

山西大学

2015 届博士学位论文

沙尘暴持续时间累积分布研究

——以黄土高原为例

作者姓名	刘国梁
指导教师	张峰 教授
学科专业	生态学
研究方向	全球变化
培养单位	黄土高原研究所
学习年限	2010 年 9 月至 2015 年 6 月

二〇一五年 六月

Thesis for Doctor's Degree, Shanxi University, 2015

**Study on Accumulative Distribution of Sand-dust Storm
Duration Times**

—— Taking the Loess Plateau of China as an Example

Student Name	Guoliang Liu
Supervisor	Professor Feng Zhang
Major	Ecology
Specialty	Global change
Department	Institute of Loess Plateau
Research Duration	2010.09-2015.6

June, 2015

目 录

中文摘要	I
Abstract	II
1 引言	1
1.1 来自中国国家气象局的沙尘暴资料	2
1.2 对数线性沙尘暴持续时间累积分布 (LASD) 研究综述	2
1.3 本文研究的内容	6
2 LASD 的原理	8
2.1 沙尘暴阈值风速概念模型	8
2.2 LASD 的模拟	10
2.3 LASD 的理论推导	11
3 资料	13
3.1 黄土高原沙尘暴资料介绍	13
3.2 沙尘暴时间记录预处理	15
4 黄土高原 LASD 分析	16
4.1 结果与分析	16
4.1.1 黄土高原整体 LASD 分析	16
4.1.2 典型气象站 LASD 分析	21
4.2 结论与讨论	25
5 用 Weibull 函数拟合沙尘暴持续时间累积分布效果分析	27
5.1 结果与分析	27
5.1.1 结果	27
5.1.2 参数比较	34
5.1.3 统计检验	36
5.2 结论与讨论	38
6 LASD 成立条件分析	43
6.1 模拟试验	43

6.2 实验结果分析.....	44
6.2.1 信号 1.....	44
6.2.2 信号 2.....	63
6.3 LASD 成立的条件	81
7 应用 LASD 分析沙漠化对沙尘暴的影响	82
7.1 对沙尘暴资料的疑虑.....	82
7.2 沙漠化对 LASD 影响的原理	86
7.3 结果与分析.....	87
7.4 结论与讨论.....	95
8 结论	97
参考文献	98
研究成果	103
致 谢	104
个人简况及联系方式.....	105
承 诺 书	106
学位论文使用授权声明.....	107

Contents

Abstract in Chinese	I
Abstract	II
1 Introduction.....	1
1.1 Sand-dust storms data from the China Meteorological Administration (CMA)	2
1.2 Overview of the research on the Log-linear Accumulative distribution of Sand-dust storm Duration times (LASD)	2
1.3 The content of the research	6
2 Mechanics of LASD	8
2.1 The conceptual model of the threshold wind speed for sand-dust storm	8
2.2 Simulation of LASD	10
2.3 Theoretical deduction of LASD	11
3 Data	13
3.1 Introduction of the sand-dust storms data of the Loess Plateau.....	13
3.2 Pretreatment of sand-dust storm time records.....	15
4 Analysis of LASD in the Loess Plateau.....	16
4.1 Results and analysis	16
4.1.1 Analysis of LASD for the Loess Plateau as a whole.....	16
4.1.2 Analysis of LASD for a typical meteorological station in the Loess Plateau	21
4.2 Conclusion and discussion.....	25
5 Analysis of the availability to fit the accumulative distribution of sand-dust storm duration times with Weibull function.....	27
5.1 Results and analysis	27
5.1.1 Results.....	27
5.1.2 Comparison of the parameters	34
5.1.3 Statistical test	36
5.2 Conclusion and discussion.....	38
6 Analysis of the conditions for LASD.....	43

6.1 Simulation test	43
6.2 Results and analysis	44
6.2.1 Singal 1	44
6.2.2 Singal 2	63
6.3 The conditions for LASD.....	81
7 Analysis of the desertification effecting on the sand-dust storms by LASD	82
7.1 The question on the sand-dust storms data	82
7.2 Principle for the effect of the desertification on LASD	86
7.3 Results and analysis	87
7.4 Conclusion and discussion.....	95
8 Conclusion	97
References	98
Research achievements	103
Acknowledgments	104
Personal profiles.....	105
Letter of commitment.....	106
Authorization statement.....	107

中文摘要

沙尘暴发生次数与持续时间满足： $\lg N = a - bt$ ， N 为持续时间大于 t 的沙尘暴次数。该现象称为“对数线性沙尘暴持续时间累积分布” (Log-linear Accumulative distribution of Sand-dust storm Duration times)，简称 LASD，在一些文章中也称为“LH 现象”。已有对 LASD 的理论认识是：LASD 可以从沙尘暴阈值风速的概念模型（即仅当风速 $V \geq$ 沙尘暴阈值风速 V_t ，沙尘暴出现）推导出，且其中 b 值随 V_t 单调递增。

本文的研究是作者对 LASD 的最新理论研究和应用探索。研究所用资料是黄土高原 56 个气象站 1958-2000 年记录的沙尘暴资料，它来自中国气象局。作者首先对黄土高原沙尘暴持续时间进行了分析，然后利用分析的结果，对 LASD 理论进行了完善，最后应用 LASD 理论探讨了沙漠化对沙尘暴的影响。

对黄土高原的分析显示：本文计算 LASD 中的 b 值的范围与以往的研究一致，计算的几个例子中最大 b 值为 0.3197 hr^{-1} （盐池夏季），最小为 0.1417 hr^{-1} （盐池春季）；由 LASD 理论，较大 b 值对应较大沙尘暴阈值 V_t ， b 值的四季差异符合这个规律，如盐池站春季为 0.1417 hr^{-1} 、夏季为 0.3197 hr^{-1} 、秋季为 0.1656 hr^{-1} 和冬季为 0.1982 hr^{-1} 。

分析还发现，统计上用 $N = N_0 \exp(-(t/C)^K)$ 拟合持续时间大于 t 的沙尘暴次数 N 与 t 的关系效果更好。通过对前述概念模型的分析，从理论上说明沙尘暴阈值风速 (V_t) 随时间变化可以导致该现象，同时也得到 LASD 成立的条件：即 V_t 随时间变化可以忽略。实践上可以用 $K \approx 1$ ，并且用 $\lg N = a - bt$ 拟合的相关指数 R^2 较大（本文取 ≥ 0.95 ）来替代该条件。研究也表明对单个气象站， b 可以用 $1/T$ 乘系数替代， T 为平均沙尘暴持续时间。

基于 LASD 理论可以推断：沙漠化可以使 LASD 中的 b 值减小。对黄土高原春季沙尘暴资料的分析结果，印证了这个推断。同时还意外发现，“沙漠化加重”和“沙尘暴减少”这两个看似有冲突的结论，可以从同样的沙尘暴资料得到。这个意外发现可以为说服对国家气象局整理沙尘暴资料尚有疑虑的人，提供参考。

关键词：沙尘暴；持续时间；LH 现象；黄土高原；沙漠化

ABSTRACT

The number of sand-dust storms (N) with the duration time greater than t , is obeyed by $\lg N = a - bt$. This phenomenon with name of the Log-linear Accumulative distribution of Sand-dust storm Duration times (LASD) was called LH phenomenon in some previous researches. LASD can be deduced in theory with the conceptual model of the threshold wind speed for sand-dust storm and the b value increases with the threshold wind speed for sand-dust storm (Vt). The conceptual model can be described as that the sand-dust storms occur only when the wind speed (V) \geq the threshold wind speed for sand-dust storm (Vt).

This paper introduces the author's new research on LASD, both in theory and in practice. The sand-dust storms data of the 56 stations in the Loess Plateau for the period of 1958 to 2000 from the China Meteorological Administration (CMA) are used in this study. The duration times of sand-dust storms are analyzed, and the theory of LASD is improved with the analyzing results. Moreover, the effect of the desertification on the sand-dust storms is analyzed by the theory of LASD.

The analysis shows that the b values agree with that of the previous researches, with maximum of 0.3197 hr^{-1} for summer in Yanchi and minimum of 0.1417 hr^{-1} for spring in Yanchi. The differences of b values of four seasons are reasonable with b values in Yanchi of 0.1417 hr^{-1} , 0.3197 hr^{-1} , 0.1656 hr^{-1} and 0.1982 hr^{-1} for spring, summer, autumn and winter, respectively. The differences agree with the result that the b value increases with Vt .

It is also found that the regression equation of N (the number of sand-dust storms with the duration time greater than t) and t is more preferred $N = N_0 \exp(-(t/C)^K)$, which can be explained by analyzing above conceptual model with Vt varying with time. As the same time the condition for LASD is obtained as that the variation of Vt with time can be ignored. A practical substitute for the condition is obtained as that $K \approx 1$ and the correlation index R^2 (with $\lg N = a - bt$ to fit N and t) is big enough (with value ≥ 0.95). While the conditions for LASD were meet, the analysis also shows that the b value for a single station can be calculated by $1/T$ times a factor, where T is the mean sand-dust storms duration time.

From the theory of LASD, it can be deduced that the b value of LASD decreases with desertification. The analysis of the spring sand-dust storms data in the Loess Plateau is a vindication to this deduction. The analysis also shows that the decreasing sand-dust storm frequencies and increasing desertification are inferred from the same sand-dust storms data, while they seem to be in conflict. This is an unexpected discovery, and it may provide a reference for convincing the people who are still suspicious of the sand-dust storms data from CMA.

Key words: Sand-dust Storm; Duration time; LH phenomenon; The Loess Plateau; Desertification

1 引言

沙尘天气分为沙尘暴、扬沙和浮尘。按照气象规范定义^[1]：沙尘暴指由于强风将地面大量沙尘吹起，使空气相当混浊，水平能见度小于 1km 的天气现象，其中能见度大于等于 0.05km 至小于 0.5km 为强沙尘暴，能见度小于 0.05km 的为特强沙尘暴；扬沙指由于大风将地面沙尘吹起，使空气相当混浊，水平能见度大于等于 1km 至小于 10km 的天气现象；浮尘指尘土、细砂均匀地浮游在空中，使水平能见度小于 10km 的天气现象。在沙尘天气概念上需要注意两点：(1)沙尘暴和扬沙伴随大风，沙尘暴和扬沙天气中的尘主要是来自本地或附近；(2)浮尘天气的水平能见度也可以小于 1km，浮尘多为远处尘沙经上层气流传播而来，或者是沙尘暴、扬沙出现后尚未下沉的细粒浮游空中而形成，浮尘天气无风或风速较小。

沙尘暴的形成有三个基本条件：一是大风；二是地面上的沙尘物质；三是不稳定的空气状态^[2]。沙尘暴,尤其是特强沙尘暴是由大、中、小各种天气尺度及其特殊地形（如地形狭管效应）和下垫面条件共同作用的产物^[3,4]，并会形成形似原子弹爆炸后的蘑菇状烟云,呈现上黄、中红、下黑三种颜色的旋转式沙尘团^[5]。沙暴天气在可见光卫星云图上呈现浅灰色^[6-9]，沙尘暴出现后空中沙尘粒子大量增多，光学厚度可以增加20多倍^[10]，TSP可以超过国家空气污染浓度规定二级标准的40倍以上^[11]。沙尘暴颗粒以地壳元素为主,颗粒的粒径主要在 $2.1\mu\text{m}$ 以上^[11]。沙尘暴特别是强沙尘暴在其过境前后,气象要素变化十分剧烈,过境前温度很高,气压很低,天气晴好,风速很小，沙尘暴一到，顿时狂风大作、沙尘飞扬,温度剧降、气压猛升^[12-15]。

沙尘暴频繁地在中国西北和内蒙的干旱地区出现^[11,16-20]。给当地人民的生产和生活造成巨大影响。发生在中国北方的一些较强沙尘暴会把大量沙尘卷入高空，通过高空气流输送到韩国和日本，甚至到达美国^[21-26]。沙尘暴也是土地荒漠化发展到一定程度的体现，对荒漠化具有一定的指示意义。沙尘暴天气的时空变化对气候变化也有指示意义^[17,27-31]，因此对沙尘暴进行全面、系统、深入的研究，不仅有助于预报和防治沙尘暴，搞清荒漠化过程中的某些动力学机制，也助于深入认识环境问题和全球气候变化问题。

1.1 来自中国国家气象局的沙尘暴资料

中国国家气象局整理了全国 681 个气象站建站以来的沙尘天气（即沙尘暴、扬沙、和浮尘）记录资料（可以从国家气象局资料室获得该资料），周自江等^[16]首次启用了该资料。其中沙尘暴资料包含气象站的位置、每次沙尘暴的开始时间和结束时间、能见度、气压、气温、湿度、风速风向和最大风速风向。最早出现的该沙尘天气资料是从建站到 1998 年，随后逐渐补充新资料。

分析国家气象局整理的全国建站以来记录的沙尘暴资料，也是深入研究认识沙尘暴的一个重要环节。

1.2 对数线性沙尘暴持续时间累积分布(LASD)研究综述

20 世纪 80 年代以来的分形理论^[32-35] 比较时髦。分形 (Fractal) 是 Mandelbrot 首先提出来的，它用来描述自然界中传统欧几里德几何学所不能描述的一大类复杂无规的几何对象。例如，海岸线、山脉、粗糙的断面，云、河流、血管等。它们的特点都是，极不规则或极不光滑。分维 D_0 （也称分形维或分数维）是分形的定量表征和基本参数。

$$D_0 = \lim_{r \rightarrow 0} \left(\frac{\ln N(r)}{\ln(1/r)} \right) \quad (1.1)$$

其中 r 为尺子的大小，用大小为 r 的尺子覆盖几何体，需要尺子的个数为 $N(r)$ 。

受分形理论的影响，刘国梁和郝丽珍（2005）^[36] 尝试以沙尘暴持续时间（沙尘暴开始时间与结束时间的时间差）为长度尺度计算分维。图 1.1 为全国 355 个气象站持续时间大于 t 的沙尘暴次数 N 与 t 的关系。图 1.1 的 A 图为计算分维时绘制的图，在双对数坐标下绘制，如果满足分形应存在： $N=A \cdot t^D$ ， A 为拟合参数， D 为分维。A 图与 B 图相比，所用资料相同，唯一差异是横坐标没有取对数坐标。

从图 1.1 发现持续时间大于 t 的沙尘暴发生次数 N 满足：

$$\lg N = a - bt \quad (1.2)$$

其中 a 和 b 是拟合常数。进一步分析显示，公式 (1.2) 对沙尘暴具有普适性，其中图 1.2 是“皮山”等 5 个站 1961-2000 年的分析结果；图 1.3 是民勤 1968 年和 1978 年的分析结果。本文称该现象为“对数线性沙尘暴持续时间累积分布” (the Log-linear Accumulative distribution of Sand-dust storm Duration times)，简称“LASD”（在一些文章中也称为“LH 现象”）。

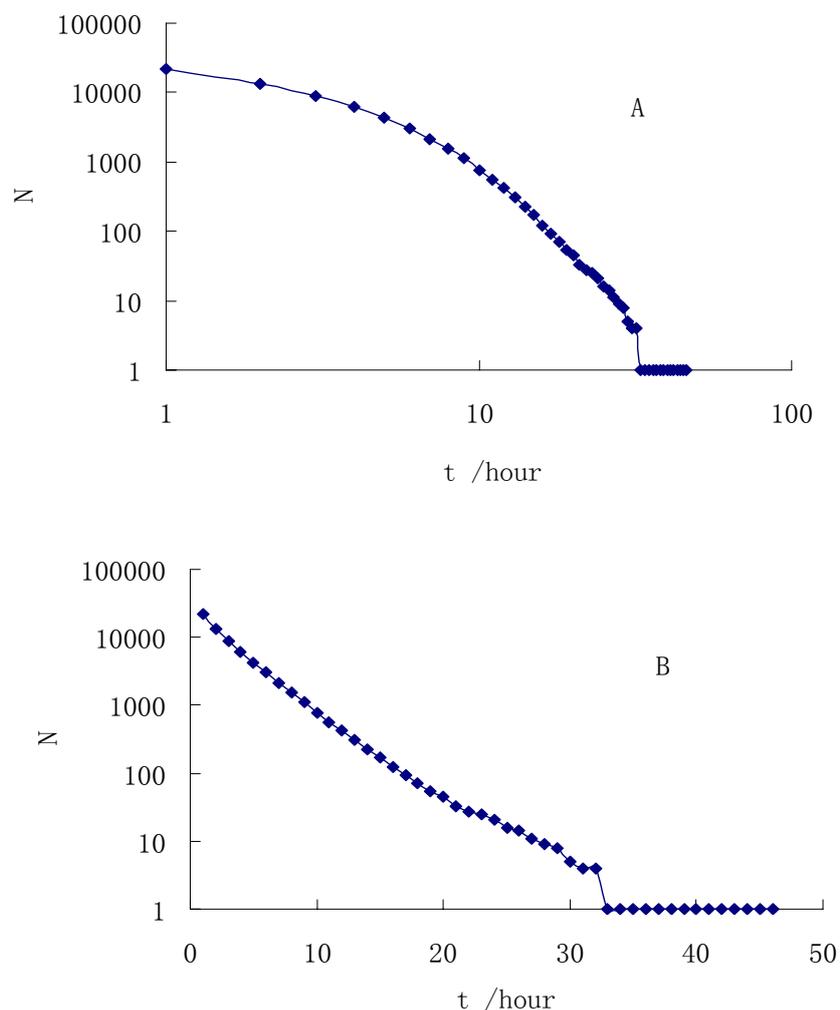


图 1.1 全国 355 个气象站持续时间大于 t 的沙尘暴次数 N 与 t 的关系(上下两图用同样的资料绘制)

Fig. 1.1 The cumulative distribution of the Sand-dust storm occurrence frequency against the duration time for 355 stations in China (The figures are drawn with same data.)

LASD 中的 b 值随气象站变化。刘国梁和郝丽珍 (2005) ^[36] 利用 1961-2000 年的资料, 计算了沙尘暴总发生频次大于 60 次的 126 个站的 b 值, 结果如图 1.4 所示。在 126 个站中, 有 50 个站 $b \leq 0.2$ 。这 50 个站 90% 以上出现在沙漠、沙地或其附近, 如塔克拉玛干沙漠、巴丹吉林沙漠、浑善达克沙地、毛乌素沙地和科尔沁沙地等。 b 值较小的站主要出现在沙漠、沙地或其附近, 说明 b 值与影响出现沙尘暴的地面条件有关。

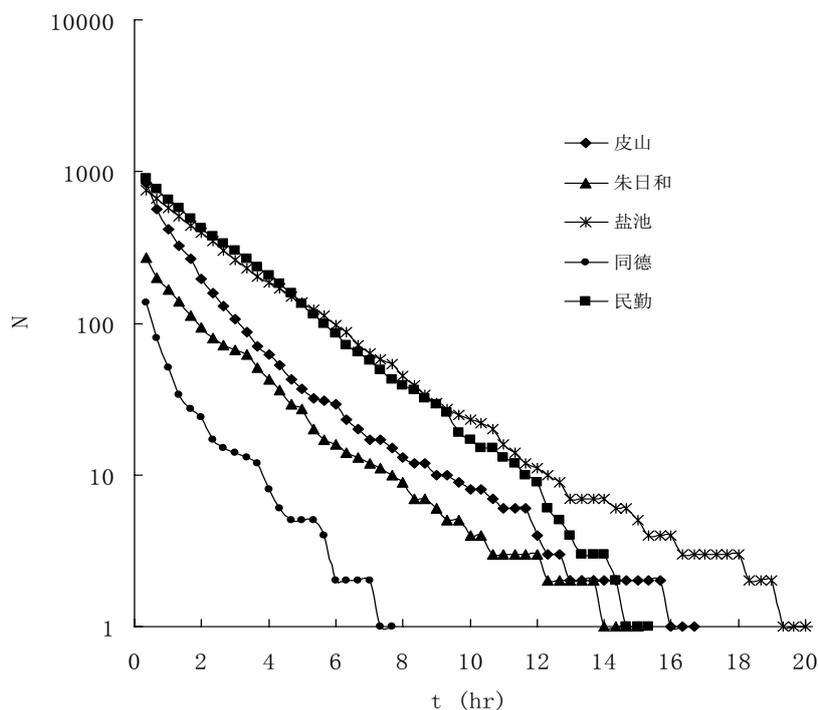


图 1.2 对 5 个气象站，持续时间大于 t 的沙尘暴次数 N 与 t 的关系^[36]

Fig. 1.2 The cumulative distribution of the Sand-dust storm occurrence frequency against the duration time for 5 stations

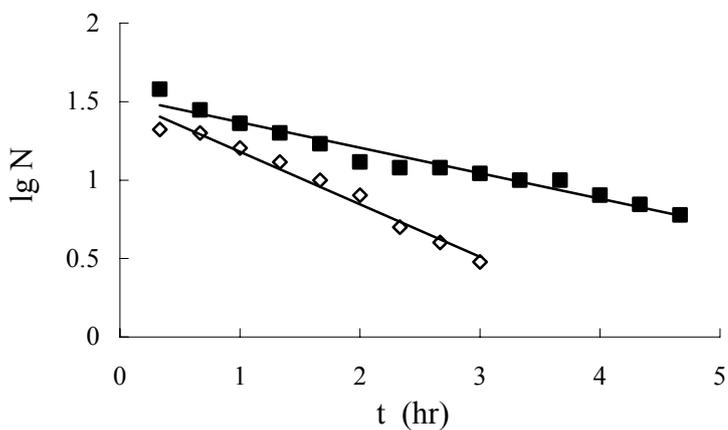
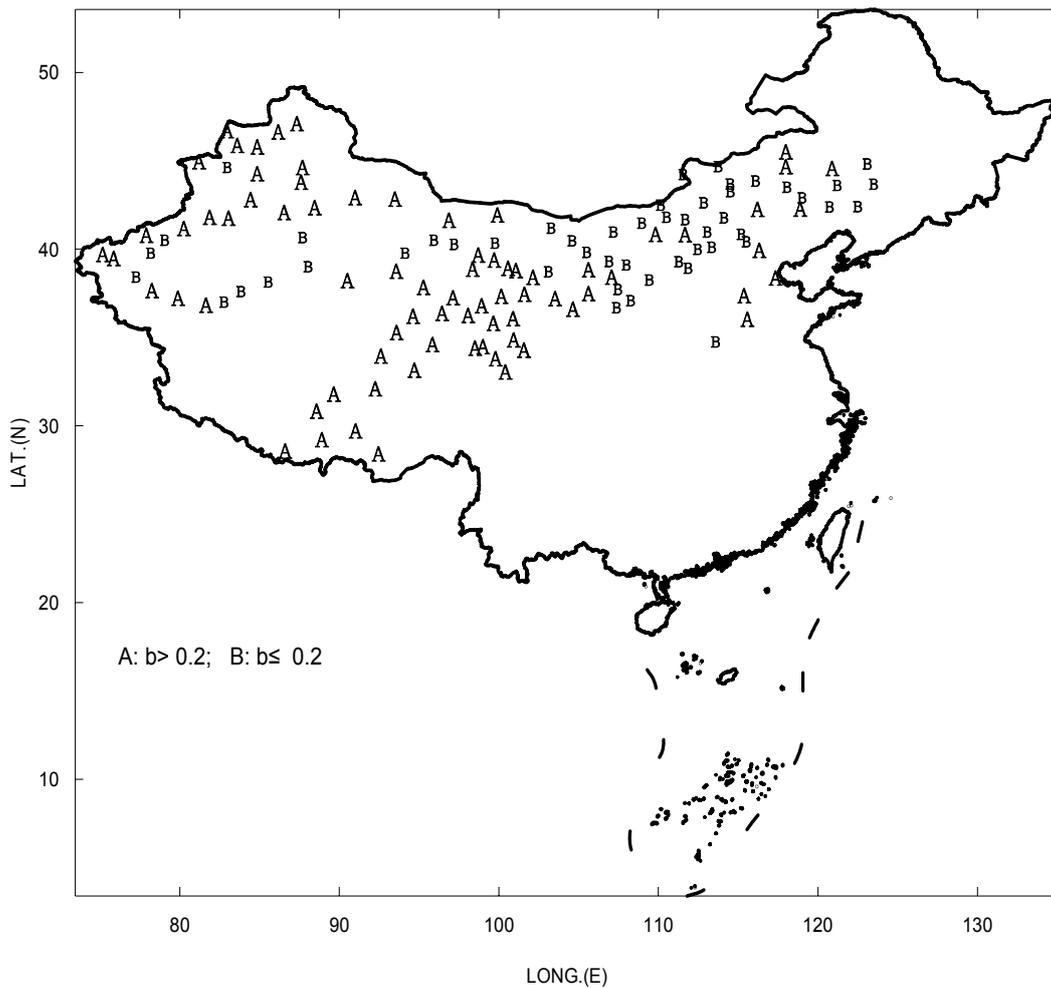


图 1.3 1968 年 (\diamond) 和 1978 年 (\blacksquare) 民勤站，持续时间大于 t 的沙尘暴次数 N 与 t 的关系^[36]

Fig. 1.3 The cumulative distribution of the sand-dust storm occurrence frequency against the duration time at Minqin in 1968 (\diamond) and 1978 (\blacksquare)

图 1.4 126 个站 b 值的空间分布^[36]Fig. 1.4 The spatial distribution of the value b at 126 stations

A 表示 $b > 0.2/\text{hr}$, B 表示 $b \leq 0.2/\text{hr}$

从沙尘暴的概念看（见本文第一页的第一段），沙尘暴伴随大风，存在阈值风速。可以构建沙尘暴阈值风速的概念模型，模型假设：当且仅当风速 $V \geq$ 沙尘暴阈值风速 V_t ，沙尘暴出现。刘国梁和郝丽珍（2006）^[37]使用连续风速信号，采取数值方法模拟该概念模型，证实了沙尘暴阈值风速可以造成 LASD。具体方法为：首先对连续的风速信号，数出所有两端的两个值小于或等于 V_t ，中间的值都大于 V_t 的小时间序列（ V_t 为阈值风速）；然后在这些小时间序列中，设长度大于 t 的个数为 N ，在不同的 V_t 下可以验证 N 和 t 的关系满足公式（1.2）。

数值模拟也发现 b 随 V_t 增大而增大，这可以解释“ b 值较小的站主要出现在沙漠、沙地或其附近”这个现象（因为沙漠、沙地或其附近沙尘暴阈值风速也较小， V_t 较

小对应 b 值也较小)。Liu and Park (2007)^[38]分季节对 LASD 的细节有进一步的分析,发现不同季节 b 值有差异。Liu and Park (2007)^[38]对该沙尘暴阈值风速的概念模型还进行过理论分析研究,把风速信号换为满足标准正态分布的随机信号,从理论上证明 LASD 成立。

Liu et al (2012)^[39]从理论和实践上说明上述沙尘暴阈值风速概念模型也可以用来研究沙尘暴时间间隔分布。并得到同一站沙尘暴时间间隔分布也满足:

$$N = A \exp(-b_1 t) \quad (1.3)$$

其中 N 为同一站沙尘暴时间间隔大于 t 的个数。 A 和 b_1 是拟合参数。并发现当沙尘暴阈值风速随时间变化,沙尘暴时间间隔分布更倾向于 Weibull 分布。刘国梁(2014)^[40]借鉴该模型还建立了一个地震时间间隔分布的理论模型,该理论模型也得到实际资料的验证。该模型获得的地震时间间隔分布函数与以往的地震时间间隔的分布函数^[41-45]相比,拟合效果差距不大,只是它给地震时间间隔分布统计量赋予了地壳结构的物理意义。

上述对沙尘暴时间记录的研究是独特的,没有类似研究。国内外研究沙尘暴的文献中涉及沙尘暴持续时间的研究很少。王式功(2000)^[11]综述 2000 年前国内外对沙尘暴的研究,其中对沙尘暴时间记录资料的研究仅有统计分析沙尘暴开始时间的分布。2000 年以后,也有一些工作^[17, 46]利用沙尘暴持续时间表征沙尘暴强度,其用法只是用沙尘暴持续时间替代了常用的沙尘暴日数或沙尘暴次数,上述工作对沙尘暴时间记录资料利用很有限。唯一例外的是,冯鑫媛等(2010)^[47]意识到沙尘暴持续时间在不同区域有差别,并根据持续时间,把沙尘暴发生区域划分为:短时型、中间型和持续型。

1.3 本文研究的内容

上述对沙尘暴发生频次与持续时间的关系的研究,可以认为是在“分形”理论的指导下分析沙尘暴持续时间,通过分析而发现 LASD,然后利用沙尘暴阈值风速概念模型解释 LASD 的成因,建立了对 LASD 的理论认识。

通过对沙尘暴时间间隔分布的研究和分季节对 LASD 的分析,我们也意识到沙尘暴阈值风速随时间变化,而且它也有影响。本文研究内容就是以黄土高原为研究范围,首先细致地分季节对黄土高原 LASD 进行分析,分析沙尘暴阈值风速随时间变化对 LASD 的影响。并利用分析结果完善 LASD 的理论。

对一个区域，沙尘暴阈值风速是该区域出现沙尘暴需要的最小风速，它本质上是反应该区域的沙漠化程度。也就是沙漠化会影响沙尘暴阈值风速，进而会影响 b 值。本文最后还尝试应用对 LASD 的理论认识，进行新的实践，探讨沙漠化对沙尘暴的影响。

上述对 LASD 研究的进展和本文研究内容如图 1.5 所示。研究进展和研究内容也反应了认识论上的：理论指导下进行实践，利用实践完善理论，然后在完善后的理论指导下进行新的实践，循环往复以致无穷，在这过程中对理论的认识是在螺旋地上升。

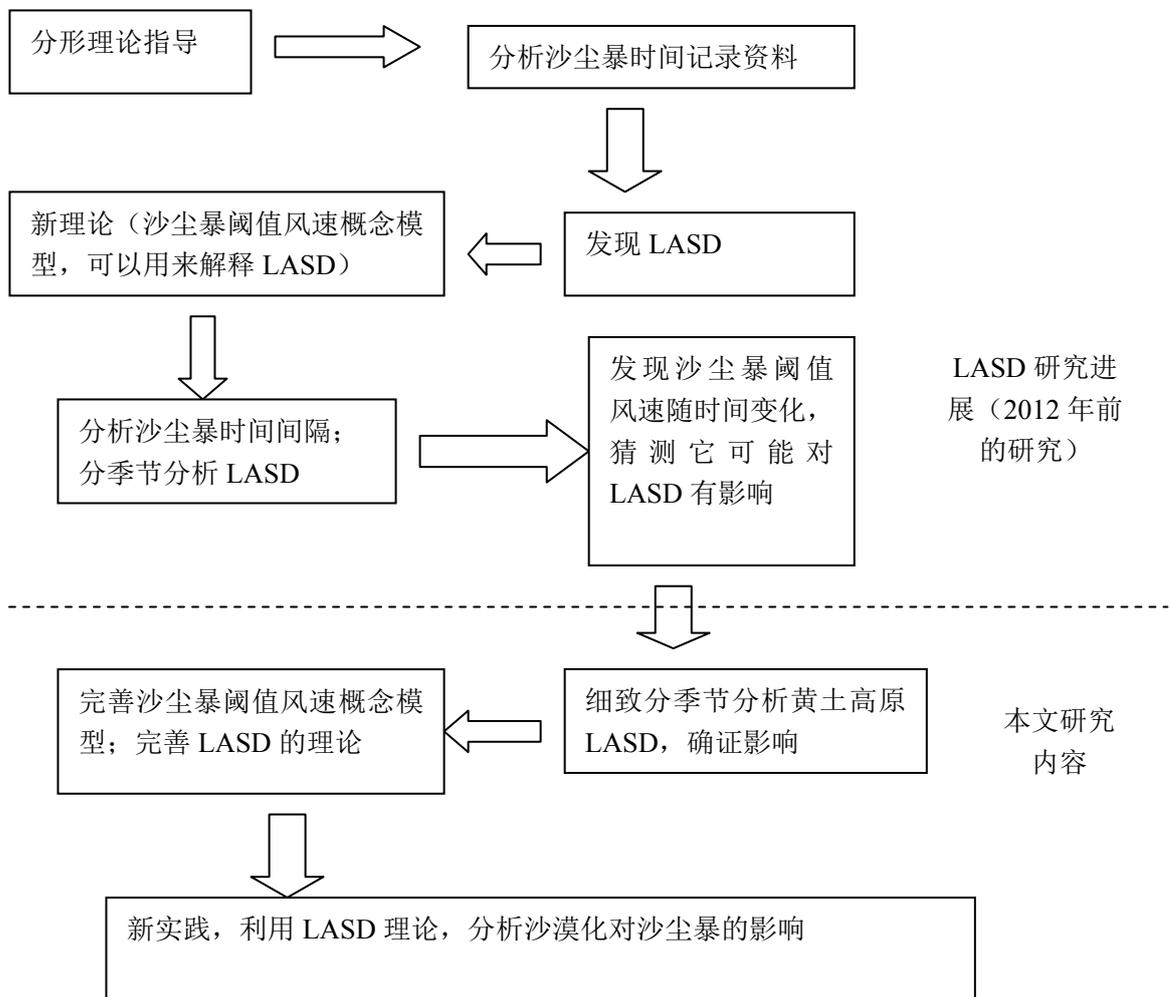


图 1.5 LASD 的研究进展和本文研究内容(虚线以下) 示意图

Fig. 1.5 Sketch map for the research progress on LASD and the contents (which are shown below the dotted line.)

2 LASD 的原理

目前对 LASD (即持续时间大于 t 的沙尘暴次数 N 满足 $lgN=a-bt$; 也称为 LH 现象) 的认识是: (1) 沙尘暴存在阈值风速 (V_t) 的假设 (即仅当风速 $V \geq$ 沙尘暴阈值风速 V_t , 沙尘暴出现), 可以推导出 LASD; (2) LASD 中的 b 值与沙尘暴阈值风速 (V_t) 单调递增; (3) 对实际沙尘暴资料的统计分析, 支持上述两点。本章详细介绍上述 (1) 和 (2) 的理论推导过程。

2.1 沙尘暴阈值风速概念模型

图 2.1 为沙尘暴时间记录力学模型示意图, 它也是沙尘暴阈值风速概念模型, 它可以用来解释沙尘暴 LASD [37-39], 模型中 V 为风速, V_t 为沙尘暴阈值风速, 风速(V)超过阈值风速(V_t)沙尘暴才出现 (即仅当 $V \geq V_t$ 沙尘暴出现), 图中 Δt_2 为沙尘暴的持续时间, Δt_1 为沙尘暴的时间间隔。

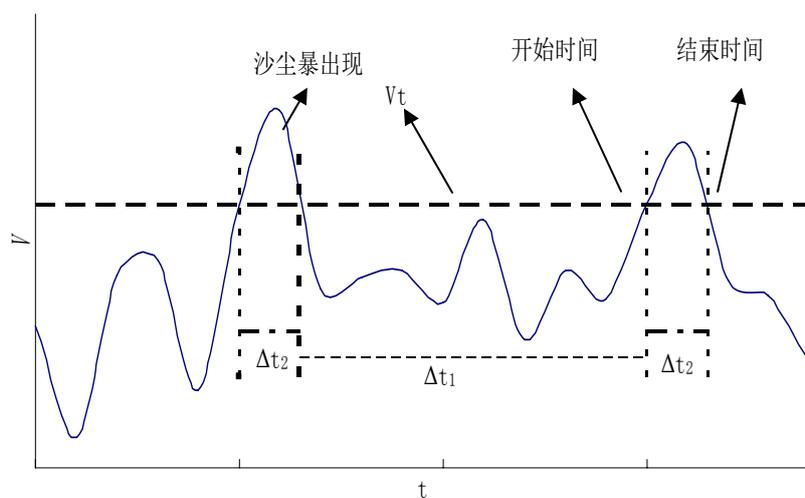


图 2.1 沙尘暴时间记录力学模型示意图

Fig. 2.1 Sketch map for mechanic model of Sand-dust storm time records

沙尘暴阈值风速的概念可以从沙尘暴的概念推断出。沙尘暴是地面起尘, 然后扩散, 而使空气中尘 (悬浮颗粒) 的浓度超过临界值 (即水平能见度小于 1km, 水平能见度与颗粒物浓度成反比) 的一种状态。地面起尘过程, 是在一定风速下, 较大粒子的蠕动和跃动, 在地面溅起一个悬浮粒子层 (其它机械运动或瞬间强气流也可以产生悬浮粒子层), 悬浮粒子层可以认为是重气体层 (密度比空气大的

气体), 起尘是该重气层的向上扩散, 重气垂直通量正比于平均风速的三次方^[48]。起尘量与风速 V (或用摩擦速度 u_*) 的三次方成正比在很多研究中也应用^[49-54]。公式 (2.1) 可以作为悬浮粒子点源扩散公式 (假设是地面源的高斯扩散^[55]),

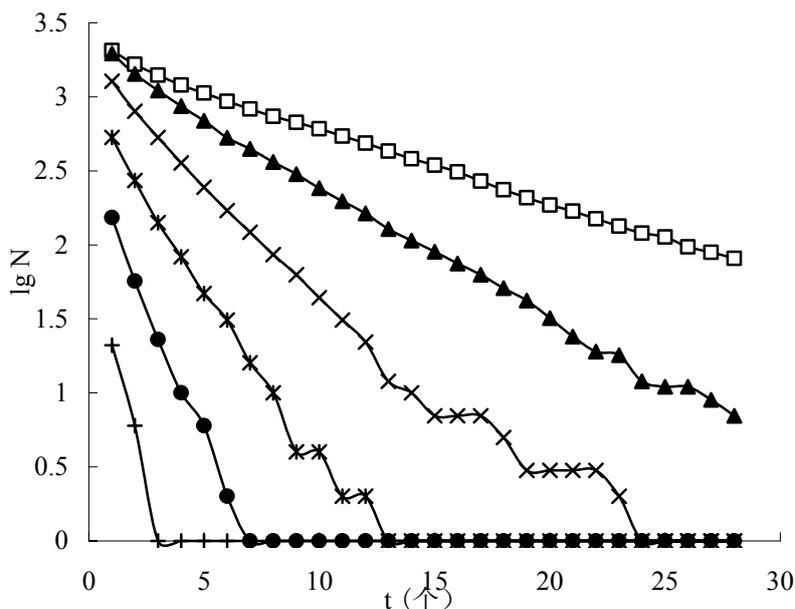
$$q(x, y, z, 0) = \frac{Q}{\pi u \sigma_x \sigma_y} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (2.1)$$

其中 q 为颗粒物 (尘) 浓度, u 为平均风速, σ_y 为横向扩散参数, σ_z 为垂直扩散参数, Q 为源强。如果源强不变, 不考虑风速对扩散参数的影响, 颗粒物浓度与风速成反比。地面起尘 (即颗粒物源强) Q 正比于风速 u 的三次方, 因此由公式 (2.1) 可以近似认为, 颗粒物浓度 q 正比于风速的平方。可见由地面起尘所致, 空气中颗粒物浓度随风速的增大而增大, 因此存在风速 V_t , 在该风速下空气中颗粒物浓度达到临界值 (水平能见度等于 1km), 当风速 $V \geq V_t$ 时沙尘暴出现, V_t 即为沙尘暴阈值风速。

2.2 LASD 的模拟

图 2.2 为图 2.1 中的 V 取风洞风速信号, 在不同 V_t 下, 持续时间 (如图中的 Δt_2) 大于 t 的个数 N 与 t 的关系^[37]。它是用数值方法再现了图 2.1 所描述的沙尘暴阈值风速概念。具体方法为: 首先对连续的风速信号, 数出所有两端的两个值小于或等于 V_t , 中间的值都大于 V_t 的小时间序列; 然后在这些小时间序列中, 统计长度大于 t 的个数 N , 在不同的 V_t 下绘制 $\lg N$ 随 t 的变化。

图 2.2 中的 N 与 t 满足 $\lg N = a - bt$, 图中形成直线点的斜率的绝对值即 b 值。表明图 2.1 所示力学模型, 可以用来解释 LASD。从图 2.2 也可以看出 b 值随沙尘暴阈值风速 V_t 增大。



□: $Vt=1.4$; ▲: $Vt=1.6$; ×: $Vt=1.8$; *: $Vt=2.0$; ●: $Vt=2.2$; +: $Vt=2.4$

图 2.2 不同参考值 Vt 下 N 和 t 的关系^[37]

Fig. 2.2 N versus t for the different reference values of Vt

2.3 LASD 的理论推导

对图 2.1 所示力学模型，如果 V 取满足标准正态分布的独立随机连续信号，数学上也可以证明存在公式 (1.2)。

设信号大于 Vt 的概率为 p ，利用 Vt 把原始信号转换为 0 和 1 的数字信号，即令原始信号中大于 Vt 的为 1，小于 Vt 的为 0。设整个数字信号 V 的长度为 N_0 ，其中 M_0 个 0， M_1 个 1。 M_{0k} 表示信号片段“011...1”的个数，它有 k 个 1； M_{0k0} 表示信号片段“011...10”的个数，它有 k 个 1； P_{0k} 表示信号“011...1”（含 $k-1$ 个 1）后面出现 1 的概率； P_{0k0} 表示信号“011...1”（含 k 个 1）后面出现 0 的概率。则有：

$$P_{01}=M_{01}/M_0 \tag{2.2}$$

$$P_{0k0}=M_{0k0}/M_{0k} \tag{2.3}$$

$$P_{0k}=M_{0k}/M_{0(k-1)} \tag{2.4}$$

因此有：

$$\begin{aligned} M_{0k0} &= P_{0k0} \times M_{0k} = P_{0k0} \times P_{0k} \times M_{0(k-1)} = \dots = P_{0k0} \times P_{0k} \times \dots \times P_{02} \times M_{01} \\ &= P_{0k0} \times P_{0k} \times \dots \times P_{02} \times P_{01} \times M_0 \end{aligned} \quad (2.5)$$

因为信号独立，因此：

$$P_{0k} = M_1 / N_0 = p \quad (2.6)$$

$$P_{0k0} = (1-p) \quad (2.7)$$

$$M_{0k0} = (1-p) \times p^k \times (1-p) \times N_0 \quad (2.8)$$

对公式 (2.8) 取两边对数，则有：

$$\lg(M_{0k0}) = k \times \lg(p) + \lg(N_0 \times (1-p)^2) \quad (2.9)$$

t 对应 k ， M_{0k0} 对应长度为 t 的小时间序列个数 n 。因为公式 (1.2) 中 N 对 t 求导，可得长度为 t 的小时间序列个数 n 满足：

$$\lg(n) = c - bt \quad (2.10)$$

公式 (2.10) 中的 b 等于公式 (1.1) 的 b ，公式 (2.9) 与公式 (2.10) 等价。所以即证对彼此独立的随机信号，数出两端的两个值小于或等于 Vt ，中间的值都大于 Vt 的小时间序列，在这些小时间序列中，长度大于 t 的个数 N 满足公式 (1.2) (即 $\lg N = a - bt$)，且有：

$$b = -\lg(p) \quad (2.11)$$

对满足标准正态分布的独立信号，信号是大于 Vt 的概率 p 满足：

$$p = \int_{Vt}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Vt}{\sqrt{2}}\right) \quad (2.12)$$

其中 erfc 为余误差函数。可以得到：

$$b = -\lg\left(0.5 \times \operatorname{erfc}\left(\frac{Vt}{\sqrt{2}}\right)\right) \quad (2.13)$$

图 2.3 是对满足标准正态分布的独立随机信号，由公式 (2.13) 计算的不同 Vt 下的 b 和由数值方法（即绘制图 2.2 所用数值方法）直接计算的不同 Vt 下的 b 的比较，可以看出数值试验结果和理论结果基本吻合。图 2.3 也显示，信号长度为 500,000 比信号长度为 50,000 的数值试验结果有所改善。

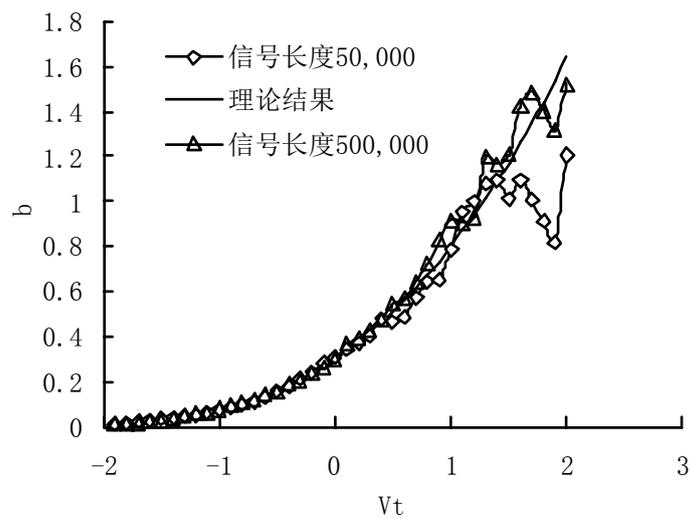


图 2.3 对满足高斯分布的时间序列信号, Vt 和 b 的关系

Fig. 2.3 Relationship between the Vt and b for the normal Gaussian distribution function signal

3 资料

本章介绍使用的沙尘暴资料。本文使用沙尘暴资料是早期直接来自国家气象局资料室，该资料目前也可以通过气象数据共享服务网获得。

3.1 黄土高原沙尘暴资料介绍

本文研究所使用的沙尘暴资料为国家气象局整理沙尘暴资料中的黄土高原的 56 个气象监测站（图 3.1）1958 年 1 月至 2000 年 12 月记录的沙尘暴资料（共 43 a 的资料），共 11433 条记录，10618 次沙尘暴，9016 d 沙尘暴天气。10618 次沙尘暴中有 363 次缺持续时间记录，这 363 次沙尘暴其中有 359 次缺开始时间记录。

56 个站中青海省有 4 个站、甘肃有 12 个站、内蒙古有 6 个站，宁夏有 8 个站、山西有 15 个站、陕西有 9 个站、河南有 2 个站。56 个站的编号（图 3.1 所示编号）、站号、经纬度、名称、以及所在省见表 3.1。

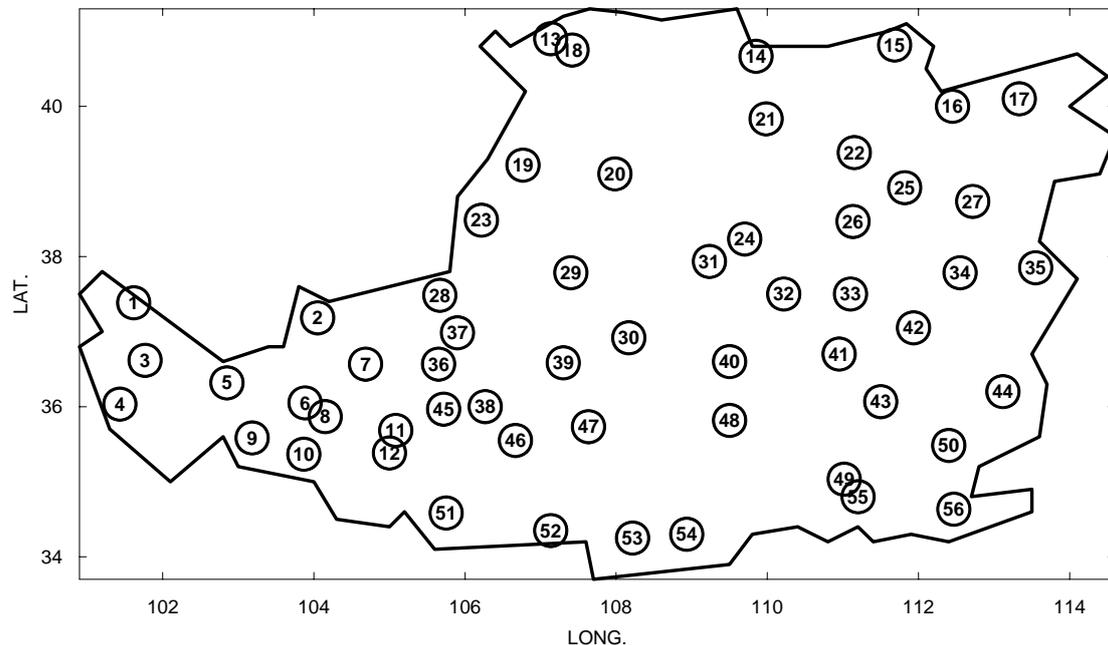


图 3.1 黄土高原56个气象站位置

Fig. 3.1 Locations of 56 stations in the Loess Plateau that are used in this study

表 3.1 56 个站的详细信息

Table 3.1 Detail information of the 56 stations

编号	站号	纬度	经度	站名	所在省	编号	站号	纬度	经度	站名	所在省
1	52765	37.38	101.62	门源	青海	29	53723	37.78	107.40	盐池	宁夏
2	52797	37.18	104.05	景泰	甘肃	30	53738	36.92	108.17	吴旗	陕西
3	52866	36.62	101.77	西宁	青海	31	53740	37.93	109.23	横山	陕西
4	52868	36.03	101.43	贵德	青海	32	53754	37.50	110.22	绥德	陕西
5	52876	36.32	102.85	民和	青海	33	53764	37.50	111.10	忻州	山西
6	52889	36.05	103.88	兰州	甘肃	34	53772	37.78	112.55	太原	山西
7	52895	36.57	104.68	靖远	甘肃	35	53782	37.85	113.55	阳泉	山西
8	52983	35.87	104.15	榆中	甘肃	36	53806	36.57	105.65	海源	宁夏
9	52984	35.58	103.18	临夏	甘肃	37	53810	36.98	105.90	同心	宁夏
10	52986	35.37	103.87	临洮	甘肃	38	53817	36.00	106.27	固原	宁夏
11	52993	35.68	105.08	会宁	甘肃	39	53821	36.58	107.30	环县	甘肃
12	52996	35.38	105.00	华家岭	甘肃	40	53845	36.60	109.50	延安	陕西
13	53420	40.90	107.13	杭锦后旗	内蒙	41	53853	36.70	110.95	隰县	山西
14	53446	40.67	109.85	包头	内蒙	42	53863	37.05	111.93	介休	山西
15	53463	40.82	111.68	呼和浩特	内蒙	43	53868	36.07	111.50	临汾	山西
16	53478	40.00	112.45	右玉	山西	44	53882	36.20	113.12	长治	山西
17	53487	40.10	113.33	大同	山西	45	53903	35.97	105.72	西吉	宁夏
18	53513	40.75	107.42	临河	内蒙	46	53915	35.55	106.67	平凉	甘肃
19	53519	39.22	106.77	惠农	宁夏	47	53923	35.73	107.63	西峰镇	甘肃
20	53529	39.10	107.98	鄂托克旗	内蒙	48	53942	35.82	109.50	洛川	陕西
21	53543	39.83	109.98	东胜	内蒙	49	53959	35.03	111.02	运城	山西
22	53564	39.38	111.15	河曲	山西	50	53975	35.48	112.40	阳城	山西
23	53614	38.48	106.22	银川	宁夏	51	57006	34.58	105.75	天水	甘肃
24	53646	38.23	109.70	榆林	陕西	52	57016	34.35	107.13	宝鸡	陕西
25	53663	38.92	111.82	五寨	山西	53	57034	34.25	108.22	武功	陕西
26	53664	38.47	111.13	兴县	山西	54	57036	34.30	108.93	西安	陕西
27	53673	38.73	112.72	原平	山西	55	57051	34.80	111.20	三门峡	河南
28	53705	37.48	105.67	中宁	宁夏	56	57073	34.63	112.47	洛阳	河南

3.2 沙尘暴时间记录预处理

计算沙尘暴持续时间，要注意跨 20:00 或 19:00（1960 年以前部分站点以前一天 19 时为分界点）的沙尘暴时间记录（因为气象观测以前一天 20 时为一天的开始）。表 3.2 是盐池站 ②⑨ 1965 年的相邻两条沙尘暴时间记录，分别是：（1）1965 年 12 月 22 日 19:38 分开始到 20:00 结束；（2）1965 年 12 月 23 日 20:00 分开始到 23:10 结束。这两条记录是一次沙尘暴的信息，对应沙尘暴为 1965 年 12 月 22 日 19:38 开始，23:10 结束，沙尘暴持续时间应为 3 小时 32 分。在计算沙尘暴持续时间时，逐项查找并处理了类似原始资料。

表 3.2 沙尘暴时间记录实例（记录于盐池站 ②⑨）

Table 3.2 Example of the sand-dust storm time records (Yanchi ②⑨)

年	月	日	开始时间	结束时间
1965	12	22	19: 38	20: 00
1965	12	23	20: 00	23: 10

4 黄土高原 LASD 分析

本章介绍对黄土高原56站整体和其中的典型站盐池站1958年1月-2000年12月的沙尘暴，分全年、春季、夏季、秋季和冬季，分析其LASD的特征。分析方法是，首先利用原始资料计算出每次沙尘暴的持续时间；然后给定不同 t 值，数出持续时间大于 t 的沙尘暴次数 N ， t 的间隔设定为1/3 hour (20 min)；最后用公式(1.2)(即 $\lg N=a-bt$)拟合 t 与 N 的关系，绘图显示。

4.1 结果与分析

4.1.1 黄土高原整体 LASD 分析

表 4.1 为黄土高原沙尘暴四季沙尘暴次数以及持续时间特征统计。黄土高原 56 个站 1958 - 2000 年共 10618 次沙尘暴记录，其中 363 次无法计算持续时间，约占 3.4%，10255 (=10618-363) 次沙尘暴的平均持续时间为：113.7 min；春季共 6701 次沙尘暴记录，其中 228 次无法计算持续时间，约占 3.4%，6473 (=6701-228) 次沙尘暴的平均持续时间为：126.5 min；夏季共 1243 次沙尘暴记录，其中 36 次无法计算持续时间，约占 2.9%，1207 (=1243-36) 次沙尘暴的平均持续时间为：51.9 min；秋季共 498 次沙尘暴记录，其中 22 次无法计算持续时间，约占 4.4%。476 (=498-22) 次沙尘暴的平均持续时间为：95.9 min；冬季共 2176 次沙尘暴记录，其中 77 次无法计算持续时间，约占 3.5%，2099 (=2176-77) 次沙尘暴的平均持续时间为：113.6 min。

表 4.2 为四季持续时间最长的沙尘暴的原始时间记录。春季持续时间最长的一次沙尘暴是 1979 年 4 月 11 日在临河(18)记录到得一次沙尘暴，沙尘暴是 4 月 11 日上午 11:09 开始，沙尘暴一直持续到 4 月 12 日上午 10:05，共计持续 22 hr 56 min (1376 min)；夏季持续时间最长的一次沙尘暴为全年持续时间最长的一次沙尘暴，是 1961 年 6 月 2 日在榆中(8)记录到的一次沙尘暴，沙尘暴是 6 月 2 日早上 6:30 开始，持续到 6 月 3 日 14:30，共计 32 hr (1920 min)；秋季持续时间最长的一次沙尘暴是 1965 年 11 月 28 日在宁夏的中宁(28)记录到得一次沙尘暴，沙尘暴是 11 月 28 日下午 13:35 开始，沙尘暴一直持续到 11 月 29 日凌晨 00:20，共计持续了 10 hr 45 min (645 min)；冬季持续时间最长的一次沙尘暴是 1987 年 12 月 31 日在宁夏的盐池(29)记录到得一次沙尘暴，沙尘暴是 12 月 31 日早上 00:00 开始，沙尘暴一直持续到晚上 19:02，共计持续了 19 hr 2 min (1142 min)。

表 4.1 黄土高原沙尘暴持续时间统计

Table 4.1 Summary for the sand-dust storms duration times in the Loess Plateau

	全年	春季	夏季	秋季	冬季
沙尘暴总次数	10618	6701	1243	498	2176
残缺数	363	228	36	22	77
残缺率	3.4%	3.4%	2.9%	4.4%	3.5%
有效数	10255	6473	1207	476	2099
最长持续时间 (min)	1920	1376	1920	645	1142
最长持续时间对应 气象站	榆中 (8)	临河 (18)	榆中 (8)	中宁 (28)	盐池 (29)
平均持续时间 (min)	113.7	126.5	51.9	95.9	113.6

表 4.2 黄土高原四季持续时间最长沙尘暴的原始时间记录

Table 4.2 Original time records of sand-dust storms with the maximum duration time in the Loess Plateau

	站号	年	月	日	开始时间	结束时间
春季 临河 (18)	53513	1979	4	11	11:09	20:00
		1979	4	12	20:00	10:05
夏季 榆中 (8)	52983	1961	6	2	06:30	20:00
		1961	6	3	20:00	14:30
秋季 中宁 (28)	53705	1965	11	28	13:35	20:00
		1965	11	29	20:00	00:20
冬季 盐池 (29)	53723	1987	12	31	00:00	19:02

注：上述春季、夏季、秋季均存在夸 20:00 问题，记录为同一次沙尘暴的在两天的记录。

图 4.1 - 4.5 分别为全年、春季、夏季、秋季和冬季黄土高原持续时间大于 t 的沙尘暴次数 N 与 t 的关系。图中 t 的单位为：hr，纵坐标为 $\lg(N)$ 。只对 $N/N_0 \geq 0.1\%$ 的数据进行拟合， N_0 为对应时期沙尘暴总次数。图中也显示了 N 与 t 的拟

合相关指数^[56] R_{LH}^2 ,

$$R_{LH}^2 = 1 - SS_{\text{剩余}} / S_{NN} \quad (4.1)$$

其中 $SS_{\text{剩余}}$ 是剩余平方和:

$$SS_{\text{剩余}} = \sum_{i=1}^n (N_i - N')^2 \quad (4.2)$$

S_{NN} 是总校正平方和:

$$S_{NN} = \sum_{i=1}^n (N_i - N^{\wedge})^2 \quad (4.3)$$

N_i 是持续时间大于 t_i 的沙尘暴次数; N' 为用公式 (1.2) 计算的 t_i 时 N 的值, N^{\wedge} 为 N_i 的均值。

对全年沙尘暴持续时间累积分布 (图 4.1), 持续时间大于 20 min 的有 7473 次, 约占总沙尘暴次数 (10618) 的 70.4%; 持续时间大于 1 小时的有 4981 次, 约占 46.9%; 持续时间大于 2 hr 的有 3159 次, 约占 29.8%; 持续时间大于 5 hr 的有 1035 次, 约占 9.7%。 N 与 t 用公式 (1.2) 拟合, 拟合相关指数 R_{LH}^2 为 0.9892, 其中的 b 值为 0.1662 hr^{-1} 。

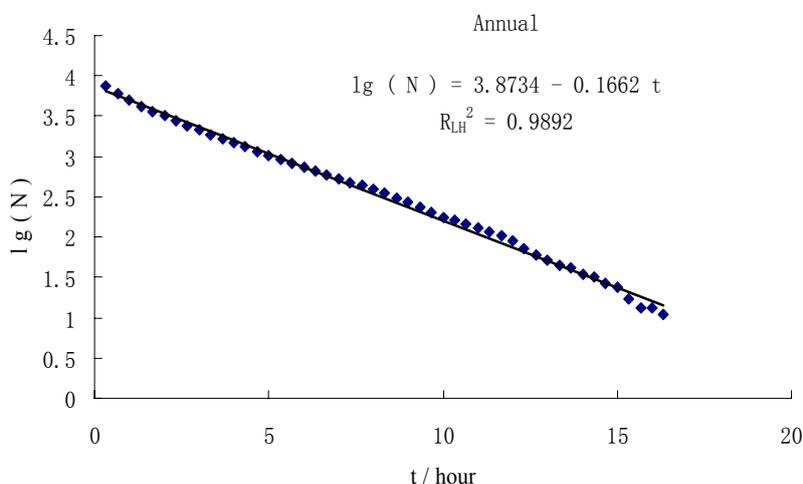


图4.1 黄土高原沙尘暴持续时间累积分布 (全年)

Fig. 4.1 Duration times distribution of the sand-dust storms in the Loess Plateau (Annual)

对春季沙尘暴持续时间的分布 (图 4.2), 持续时间大于 20 min 的有 4887 次, 约占春季沙尘暴总次数 (6701) 的 72.9%; 持续时间大于 1 hr 的有 3384 次, 约占 50.5%; 持续时间大于 2 hr 的有 2218 次, 约占 33.1%; 持续时间大于 5 hr 的

有 781 次, 约占 11.7%。 N 与 t 用公式 (1.2) 拟合, 拟合相关指数 R_{LH}^2 为 0.9878, b 值为 0.1635 hr^{-1} 。

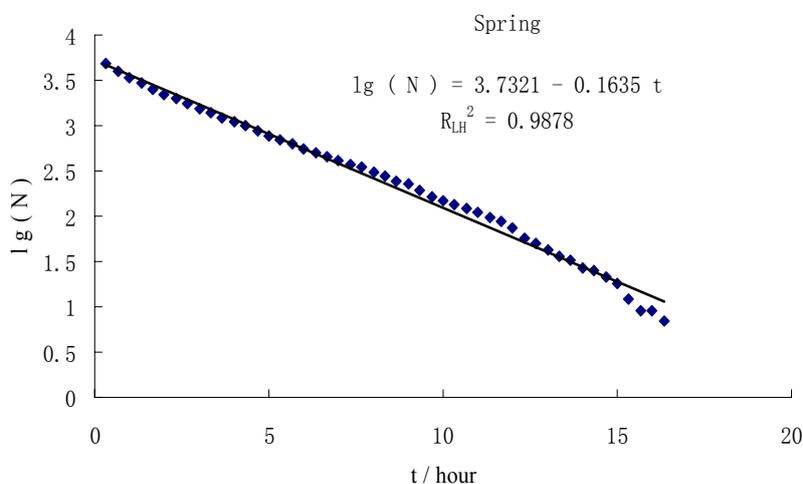


图 4.2 黄土高原沙尘暴持续时间累积分布 (春季)

Fig. 4.2 Duration times distribution of the sand-dust storms in the Loess Plateau (Spring)

对夏季沙尘暴持续时间累积分布 (图 4.3), 夏季持续时间大于 20 min 的有 638 次, 约占夏季总沙尘暴次数 (1243) 的 51.3%; 持续时间大于 1 hr 的有 313 次, 约占 25.2%; 持续时间大于 2 hr 的有 114 次, 约占 11.6%; 持续时间大于 5 hr 的有 21 次, 约占 1.7%。从图上直观看整体与 LASD 有差别, 图中的尾部更大 (也即持续时间长的沙尘暴所占份额比 LASD 描述的要多)。用公式 (1.2) 拟合的效果不是很好, 拟合相关指数 R_{LH}^2 为 0.7111, 低于全年、春季的拟合相关指数, 拟合的 b 值为 0.2064 hr^{-1} 。

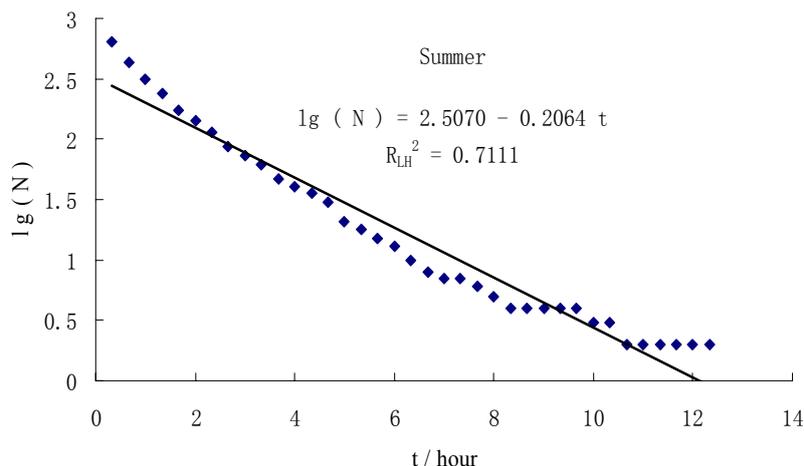


图 4.3 黄土高原沙尘暴持续时间累积分布（夏季）

Fig. 4.3 Duration times distribution of the sand-dust storms in the Loess Plateau (Summer)

对秋季沙尘暴持续时间累积分布（图 4.4），持续时间大于 20 min 的有 335 次，约占秋季总沙尘暴次数（498）的 67.3%；持续时间大于 1 hr 的有 205 次，约占 41.2%；持续时间大于 2 hr 的有 135 次，约占 27.1%；持续时间大于 5 hr 的有 38 次，约占 7.6%。 N 与 t 用公式 (1.2) 拟合，拟合相关指数 R_{LH}^2 为 0.9901，其中的 b 值为 0.2043 hr^{-1} 。

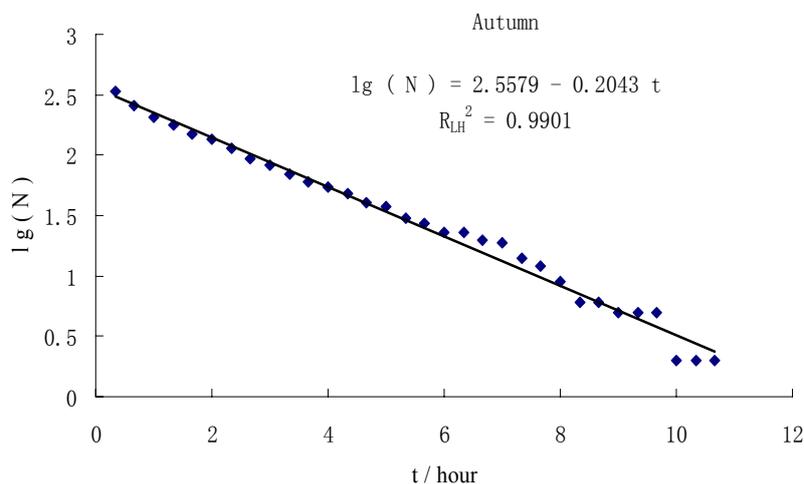


图 4.4 黄土高原沙尘暴持续时间累积分布（秋季）

Fig. 4.4 Duration times distribution of the sand-dust storms in the Loess Plateau (Autumn)

对冬季持续时间值分布（图 4.5），持续时间大于 20 min 的有 1613 次，约占冬季总沙尘暴次数(2176)的 74.1%；持续时间大于 1 hr 的有 1079 次，约占 49.6%；

持续时间大于 2 hr 的有 662 次, 约占 30.4%; 持续时间大于 5 hr 的有 195 次, 约占 9.0%。 N 与 t 用公式 (1.2) 拟合, 拟合相关指数 R_{LH}^2 为 0.9505, 其中的 b 值为 0.1625 hr^{-1} 。

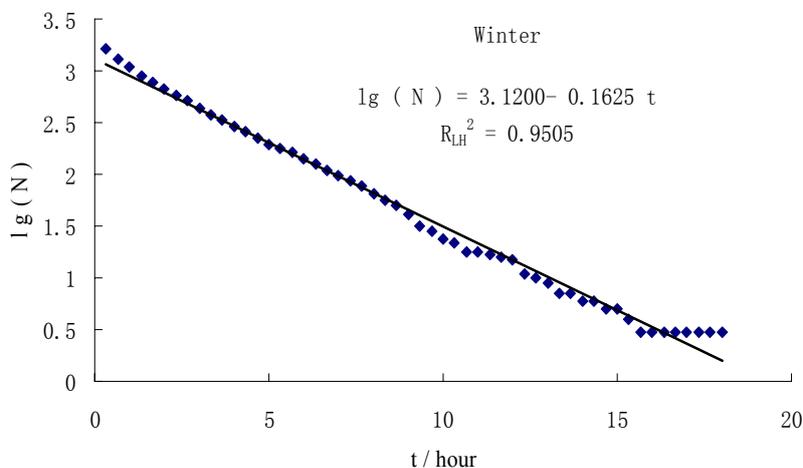


图 4.5 黄土高原沙尘暴持续时间累积分布 (冬季)

Fig. 4.5 Duration times distribution of the sand-dust storms in the Loess Plateau (Winter)

4.1.2 典型气象站 LASD 分析

以位于黄土高原宁夏的盐池站 (图 3.1 编号为 29 的气象站) 是黄土高原沙尘暴发生频次最高的站^[57]。本文以该站为典型, 对单站 LASD 进行分析。盐池沙尘暴时间记录资料完整, 其沙尘暴持续时间细节见表 4.3 和表 4.4。

盐池 1958 - 2000 年共记录到 953 次沙尘暴, 无缺测, 其平均持续时间为: 161.4min; 春季 582 次沙尘暴, 平均持续时间为: 171.0min; 夏季 87 次沙尘暴, 平均持续时间为: 61.2min; 秋季 33 次沙尘暴, 平均持续时间为: 152.1min; 冬季 251 次沙尘暴, 沙尘暴持续时间的平均值为: 175.3min。

春季持续时间最长的沙尘暴是 1994 年 5 月 1 日早上 6:04 开始持续到第二天凌晨 3:43, 共计 1299min; 夏季持续时间最长的一次沙尘暴是 1982 年 7 月 9 日下午 3:12 开始持续到晚上 9:37, 共计 385min; 秋季持续时间最长的一次沙尘暴是 1965 年 11 月 28 日上午 10:15 开始, 一直持续到晚上 8:59, 共计 644min; 冬季持续时间最长的一次沙尘暴是 1987 年 12 月 31 日早上 00:00 开始持续到晚上 19:02, 共计持续了 1142min。

表 4.3 盐池沙尘暴持续时间统计

Table 4.3 Summary for the sand-dust storms duration times of Yanchi

	全年	春季	夏季	秋季	冬季
沙尘暴总次数	953	582	87	33	251
最长持续时间 (min)	1299	1299	385	644	1142
平均持续时间 (min)	161.4	171.0	61.2	152.1	175.3

表 4.4 盐池四季持续时间最长沙尘暴的时间记录

Table 4.4 Time records of sand-dust storms with the maximum duration times in Yanchi

	年	月	日	开始时间	结束时间
春季	1994	5	1	06:04	20:00
	1994	5	2	20:00	03:43
夏季	1982	7	9	15:12	20:00
	1982	7	10	20:00	21:37
秋季	1965	11	28	10:15	20:00
	1965	11	29	20:00	20:59
冬季	1987	12	31	00:00	19:02

注：上述春季、夏季、秋季均存在夸 20:00 问题，记录为同一次沙尘暴的在两天的记录。

图 4.6 为盐池全年持续时间大于 t 的沙尘暴次数 N 用“ $\lg N = a - bt$ ”拟合（即 LASD）。对黄土高原沙尘暴持续时间累积分布分析，只对 $N/N_0 \geq 0.1\%$ 的数据进行拟合，1958 -2000 年盐池约为黄土高原沙尘暴次数的 9%，对盐池沙尘暴持续时间累积分布分析只对 $N/N_0 \geq 1\%$ 的数据进行拟合， N_0 为对应时期沙尘暴总次数。图 4.6 中的点基本在一条直线上，即与 LASD 吻合， b 值为 0.1556 hr^{-1} ，拟合相关指数 (R_{LH}^2) 为 0.9978。953 次沙尘暴，持续时间 $\geq 20\text{min}$ 的有 854 次，约占 89.6%；持续时间 $\geq 1 \text{ hr}$ 的有 646 次，约占 67.8%；持续时间 $\geq 2 \text{ hr}$ 的有 440 次，约占 46.2%；持续时间 $\geq 5 \text{ hr}$ 的有 158 次，约占 16.6%。

图 4.7 为对春季的分析。图中的点也基本在一条直线上，与 LASD 吻合， b

值为 0.1417 hr^{-1} , 拟合相关指数 (R_{LH}^2) 为 0.9961。582 次沙尘暴, 持续时间 $\geq 20\text{min}$ 的有 520 次, 约占 89.3%; 持续时间 $\geq 1 \text{ hr}$ 的有 394 次, 约占 67.7%; 持续时间 $\geq 2 \text{ hr}$ 的有 272 次, 约占 46.7%; 持续时间 $\geq 5 \text{ hr}$ 的有 106 次, 约占 18.2%。

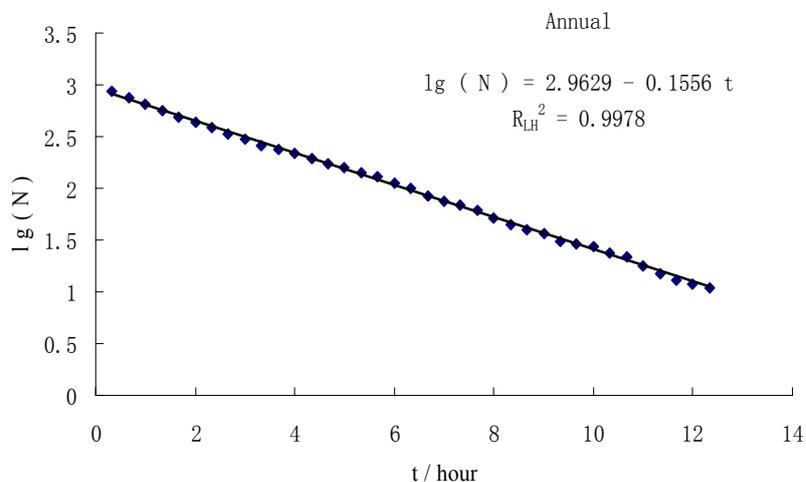


图 4.6 盐池沙尘暴持续时间累积分布,用公式 (1.2) 拟合 (全年)

Fig. 4.6 Duration times distribution of the sand-dust storms in Yanchi (Annual)

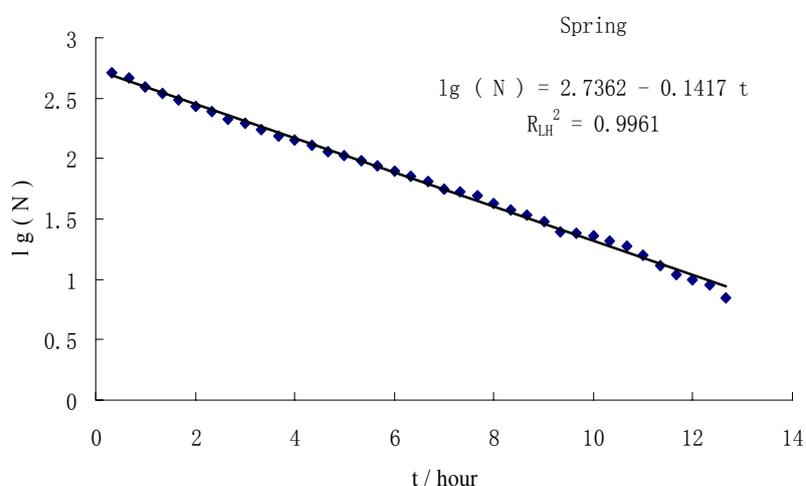


图 4.7 盐池沙尘暴持续时间累积分布 (春季)

Fig. 4.7 Duration times distribution of the sand-dust storms in Yanchi (Spring)

图 4.8 为对夏季的分析。图中的点也基本在一条直线上, 与 LASD 吻合, b 值为 0.3197 hr^{-1} 明显比春季和全年的大, 拟合相关指数 (R_{LH}^2) 为 0.9239。87 次沙尘暴, 持续时间 $\geq 20\text{min}$ 的有 62 次, 约占 71.3%; 持续时间 $\geq 1 \text{ hr}$ 的有 28 次, 约占 32.2%; 持续时间 $\geq 2 \text{ hr}$ 的有 14 次, 约占 16.1%; 持续时间 $\geq 5 \text{ hr}$ 的有 1 次, 约占 1.1%。

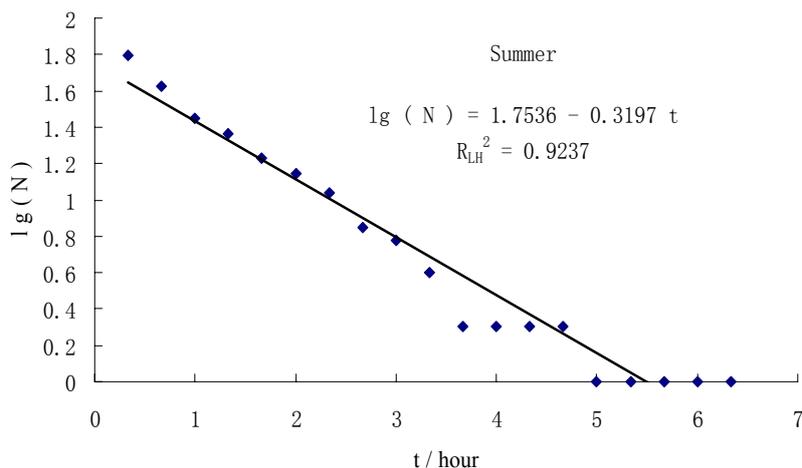


图 4.8 盐池沙尘暴持续时间累积分布（夏季）

Fig. 4.8 Duration times distribution of the sand-dust storms in Yanchi (Summer)

图 4.9 为对秋季的分析。 b 值为 0.1656 hr^{-1} ，拟合相关指数 (R_{LH}^2) 为 0.9428。尽管拟合点较少（盐池秋季，43 年，沙尘暴只有 33 次），但也可以认为满足 LASD。33 次沙尘暴，持续时间 $\geq 20\text{min}$ 的有 29 次，约占 87.9%；持续时间 $\geq 1 \text{ hr}$ 的有 25 次，约占 75.8%；持续时间 $\geq 2 \text{ hr}$ 的有 17 次，约占 51.5%；持续时间 $\geq 5 \text{ hr}$ 的有 5 次，约占 15.2%。

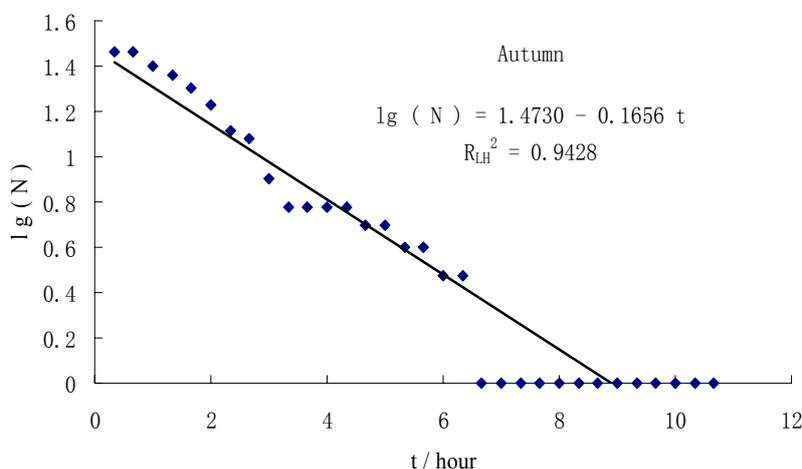


图 4.9 盐池沙尘暴持续时间累积分布（秋季）

Fig. 4.9 Duration times distribution of the sand-dust storms in Yanchi (Autumn)

图 4.10 为对冬季的分析。图中的点也基本在一条直线上，与 LASD 吻合， b 值为 0.1982 hr^{-1} ，拟合相关指数 (R_{LH}^2) 为 0.9401。251 次沙尘暴，持续时间 $\geq 20\text{min}$ 的有 243 次，约占 96.8%；持续时间 $\geq 1 \text{ hr}$ 的有 199 次，约占 79.3%；持续时

间 ≥ 2 hr 的有 137 次, 约占 54.6%; 持续时间 ≥ 5 hr 的有 46 次, 约占 18.3%。

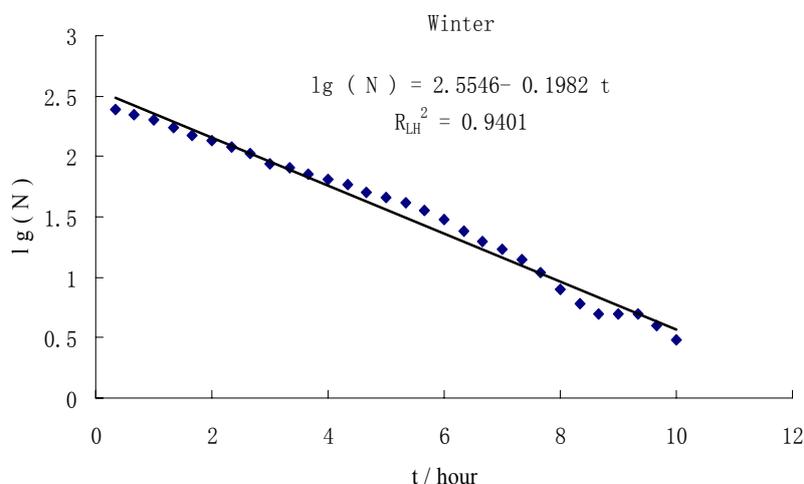


图 4.10 盐池沙尘暴持续时间累积分布 (冬季)

Fig. 4.10 Duration times distribution of the sand-dust storms in Yanchi (Winter)

利用“ $\lg N = a - bt$ ”拟合沙尘暴持续时间累积分布, 有力学机理的支持 (及图 2.1 所示力学模型), 其中的 b 值与沙尘暴阈值风速有关, 春季 b 值最小 (为 0.1417 hr^{-1}), 与春季沙尘暴阈值风速小、植被覆盖少、容易起尘对应, 这是合理的。夏季 b 值为 0.3197 hr^{-1} , 秋季 b 值为 0.1656 hr^{-1} , 冬季 b 值为 0.1982 hr^{-1} , 它们比春季的大, 是合理的, 但考虑到沙尘暴次数较少 (分别为 87、33 和 251 次), 计算的 b 值误差应该也较大, 特别是秋季只有 33 次, 计算的 b 值误差应该更大, 秋季和冬季的 b 值差异, 不能说明秋季沙尘暴阈值风速比冬季的小, 因此利用 b 值研究沙尘暴阈值风速, 沙尘暴次数也是需要考虑的因素。盐池全年 b 值和不同季节 b 值的差异, 提示沙尘暴阈值风速是随时间变化的, 不是图 2.1 所示力学模型中的不随时间变化的 V_t 。

4.2 结论与讨论

上述结果给出黄土高原和盐池站 LASD 细节特征 (见表 4.5)。该特征也表明:

(1) 本文计算的 LASD 的 b 值量值范围与以往的研究^[36]一致, 表 4.5 中最大 b 值为 0.3197 hr^{-1} (盐池夏季), 最小为 0.1417 hr^{-1} (盐池春季)。

(2) 四季 b 值有差异, 黄土高原春季和冬季植被覆盖少于夏季和秋季的植被覆盖, 四季 b 值差异支持较大 b 值对应较高的沙尘暴阈值风速的认识, 同时也提示

沙尘暴阈值风速不是常数。

(3) 研究也显示除图 4.3 (对应黄土高原 56 站整体夏季沙尘暴持续时间累积分布, 表 4.5 中加粗部分), 持续时间大于 t 的沙尘暴次数 N 用: $lgN=a-bt$ 拟合的效果很好。另外, 从图 4.3 看 N 与 t 的关系很类似 Weibull 分布, 有必要验证并从理论上探讨原因。

表 4.5 黄土高原沙尘暴持续时间累积分布统计

Table 4.5 Summary for the duration times distribution of sand-dust storms in the Loess Plateau

		全年	春季	夏季	秋季	冬季
沙尘暴总次数 N_0	盐池	953	582	87	33	251
	黄土高原	10618	6701	1243	498	2176
平均持续时间 T (min)	盐池	161.4	171.0	61.2	152.1	175.3
	黄土高原	113.7	126.5	51.9	95.9	113.6
b (hr^{-1})	盐池	0.1556	0.1417	0.3197	0.1656	0.1982
	黄土高原	0.1662	0.1635	0.2064	0.2043	0.1625
a	盐池	2.9629	2.7362	1.7536	1.4730	2.5546
	黄土高原	3.8734	3.7321	2.5070	2.5579	3.1200
R_{LH}^2	盐池	0.9978	0.9961	0.9237	0.9428	0.9401
	黄土高原	0.9892	0.9878	0.7111	0.9901	0.9505

5 用 Weibull 函数拟合沙尘暴持续时间累积分布的效果分析

第4章提到, 尽管沙尘暴频次与持续时间用“ $\lg N=a-bt$ ”描述效果很好, 但是根据图 4.3 (见第4章), 猜测它可以用 Weibull 分布拟合, 即沙尘暴持续时间累积分布可能满足:

$$N=N_0 \exp(-(t/C)^K) \quad (5.1)$$

其中 N 为持续时间大于 t 的个数, C 和 K 常数, N_0 是沙尘暴总次数。

从“ $N = N_0 \exp(-(t/C)^K)$ ”和“ $\lg N=a-bt$ ”两种拟合形式看: “ $\lg N=a-bt$ ”拟合数据点时, 端点数据不固定, 主要利用中段信息拟合参数 a 和 b , a 为拟合值, 且不等于 $\lg N_0$; “ $N = N_0 \exp(-(t/C)^K)$ ”是固定一个端点, 即初始点 (即 $t=0$ 时, $N=N_0$), 然后拟合数据。

本章就是探讨用公式 (5.1) (即 $N = N_0 \exp(-(t/C)^K)$) 拟合黄土高原沙尘暴持续时间累积分布的效果。

方法是对图 4.1 - 4.10(第 4 章)中同样的数据换为 Weibull 拟合形式(公式(5.1))。也即资料还是上章提到资料, 首先利用原始资料计算出每次沙尘暴的持续时间, 然后统计持续时间的累积分布, 即给定 t 值, t 的间隔取为 1/3 hour (20 min), 统计持续时间大于 t 的沙尘暴次数 N , 最后绘图显示 t 与 N 的关系, 横坐标取为: $\ln(t/T)$, T 为沙尘暴平均持续时间, 纵坐标取为: $\ln(-\ln(N/N_0))$, N_0 为对应时期沙尘暴总次数, 只对 $N/N_0 \geq 0.1\%$ 的数据进行绘图拟合, N 与 t 如果满足公式 (5.1) 图中的点应该在一条直线上。

5.1 结果分析

5.1.1 结果

利用拟合曲线的相关指数 (R^2)^[56]作为判断“ $\lg N=a-bt$ ”和“ $N=N_0 \exp(-(t/C)^K)$ ”对沙尘暴持续时间累积分布拟合效果的指标。对同样的数据, 相关指数 (R^2) 越大的拟合函数的拟合效果越好。用“ $\lg N=a-bt$ ”拟合的相关指数表示为: R_{LH}^2 (数据来自上一章); 用“ $N = N_0 \exp(-(t/C)^K)$ ”拟合的相关指数表示为: $R_{weibull}^2$ 。

图 5.1、图 5.2、图 5.3、图 5.4 和图 5.5 分别为全年、春季、夏季、秋季和冬季

沙尘暴持续时间累积分布用公式 (5.1) 拟合的结果。直观地看, 图 5.1-5.5 用“ $N = N_0 \exp(-(t/C)^K)$ ”拟合的效果都很好, 拟合相关指数 ($R^2_{weibull}$) 均大于 0.99。对全年、春季、秋季和冬季沙尘暴持续时间累积分布, 用“ $\lg N = a - bt$ ”拟合的相关指数 (R^2_{LH}) 略小于用公式 (5.1) ($N = N_0 \exp(-(t/C)^K)$) 拟合的相关指数 ($R^2_{weibull}$)。如, 全年 $R^2_{LH} = 0.9892$, $R^2_{weibull} = 0.9962$; 春季 $R^2_{LH} = 0.9878$, $R^2_{weibull} = 0.9956$; 秋季 $R^2_{LH} = 0.9901$, $R^2_{weibull} = 0.9943$; 冬季 $R^2_{LH} = 0.9505$, $R^2_{weibull} = 0.9987$ 。对夏季沙尘暴持续时间累积分布, 用“ $\lg N = a - bt$ ”拟合的相关指数 (R^2_{LH}) 为 0.7111 (见上一章图 (4.3)), 小于用“ $N = N_0 \exp(-(t/C)^K)$ ”拟合的相关指数 ($R^2_{weibull}$) 0.9993, 二者之间差别较大。

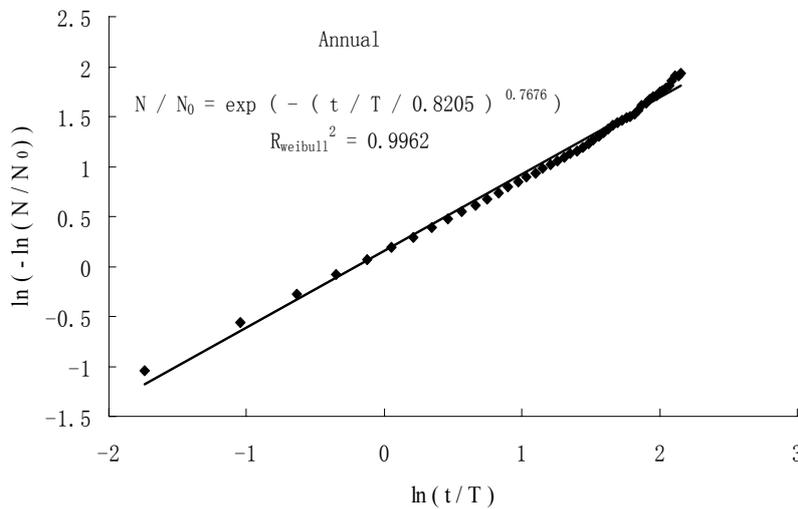


图 5.1 黄土高原1958 - 2000年全年持续时间大于 t 的沙尘暴次数 N 与 t 的关系 ($N_0=10618$, $T=113.7$ min)

Fig. 5.1 N , the number of duration times of the sand-dust storms (with length greater than t) against t , for the total sand-dust storms data from 1958 to 2000 in the Loess Plateau ($N_0=10618$, $T=113.7$ min)

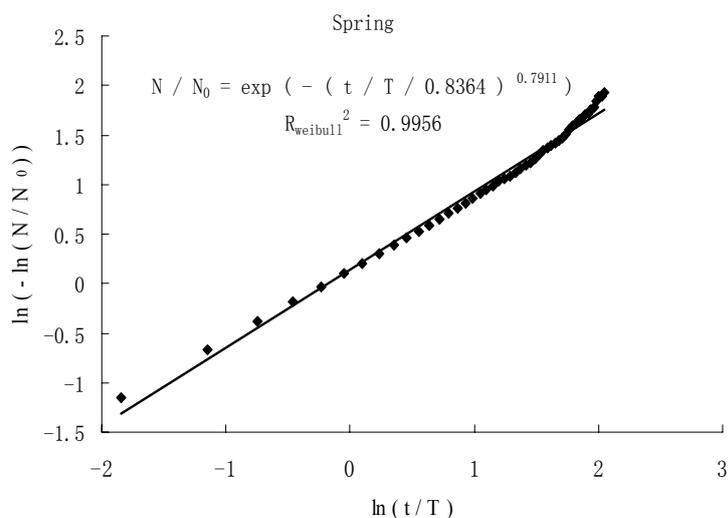


图 5.2 黄土高原1958 - 2000年春季持续时间大于 t 的沙尘暴次数 N 与 t 的关系 ($N_0=6701$, $T=126.5$ min)

Fig. 5.2 N , the number of duration times of the sand-dust storms (with length greater than t) against t , for the spring sand-dust storms data from 1958 to 2000 in the Loess Plateau ($N_0=6701$, $T=126.5$ min)

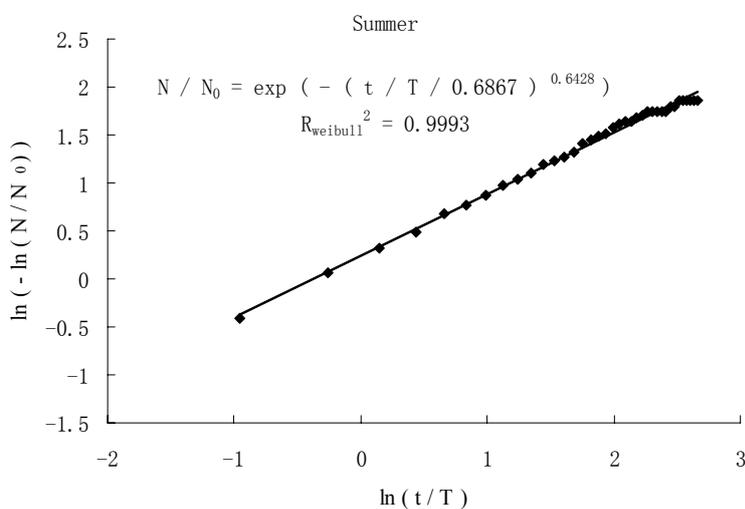


图 5.3 黄土高原1958 - 2000夏季持续时间大于 t 的沙尘暴次数 N 与 t 的关系 ($N_0=1243$, $T=51.9$ min)

Fig. 5.3 N , the number of duration times of the sand-dust storms (with length greater than t) against t , for the summer sand-dust storms data from 1958 to 2000 in the Loess Plateau ($N_0=1243$, $T=51.9$ min)

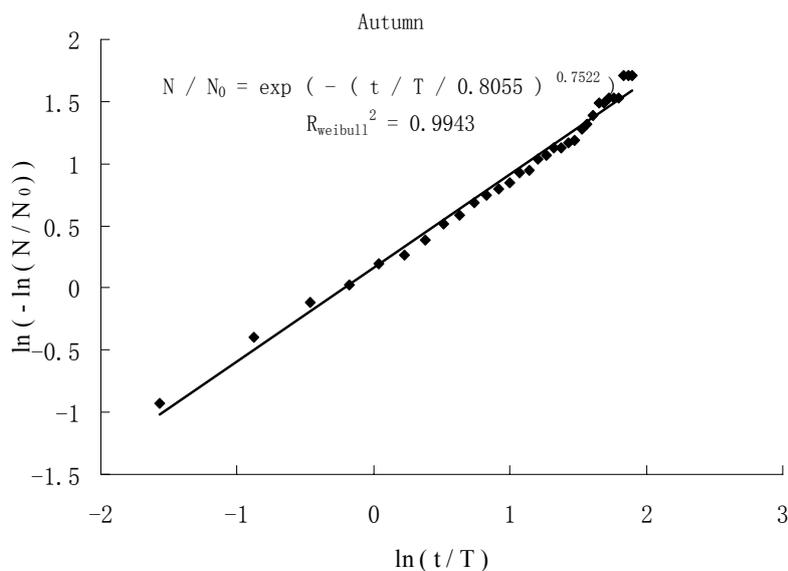


图 5.4 黄土高原1958 - 2000秋季持续时间大于 t 的沙尘暴次数 N 与 t 的关系 ($N_0=498, T=95.9$ min)

Fig. 5.4 N , the number of duration times of the sand-dust storms (with length greater than t) against t , for the autumn sand-dust storms data from 1958 to 2000 in the Loess Plateau ($N_0=498, T=95.9$ min)

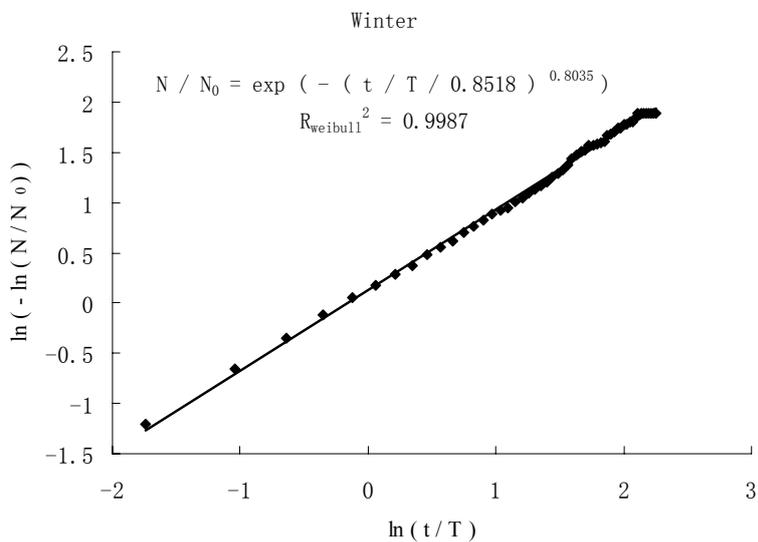


图 5.5 黄土高原1958 - 2000年冬季持续时间大于 t 的沙尘暴次数 N 与 t 的关系 ($N_0=2176, T=113.6$ min)

Fig. 5.5 N , the number of duration times of the sand-dust storms (with length greater than t) against t , for the winter sand-dust storms data from 1958 to 2000 in the Loess Plateau ($N_0=2176, T=113.6$ min)

图 5.6 为对盐池全年资料的分析, 所用资料同图 4.6, 其中 $N_0=953$, $T=161.4\text{min}$, 图中也显示了拟合相关指数 (R_{weibull}^2)。拟合的 $K=0.9919$, $C=1.0085T$, 图中点基本在一条直线上, 即持续时间大于 t 的沙尘暴次数 N 用“ $N=N_0\exp(-(t/C)^K)$ ” (即 Weibull 分布) 拟合, 效果很好。从拟合相关指数看, 用“ $\lg N=a-bt$ ” (LASD) 拟合的相关指数 (0.9978) 略小于用“ $N=N_0\exp(-(t/C)^K)$ ” (Weibull 分布) 拟合的相关指数 (0.9984)。

同图 5.6, 图 5.7-5.10 分别为盐池春季、夏季、秋季和冬季的分析结果, 图中点基本也在一条直线上, 即持续时间大于 t 的沙尘暴次数 N 用“ $N=N_0\exp(-(t/C)^K)$ ” (即 Weibull 分布) 拟合, 效果均很好。从拟合相关指数看, 对用“ $\lg N=a-bt$ ” (LASD) 拟合的相关指数均略小于用“ $N=N_0\exp(-(t/C)^K)$ ” (Weibull 分布) 拟合的相关指数, 如春季 $R_{\text{weibull}}^2=0.9980$ 而 $R_{LH}^2=0.9961$; 夏季 $R_{\text{weibull}}^2=0.9946$ 而 $R_{LH}^2=0.9239$; 秋季 $R_{\text{weibull}}^2=0.9799$ 而 $R_{LH}^2=0.9428$; 冬季 $R_{\text{weibull}}^2=0.9928$ 而 $R_{LH}^2=0.9401$ 。拟合的 K 值也是接近 1, 最大值为 1.3249 (冬季) 最小值为 0.8816 (夏季)。 C/T 也接近 1, 最大值为 1.0918 (冬季), 最小值为 0.9585 (夏季)。

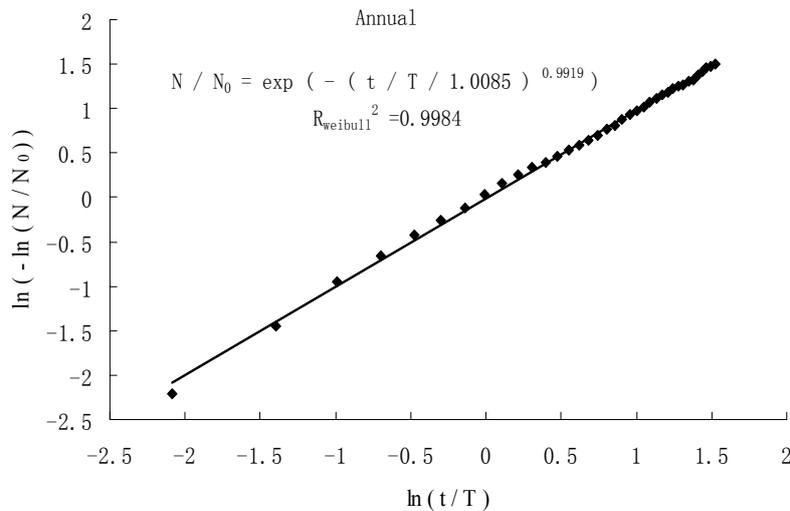


图 5.6 盐池站1958 - 2000年全年持续时间大于 t 的沙尘暴次数 N 与 t 的关系 ($N_0=953$, $T=161.4$ min)

Fig. 5.6 N , the number of duration times of the sand-dust storms (with length greater than t) against t , for the total sand-dust storms data from 1958 to 2000 in Yanchi ($N_0=953$, $T=161.4$ min)

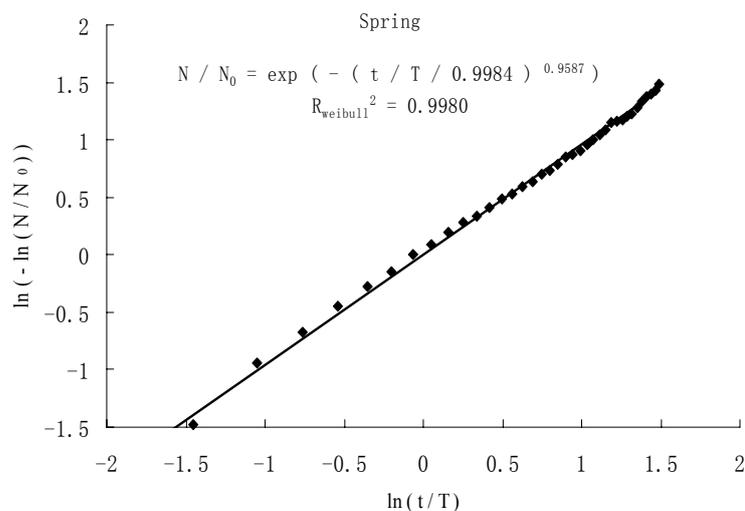


图 5.7 盐池站1958 - 2000年春季持续时间大于 t 的沙尘暴次数 N 与 t 的关系 ($N_0=582$, $T=171.0$ min)

Fig. 5.7 N , the number of duration times of the sand-dust storms (with length greater than t) against t , for the spring sand-dust storms data from 1958 to 2000 in Yanchi ($N_0=582$, $T=171.0$ min)

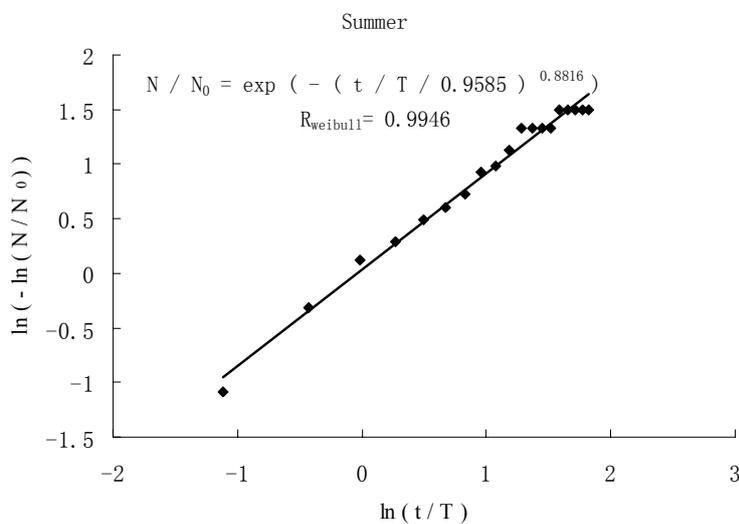


图 5.8 盐池站1958 - 2000年夏季持续时间大于 t 的沙尘暴次数 N 与 t 的关系 ($N_0=87$, $T=61.2$ min)

Fig. 5.8 N , the number of duration times of the sand-dust storms (with length greater than t) against t , for the summer sand-dust storms data from 1958 to 2000 in Yanchi ($N_0=87$, $T=61.2$ min)

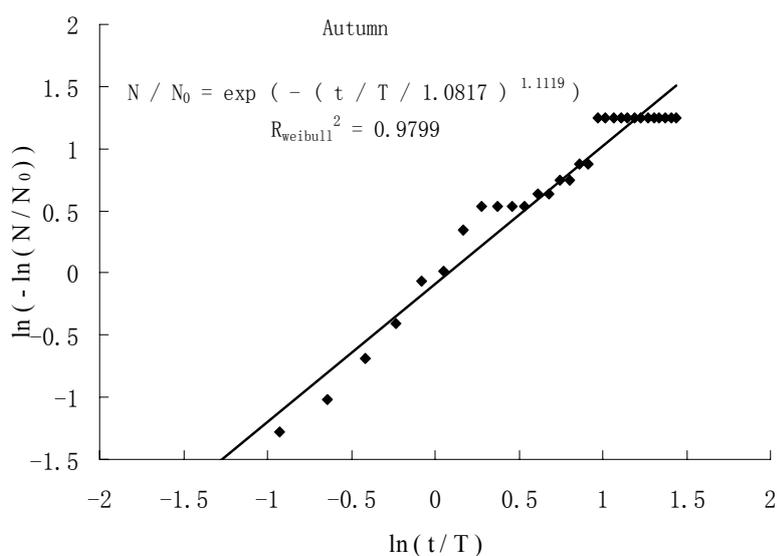


图 5.9 盐池站1958 - 2000年秋季持续时间大于 t 的沙尘暴次数 N 与 t 的关系 ($N_0=33$, $T=152.1\text{min}$)

Fig. 5.9 N , the number of duration times of the sand-dust storms (with length greater than t) against t , for the autumn sand-dust storms data from 1958 to 2000 in Yanchi, and regressed with Eq.(5.1)

$$(N_0=33, T=152.1\text{min})$$

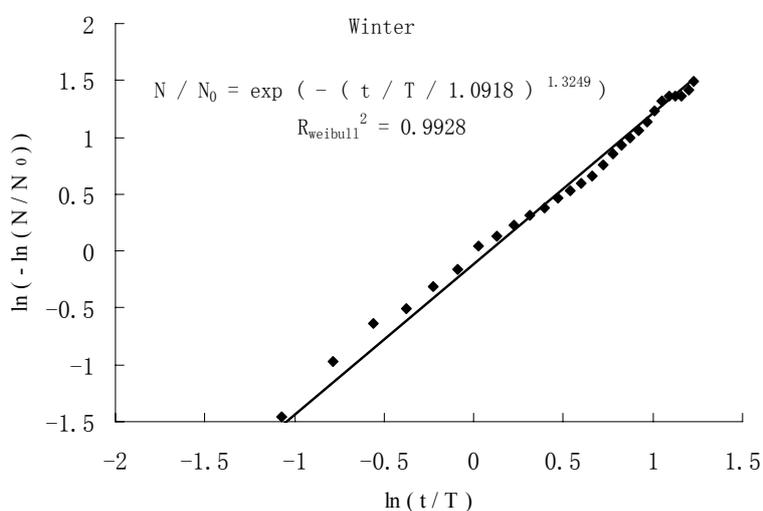


图 5.10盐池站1958 - 2000年冬季持续时间大于 t 的沙尘暴次数 N 与 t 的关系 ($N_0=251$, $T=175.3\text{min}$)

Fig. 5.10 N , the number of duration times of the sand-dust storms (with length greater than t) against t , for the winter sand-dust storms data from 1958 to 2000 in Yanchi ($N_0=251$, $T=175.3\text{min}$)

5.1.2 参数比较

表 5.1 为盐池和黄土高原（56 站）拟合参数比较。黄土高原的资料来自第四章。明显可以看出：（1）从拟合指数上看，用“ $N=N_0exp(-(t/C)^K)$ ”（即 Weibull 函数）拟合沙尘暴持续时间累积分布效果优于用“ $lgN=a-bt$ ”（LASD）；（2）对盐池站尽管存在 $R_{weibull}^2 \geq R_{LH}^2$ ，但拟合指数 R_{LH}^2 均很高（ ≥ 0.9237 ），考虑到 LASD（用“ $lgN=a-bt$ ”拟合沙尘暴持续时间累积分布）有力学基础，不能否定 LASD 的合理性；（3）单站（盐池）的 K 值和 C/T 很接近 1，而黄土高原 56 个站整体，不存在这个现象，这样就存在一种可能性，单站沙尘暴持续时间累积分布可能满足：

$$N = N_0 exp(-t/T) \tag{5.2}$$

因此猜测对盐池应该存在 $T \cdot b/60 = lg(e)$ （注：除以 60，是因为 T 的单位为 min， b 的单位为 hr^{-1} ）变化和 $a = lgN_0$ ，图 5.11 为盐池和黄土高原 b 和 T 的关系，盐池站更接近这个猜测，图 5.12 为 a 和 lgN_0 的比较， $a = lgN_0$ 可以接受。

表 5.1 盐池和黄土高原（56 站）拟合参数比较

Table 5.1 Compared the fitting parameters of Yanchi with the LoessPlateau (56 stations)

		全年	春季	夏季	秋季	冬季
沙尘暴总次数 N_0	盐池	953	582	87	33	251
	黄土高原	10618	6701	1243	498	2176
平均持续时间 T/min	盐池	161.4	171.0	61.2	152.1	175.3
	黄土高原	113.7	126.5	51.9	95.9	113.6
K	盐池	0.9919	0.9587	0.8816	1.1119	1.3249
	黄土高原	0.7676	0.7911	0.6428	0.7522	0.8035
C/T	盐池	1.0085	0.9984	0.9585	1.0817	1.0918
	黄土高原	0.8205	0.8364	0.6867	0.8055	0.8518
b/hr^{-1}	盐池	0.1556	0.1417	0.3197	0.1656	0.1982
	黄土高原	0.1662	0.1635	0.2064	0.2043	0.1625
a	盐池	2.9629	2.7362	1.7536	1.4730	2.5546
	黄土高原	3.8734	3.7321	2.5070	2.5579	3.1200
R_{LH}^2	盐池	0.9978	0.9961	0.9237	0.9428	0.9401
	黄土高原	0.9892	0.9878	0.7111	0.9901	0.9505
$R_{weibull}^2$	盐池	0.9984	0.9980	0.9946	0.9799	0.9928
	黄土高原	0.9962	0.9956	0.9993	0.9943	0.9987

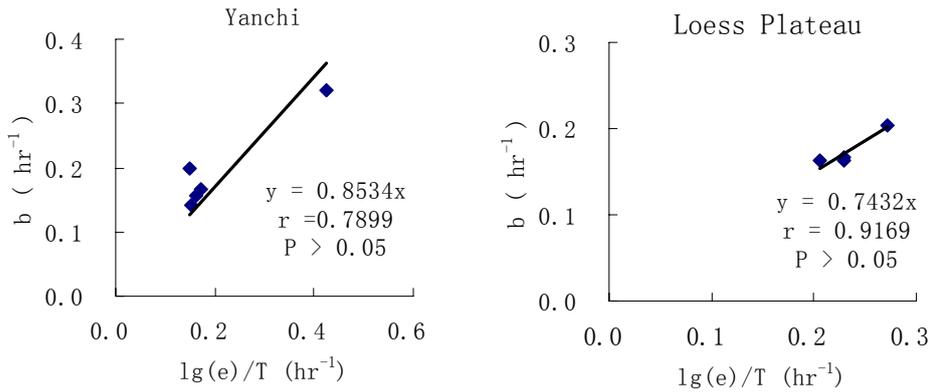


图 5.11 b 与 T 的关系（如沙尘暴持续时间累积分布满足公式（5.2）（即 $N=N_0exp(-t/T)$ ），图中拟合线应满足 $y=x$ ；对黄土高原剔除夏季的数据($R_{LH}^2=0.7111$)

Fig. 5.11 The relationship of b and T (if the sand-dust storm duration time distribution agrees with the Eq.(5.2) of $N=N_0exp(-t/T)$, the points in the figures should be regressed with $y=x$; The data of summer for the LoessPlateau is took out for R_{LH}^2 of 0.7111)

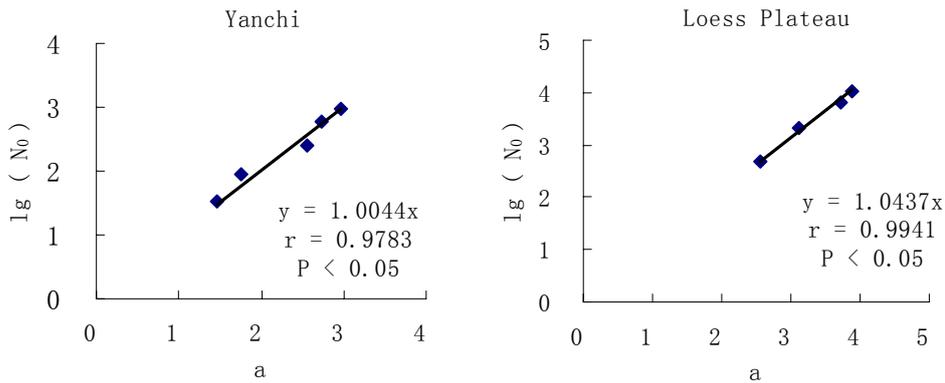


图 5.12 a 与 lgN_0 的关系（如沙尘暴持续时间累积分布满足公式（5.2）（即 $N=N_0exp(-t/T)$ ），图中拟合线应满足 $y=x$ ；对黄土高原剔除夏季的数据($R_{LH}^2=0.7111$)

Fig. 5.12 The relationship of a and lgN_0 (if the sand-dust storms duration times distribution agrees with the Eq.(5.2) of $N=N_0exp(-t/T)$, the points in the figures should be regressed with $y=x$; The data of summer for the Loess Plateau is took out for the R_{LH}^2 of 0.7111)

图 5.13 为对盐池，指数分布（公式（5.2））与实际沙尘暴持续时间累积分布的比较。沙尘暴持续时间累积分布的绘图资料同图 4.6-4.10。从图上直观地看，用指数分布（即公式（5.2））描述盐池站沙尘暴持续时间累积分布也是可以考虑的选项。

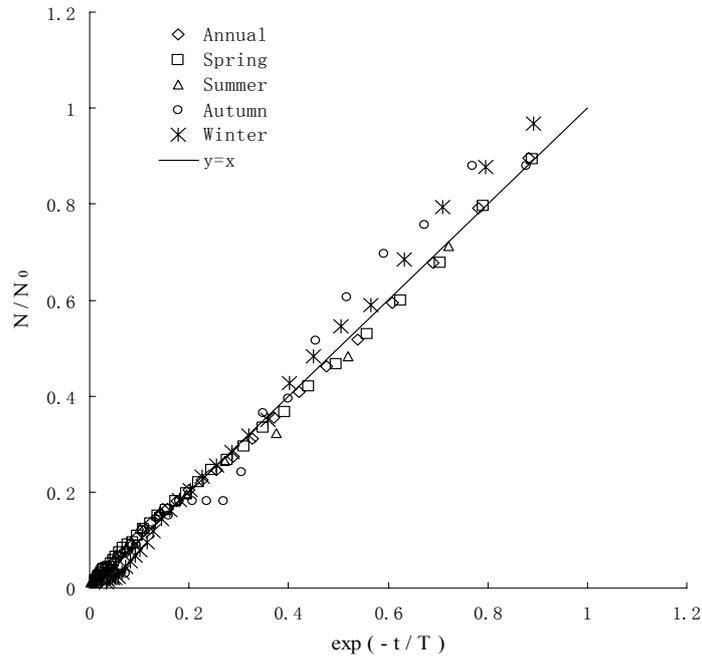


图 5.13 指数分布（公式（5.2））与实际沙尘暴持续时间累积分布的比较（盐池）

Fig. 5.13 Comparing the exponential distribution (Eq.(5.2)) and the sand-dust storms duration times distribution of Yanchi

5.1.3 统计检验

本节对“ $\lg N = a - bt^c$ ”、“ $N = N_0 \exp(-(t/C)^K)$ ”和“ $N = N_0 \exp(-t/T)$ ”描述盐池沙尘暴持续时间累积分布进行统计检验，使用 χ^2 检验法进行检验。分布函数中的参数（ N_0 、 T 、 b 、 a 、 K 和 C ）取值见表 5.1。

检验假设， H_0 ：盐池沙尘暴持续时间总体分布函数为 $F(x)$ 。 $F(x)$ 分别取公式“ $\lg N = a - bt^c$ ”、“ $N = N_0 \exp(-(t/C)^K)$ ”和“ $N = N_0 \exp(-t/T)$ ”来进行检验。卡方（ χ^2 ）检验法的基本思想^[58]是：将随机试验的 n 个样品分为 k 个互不相容的事件 A_1, A_2, \dots, A_k 。在假设 H_0 下，计算 A_i 出现的概率 $p_i = P(A_i)$, $i = 1, 2, \dots, k$ 。

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(f_i/n - p_i)^2}{p_i} \quad (5.3)$$

其中 f_i/n 为 n 次试验中事件 A_i 出现的概率， p_i 为用分布函数 $F(x)$ 计算的 A_i 出现的概率。若 n 充分大（ $n \geq 50$ ），则当 H_0 为真时，统计量（ χ^2 ）总是近似地服从自由度为 $k-r-1$ 的 χ^2 分布，其中 r 是分布函数 $F(x)$ 被估计的参数个数。在假设 H_0 下计算（5.3），

若有

$$\chi^2 \geq \chi_{\alpha}^2(k-r-1), \quad (5.4)$$

则在显著性水平 α 下拒绝 H_0 , 否则就接受 H_0 。 χ^2 检验也要求 np_i 不能太小, 要求每个不小于 5, 否则应适当合并 A_i , 以满足要求。

本文的事件 A_i 为持续时间 t 满足 $t_i \leq t < t_{i+1}$ 的沙尘暴, f_i 为用实际资料获得的 A_i 中沙尘暴的次数, np_i 为用分布函数计算的 A_i 中沙尘暴的次数, 可以用

$$np_i = N(t_i) - N(t_{i+1}) \quad (5.5)$$

计算, 其中 $N(t_i)$ 为分别用公式“ $\lg N = a - bt$ ”、“ $N = N_0 \exp(-(t/C)^K)$ ”和“ $N = N_0 \exp(-t/T)$ ”计算的持续时间大于 t_i 的沙尘暴次数。

表 5.2 为对盐池全年沙尘暴持续时间累积分布的 χ^2 检验表。取显著性水平 α 为 0.05。对“ $\lg N = a - bt$ ”计算的 $\chi^2 = 23.349 \leq \chi_{\alpha}^2(27-2-1) = 36.415$; 对“ $N = N_0 \exp(-(t/C)^K)$ ”计算的 $\chi^2 = 20.279 \leq \chi_{\alpha}^2(27-3-1) = 35.172$; 对“ $N = N_0 \exp(-t/T)$ ”计算的 $\chi^2 = 20.152 \leq \chi_{\alpha}^2(27-2-1) = 36.415$ 。即在显著性水平 $\alpha (=0.05)$ 下接受公式“ $\lg N = a - bt$ ”、“ $N = N_0 \exp(-(t/C)^K)$ ”或“ $N = N_0 \exp(-t/T)$ ”均可作为盐池年沙尘暴持续时间的累积分布函数。

表 5.3 为对盐池春季沙尘暴持续时间累积分布的 χ^2 检验表, 从计算的 χ^2 同样在显著性水平 $\alpha (=0.05)$ 下接受公式“ $\lg N = a - bt$ ”、“ $N = N_0 \exp(-(t/C)^K)$ ”或“ $N = N_0 \exp(-t/T)$ ”均可作为盐池春季沙尘暴持续时间的累积分布函数。

表 5.4 为对盐池全年夏季沙尘暴持续时间累积分布的 χ^2 检验表。取显著性水平 α 为 0.05。对“ $\lg N = a - bt$ ”计算的 $\chi^2 = 29.887 \geq \chi_{\alpha}^2(5-2-1) = 5.991$; 对“ $N = N_0 \exp(-(t/C)^K)$ ”计算的 $\chi^2 = 2.898 \leq \chi_{\alpha}^2(6-3-1) = 5.991$; 对“ $N = N_0 \exp(-t/T)$ ”计算的 $\chi^2 = 2.430 \leq \chi_{\alpha}^2(6-2-1) = 7.815$ 。即在显著性水平 $\alpha (=0.05)$ 下拒绝“ $\lg N = a - bt$ ”, 接受“ $N = N_0 \exp(-(t/C)^K)$ ”和“ $N = N_0 \exp(-t/T)$ ”作为盐池年沙尘暴持续时间的累积分布函数。

秋季只有 33 次沙尘暴, 不符合检验的条件 (即: $n \geq 50$), 因此对秋季未进行统计检验。

表 5.5 为对盐池冬季沙尘暴持续时间累积分布的 χ^2 检验表。取显著性水平 α 为 0.05。对“ $\lg N = a - bt$ ”计算的 $\chi^2 = 69.833 \geq \chi_{\alpha}^2(17-2-1) = 23.685$; 对“ $N = N_0 \exp(-(t/C)^K)$ ”计算的 $\chi^2 = 19.537 \leq \chi_{\alpha}^2(18-3-1) = 23.685$; 对“ $N = N_0 \exp(-t/T)$ ”计算的 $\chi^2 = 28.025 \geq \chi_{\alpha}^2(16-2-1) = 22.362$ 。即在显著性水平 $\alpha (=0.05)$ 下拒绝“ $\lg N = a - bt$ ”和“ $N = N_0 \exp(-t/T)$ ”, 接受“ $N = N_0 \exp(-(t/C)^K)$ ”作为盐池年沙尘暴持续时间的累积分布函数。

5.2 结论与讨论

通过验证, 确证第四章提到图 4.3 中 N 与 t 用 Weibull 分布 ($N=N_0\exp(-(t/C)^K)$, 其中 N 为持续时间大于 t 的个数, C 和 K 常数, N_0 是沙尘暴次数) 拟合更好。进一步分析也说明尽管沙尘暴 LASD 受到图 2.1 所示力学机理的支持, 但统计上沙尘暴持续时间累积分布用 Weibull 分布拟合效果最好, 对单站甚至用 Weibull 分布的特殊情形 ($K=1, C=T$) 拟合效果也很好。

考虑到 (1) 沙尘暴 LASD 受到图 2.1 所示力学机理的支持; (2) 用 “ $\lg N=a-bt$ ” 拟合沙尘暴持续时间累积分布 (即 LASD), 除了图 4.3 (黄土高原夏季) 拟合相关指数也很高; (3) 从统计检验的效果看, “ $\lg N=a-bt$ ” 也是这三个 ($N=N_0\exp(-(t/C)^K)$ 、 $\lg N=a-bt$ 和 $N=N_0\exp(-t/T)$) 中最差的, 但对盐池单站, 全年、春季也通过了检验。因此 LASD 是合理且有价值的, 但需要从理论上探讨统计上沙尘暴持续时间累积分布用 $N=N_0\exp(-(t/C)^K$ (Weibull 分布) 的拟合效果好于用 $\lg N=a-bt$ 拟合的原因, 来完善对 LASD 的认识。

表 5.2 沙尘暴持续时间累积分布的 χ^2 检验结果(盐池,全年)Table 5.2 χ^2 test table for Goodness of Fit (Yanchi, annual)

A_i	f_i	$lgN=a-bt$		$N=N_0exp(-(t/C)^K)$		$N/N_0=exp(-t/T)$	
		np_i	$\frac{(f_i - np_i)^2}{np_i}$	np_i	$\frac{(f_i - np_i)^2}{np_i}$	np_i	$\frac{(f_i - np_i)^2}{np_i}$
A ₁	99	103.324	0.181	111.938	1.495	111.052	1.308
A ₂	100	91.695	0.752	97.754	0.052	98.111	0.036
A ₃	108	81.375	8.711	86.050	5.599	86.678	5.245
A ₄	79	72.217	0.637	75.893	0.127	76.578	0.077
A ₅	74	64.089	1.533	67.001	0.731	67.654	0.595
A ₆	53	56.876	0.264	59.189	0.647	59.771	0.767
A ₇	50	50.475	0.004	52.311	0.102	52.806	0.149
A ₈	51	44.794	0.860	46.249	0.488	46.652	0.405
A ₉	43	39.753	0.265	40.901	0.108	41.216	0.077
A ₁₀	34	35.279	0.046	36.179	0.131	36.413	0.160
A ₁₁	28	31.308	0.350	32.009	0.502	32.170	0.541
A ₁₂	19	27.785	2.777	28.324	3.069	28.421	3.123
A ₁₃	21	24.658	0.543	25.067	0.660	25.109	0.673
A ₁₄	21	21.882	0.036	22.188	0.064	22.183	0.063
A ₁₅	15	19.420	1.006	19.641	1.097	19.598	1.079
A ₁₆	17	17.234	0.003	17.389	0.009	17.315	0.006
A ₁₇	12	15.294	0.710	15.396	0.749	15.297	0.711
A ₁₈	17	13.573	0.865	13.633	0.831	13.514	0.899
A ₁₉	12	12.046	0.000	12.073	0.000	11.940	0.000
A ₂₀	15	10.690	1.738	10.692	1.736	10.548	1.879
A ₂₁	11	9.487	0.241	9.470	0.247	9.319	0.303
A ₂₂	6	8.419	0.695	8.388	0.680	8.233	0.606
A ₂₃	7	7.472	0.030	7.430	0.025	7.274	0.010
A ₂₄	9	6.631	0.847	6.582	0.888	6.426	1.031
A ₂₅	7	5.884	0.212	5.831	0.234	5.677	0.308
A ₂₆	5	5.222	0.009	5.166	0.005	5.016	0.000
A ₂₇	40	41.178	0.034	40.256	0.002	38.027	0.102
	χ^2		23.349		20.279		20.152

注: $A_i = \{t_i \leq t < t_{i+1}\}$, $t_1=0$, $t_{i+1}-t_i=20\text{min}$, $i=1,2,\dots,26$; $A_{27} = \{t_{27} \leq t < \infty\}$, 对 “ $lgN=a-bt$ ”

$\chi_{0.05}^2(27-2-1) = 36.415$; 对“ $N=N_0exp(-(t/C)^K)$ ” $\chi_{0.05}^2(27-3-1) = 35.172$; 对“ $N/N_0=exp(-t/T)$ ”

$\chi_{0.05}^2(27-2-1) = 36.415$; 在显著性水平 $\alpha (=0.05)$ 下接受 H_0 ($\chi^2 \leq \chi_{0.05}^2$)

表 5.3 沙尘暴持续时间累积分布的 χ^2 检验结果(盐池,春季)

Table 5.3 χ^2 test table for Goodness of Fit (Yanchi, spring)

A _i	lgN=a-bt			N=N ₀ exp(-(t/C) ^K)			N/N ₀ =exp(-t/T)		
	f _i	np _i	$\frac{(f_i - np_i)^2}{np_i}$	f _i	np _i	$\frac{(f_i - np_i)^2}{np_i}$	np _i	$\frac{(f_i - np_i)^2}{np_i}$	
A ₁	62	56.121	0.616	62	69.938	0.901	64.257	0.079	
A ₂	57	50.339	0.881	57	58.267	0.028	57.163	0.000	
A ₃	69	45.153	12.595	69	50.596	6.695	50.852	6.477	
A ₄	45	40.501	0.500	45	44.364	0.009	45.237	0.001	
A ₅	41	36.328	0.601	41	39.096	0.093	40.243	0.014	
A ₆	36	32.586	0.358	36	34.564	0.060	35.800	0.001	
A ₇	27	29.228	0.170	27	30.627	0.430	31.847	0.738	
A ₈	32	26.217	1.276	32	27.185	0.853	28.331	0.475	
A ₉	19	23.516	0.867	19	24.164	1.103	25.203	1.527	
A ₁₀	22	21.093	0.039	22	21.502	0.012	22.420	0.008	
A ₁₁	17	18.920	0.195	17	19.152	0.242	19.945	0.435	
A ₁₂	12	16.971	1.456	12	17.072	1.507	17.743	1.859	
A ₁₃	15	15.222	0.003	15	15.229	0.003	15.784	0.039	
A ₁₄	13	13.654	0.031	13	13.594	0.026	14.041	0.077	
A ₁₅	9	12.247	0.861	9	12.141	0.813	12.491	0.976	
A ₁₆	11	10.986	0.000	11	10.849	0.002	11.112	0.001	
A ₁₇	7	9.854	0.827	7	9.699	0.751	9.885	0.842	
A ₁₈	10	8.839	0.153	10	8.675	0.202	8.794	0.165	
A ₁₉	6	7.928	0.469	6	7.762	0.400	7.823	0.425	
A ₂₀	8	7.111	0.111	8	6.947	0.160	6.959	0.156	
A ₂₁	8	6.379	0.412	8	6.220	0.509	6.191	0.529	
A ₂₂	3	5.721	1.294	3	5.571	1.187	5.507	1.141	
A ₂₃	4	5.132	0.250	53	48.786	0.364	44.374	1.677	
A ₂₄	49	44.681	0.418						
	χ^2		24.382			16.348		17.642	

注：对“lgN=a-bt”，A_i={t_i ≤ t < t_{i+1}}，t₁=0，t_{i+1}-t_i=20min，i=1,2,...,23； A₂₄={t₂₄ ≤ t < ∞}；
 对“N=N₀exp(-(t/C)^K)”和“N=N₀exp(-t/T)”，A_i={t_i ≤ t < t_{i+1}}，t₁=0，t_{i+1}-t_i=20min，
 i=1,2,...,22； A₂₃={t₂₃ ≤ t < ∞}；对 LASD $\chi^2_{0.05}(24-2-1) = 32.671$ ；对“N=N₀exp(-(t/C)^K)”，
 $\chi^2_{0.05}(23-3-1) = 30.144$ ；对“N=N₀exp(-t/T)”， $\chi^2_{0.05}(23-2-1) = 31.410$ ；在显著性水平 α
 (=0.05) 下接受 H₀ ($\chi^2 \leq \chi^2_{0.05}$)

表 5.4 沙尘暴持续时间累积分布的 χ^2 检验表(盐池, 夏季)Table 5.4 χ^2 test table for Goodness of Fit (Yanchi, summer)

A_i	$lgN=a-bt$			$N=N_0exp(-(t/C)^K)$			$N/N_0=exp(-t/T)$		
	f_i	np_i	$\frac{(f_i - np_i)^2}{np_i}$	f_i	np_i	$\frac{(f_i - np_i)^2}{np_i}$	np_i	$\frac{(f_i - np_i)^2}{np_i}$	
A_1	25	12.336	13.002	25	27.933	0.308	24.251	0.023	
A_2	20	9.652	11.095	20	16.442	0.770	17.491	0.360	
A_3	14	7.552	5.506	14	11.255	0.670	12.615	0.152	
A_4	5	5.909	0.140	5	8.002	1.126	9.099	1.847	
A_5	23	21.249	0.144	6	5.809	0.006	6.563	0.048	
A_6				17	17.560	0.018	16.981	0.000	
	χ^2		29.887**			2.898		2.430	

注: 对“ $lgN=a-bt$ ”, $A_i=\{t_i \leq t < t_{i+1}\}$, $t_1=0$, $t_{i+1}-t_i=20\text{min}$, $i=1,2,\dots,4$; $A_5=\{t_5 \leq t < \infty\}$; 对“ $N=N_0exp(-(t/C)^K)$ ”和“ $N=N_0exp(-t/T)$ ”, $A_i=\{t_i \leq t < t_{i+1}\}$, $t_1=0$, $t_{i+1}-t_i=20\text{min}$, $i=1,2,\dots,5$; $A_6=\{t_6 \leq t < \infty\}$; 对“ $lgN=a-bt$ ”, $\chi_{0.05}^2(5-2-1)=5.991$, $\chi_{0.01}^2(5-2-1)=9.210$; 对“ $N=N_0exp(-(t/C)^K)$ ”, $\chi_{0.05}^2(6-3-1)=5.991$; 对“ $N=N_0exp(-t/T)$ ”, $\chi_{0.05}^2(6-2-1)=7.815$; *显著: 在显著性水平 $\alpha (=0.05)$ 下拒绝 H_0 ($\chi_{0.05}^2 \leq \chi^2 \leq \chi_{0.01}^2$); **极显著: 在显著性水平 $\alpha (=0.01)$ 下拒绝 H_0 ($\chi^2 \geq \chi_{0.01}^2$); 在显著性水平 $\alpha (=0.05)$ 下接受 H_0 ($\chi^2 \leq \chi_{0.05}^2$)

表 5.5 沙尘暴持续时间累积分布的 χ^2 检验结果(盐池, 冬季)

Table 5.5 χ^2 test table for Goodness of Fit (Yanchi, winter)

A _i	lgN=a-bt			N=N ₀ exp(-(t/C) ^K)			N/N ₀ =exp(-t/T)		
	f _i	np _i	$\frac{(f_i - np_i)^2}{np_i}$	f _i	np _i	$\frac{(f_i - np_i)^2}{np_i}$	f _i	np _i	$\frac{(f_i - np_i)^2}{np_i}$
A ₁	8	50.591	35.856	8	12.280	1.492	8	27.063	13.428
A ₂	23	43.453	9.627	23	17.360	1.832	23	24.145	0.054
A ₃	21	37.323	7.138	21	18.926	0.227	21	21.542	0.014
A ₄	27	32.057	0.798	27	19.222	3.147	27	19.219	3.150
A ₅	24	27.534	0.454	24	18.804	1.436	24	17.147	2.739
A ₆	11	23.649	6.766	11	17.949	2.690	11	15.298	1.208
A ₇	16	20.312	0.916	16	16.830	0.041	16	13.649	0.405
A ₈	14	17.447	0.681	14	15.561	0.157	14	12.177	0.273
A ₉	19	14.985	1.076	19	14.225	1.603	19	10.864	6.093
A ₁₀	8	12.871	1.843	8	12.879	1.848	8	9.693	0.296
A ₁₁	9	11.055	0.382	9	11.563	0.568	9	8.648	0.014
A ₁₂	7	9.495	0.656	7	10.305	1.060	7	7.715	0.066
A ₁₃	6	8.155	0.570	6	9.123	1.069	6	6.883	0.113
A ₁₄	7	7.005	0.000	7	8.028	0.132	7	6.141	0.120
A ₁₅	5	6.017	0.172	5	7.026	0.584	5	5.479	0.042
A ₁₆	5	5.168	0.005	5	6.117	0.204	46	45.337	0.010
A ₁₇	41	31.459	2.894	5	5.301	0.017			
A ₁₈				36	29.502	1.431			
	χ^2		69.833**			19.537			28.025**

注: 对“lgN=a-bt”、, A_i={t_i ≤ t < t_{i+1}}, t₁=0, t_{i+1}-t_i=20min, i=1,2,...16; A₁₇={t₁₇ ≤ t < ∞};
 对“N=N₀exp(-(t/C)^K)”, A_i={t_i ≤ t < t_{i+1}}, t₁=0, t_{i+1}-t_i=20min, i=1,2,...17; A₁₈={t₁₈ ≤ t < ∞};
 对“N=N₀exp(-t/T)”, A_i={t_i ≤ t < t_{i+1}}, t₁=0, t_{i+1}-t_i=20min, i=1,2,...15;
 A₁₆={t₁₆ ≤ t < ∞}; 对“lgN=a-bt” $\chi^2_{0.05}(17-2-1) = 23.685$, $\chi^2_{0.01}(17-2-1) = 29.141$; 对
 “N=N₀exp(-(t/C)^K)” , $\chi^2_{0.05}(18-3-1) = 23.685$; 对 “N=N₀exp(-t/T)” ,
 $\chi^2_{0.05}(16-2-1) = 22.362$, $\chi^2_{0.01}(16-2-1) = 27.688$; *显著: 在显著性水平 $\alpha (=0.05)$
 下拒绝 H₀ ($\chi^2_{0.05} \leq \chi^2 \leq \chi^2_{0.01}$); **极显著: 在显著性水平 $\alpha (=0.01)$ 下拒绝 H₀
 ($\chi^2 \geq \chi^2_{0.01}$); 在显著性水平 $\alpha (=0.05)$ 下接受 H₀ ($\chi^2 \leq \chi^2_{0.05}$)

6 LASD 成立条件分析

第二章介绍了 LASD 的原理，LASD 可以从沙尘暴阈值风速的概念模型推导出，第二章介绍的推导过程中沙尘暴阈值风速 V_t 取为常数。本章是令 V_t 取随时间变化的形式，并采用第二章 (2.2) 介绍的模拟的方法，分析 V_t 随时间变化对沙尘暴持续时间累积分布的影响。

第五章证实统计上用 Weibull 分布拟合沙尘暴持续时间的累积分布效果更好。我们猜测它是沙尘暴阈值风速随时间变化造成的。本章的研究内容就是 (1) 检验 V_t 随时间变化是否可以造成用“ $lgN=a-bt$ ”拟合沙尘暴持续时间的累积分布效果下降，并且用 Weibull 分布拟合沙尘暴持续时间的累积分布效果更好；(2) 分析 LASD 成立的条件，对 LASD 的原理进行完善。

6.1 模拟试验

图 2.1 所示力学模型是沙尘暴阈值风速概念模型，即风速 V 超过阈值风速 V_t 沙尘暴就出现（即仅当 $V \geq V_t$ 沙尘暴出现），本章尝试令模型中的 V_t 随时间变化，然后统计分析模型中沙尘暴持续时间的累积分布，来进行验证。

实验信号 V 取为两种，(1) 满足标准正态分布的随机信号（即实验信号 $V \sim N(0,1)$ ），信号长度 $n=50000$ 个，信号由随机函数产生（用 Matlab 软件中的函数 `randn(50000,1)` 生成），图 6.1 为信号的前 200 个；(2) 一次风洞实验的风速信号，信号是热线测风仪约 30 分钟采样的结果，其均值为 1.56m/s，标准差为 0.29m/s，信号长度 $n=27998$ 个，图 6.2 是风速信号的前 200 个，风速信号的步长单位也取为：个。

V_t 取为：

$$V_t = Xr + A \cdot \sin(B \cdot \pi \cdot i/n), \quad i=1, 2, \dots, n \quad (6.1)$$

其中 n 为信号长度， A 、 B 和 Xr 取不同的数值，统计分析模型（图 2.1 所示）中沙尘暴持续时间累积分布。并分别用公式 (1.2) (LASD) 和 (5.1) (Weibull 函数) 拟合模型沙尘暴持续时间累积分布。利用拟合曲线的相关指数 (R^2)^[56] 来比较拟合的效果。对同样数据，相关指数 (R^2) 越大拟合效果越好。

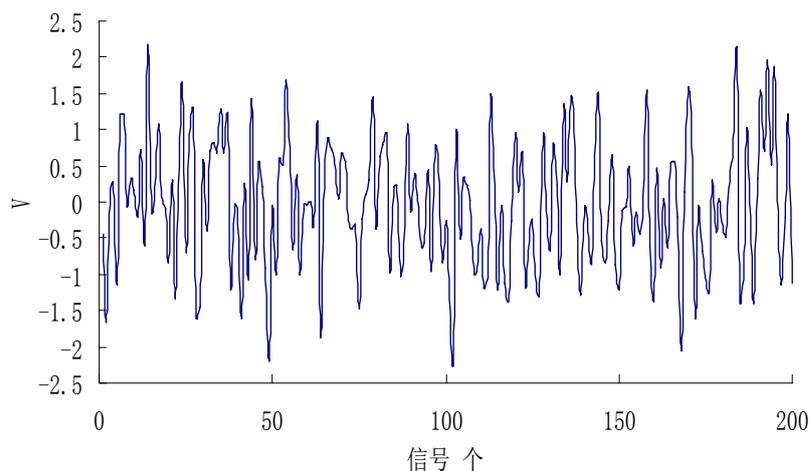


图 6.1 满足标准正态分布的随机信号（实验信号 1 的片段）

Fig. 6.1 A time series of standard normal Gaussian distribution signals (A piece of signal 1)

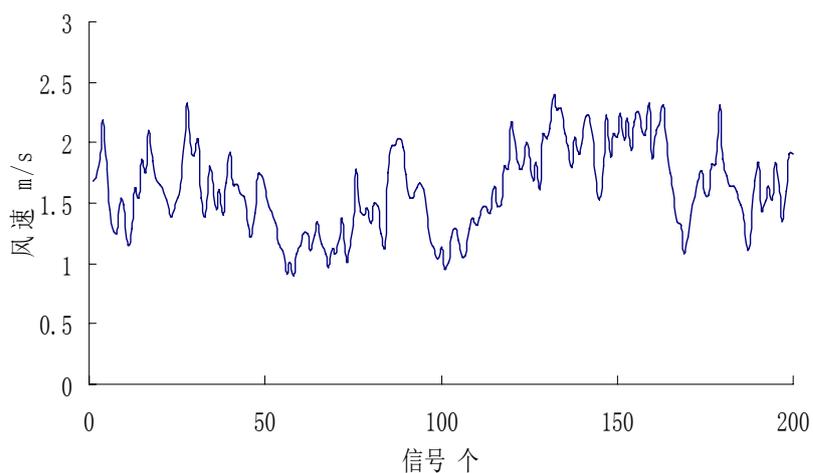


图 6.2 风速信号（实验信号 2 的片段）

Fig. 6.2 A time series of the wind speed signal (A piece of signal 2)

6.2 结果分析

6.2.1 信号 1

对信号 1 进行了 15 次数值试验，表 6.1 为数值试验中 Xr 、 A 和 B 的取值。图 6.3-图 6.17 为这 15 次数值试验的结果。拟合公式 (5.1) 和 (1.2) 中的参数以及拟合相关指数见表 6.2， N_0 对应持续时间大于 1 个的次数，点 $(1, N_0)$ 不参与拟合， T 为平

均持续时间, $R_{weibull}^2$ 和 R_{LH}^2 为对应用公式 (5.1) 和 (1.2) 拟合的拟合相关指数。拟合时剔除 $N(t)/N_0 \leq 0.01\%$ 的资料。

(1) 从拟合相关指数看, 只有编号为 (1)、(2) 和 (6), R_{LH}^2 大于 $R_{weibull}^2$, 差的最大值为 0.0115, 其余 R_{LH}^2 均小于 $R_{weibull}^2$ 。对试验编号 (3)、(5)、(8)、(10)、(12)、(14) 和 (15) 相关指数差别较大, $R_{weibull}^2 - R_{LH}^2 > 0.1$ 。数值试验支持 Vt 随时间变化, 沙尘暴持续时间累积分布用公式(5.1)(Weibull 分布)拟合效果优于公式(1.2) (LASD), 如对编号为 (1)、(2) 和 (3) 的三次数值试验, Vt 分别为: 常数 0 和随时间变化的 $\sin(w)$ 和 $\sin(5w)$, 对应 $R_{LH}^2 - R_{weibull}^2$ 依次: 为 0.0115、0.0047 和 -0.5249, 也即 Vt 随时间变化, 存在沙尘暴持续时间累积分布用公式 (5.1) (Weibull 分布) 的拟合效果优于公式 (1.2) (LASD)。

(2) 对 $Vt=0.6$ 时的结果, 尽管公式 (1.2) ($\lg N=a-bt$, 即 LASD) 是理论推导的结果, 但 $R_{weibull}^2=0.9756 > R_{LH}^2=0.9631$ 。比较合理的解释是误差覆盖了拟合指数的差别, 据此如果拟合指数存在较小差别时, 此时只凭拟合指数 R^2 不能确定 Weibull 函数和 LASD 对描述沙尘暴持续时间累积分布孰优孰劣。

(3) 从 b 值看, $Vt=0$ 、0.2 和 0.6 时, 对应值 b 为: 0.3024、0.3750 和 0.4877, 而利用公式 (2.13) 计算的理论值分别为: 0.3010、0.3760 和 0.5618。 $Vt=0$ 和 0.2 模拟计算的 b 误差很小 (误差/理论值 $< 0.4\%$), $Vt=0.6$ 数值模拟计算的 b 值误差较大, 误差/理论值=13.2%, 不排除 $Xt=0.6$ 的 5 次数值试验 (11、12、13、14 和 15) 误差均较大。

(4) Vt 不随时间变化时, b 随 Vt 增大而增大, 但也可以发现 Vt 随时间变化也可以导致 b 值增加, 如试验 (2) 和 (4) (对应 Vt 为 $\sin(w)$ 和 $2\sin(w)$, R_{LH}^2 都较大分别为 0.9818 和 0.9480), b 值为 0.4066 和 0.3722, 大于试验 (1) ($Vt=0$) 的 b 值 (0.3024)。数值试验表明 b 值的大小不仅受 Vt 均值变化的影响, 还受 Vt 变化影响。依据实际沙尘暴资料分析, 以往一直认为 b 值较大对应沙尘暴阈值风速也较大, 数值试验表明这个结论不全面, 部分 b 值较大可能是沙尘暴阈值风速变化所致。

(5) Vt 不随时间变化时的 3 个试验 (即 1、6、11), $Vt=0$ 、0.2 和 0.6, 除了 b 随 Vt 增大而增大, K 接近常数=1.3, C/T 接近常数 1.2, N_0 、 T 随 Vt 的增大而减小。

(6) K 接近常数=1 且 C/T 接近常数 1, Weibull 分布也即指数分布 ($N=N_0 \exp(-t/T)$), 从表 6.2 的参数可以发现, 存在 $K \approx 1$ 且 $C/T \approx 1$, 如试验 (4) ($Vt=2\sin(w)$, $K=1.0934$, $C/T=0.9830$) 和试验 (13) ($Vt=0.6+\sin(5w)$, $K=0.9957$, $C/T=1.0152$), 这两个实验 K 和 C/T 很接近 1。

(7) V_t 随时间变化的 12 个数值试验，基本上 K 、 C/T 、 a 和 b 随 V_t 的频率 (B) 和振幅 (A) 增加而减小。试验 12 和 13 (对应 $V_t = 0.6 + \sin(w)$ 和 $V_t = 0.6 + \sin(5w)$) 出现的例外 ($B=1$ 时 $C/T=0.8050$ ，而 $B=5$ 时 $C/T=1.0152$ ，即较大 B 对应较大 C/T ，此时 a 也有类似问题)，可能是 V_t 的变化对 K 、 C/T 、 a 和 b 的影响比较复杂，也不排除是 $X_r=0.6$ 时误差较大所致。

(8) 如果满足指数分布 ($N=N_0 \exp(-t/T)$)， T 和 b 应该近似反比关系，图 6.18 是上述 15 次试验的 b 与 $1/T$ ， b 与 $1/T$ 的相关系数 $R=0.9446 > R_{0.05}=0.5140$ (自由度 $n=15-1-1$)，相关性显著。因此用沙尘暴平均持续时间 T 的函数计算 b 值 (如 $b=a_1 + b_1/T$ 的形式)，反映沙尘暴阈值风速的特征，在实践上是可以考虑的。

表 6.1 参数 X_r 、 A 和 B 的取值

Table 6.1 Values of X_r , A and B for the numerical experiments

X_r	A	B	$V_t = X_r + A \sin(Bw)$	试验编号
	0	—	0	(1)
0	1	1	$\sin(w)$	(2)
		5	$\sin(5w)$	(3)
	2	1	$2\sin(w)$	(4)
		5	$2\sin(5w)$	(5)
0.2	0	—	0.2	(6)
	1	1	$0.2 + \sin(w)$	(7)
		5	$0.2 + \sin(5w)$	(8)
	2	1	$0.2 + 2\sin(w)$	(9)
		5	$0.2 + 2\sin(5w)$	(10)
	0	—	0.6	(11)
0.6	1	1	$0.6 + \sin(w)$	(12)
		5	$0.6 + \sin(5w)$	(13)
	2	1	$0.6 + 2\sin(w)$	(14)
		5	$0.6 + 2\sin(5w)$	(15)

注: $w = \pi i / 50000, i=1, 2, \dots, 50000$

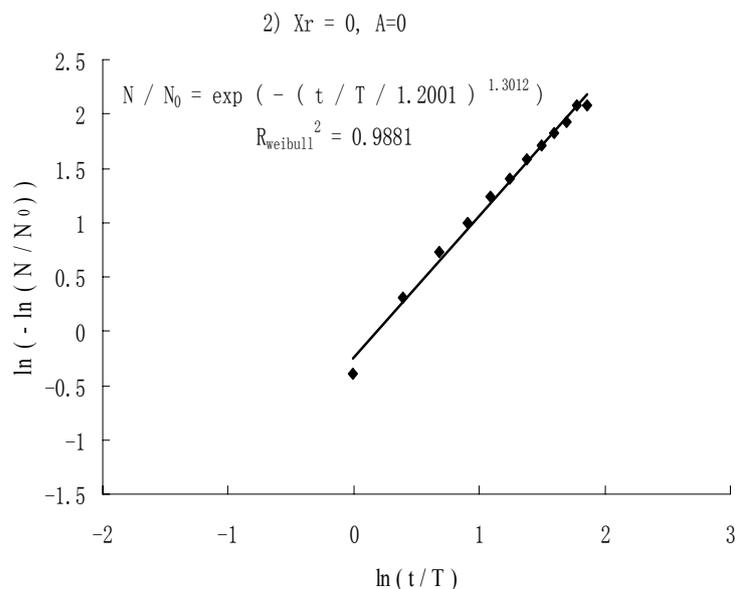
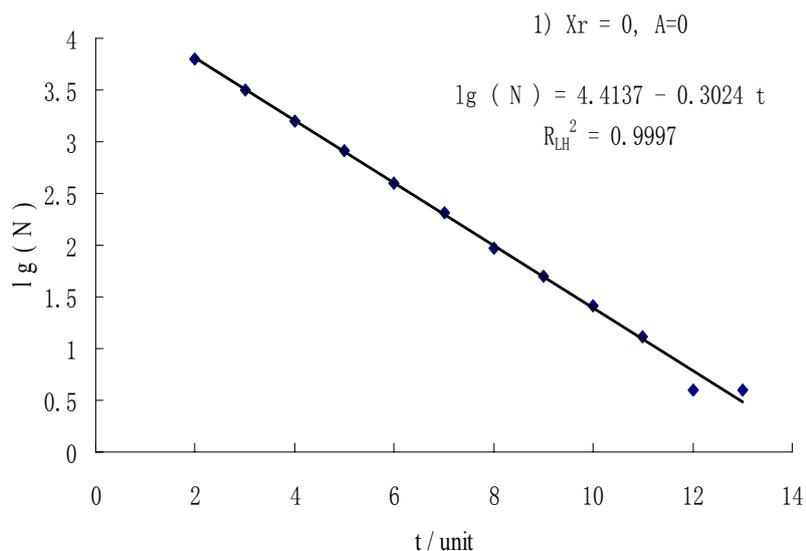


图 6.3 试验(1)的结果(图 2.1 模型中 N 与 t 的关系,模型中 $Vt=Xr+Asin(B\pi i/50000)$, $i=1,2,\dots,50000$, $X_r=0, A=0$; $V \sim N(0,1)$ (即信号 1)。使用同样的数据绘制, 1): 公式 (1.2) 拟合; 2): 公式 (5.1) 拟合, $T=2.0235$ 个, $N_0=12452$)

Fig. 6.3 Results of experiment (1) (Analysing results of N vures t for the model in Fig. 2.1 (in the model Vt is equal to $Xr+Asin(B\pi i/50000)$, $i=1, 2, \dots, 50000$ ($X_r=0, A=0$) and $V \sim N(0,1)$ (i.e. signal 1). 1) and 2) show the same data plotted with different values on the axes; 1): regressed with Eq. (1.2), 2): regressed with Eq. (5.1), with $T=2.0235$ Unit and $N_0=12452$)

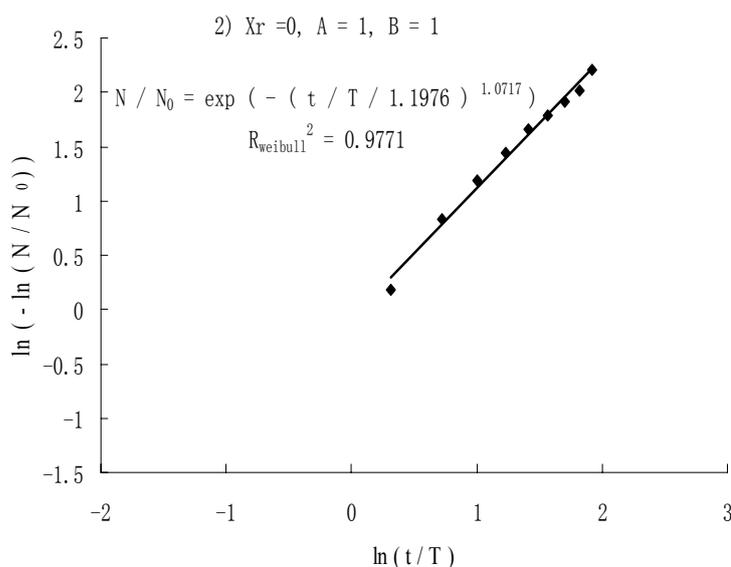
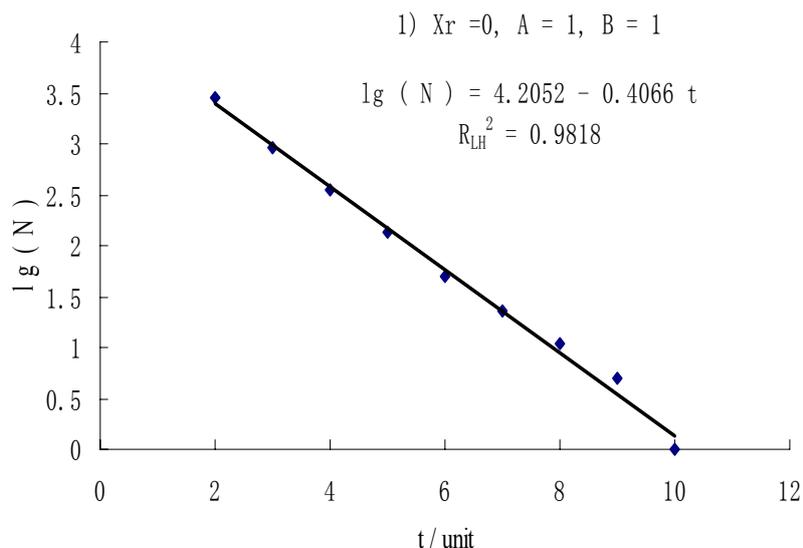


图 6.4 试验(2)的结果(图 2.1 模型中 N 与 t 的关系, 模型中 $Vt = Xr + A \sin(B\pi i / 50000)$, $i = 1, 2, \dots, 50000$, $Xr = 0$, $A = 1$, $B = 1$; $V \sim N(0, 1)$ (即信号 1)。使用同样的数据绘制, 1): 公式 (1.2) 拟合; 2): 公式 (5.1) 拟合, $T = 1.4634$ 个, $N_0 = 9344$)

Fig. 6.4 Results of experiment (2) (Analysing results of N vures t for the model in Fig. 2.1 (in the model Vt is equal to $Xr + A \sin(B\pi i / 50000)$, $i = 1, 2, \dots, 50000$ ($Xr = 0$, $A = 1$, $B = 1$) and $V \sim N(0, 1)$ (i.e. signal 1). 1) and 2) show the same data plotted with different values on the axes; 1): regressed with Eq. (1.2), 2): regressed with Eq. (5.1), with $T = 1.4634$ unit, $N_0 = 9344$)

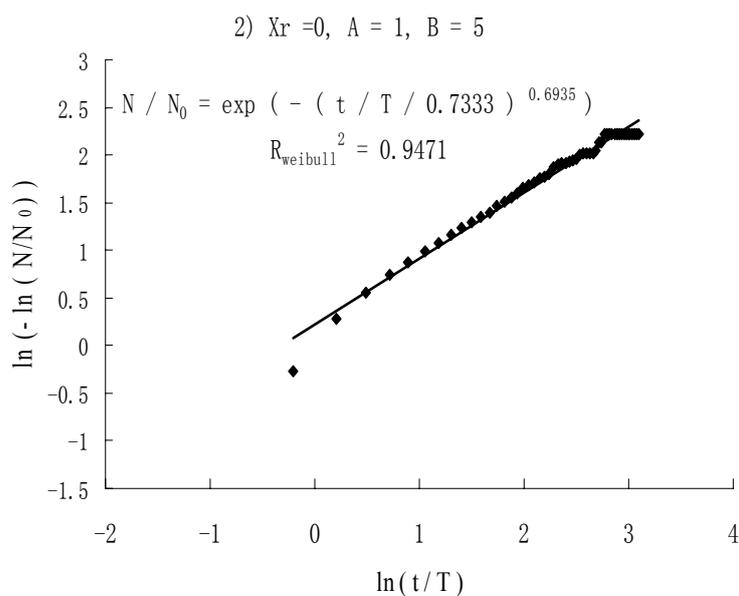
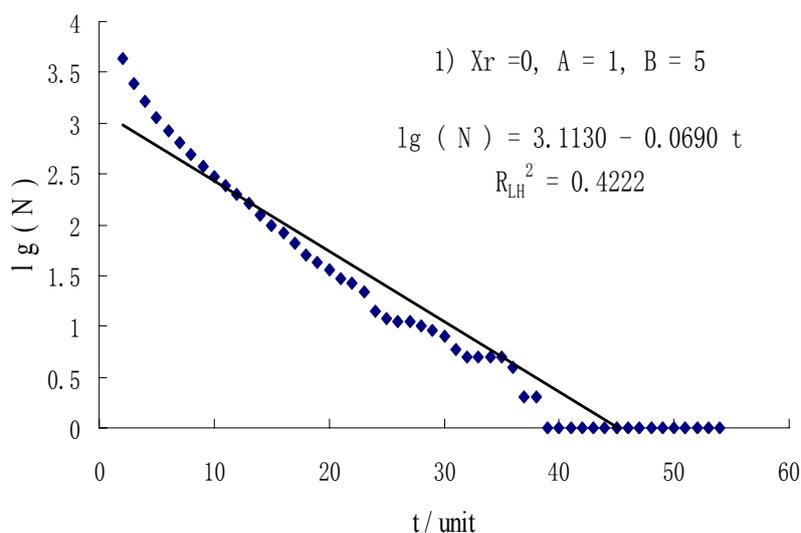


图 6.5 试验(3)的结果(图 2.1 模型中 N 与 t 的关系, 模型中 $Vt = Xr + A \sin(B\pi i / 50000)$, $i = 1, 2, \dots, 50000$, $Xr = 0$, $A = 1$, $B = 5$; $V \sim N(0, 1)$ (即信号 1)。使用同样的数据绘制, 1): 公式 (1.2) 拟合; 2): 公式 (5.1) 拟合, $T = 2.4507$ 个, $N_0 = 9348$)

Fig. 6.5 Results of experiment (3) (Analysing results of N vures t for the model in Fig. 2.1 (in the model Vt is equal to $Xr + A \sin(B\pi i / 50000)$, $i = 1, 2, \dots, 50000$ ($Xr = 0$, $A = 1$, $B = 5$) and $V \sim N(0, 1)$ (i.e. signal 1). 1) and 2) show the same data plotted with different values on the axes; 1): regressed with Eq. (1.2), 2): regressed with Eq. (5.1), with $T = 2.4507$ unit, $N_0 = 9348$)

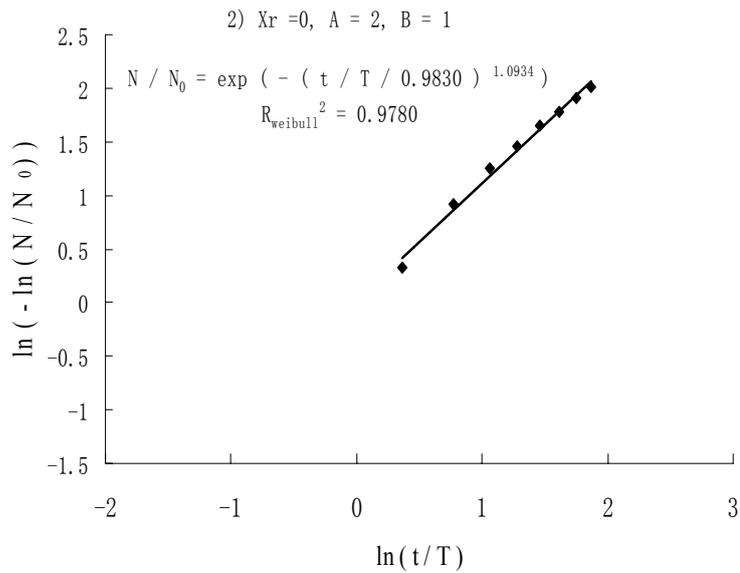
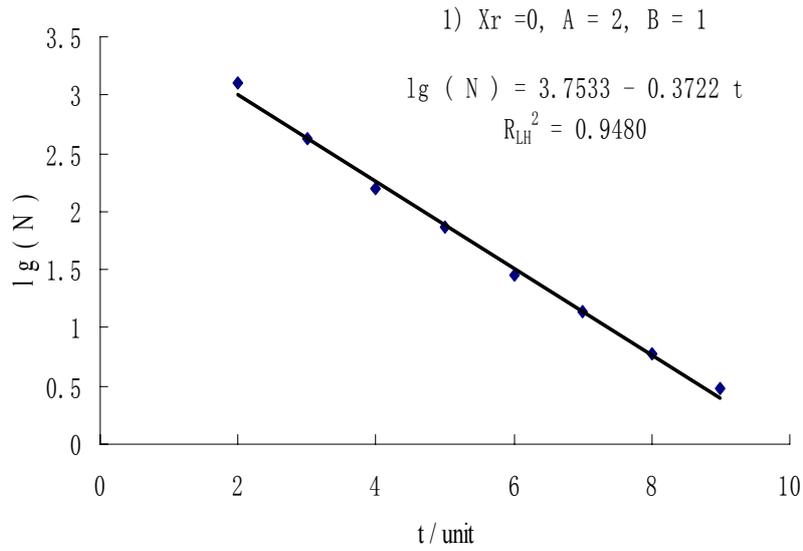


图 6.6 试验(4)的结果(图2.1模型中 N 与 t 的关系,模型中 $Vt=Xr+Asin(B\pi i/50000)$, $i=1,2,\dots,50000$, $Xr=0$, $A=2$, $B=1$; $V \sim N(0,1)$ (即信号 1)。使用同样的数据绘制, 1): 公式 (1.2) 拟合; 2): 公式 (5.1) 拟合, $T=1.3873$ 个, $N_0=5154$)

Fig. 6.6 Results of experiment (4) (Analysing results of N vures t for the model in Fig. 2.1 (in the model Vt is equal to $Xr+Asin(B\pi i/50000)$, $i=1, 2,\dots,50000$ ($Xr=0$, $A=2$, $B=1$) and $V \sim N(0,1)$ (i.e. signal 1). 1) and 2) show the same data plotted with different values on the axes; 1): regressed with Eq. (1.2), 2): regressed with Eq. (5.1), with $T=1.3873$ unit, $N_0=5154$)

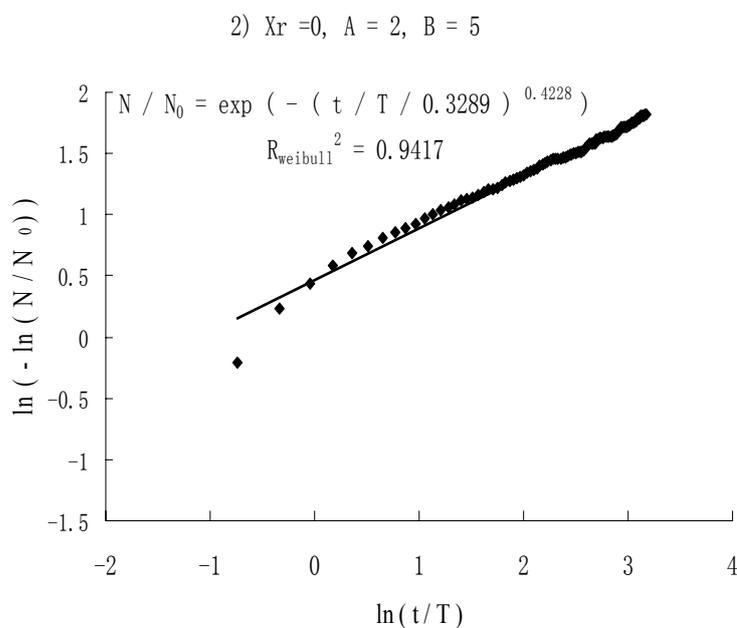
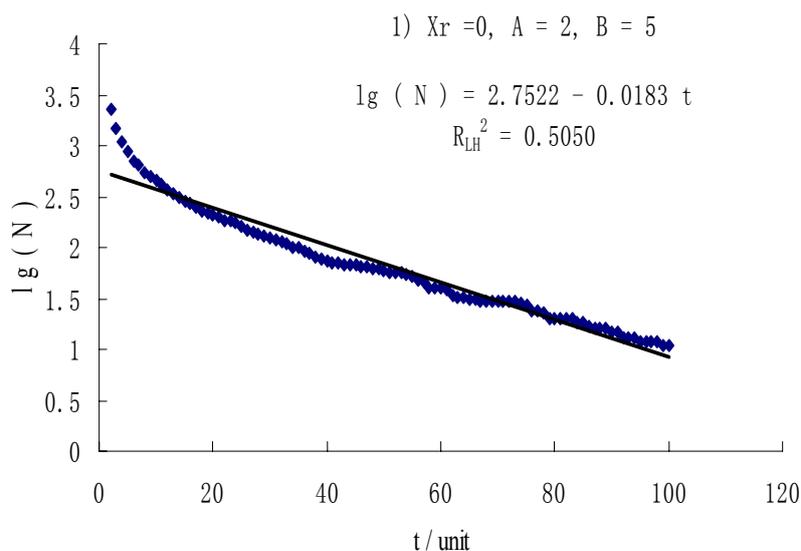


图 6.7 试验(5)的结果(图 2.1 模型中 N 与 t 的关系, 模型中 $Vt = X_r + A \sin(B\pi i/50000)$, $i=1, 2, \dots, 50000$, $X_r=0$, $A=2$, $B=5$; $V \sim N(0,1)$ (即信号 1)。使用同样的数据绘制, 1): 公式 (1.2) 拟合; 2): 公式 (5.1) 拟合, $T=4.1799$ 个, $N_0=5153$)

Fig. 6.7 Results of experiment (5) (Analysing results of N vures t for the model in Fig. 2.1 (in the model Vt is equal to $X_r + A \sin(B\pi i/50000)$, $i=1, 2, \dots, 50000$ ($X_r=0$, $A=2$, $B=5$) and $V \sim N(0,1)$ (i.e. signal 1). 1) and 2) show the same data plotted with different values on the axes; 1): regressed with Eq. (1.2), 2): regressed with Eq. (5.1), with $T=4.1799$ unit, $N_0=5153$)

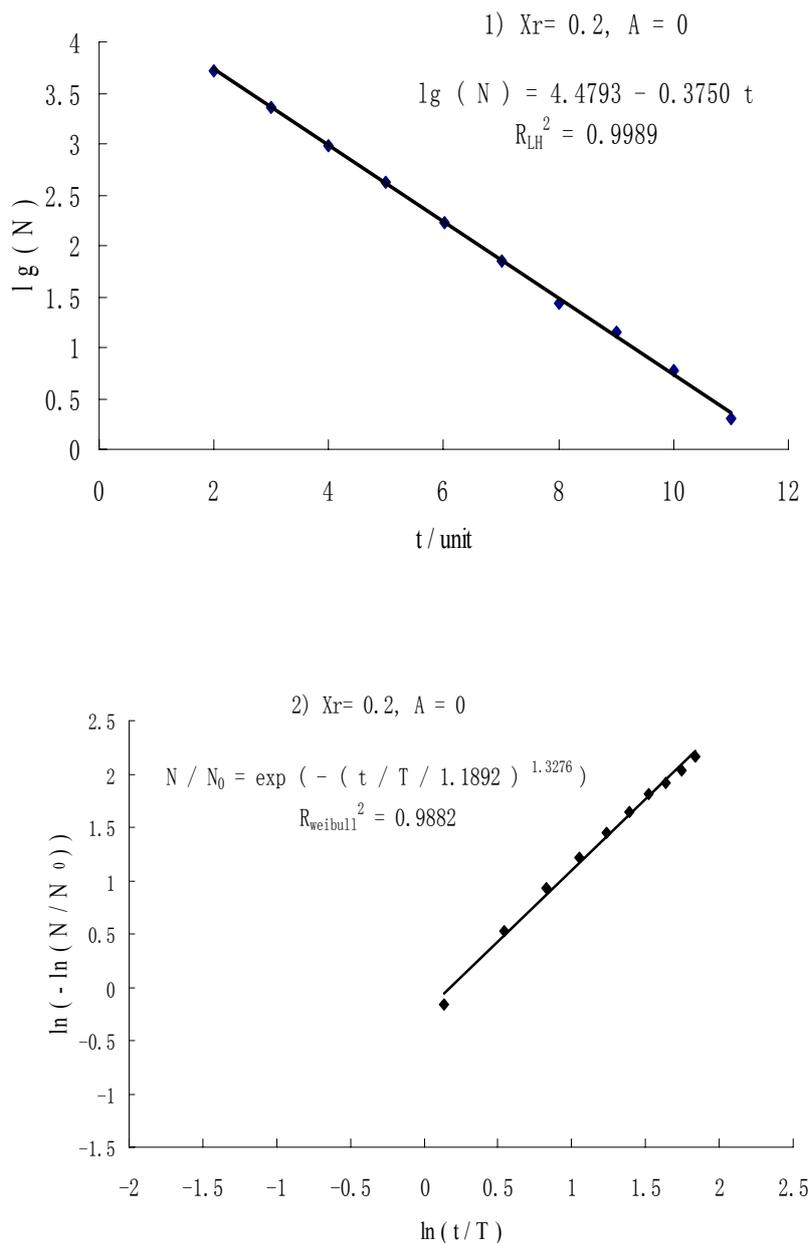


图 6.8 试验(6)的结果(图 2.1 模型中 N 与 t 的关系,模型中 $Vt=X_r+Asin(B\pi i/50000)$, $i=1,2,\dots,50000$, $X_r=0.2, A=0$; $V \sim N(0,1)$ (即信号 1)。使用同样的数据绘制, 1): 公式 (1.2) 拟合; 2): 公式 (5.1) 拟合, $T=1.7491$ 个, $N_0=12166$)

Fig. 6.8 Results of experiment (6) (Analysing results of N vures t for the model in Fig. 2.1 (in the model Vt is equal to $X_r+Asin(B\pi i/50000)$, $i=1, 2, \dots, 50000$ ($X_r=0.2, A=0$) and $V \sim N(0,1)$ (i.e. signal 1). 1) and 2) show the same data plotted with different values on the axes; 1): regressed with Eq. (1.2), 2): regressed with Eq. (5.1), with $T=1.7491$ unit, $N_0=12166$)

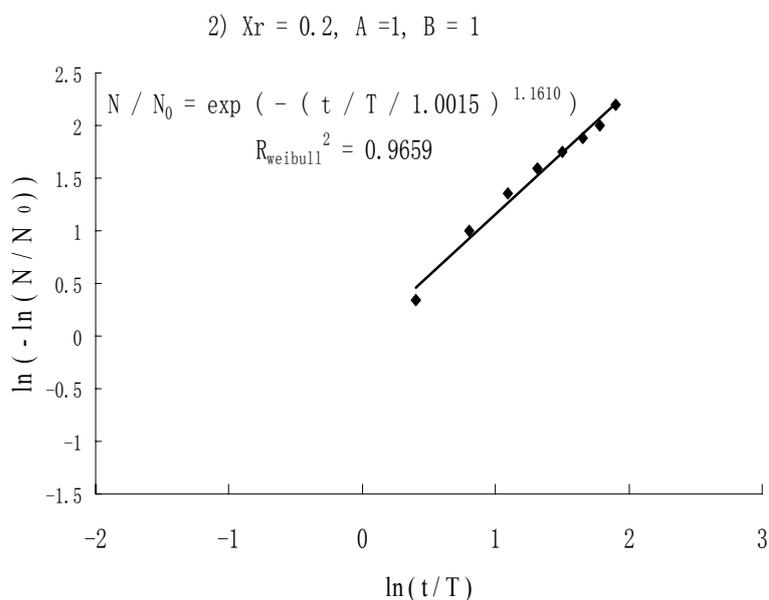
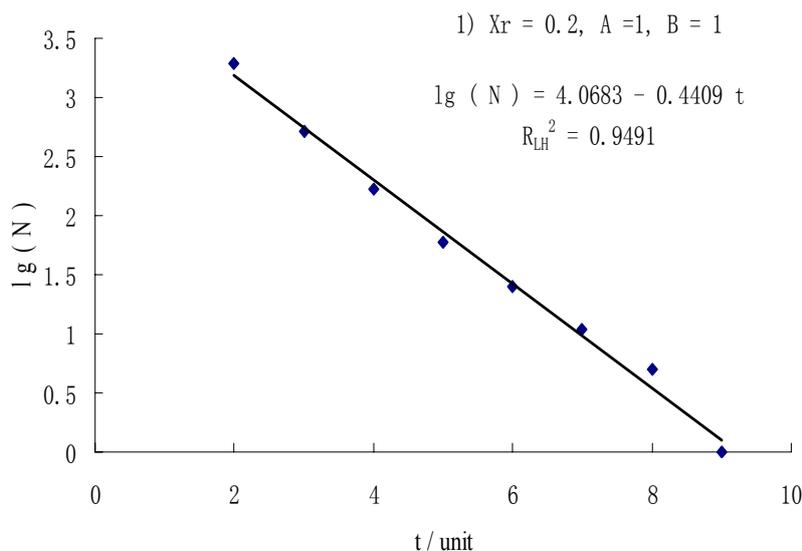


图 6.9 试验(7)的结果(图 2.1 模型中 N 与 t 的关系, 模型中 $Vt = Xr + A \sin(B\pi i / 50000)$, $i = 1, 2, \dots, 50000$, $Xr = 0.2$, $A = 1$, $B = 1$; $V \sim N(0, 1)$ (即信号 1)。使用同样的数据绘制, 1): 公式 (1.2) 拟合; 2): 公式 (5.1) 拟合, $T = 1.3421$ 个, $N_0 = 7962$)

Fig. 6.9 Results of experiment (7) (Analysing results of N vures t for the model in Fig. 2.1 (in the model Vt is equal to $Xr + A \sin(B\pi i / 50000)$, $i = 1, 2, \dots, 50000$ ($Xr = 0.2$, $A = 1$, $B = 1$) and $V \sim N(0, 1)$ (i.e. signal 1). 1) and 2) show the same data plotted with different values on the axes; 1): regressed with Eq.

(1.2), 2): regressed with Eq. (5.1), with $T = 1.3421$ unit, $N_0 = 7962$)

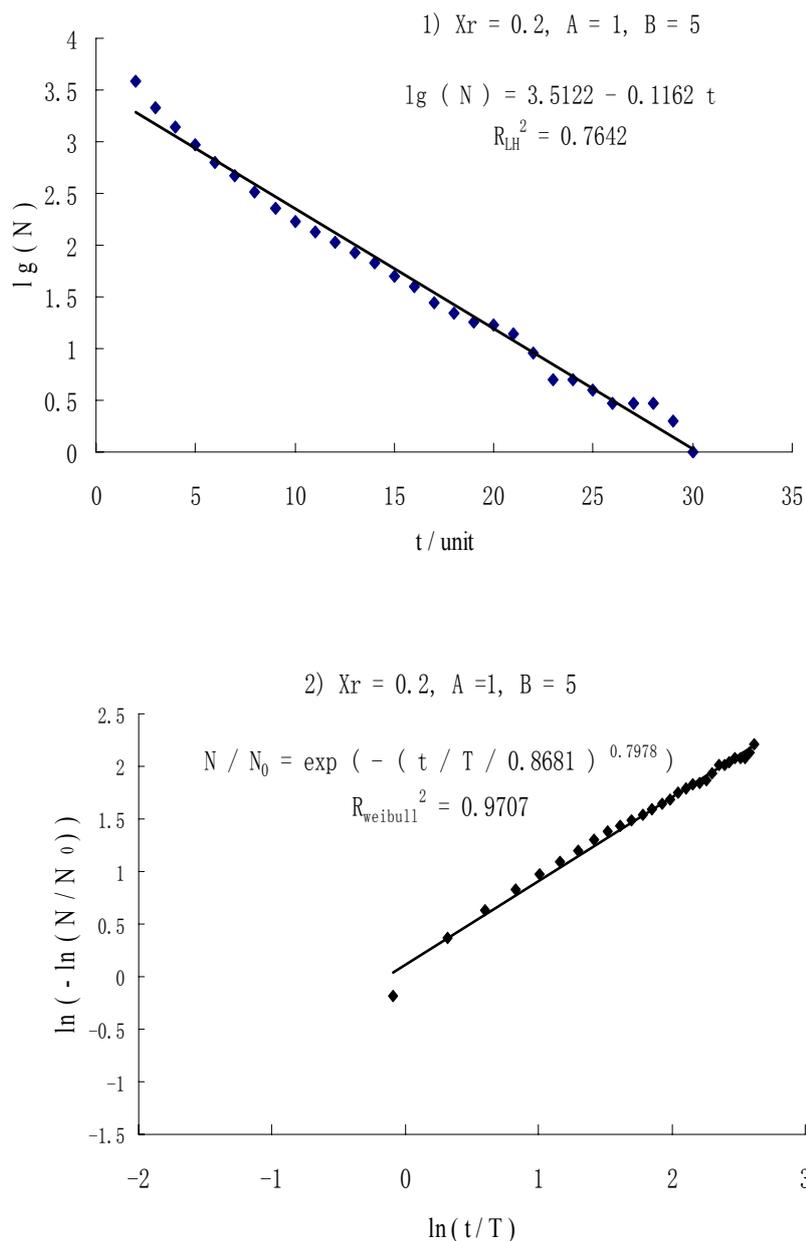


图 6.10 试验(8)的结果(图 2.1 模型中 N 与 t 的关系, 模型中 $Vt = X_r + A \sin(B\pi i / 50000), i = 1, 2, \dots, 50000$, $X_r = 0.2, A = 1, B = 5; V \sim N(0, 1)$ (即信号 1)。使用同样的数据绘制, 1): 公式 (1.2) 拟合; 2): 公式 (5.1) 拟合, $T = 2.1936$ 个, $N_0 = 9040$)

Fig. 6.10 Results of experiment (8) (Analysing results of N vures t for the model in Fig. 2.1 (in the model Vt is equal to $X_r + A \sin(B\pi i / 50000), i = 1, 2, \dots, 50000$ ($X_r = 0.2, A = 1, B = 5$) and $V \sim N(0, 1)$ (i.e. signal 1). 1) and 2) show the same data plotted with different values on the axes; 1): regressed with Eq. (1.2), 2): regressed with Eq. (5.1), with $T = 2.1936$ unit, $N_0 = 9040$)

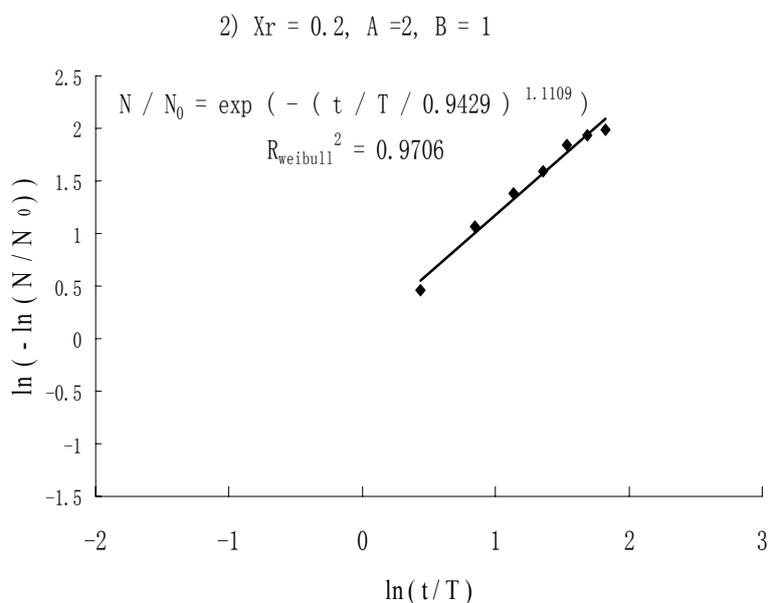
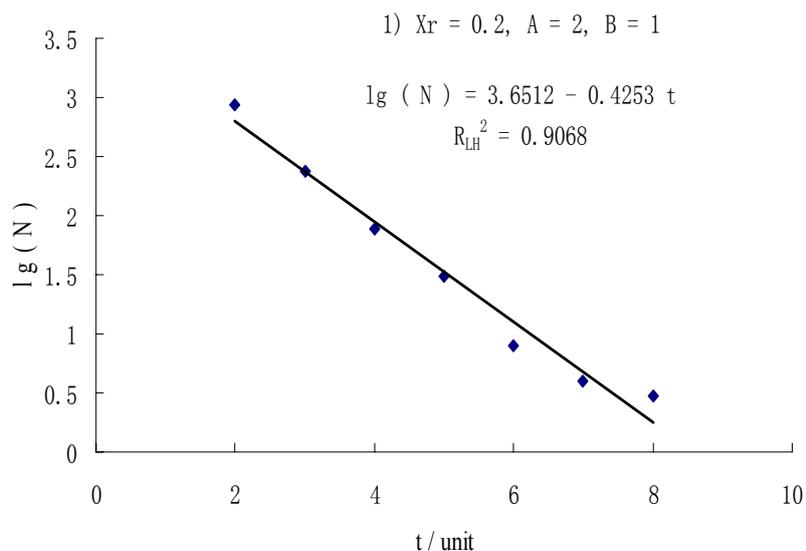


图6.11 试验(9)的结果(图2.1模型中 N 与 t 的关系,模型中 $Vt=Xr+Asin(B\pi i/50000), i=1,2,\dots,50000$,
 $X_r=0.2, A=2, B=1; V \sim N(0,1)$ (即信号1)。使用同样的数据绘制, 1): 公式(1.2)拟合; 2):
 公式(5.1)拟合, $T=1.2906$ 个, $N_0=4223$)

Fig. 6.11 Results of experiment (9) (Analysing results of N vures t for the model in Fig. 2.1 (in the model Vt is equal to $Xr+Asin(B\pi i/50000), i=1, 2, \dots, 50000$ ($X_r=0.2, A=2, B=1$) and $V \sim N(0,1)$ (i.e. signal 1). 1) and 2) show the same data plotted with different values on the axes; 1): regressed with Eq. (1.2), 2): regressed with Eq. (5.1), with $T=1.2906$ unit, $N_0=4223$)

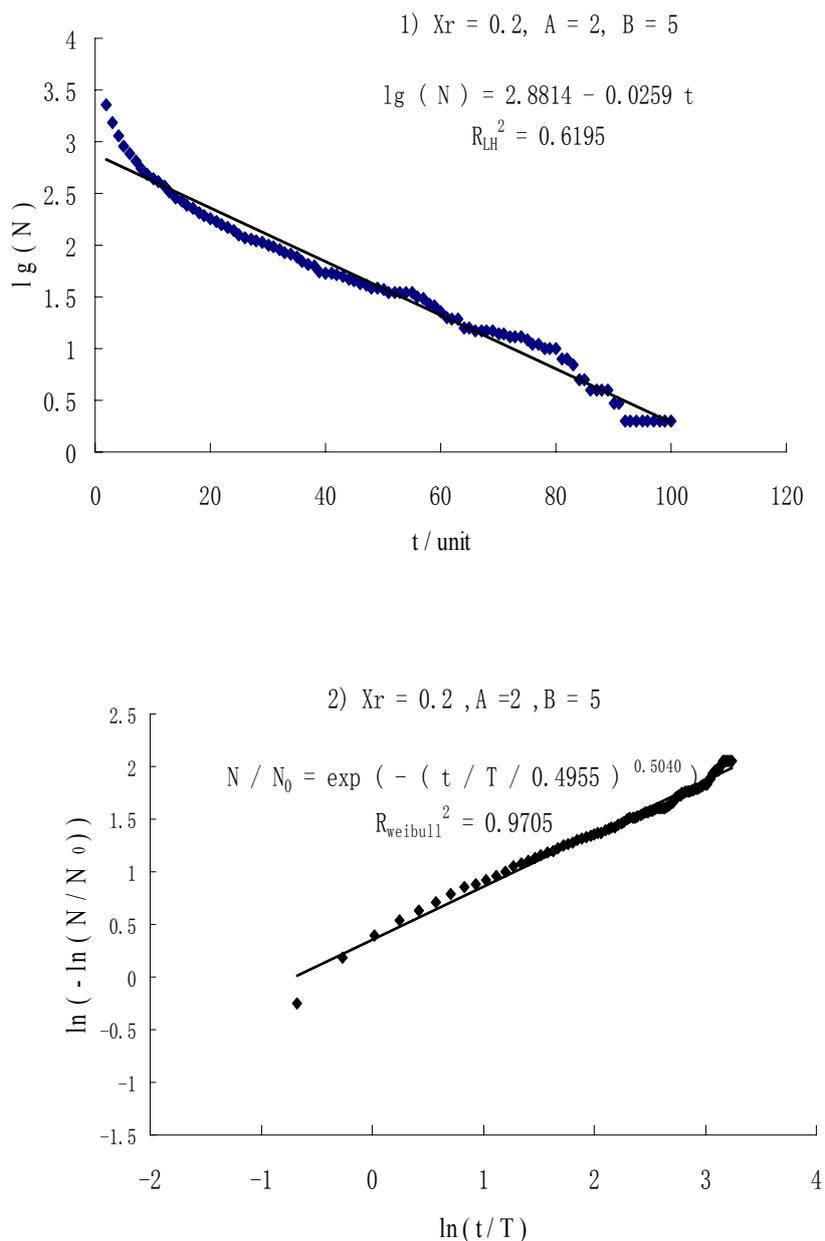


图 6.12 试验 (10) 的结果 (图 2.1 模型中 N 与 t 的关系, 模型中 $Vt=Xr+Asin(B\pi i/50000)$, $i=1,2,\dots,50000, X_r=0.2, A=2, B=5; V \sim N(0,1)$ (即信号 1)。使用同样的数据绘制, 1): 公式 (1.2) 拟合; 2): 公式 (5.1) 拟合, $T=3.9270$ 个, $N_0=5014$)

Fig. 6.12 Results of experiment (10) (Analysing results of N vures t for the model in Fig. 2.1 (in the model Vt is equal to $Xr+Asin(B\pi i/50000)$, $i=1, 2, \dots, 50000$ ($X_r=0.2, A=2, B=5$) and $V \sim N(0,1)$ (i.e. signal 1). 1) and 2) show the same data plotted with different values on the axes; 1): regressed with Eq. (1.2), 2): regressed with Eq. (5.1), with $T=3.9270$ unit, $N_0=5014$)

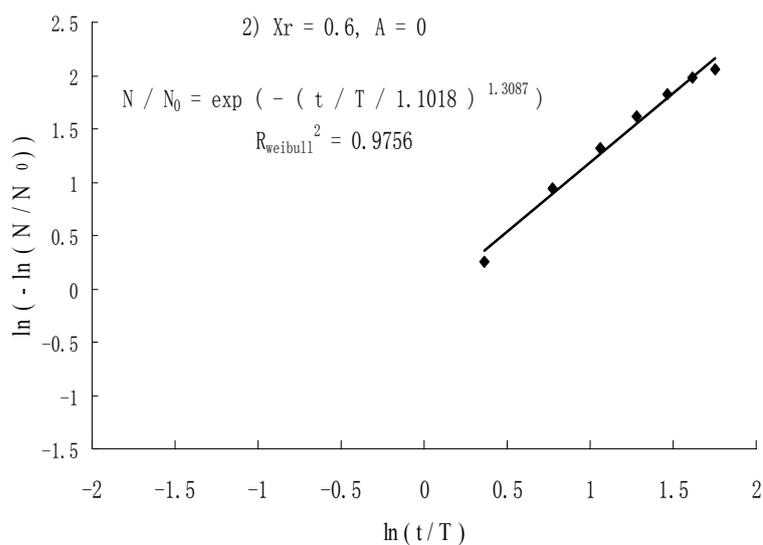
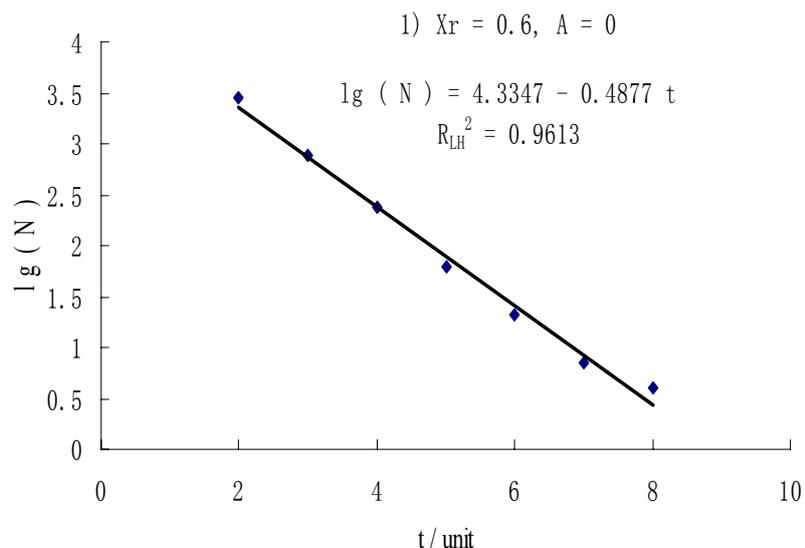


图 6.13 试验 (11) 的结果 (图 2.1 模型中 N 与 t 的关系, 模型中 $Vt=Xr+Asin(B\pi i/50000)$, $i=1,2,\dots,50000$, $Xr=0.6$, $A=0$; $V \sim N(0,1)$ (即信号 1)。使用同样的数据绘制, 1): 公式 (1.2) 拟合; 2): 公式 (5.1) 拟合, $T=1.3864$ 个, $N_0=10023$)

Fig. 6.13 Results of experiment (11) (Analysing results of N vures t for the model in Fig. 2.1 (in the model Vt is equal to $Xr+Asin(B\pi i/50000)$, $i=1, 2, \dots, 50000$ ($Xr=0.6$, $A=0$) and $V \sim N(0,1)$ (i.e. signal

1). 1) and 2) show the same data plotted with different values on the axes; 1): regressed with Eq.

(1.2), 2): regressed with Eq. (5.1), with $T=1.3864$ unit, $N_0=10023$)

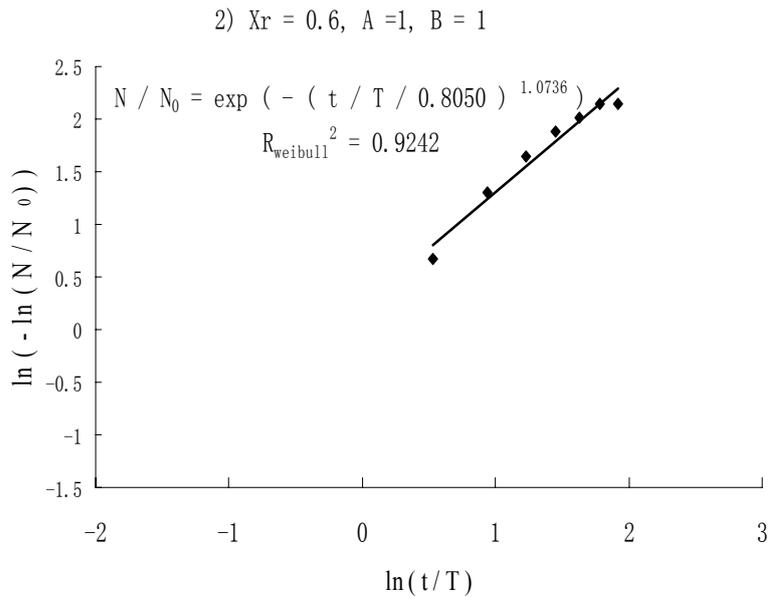
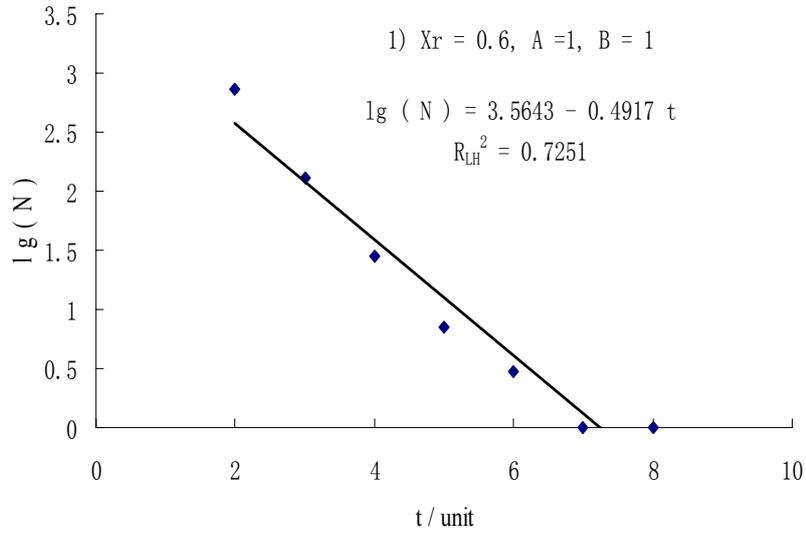


图 6.14 试验 (12) 的结果 (图 2.1 模型中 N 与 t 的关系, 模型中 $Vt=Xr+Asin(B\pi i/50000)$, $i=1,2,\dots,50000$, $Xr=0.6$, $A=1$, $B=1$; $V \sim N(0,1)$ (即信号 1)。使用同样的数据绘制, 1): 公式 (1.2) 拟合; 2): 公式 (5.1) 拟合, $T=1.1743$ 个, $N_0=5118$)

Fig. 6.14 Results of experiment (12) (Analysing results of N vures t for the model in Fig. 2.1 (in the model Vt is equal to $Xr+Asin(B\pi i/50000)$, $i=1, 2, \dots, 50000$ ($Xr=0.6$, $A=1$, $B=1$) and $V \sim N(0,1)$ (i.e. signal 1). 1) and 2) show the same data plotted with different values on the axes; 1): regressed with Eq. (1.2), 2): regressed with Eq. (5.1), with $T=1.1743$ unit, $N_0=5118$)

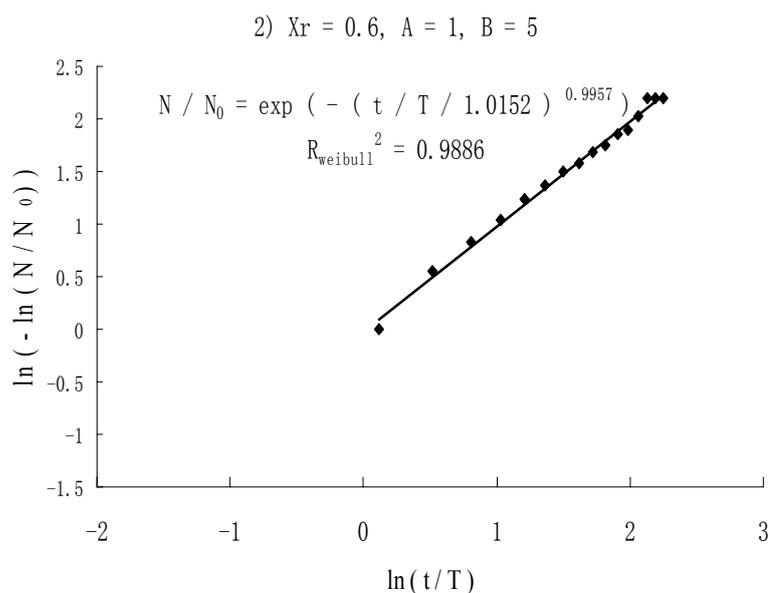
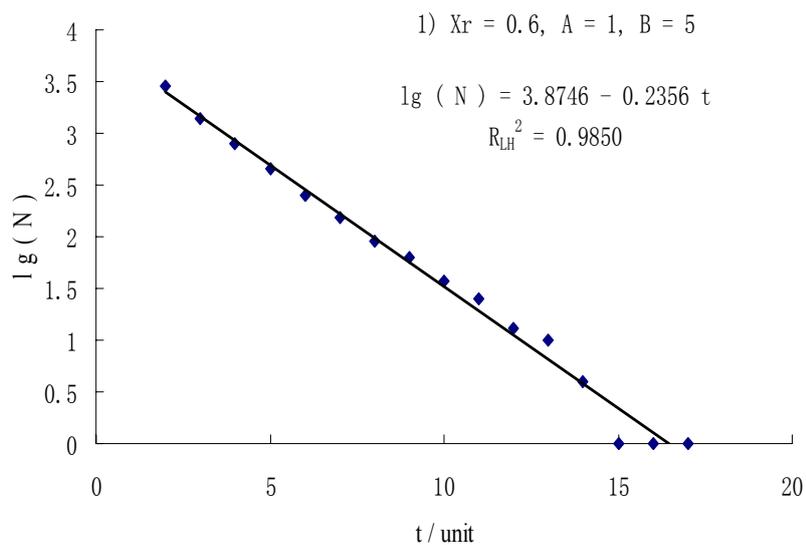


图 6.15 试验 (13) 的结果 (图 2.1 模型中 N 与 t 的关系, 模型中 $Vt = X_r + A \sin(B\pi i/50000)$, $i=1, 2, \dots, 50000$, $X_r=0.6, A=1, B=5$; $V \sim N(0,1)$ (即信号 1)。使用同样的数据绘制, 1): 公式 (1.2) 拟合; 2): 公式 (5.1) 拟合, $T=1.7860$ 个, $N_0=7823$)

Fig. 6.15 Results of experiment (13) (Analysing results of N vures t for the model in Fig. 2.1 (in the model Vt is equal to $X_r + A \sin(B\pi i/50000)$, $i=1, 2, \dots, 50000$ ($X_r=0.6, A=1, B=5$) and $V \sim N(0,1)$ (i.e. signal 1). 1) and 2) show the same data plotted with different values on the axes; 1): regressed with Eq. (1.2), 2): regressed with Eq. (5.1), with $T=1.7860$ unit, $N_0=7823$)

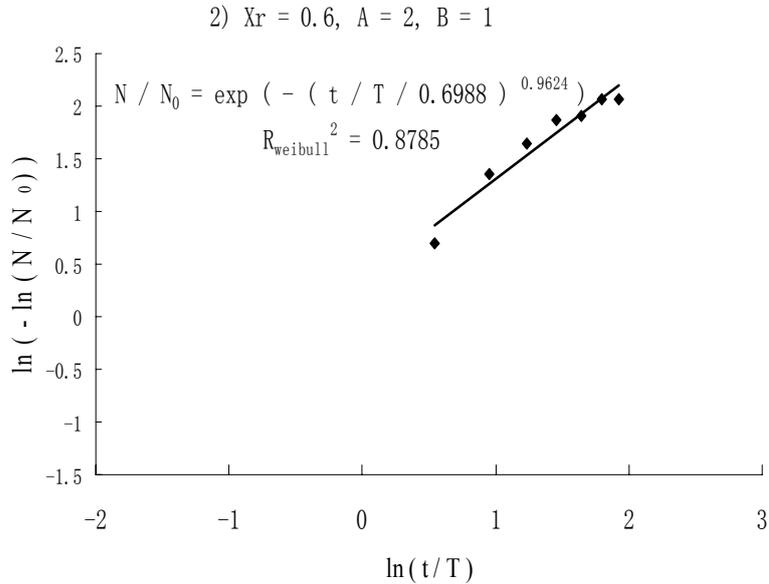
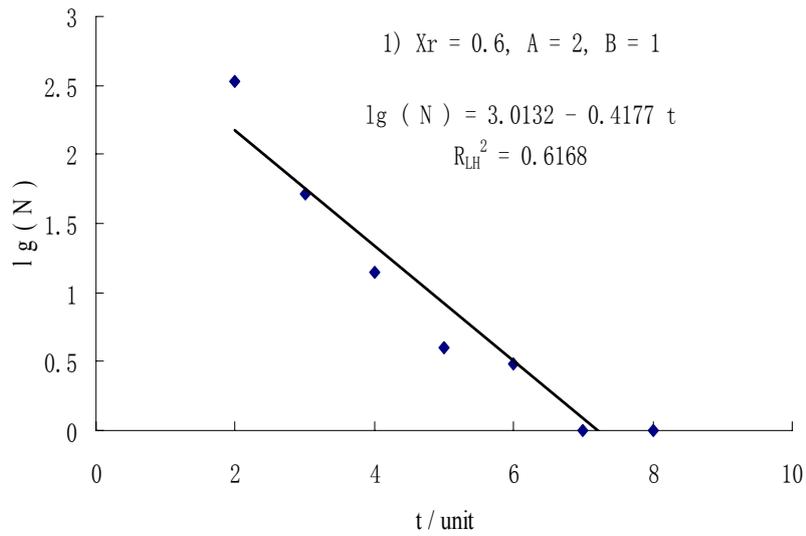


图 6.16 试验 (14) 的结果 (图 2.1 模型中 N 与 t 的关系, 模型中 $Vt=Xr+Asin(B\pi/50000)$, $i=1,2,\dots,50000$, $Xr=0.6$, $A=2$, $B=1$; $V \sim N(0,1)$ (即信号 1)。使用同样的数据绘制, 1): 公式 (1.2) 拟合; 2): 公式 (5.1) 拟合, $T=1.1624$ 个, $N_0=2556$)

Fig. 6.16 Results of experiment (14) (Analysing results of N vures t for the model in Fig. 2.1 (in the model Vt is equal to $Xr+Asin(B\pi/50000)$, $i=1, 2, \dots, 50000$ ($Xr=0.6$, $A=2$, $B=1$) and $V \sim N(0,1)$ (i.e. signal 1). 1) and 2) show the same data plotted with different values on the axes; 1): regressed with Eq. (1.2), 2): regressed with Eq. (5.1), with $T=1.1624$ unit, $N_0=2556$)

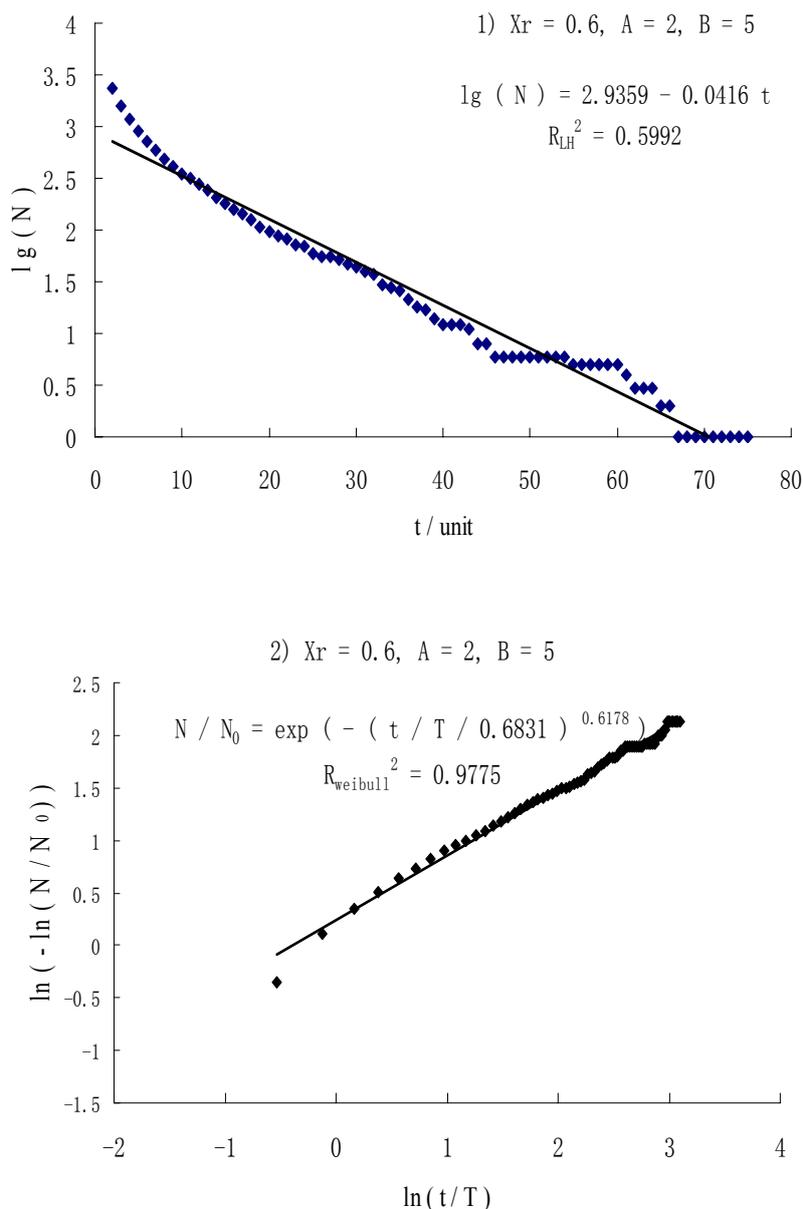


图 6.17 试验 (15) 的结果 (图 2.1 模型中 N 与 t 的关系, 模型中 $Vt = X_r + A \sin(B\pi i / 50000)$, $i=1, 2, \dots, 50000$, $X_r=0.6$, $A=2$, $B=5$; $V \sim N(0, 1)$ (即信号 1)。使用同样的数据绘制, 1): 公式 (1.2) 拟合; 2): 公式 (5.1) 拟合, $T=3.4044$ 个, $N_0=4758$)

Fig. 6.17 Results of experiment (15) (Analysing results of N vures t for the model in Fig. 2.1 (in the model Vt is equal to $X_r + A \sin(B\pi i / 50000)$, $i=1, 2, \dots, 50000$ ($X_r=0.6$, $A=2$, $B=5$) and $V \sim N(0, 1)$ (i.e. signal 1). 1) and 2) show the same data plotted with different values on the axes; 1): regressed with Eq. (1.2), 2): regressed with Eq. (5.1), with $T=3.4044$ unit, $N_0=4758$)

表 6.2 图 6.3-图 6.17 拟合参数

Table 6.2 List of fitting coefficients for Fig. 6.3-Fig. 6.17

试验 编号	Vt	N_0	$T/unit$	K	C/T	$R_{weibull}^2$	a	b	R_{LH}^2
(1)	0	12452	2.0235	1.3012	1.2001	0.9881	4.4137	0.3024	0.9997
(2)	sin(w)	9344	1.4634	1.0717	1.1976	0.9771	4.2052	0.4066	0.9818
(3)	sin(5w)	9348	2.4507	0.6935	0.7333	0.9471	3.1130	0.0690	0.4222
(4)	2sin(w)	5154	1.3873	1.0934	0.9830	0.9780	3.7533	0.3722	0.9480
(5)	2sin(5w)	5153	4.1799	0.4228	0.3289	0.9417	2.7522	0.0183	0.5050
(6)	0.2	12166	1.7491	1.3276	1.1892	0.9882	4.4793	0.3750	0.9989
(7)	0.2+sin(w)	7962	1.3421	1.1610	1.0015	0.9659	4.0683	0.4409	0.9491
(8)	0.2+sin(5w)	9040	2.1936	0.7978	0.8681	0.9707	3.5122	0.1162	0.7642
(9)	0.2+2sin(w)	4223	1.2906	1.1109	0.9429	0.9706	3.6512	0.4253	0.9068
(10)	0.2+2sin(5w)	5014	3.9270	0.5040	0.4955	0.9705	2.8814	0.0259	0.6195
(11)	0.6	10023	1.3864	1.3087	1.1018	0.9756	4.3347	0.4877	0.9613
(12)	0.6+sin(w)	5118	1.1743	1.0736	0.8050	0.9242	3.5643	0.4917	0.7251
(13)	0.6+sin(5w)	7823	1.7860	0.9957	1.0152	0.9886	3.8746	0.2356	0.9850
(14)	0.6+2sin(w)	2556	1.1624	0.9624	0.6988	0.8785	3.0132	0.4177	0.6168
(15)	0.6+2sin(5w)	4758	3.4044	0.6178	0.6831	0.9775	2.9359	0.0416	0.5992

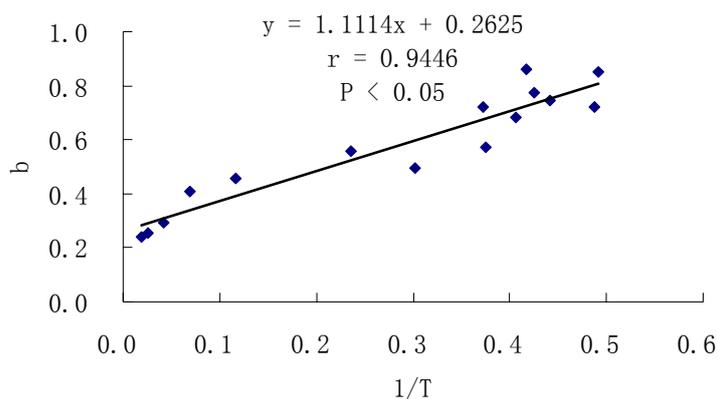


图 6.18 b 与 $1/T$ 的关系 (对上述 15 次数值试验)

Fig. 6.18 Relationship of b with $1/T$ for the above 15 experiments

6.2.2 信号 2

对信号 2(风洞风速信号)也进行了 15 次数值试验,表 6.3 为数值试验中 Xr 、 A 和 B 的取值,取值类似对信号 1 试验的取值, Xr 分别取:均值、均值+0.2×标准差和均值+0.6×标准差; A 和 B 取值方法同对信号 1 试验的取值。图 6.19-图 6.33 为这 15 次数值试验的结果。拟合公式 (5.1) 和 (1.2) 中的参数以及拟合相关指数见表 6.4, N_0 对应持续时间大于 1 个次数,点 $(1, N_0)$ 不参与拟合, T 为平均持续时间, $R_{weibull}^2$ 和 R_{LH}^2 为对应用公式 (5.1) 和 (1.2) 拟合的拟合相关指数。拟合时剔除 $N(t)/N_0 \leq 1\%$ 的资料。

(1) 从拟合相关指数看, R_{LH}^2 均小于 $R_{weibull}^2$ 。 $B=5$ 的 6 次试验(即编号为 (18)、(20)、(23)、(25)、(28) 和 (30)) 相关指数差别较大, 其中 $R_{weibull}^2 - R_{LH}^2$ 最小值为 0.3932 (对应试验 (28)), 最大值为 0.4639 (对应试验 (20))。其余差别不大, 差别最小仅为 0.0080 (试验 (16)), 最大也只有 0.1184 (试验 (19))。

(2) 对信号 2 的数值试验也支持假设: Vt 随时间变化使沙尘暴持续时间累积分布用公式 (5.1) (Weibull 分布) 的拟合效果优于公式 (1.2) (LASD), 如对编号为 (16) 和 (18) 的两次数值试验, Vt 分别为: 1.56 和 $1.56 + \sin(2w)$, 对应 $R_{weibull}^2 - R_{LH}^2$ 依次为: 为 0.0080 和 0.4638, 也即 Vt 随时间变化可以使 $R_{weibull}^2 - R_{LH}^2$ 增大。

(3) 从 b 值看, $Vt=1.56$ 、1.62 和 1.74 时, 对应值 b 为: 0.083、0.0957 和 0.1345, 尽管对风速信号(试验信号 2) 不能用公式 (2.13) 计算不同 Vt 下的 b 值, 但显示的 b 与 Vt 的关系也是 b 随 Vt 的增大而增大。

(4) 同样也可以发现 Vt 随时间变化也可以导致 b 值增加, 如试验 (16) 和 (17) (对应 Vt 为 1.56 和 $1.56 + \sin(w)$), 它们的 R_{LH}^2 都较大分别为 0.9860 和 0.9334, 对应 b 值为 0.0835 和 0.1324。对试验 (18) Vt 为 $1.56 + \sin(5w)$, b 更小为 0.0133, 推测与拟合效果也有关系, 试验 (18) 的拟合指数 R_{LH}^2 为 0.4557。同样的规律可以在 $Xr=1.62$ 和 1.74 的试验上发现。

(5) Vt 不随时间变化时的 3 个试验(即 16、21 和 26 对应 $Vt=1.56$ 、1.62 和 1.74), 三次试验的 K 分别为: 0.9803、1.0016 和 1.0855 很接近 1, 三次试验的 C/T 分别为: 1.0628、1.0814 和 1.1257, 也比较接近 1。 N_0 、 T 随 Vt 的增大而减小也与随机信号一致。

(6) K 数=1 且 $C/T=1$, Weibull 分布也即指数分布 ($N=N_0 \exp(-t/T)$), 从表 6.4 的参数可以发现, 也存在 $K \approx 1$ 且 $C/T \approx 1$ 的现象, 如试验 (17) (对应 $Vt=1.56 + \sin(w)$, $K=1.0059$, $C/T=1.0606$)。这也应证指数分布拟合沙尘暴持续时间累积分布在很多情

形效果不错。

(7) V_t 随时间变化的 12 个数值试验，同随机信号一致，基本上 K 、 C/T 、 a 和 b 随 V_t 的频率 (B) 和振幅 (A) 增加而减小。

(8) 图 6.34 是上述 15 次试验的 b 与 $1/T$ ， b 与 $1/T$ 的相关系数 $R=0.9813 > R_{0.05}=0.5140$ (自由度 $n=15-1-1$)，相关性显著，结果也同对信号 1 的试验。

表 6.3 对信号 2，参数 Xr 、 A 和 B 的取值

Table 6.3 Values of Xr , A and B for the numerical experiments with signals 2

Xr	A	B	$V_t = Xr + A \sin(Bw)$	试验编号
	0	—	1.56	(16)
1.56	1	1	$1.56 + \sin(w)$	(17)
		5	$1.56 + \sin(5w)$	(18)
	2	1	$1.56 + 2\sin(w)$	(19)
		5	$1.56 + 2\sin(5w)$	(20)
1.62	0	—	1.62	(21)
	1	1	$1.62 + \sin(w)$	(22)
		5	$1.62 + \sin(5w)$	(23)
	2	1	$1.62 + 2\sin(w)$	(24)
5		$1.62 + 2\sin(5w)$	(25)	
1.74	0	—	1.74	(26)
	1	1	$1.74 + \sin(w)$	(27)
		5	$1.74 + \sin(5w)$	(28)
	2	1	$1.74 + 2\sin(w)$	(29)
5		$1.74 + 2\sin(5w)$	(30)	

注: $w = \pi i / 27998$, $i = 1, 2, \dots, 27998$

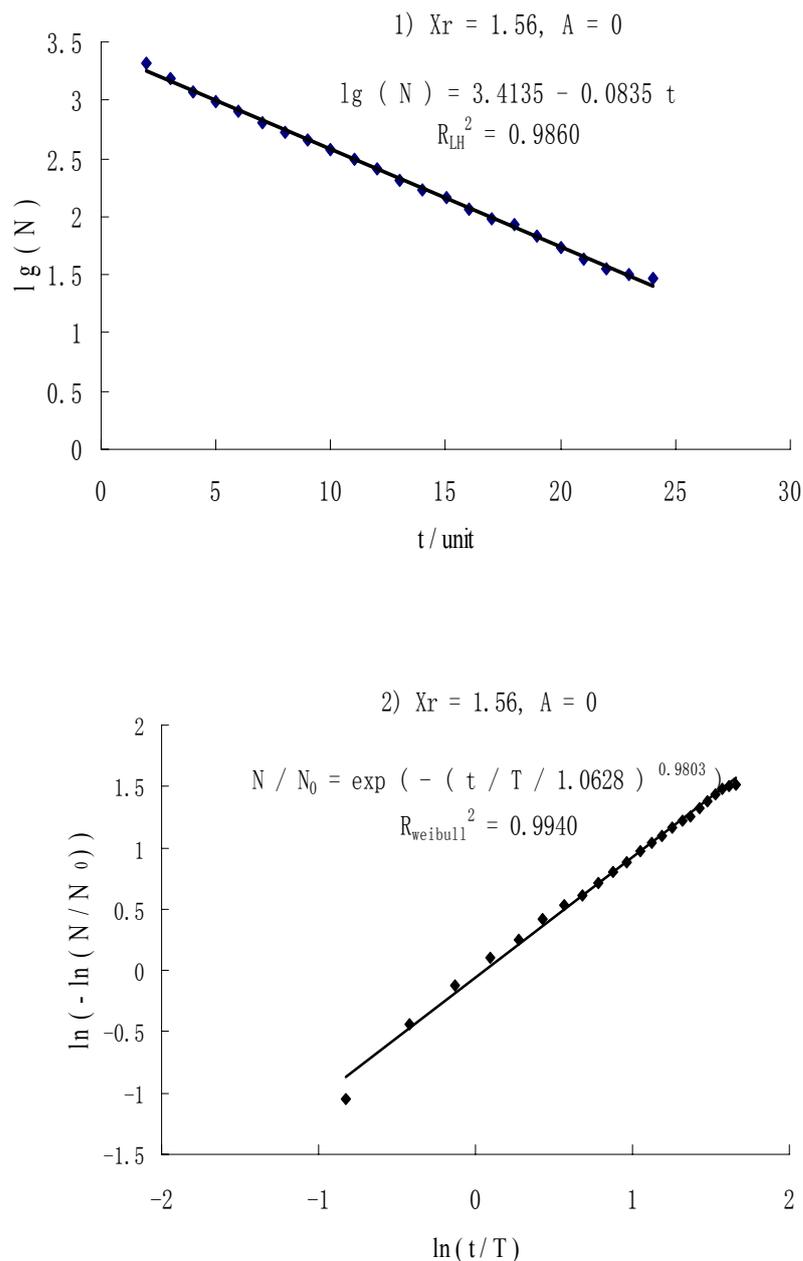


图 6.19 试验 (16) 的结果 (图 2.1 模型中 N 与 t 的关系, 模型中 $Vt = X_r + A \sin(B\pi i / 50000)$, $i=1, 2, \dots, 50000$, $X_r=1.56$, $A=0$; $V \sim N(0, 1)$ (即信号 2)。使用同样的数据绘制, 1): 公式 (1.2) 拟合; 2): 公式 (5.1) 拟合, $T=4.5620$ 个, $N_0=2902$)

Fig. 6.19 Results of experiment (16) (Analysing results of N vures t for the model in Fig. 2.1 (in the model Vt is equal to $X_r + A \sin(B\pi i / 50000)$, $i=1, 2, \dots, 50000$ ($X_r=1.56$, $A=0$) and $V \sim N(0, 1)$ (i.e. signal 2). 1) and 2) show the same data plotted with different values on the axes; 1): regressed with Eq. (1.2), 2): regressed with Eq. (5.1), with $T=4.5620$ unit and $N_0=2902$)

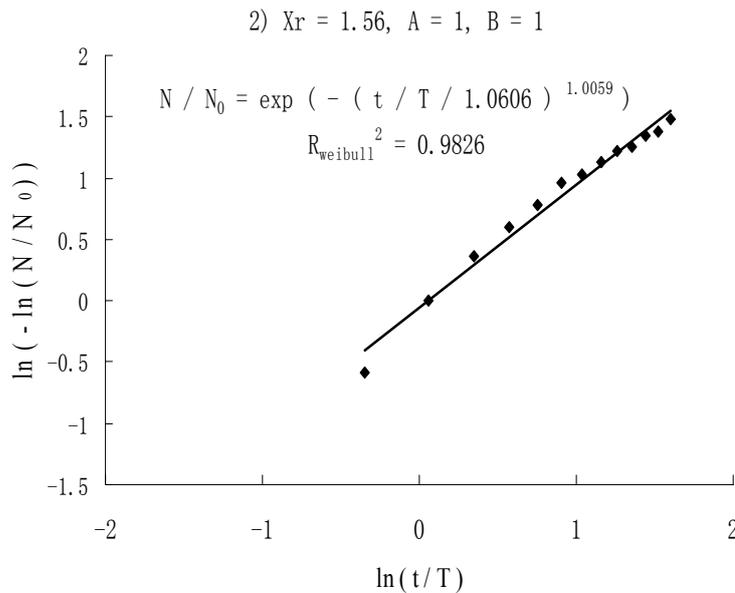
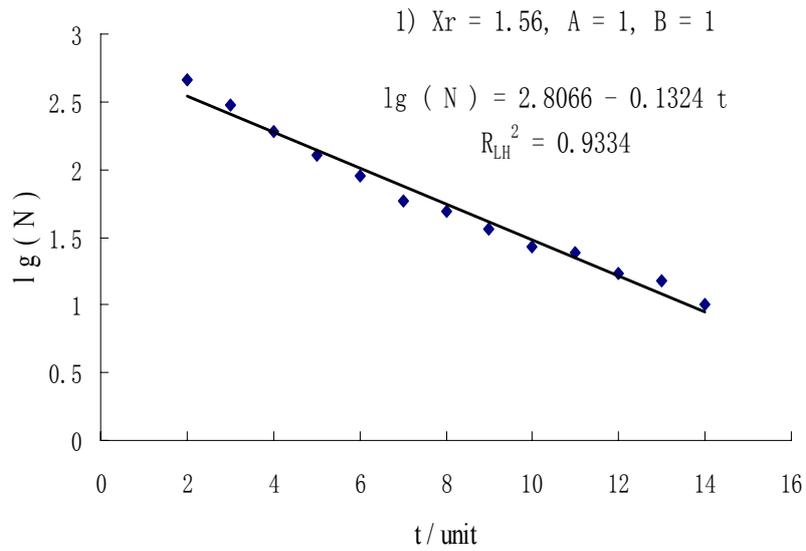


图 6.20 试验 (17) 的结果 (图 2.1 模型中 N 与 t 的关系, 模型中 $Vt=Xr+Asin(B\pi i/50000)$, $i=1,2,\dots,50000$, $Xr=1.56$, $A=1$, $B=1$; $V \sim N(0,1)$ (即信号 2)。使用同样的数据绘制, 1): 公式 (1.2) 拟合; 2): 公式 (5.1) 拟合, $T=2.8304$ 个, $N_0=802$)

Fig. 6.20 Results of experiment (17) (Analysing results of N vures t for the model in Fig. 2.1 (in the model Vt is equal to $Xr+Asin(B\pi i/50000)$, $i=1, 2, \dots, 50000$ ($Xr=1.56$, $A=1$, $B=1$) and $V \sim N(0,1)$ (i.e. signal 2). 1) and 2) show the same data plotted with different values on the axes; 1): regressed with Eq. (1.2), 2): regressed with Eq. (5.1), with $T=2.8304$ unit and $N_0=802$)

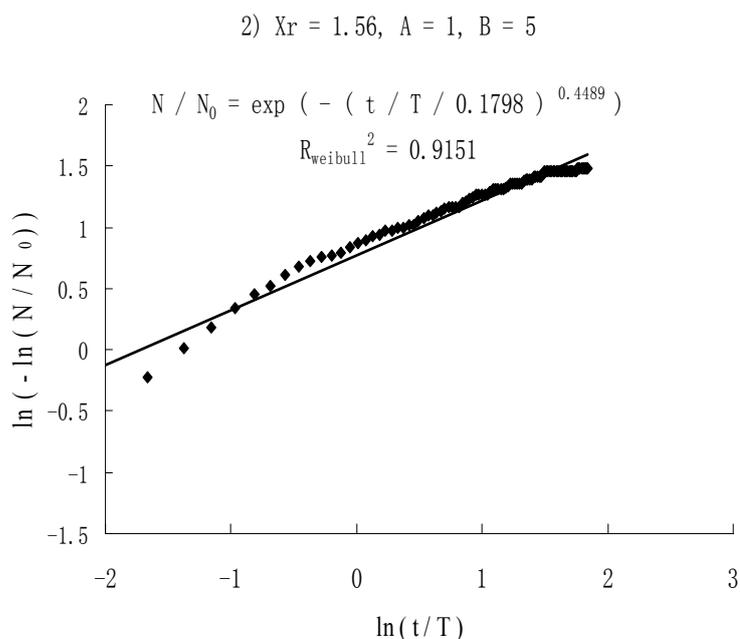
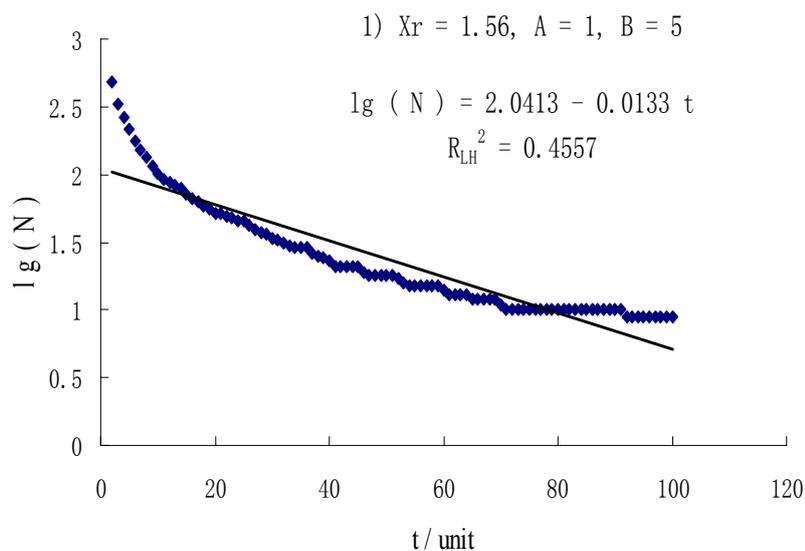
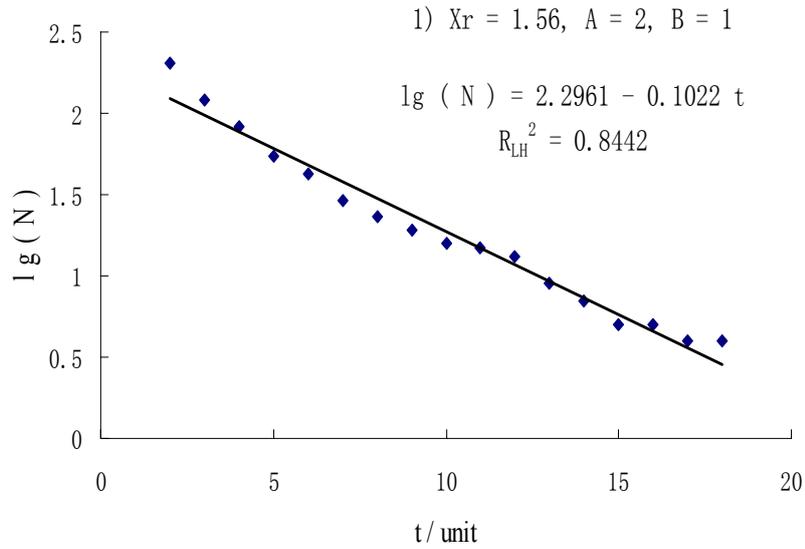


图 6.21 试验 (18) 的结果 (图 2.1 模型中 N 与 t 的关系, 模型中 $Vt = X_r + A \sin(B\pi i/50000)$, $i=1,2,\dots,50000$, $X_r=1.56$, $A=1$, $B=5$; $V \sim N(0,1)$ (即信号 2)。使用同样的数据绘制, 1): 公式 (1.2) 拟合; 2): 公式 (5.1) 拟合, $T=15.8487$ 个, $N_0=727$)

Fig. 6.21 Results of experiment (18) (Analysing results of N vures t for the model in Fig. 2.1 (in the model Vt is equal to $X_r + A \sin(B\pi i/50000)$, $i=1, 2, \dots, 50000$ ($X_r=1.56$, $A=1$, $B=5$) and $V \sim N(0,1)$ (i.e. signal 2). 1) and 2) show the same data plotted with different values on the axes; 1): regressed with Eq. (1.2), 2): regressed with Eq. (5.1), with $T=15.8487$ unit and $N_0=727$)



2) $X_r = 1.56, A = 2, B = 1$

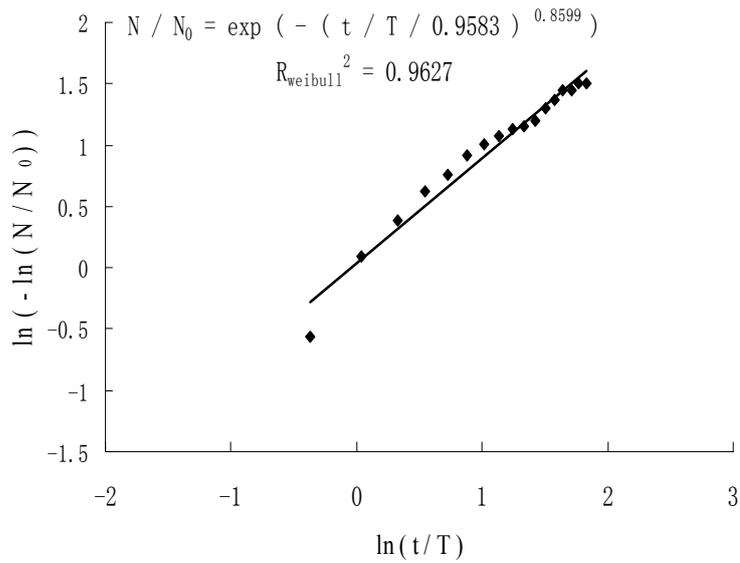


图 6.22 试验 (19) 的结果 (图 2.1 模型中 N 与 t 的关系, 模型中 $Vt = X_r + A \sin(B\pi i / 50000)$, $i = 1, 2, \dots, 50000$, $X_r = 1.56, A = 2, B = 1$; $V \sim N(0, 1)$ (即信号 2)。使用同样的数据绘制, 1): 公式 (1.2) 拟合; 2): 公式 (5.1) 拟合, $T = 2.8939$ 个, $N_0 = 358$)

Fig. 6.22 Results of experiment (19) (Analysing results of N vures t for the model in Fig. 2.1 (in the model Vt is equal to $X_r + A \sin(B\pi i / 50000)$, $i = 1, 2, \dots, 50000$ ($X_r = 1.56, A = 2, B = 1$) and $V \sim N(0, 1)$ (i.e. signal 2). 1) and 2) show the same data plotted with different values on the axes; 1): regressed with Eq. (1.2), 2): regressed with Eq. (5.1), with $T = 2.8939$ unit and $N_0 = 358$)

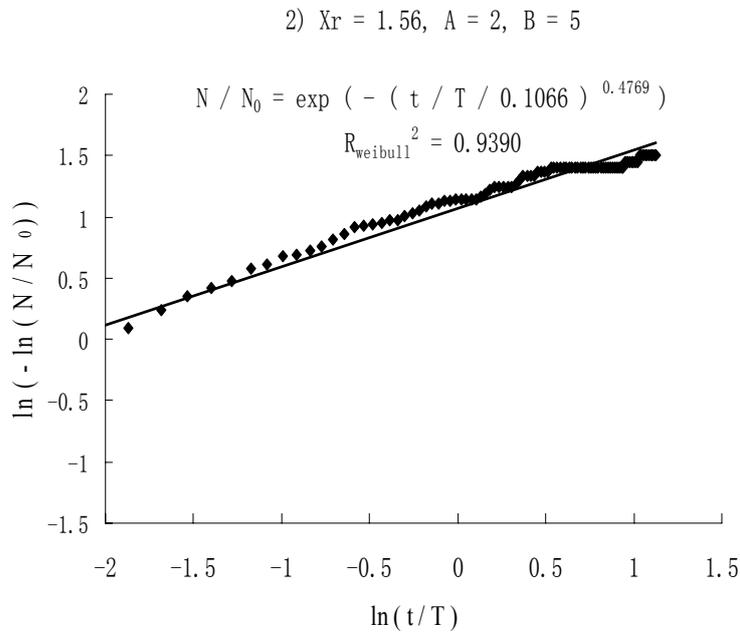
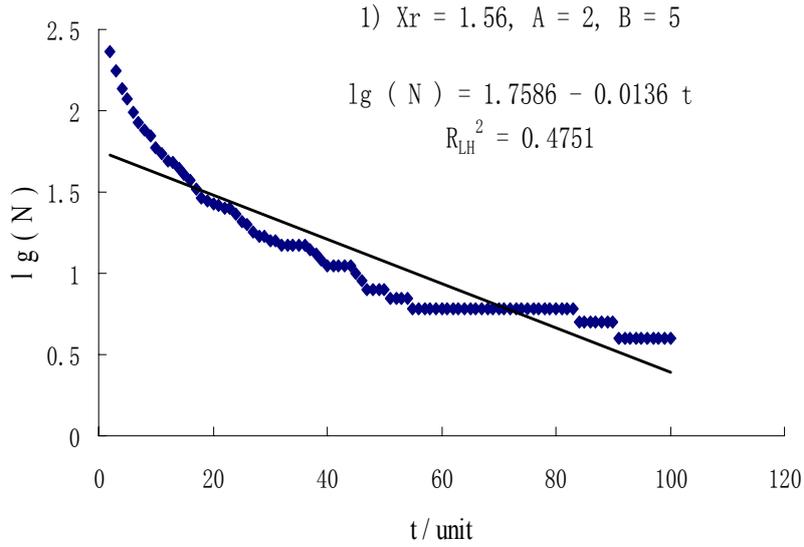


图 6.23 试验 (20) 的结果 (图 2.1 模型中 N 与 t 的关系, 模型中 $Vt=Xr+Asin(B\pi/50000)$, $i=1,2,\dots,50000$, $Xr=1.56$, $A=2$, $B=5$; $V \sim N(0,1)$ (即信号 2)。使用同样的数据绘制, 1): 公式 (1.2) 拟合; 2): 公式 (5.1) 拟合, $T=32.3943$ 个, $N_0=350$)

Fig. 6.23 Results of experiment (20) (Analysing results of N vures t for the model in Fig. 2.1 (in the model Vt is equal to $Xr+Asin(B\pi/50000)$, $i=1, 2, \dots, 50000$ ($Xr=1.56$, $A=2$, $B=5$) and $V \sim N(0,1)$ (i.e. signal 2). 1) and 2) show the same data plotted with different values on the axes; 1): regressed with Eq. (1.2), 2): regressed with Eq. (5.1), with $T=32.3943$ unit and $N_0=350$)

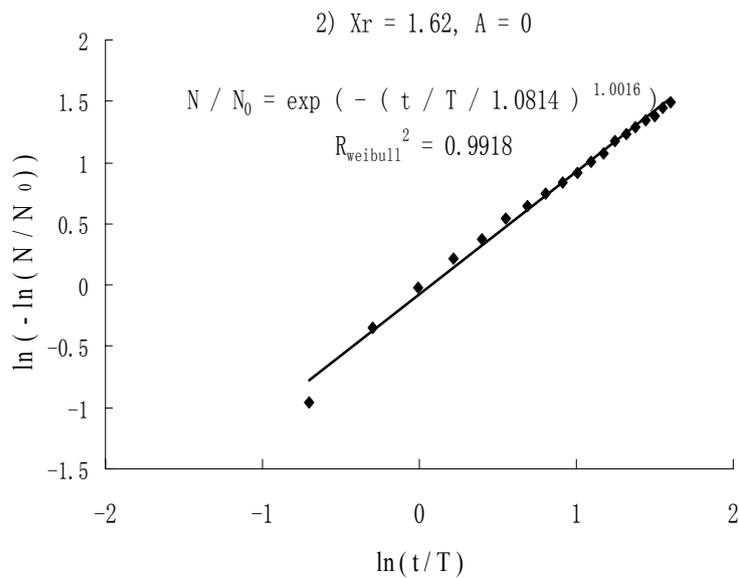
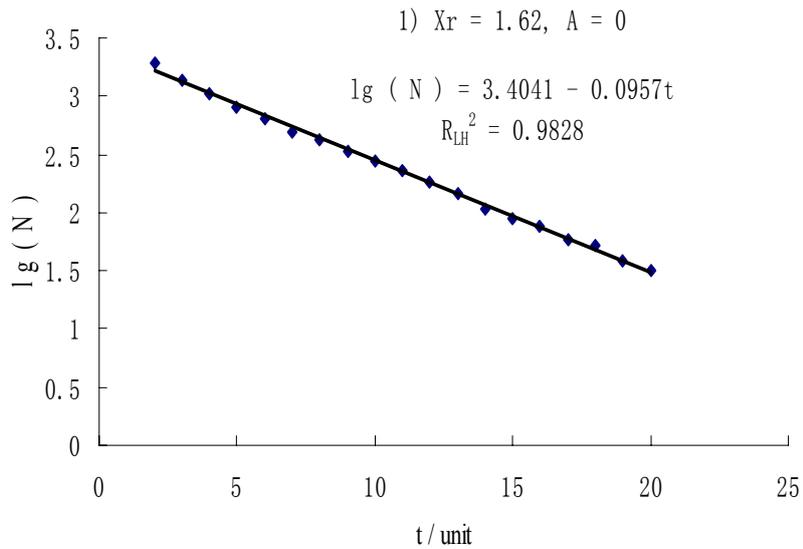


图 6.24 试验 (21) 的结果 (图 2.1 模型中 N 与 t 的关系, 模型中 $Vt=Xr+Asin(B\pi i/50000)$, $i=1,2,\dots,50000$, $Xr=1.62$, $A=0$; $V \sim N(0,1)$ (即信号 2)。使用同样的数据绘制, 1): 公式 (1.2) 拟合; 2): 公式 (5.1) 拟合, $T=4.0255$ 个, $N_0=2786$)

Fig. 6.24 Results of experiment (21) (Analysing results of N vures t for the model in Fig. 2.1 (in the model Vt is equal to $Xr+Asin(B\pi i/50000)$, $i=1, 2, \dots, 50000$ ($Xr=1.62$, $A=0$) and $V \sim N(0,1)$ (i.e. signal 2). 1) and 2) show the same data plotted with different values on the axes; 1): regressed with Eq. (1.2), 2): regressed with Eq. (5.1), with $T=4.0255$ unit and $N_0=2786$)

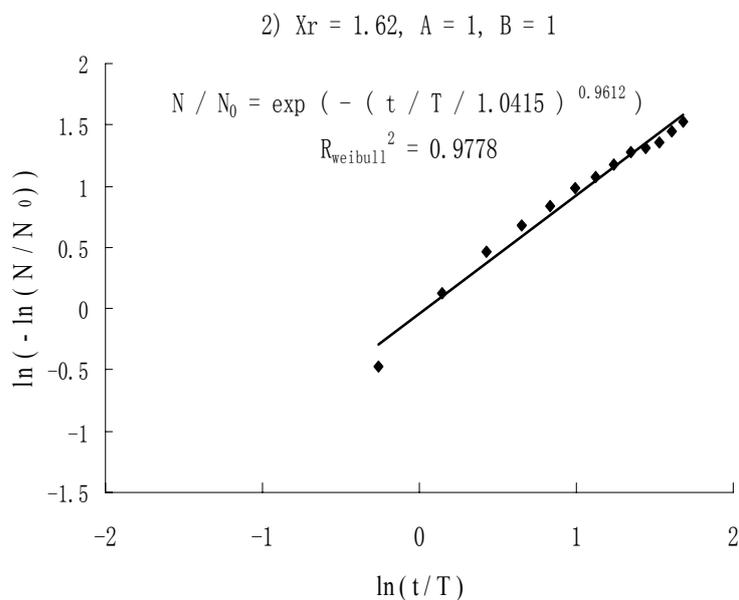
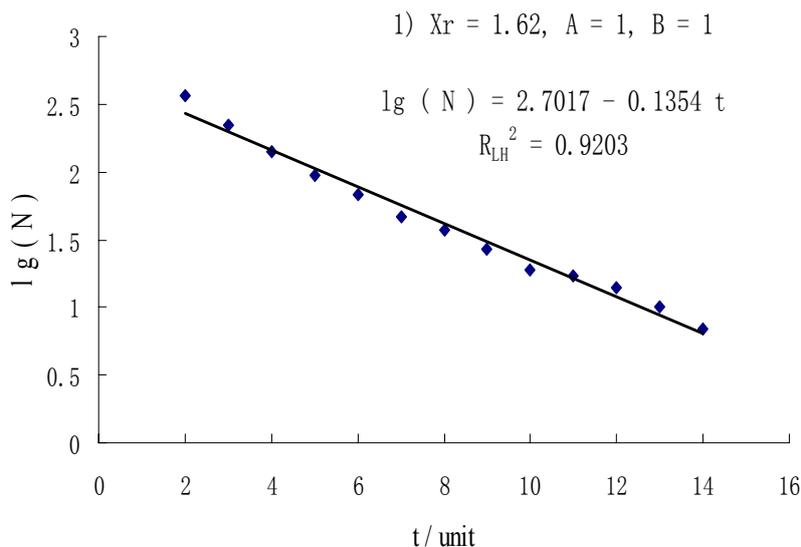


图 6.25 试验 (22) 的结果 (图 2.1 模型中 N 与 t 的关系, 模型中 $Vt=Xr+Asin(B\pi i/50000)$, $i=1,2,\dots,50000$, $X_r=1.62$, $A=1$, $B=1$; $V \sim N(0,1)$ (即信号 2)。使用同样的数据绘制, 1): 公式 (1.2) 拟合; 2): 公式 (5.1) 拟合, $T=2.5991$ 个, $N_0=686$)

Fig. 6.25 Results of experiment (22) (Analysing results of N vures t for the model in Fig. 2.1 (in the model Vt is equal to $Xr+Asin(B\pi i/50000)$, $i=1, 2, \dots, 50000$ ($X_r=1.62$, $A=1$, $B=1$) and $V \sim N(0,1)$ (i.e. signal 2). 1) and 2) show the same data plotted with different values on the axes; 1): regressed with Eq. (1.2), 2): regressed with Eq. (5.1), with $T=2.5991$ unit and $N_0=686$)

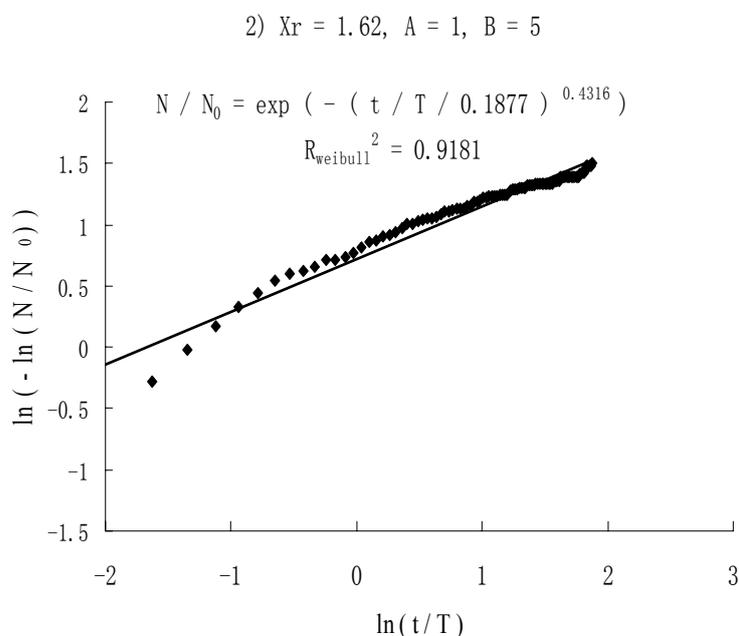
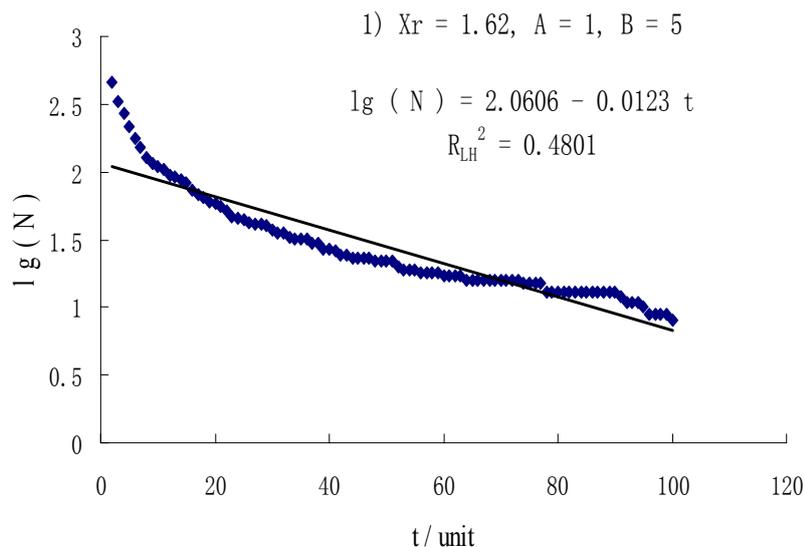


图 6.26 试验 (23) 的结果 (图 2.1 模型中 N 与 t 的关系, 模型中 $Vt=Xr+Asin(B\pi i/50000)$, $i=1,2,\dots,50000, X_r=1.62, A=1, B=5; V \sim N(0,1)$ (即信号 2)。使用同样的数据绘制, 1): 公式 (1.2) 拟合; 2): 公式 (5.1) 拟合, $T=15.3441$ 个, $N_0=715$)

Fig. 6.26 Results of experiment (23) (Analysing results of N vures t for the model in Fig. 2.1 (in the model Vt is equal to $Xr+Asin(B\pi i/50000)$, $i=1, 2, \dots, 50000$ ($X_r=1.62, A=1, B=5$) and $V \sim N(0,1)$ (i.e. signal 2). 1) and 2) show the same data plotted with different values on the axes; 1): regressed with Eq. (1.2), 2): regressed with Eq. (5.1), with $T=15.3441$ unit and $N_0=715$)

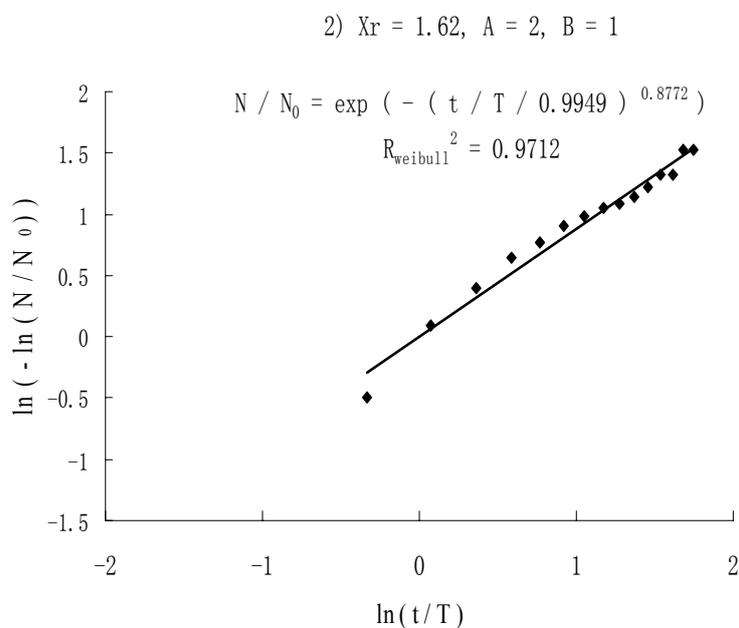
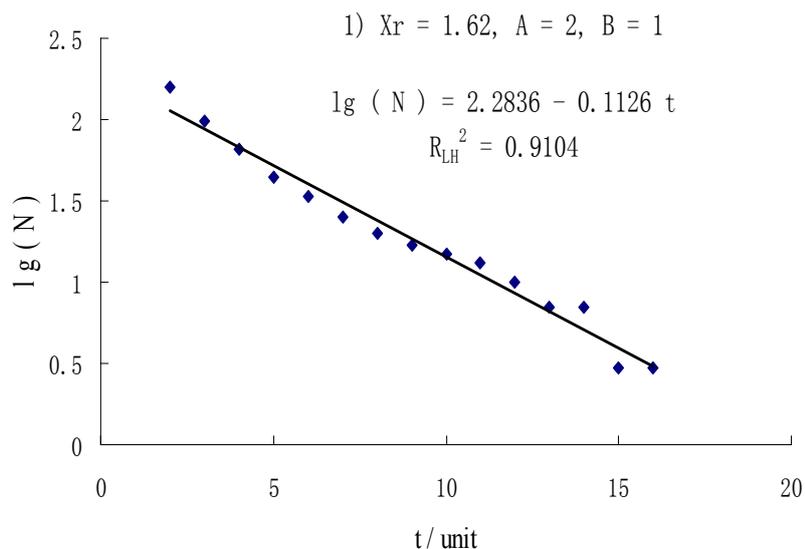


图 6.27 试验 (24) 的结果 (图 2.1 模型中 N 与 t 的关系, 模型中 $Vt = X_r + A \sin(B\pi i/50000)$, $i=1,2,\dots,50000$, $X_r=1.62$, $A=2$, $B=1$; $V \sim N(0,1)$ (即信号 2)。使用同样的数据绘制, 1): 公式 (1.2) 拟合; 2): 公式 (5.1) 拟合, $T=2.7891$ 个, $N_0=294$)

Fig. 6.27 Results of experiment (24) (Analysing results of N vures t for the model in Fig. 2.1 (in the model Vt is equal to $X_r + A \sin(B\pi i/50000)$, $i=1, 2, \dots, 50000$ ($X_r=1.62$, $A=2$, $B=1$) and $V \sim N(0,1)$ (i.e. signal 2). 1) and 2) show the same data plotted with different values on the axes; 1): regressed with Eq. (1.2), 2): regressed with Eq. (5.1), with $T=2.7891$ unit and $N_0=294$)

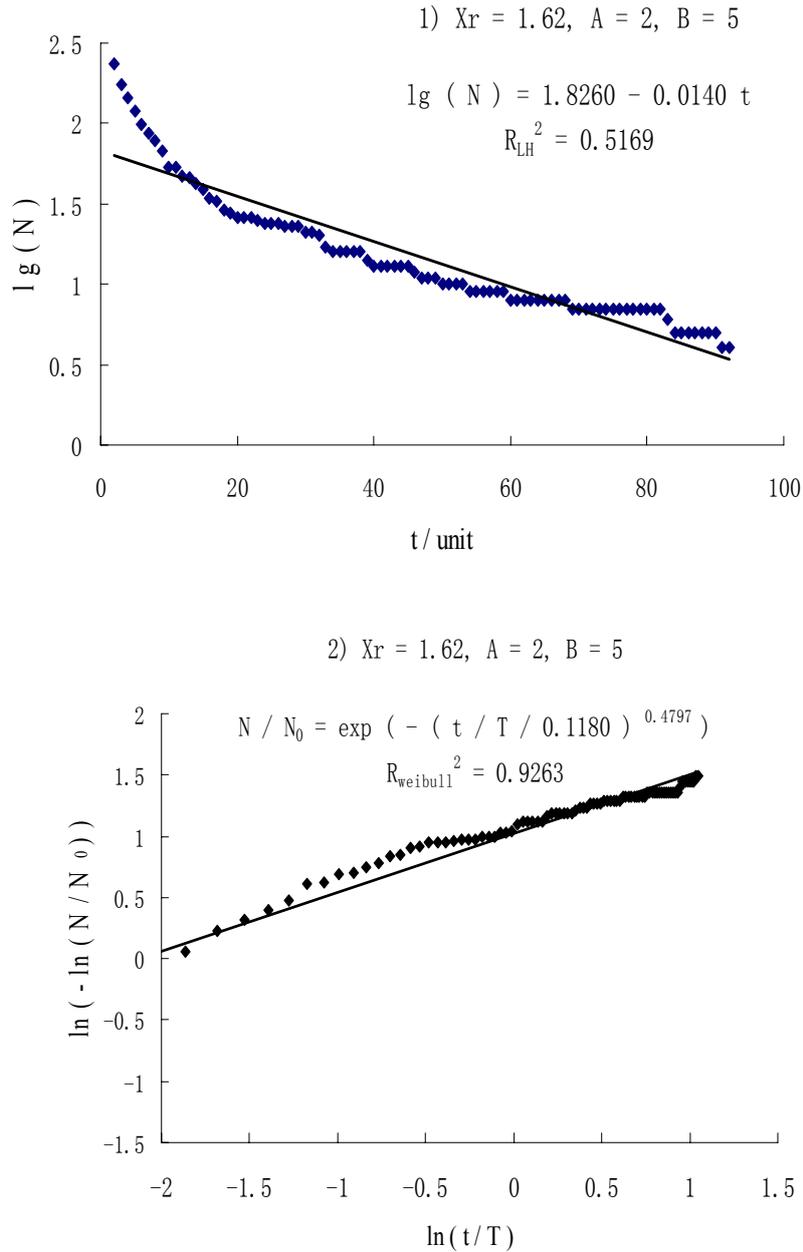


图 6.28 试验(25)结果(图 2.1 模型中 N 与 t 的关系,模型中 $Vt=Xr+Asin(B\pi i/50000)$, $i=1,2,\dots,50000$, $Xr=1.62, A=2, B=5$; $V \sim N(0,1)$ (即信号 2)。使用同样的数据绘制, 1): 公式 (1.2) 拟合; 2): 公式 (5.1) 拟合, $T=32.3178$ 个, $N_0=343$)

Fig. 6.28 Results of experiment (25) (Analysing results of N vures t for the model in Fig. 2.1 (in the model Vt is equal to $Xr+Asin(B\pi i/50000)$, $i=1, 2, \dots, 50000$ ($Xr=1.62, A=2, B=5$) and $V \sim N(0,1)$ (i.e. signal 2). 1) and 2) show the same data plotted with different values on the axes; 1): regressed with Eq. (1.2), 2): regressed with Eq. (5.1), with $T=32.3178$ unit and $N_0=343$)

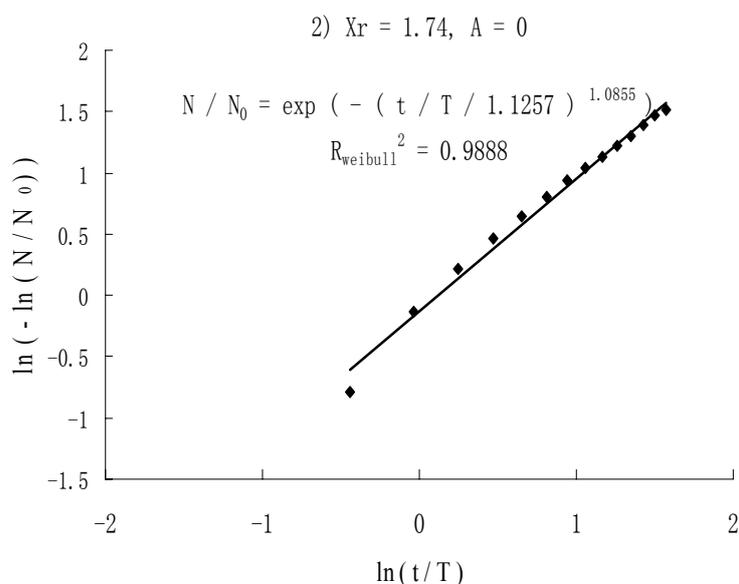
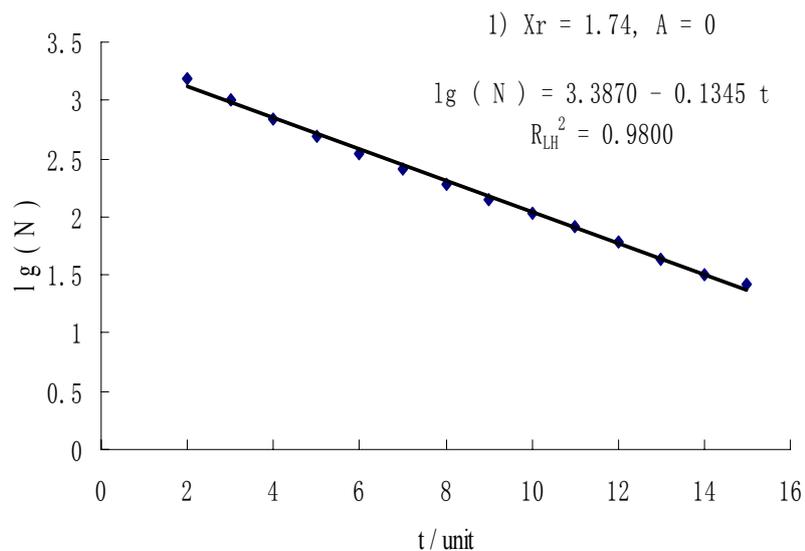


图 6.29 试验(26)结果(图 2.1 模型中 N 与 t 的关系, 模型中 $Vt=Xr+Asin(B\pi i/50000)$, $i=1,2,\dots,50000$, $Xr=1.74$, $A=0$; $V \sim N(0,1)$ (即信号 2)。使用同样的数据绘制, 1): 公式 (1.2) 拟合; 2): 公式 (5.1) 拟合, $T=3.1185$ 个, $N_0=2414$)

Fig. 6.29 Results of experiment (26) (Analysing results of N vures t for the model in Fig. 2.1 (in the model Vt is equal to $Xr+Asin(B\pi i/50000)$, $i=1, 2, \dots, 50000$ ($Xr=1.74$, $A=0$) and $V \sim N(0,1)$ (i.e. signal 2). 1) and 2) show the same data plotted with different values on the axes; 1): regressed with Eq. (1.2), 2): regressed with Eq. (5.1), with $T=3.1185$ unit and $N_0=2414$)

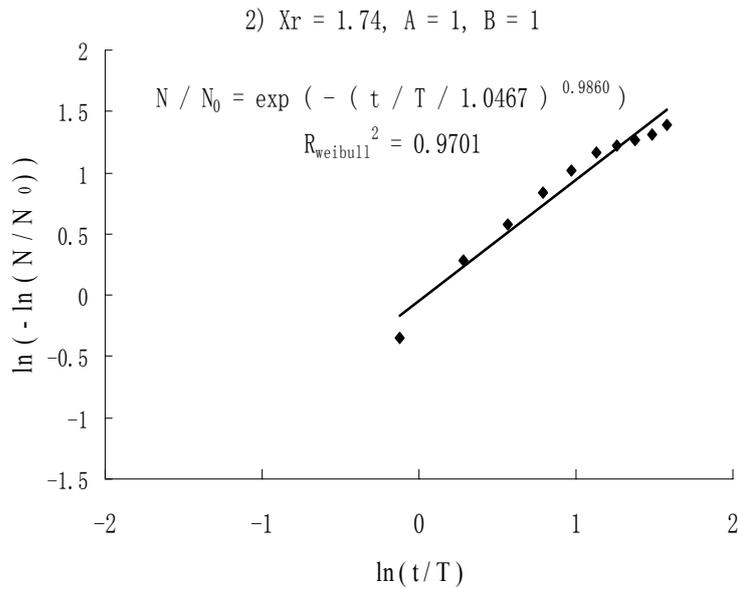
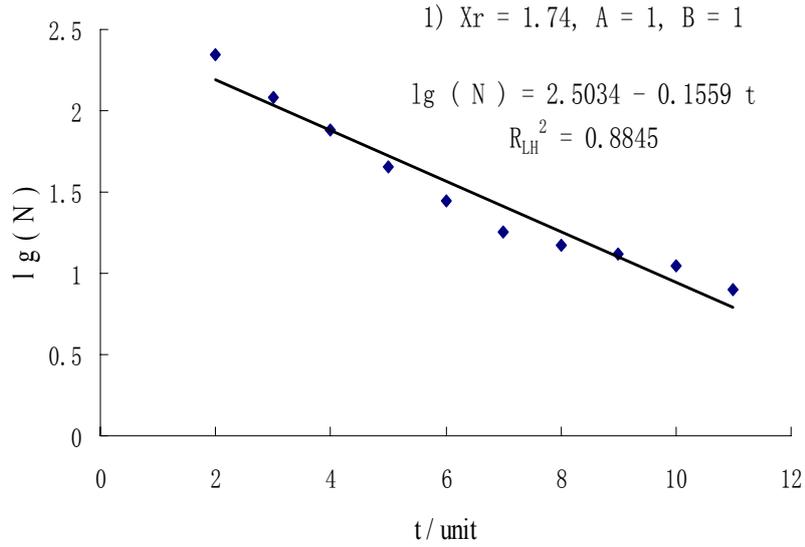


图 6.30 试验(27)结果(图 2.1 模型中 N 与 t 的关系, 模型中 $Vt=Xr+Asin(B\pi i/50000)$, $i=1,2,\dots,50000$, $Xr=1.74$, $A=1$, $B=1$; $V \sim N(0,1)$ (即信号 2)。使用同样的数据绘制, 1): 公式 (1.2) 拟合; 2): 公式 (5.1) 拟合, $T=2.2683$ 个, $N_0=451$)

Fig. 6.30 Results of experiment (27) (Analysing results of N vures t for the model in Fig. 2.1 (in the model Vt is equal to $Xr+Asin(B\pi i/50000)$, $i=1, 2,\dots,50000$ ($Xr=1.74$, $A=1$, $B=1$) and $V \sim N(0,1)$ (i.e. signal 2). 1) and 2) show the same data plotted with different values on the axes; 1): regressed with Eq. (1.2), 2): regressed with Eq. (5.1), with $T=2.2683$ unit and $N_0=451$)

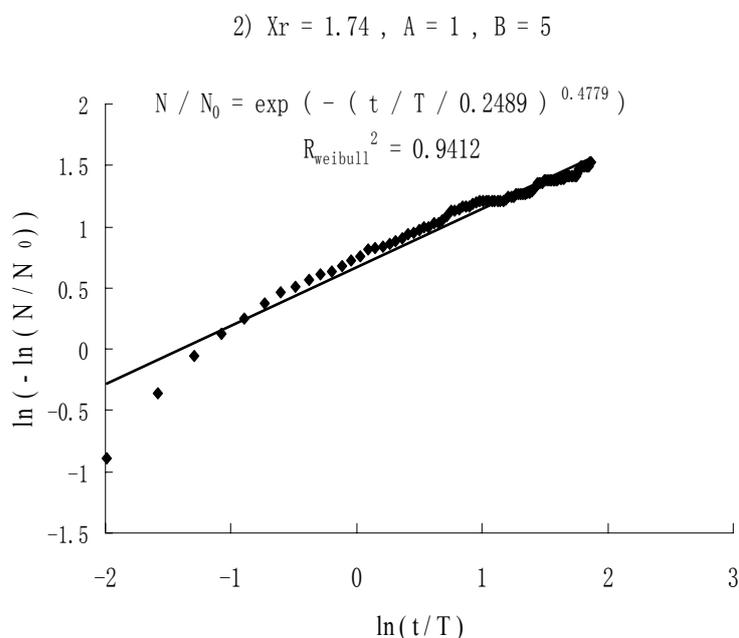
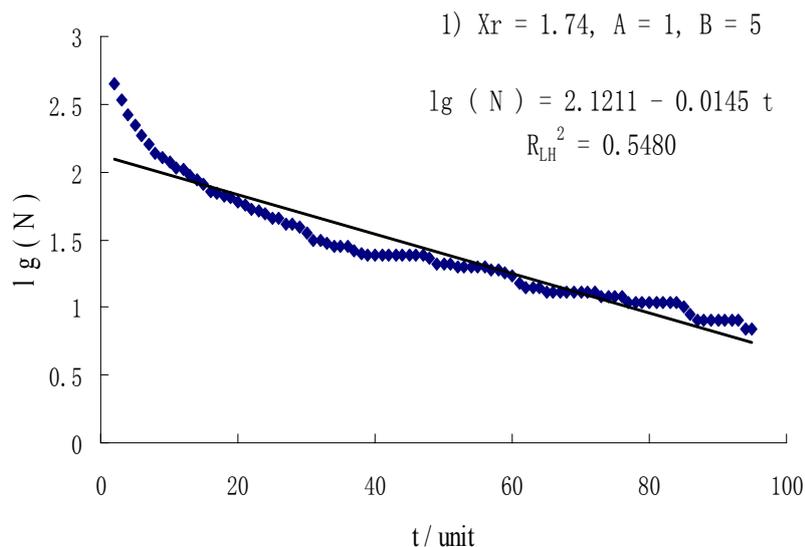


图 6.31 试验(28)结果(图 2.1 模型中 N 与 t 的关系, 模型中 $Vt = X_r + A \sin(B\pi i/50000)$, $i=1, 2, \dots, 50000$, $X_r=1.74$, $A=1$, $B=5$; $V \sim N(0,1)$ (即信号 2)。使用同样的数据绘制, 1): 公式 (1.2) 拟合; 2): 公式 (5.1) 拟合, $T=14.6182$ 个, $N_0=681$)

Fig. 6.31 Results of experiment (28) (Analysing results of N vures t for the model in Fig. 2.1 (in the model Vt is equal to $X_r + A \sin(B\pi i/50000)$, $i=1, 2, \dots, 50000$ ($X_r=1.74$, $A=1$, $B=5$) and $V \sim N(0,1)$ (i.e. signal 2). 1) and 2) show the same data plotted with different values on the axes; 1): regressed with Eq. (1.2), 2): regressed with Eq. (5.1), with $T=14.6182$ unit and $N_0=681$)

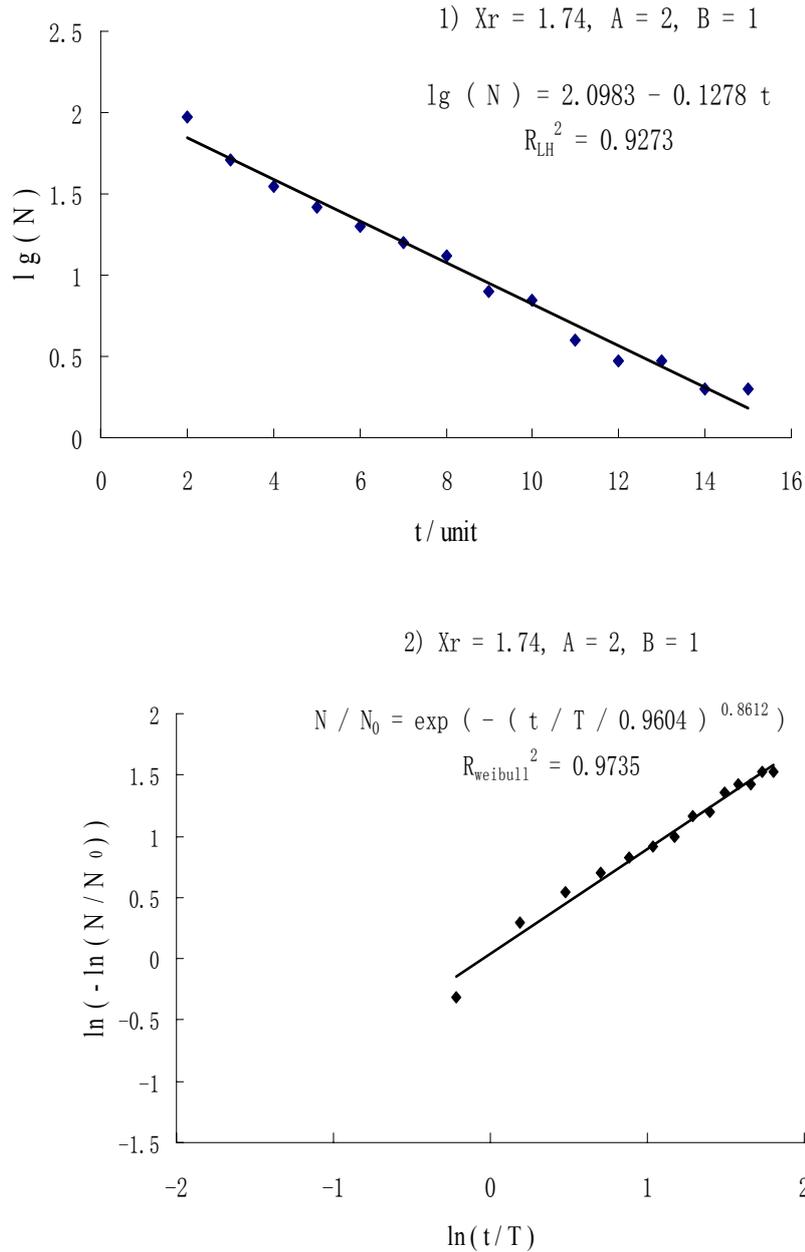


图 6.32 试验(29)结果(图 2.1 模型中 N 与 t 的关系,模型中 $Vt=Xr+Asin(B\pi i/50000), i=1,2,\dots,50000$, $Xr=1.74, A=2, B=1; V \sim N(0,1)$ (即信号 2)。使用同样的数据绘制, 1): 公式 (1.2) 拟合; 2): 公式 (5.1) 拟合, $T=2.4769$ 个, $N_0=195$)

Fig. 6.32 Results of experiment (29) (Analysing results of N vures t for the model in Fig. 2.1 (in the model Vt is equal to $Xr+Asin(B\pi i/50000), i=1, 2, \dots, 50000$ ($Xr=1.74, A=2, B=1$) and $V \sim N(0,1)$ (i.e. signal 2). 1) and 2) show the same data plotted with different values on the axes; 1): regressed with Eq. (1.2), 2): regressed with Eq. (5.1), with $T=2.4769$ unit and $N_0=195$)

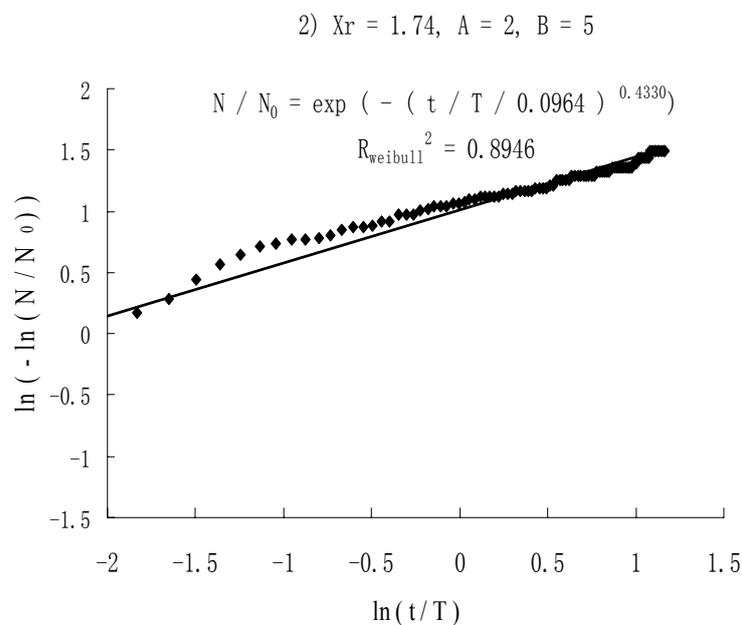
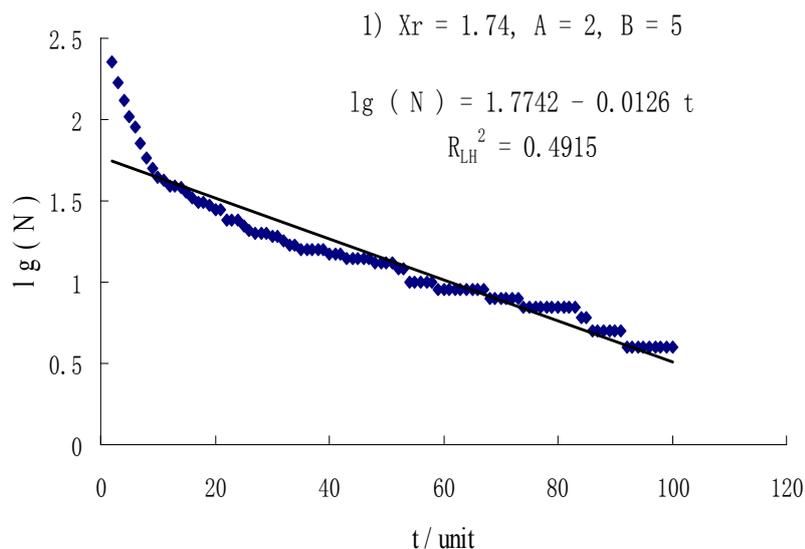


图 6.33 试验(30)结果(图 2.1 模型中 N 与 t 的关系,模型中 $Vt=Xr+Asin(B\pi i/50000)$, $i=1,2,\dots,50000$, $X_r=1.74$, $A=2$, $B=5$; $V \sim N(0,1)$ (即信号 2)。使用同样的数据绘制, 1): 公式 (1.2) 拟合; 2): 公式 (5.1) 拟合, $T=31.1858$ 个, $N_0=339$)

Fig. 6.33 Results of experiment (30) (Analysing results of N vures t for the model in Fig. 2.1 (in the model Vt is equal to $Xr+Asin(B\pi i/50000)$, $i=1, 2, \dots, 50000$ ($X_r=1.74$, $A=2$, $B=5$) and $V \sim N(0,1)$ (i.e. signal 2). 1) and 2) show the same data plotted with different values on the axes; 1): regressed with Eq. (1.2), 2): regressed with Eq. (5.1), with $T=31.1858$ unit and $N_0=339$)

表 6.4 图 6.19-图 6.33 拟合参数 (对信号 2)

Table 6.4 List of fitting coefficients for Fig. 6.19-Fig. 6.33 (for signals 2)

试验 编号	Vt	N_0	$T/unit$	K	C/T	$R_{weibull}^2$	a	b	R_{LH}^2
(16)	1.56	2902	4.5620	0.9803	1.0628	0.9940	3.4135	0.0835	0.9860
(17)	1.56+sin(w)	802	2.8304	1.0059	1.0606	0.9826	2.8066	0.1324	0.9334
(18)	1.56+sin(5w)	727	15.8487	0.4489	0.1798	0.9151	2.0413	0.0133	0.4557
(19)	1.56+2sin(w)	358	2.8939	0.8599	0.9583	0.9627	2.2961	0.1022	0.8442
(20)	1.56+2sin(5w)	350	32.3943	0.4769	0.1066	0.9390	1.7586	0.0136	0.4751
(21)	1.62	2786	4.0255	1.0016	1.0814	0.9918	3.4041	0.0957	0.9828
(22)	1.62+sin(w)	686	2.5991	0.9612	1.0415	0.9778	2.7017	0.1354	0.9203
(23)	1.62+sin(5w)	715	15.3441	0.4316	0.1877	0.9181	2.0606	0.0123	0.4801
(24)	1.62+2sin(w)	294	2.7891	0.8772	0.9949	0.9712	2.2836	0.1126	0.9104
(25)	1.62+2sin(5w)	343	32.3178	0.4797	0.1180	0.9263	1.8260	0.0140	0.5169
(26)	1.74	2414	3.1185	1.0855	1.1257	0.9888	3.3870	0.1345	0.9800
(27)	1.74+sin(w)	451	2.2683	0.9860	1.0467	0.9701	2.5034	0.1559	0.8845
(28)	1.74+sin(5w)	681	14.6182	0.4779	0.2489	0.9412	2.1211	0.0145	0.5480
(29)	1.74+2sin(w)	195	2.4769	0.8612	0.9604	0.9735	2.0983	0.1278	0.9273
(30)	1.74+2sin(5w)	339	31.1858	0.4330	0.0964	0.8946	1.7742	0.0126	0.4915

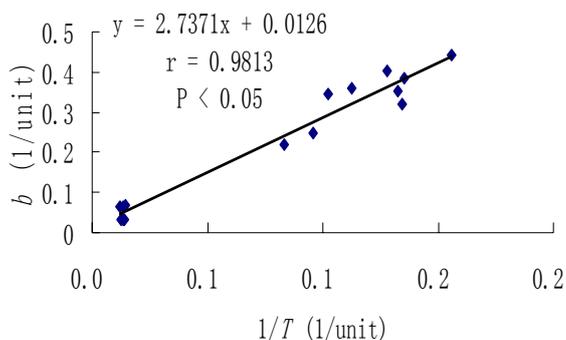


图 6.34 b 与 $1/T$ 的关系 (对上述 15 次数值试验)

Fig. 6.34 Relationship of b with $1/T$ for the above 15 experiments

6.3 LASD 成立的条件

由于未获得适宜野外观测风速信号，数值试验使用信号为随机信号和风洞测量风速信号，但试验结果还是能令人满意。以往对图 2.1 模型的数值模拟^[37,38]，沙尘暴阈值风速 V_t 取不随时间变化的值，而本次试验令 V_t 随时间变化，即 $V_t = Xr + A \cdot \sin(Bw)$ 的形式。

(1) 通过数值试验，证实沙尘暴阈值风速 V_t 随时间变化可以导致，沙尘暴持续时间累积分布的拟合函数，Weibull 函数 ($N/N_0 = \exp(-(t/C)^K)$) 的拟合效果优于对数线性函数 ($\lg N = a - bt$) 的拟合效果 (即 LASD 的描述)。

(2) 根据 V_t 取常数的 6 次试验，提出 LASD 成立的条件：对实际沙尘暴资料 K 值 (Weibull 分布中的 K 值) 接近 1， R_{LH}^2 较大。也即此时近似认为沙尘暴阈值风速随时间变化可以忽略，而此时用 $\lg N = a - bt$ 拟合沙尘暴持续时间累积分布更合理，其中的 b 值随沙尘暴阈值风速单调递增。

另外还数值试验还显示，沙尘暴阈值风速随时间变化也可能造成 b 值增加。依据实际沙尘暴资料分析，以往一直认为 b 值较大对应沙尘暴阈值风速也较大 (见图 1.5)，数值试验表明这个结论不全面，实际资料中部分 b 值较大不排除是沙尘暴阈值风速变化所致。

总之，通过本次数值试验，进一步明确可以用数值试验的方法通过图 2.1 力学模型，可以建立 b 值与沙尘暴阈值风速 V_t 的解析关系，这是进一步研究的内容。通过本次数值试验也发现使用 LASD 需要注意的问题 (即沙尘暴阈值风速是否可以看做不随时间变化)，这为利用 LASD 奠定基础。

7 应用 LASD 分析沙漠化对沙尘暴的影响

本章利用 LASD 的原理分析沙漠化对沙尘暴的影响，探讨 LASD 原理的应用。本章的研究，首先是基于 LASD 原理（见第二章和第六章），从理论上推断沙漠化对沙尘暴持续时间累积分布的影响（分析沙漠化对 b 值的影响），然后分析黄土高原 1958-1978 年和 1979-2000 年春季沙尘暴持续时间累积分布，来验证推断，并应用其结果，维护国家气象局整理沙尘暴资料的可靠性。

7.1 对沙尘暴资料的疑虑

对中国气象局整理的沙尘暴资料分析表明我国北方大部分地区的沙尘暴呈减少趋势^[16-19,54,57,59,60]。图7.1为刘国梁和郝丽珍（2003）^[17]分析该沙尘暴资料提到的全国 355 个站 1961-2000 沙尘暴总变化趋势。

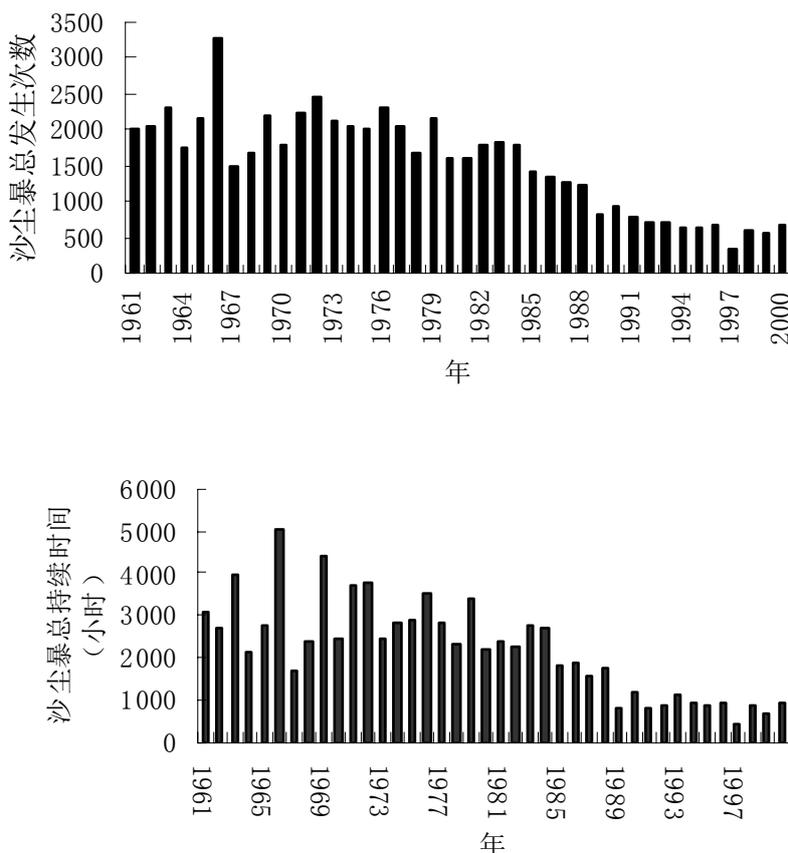


图 7.1 沙尘暴总发生次数和总持续时间（来自刘国梁和郝丽珍(2003)^[17]）

Fig. 7.1 The sand-dust storm occurrences and duration times

以往沙尘暴资料的分析结果显示建国以来中国沙尘暴发生频次和规模呈增加趋势^[11]，并且期间沙漠面积扩大^[61-67]。但来源于NASA的TOMS气溶胶指数（见图7.2）^[59]显示，中国北方包括黄土高原区域气溶胶指数明显存在下降趋势，支持沙尘暴天气的下降趋势。来自UCAR的海平面气压资料（见图7.3）^[59]显示，1991-2000蒙古高压比前几个阶段弱。中国北方的气候受蒙古高压（也叫西伯利亚高压）影响很大，蒙古高压是影响和控制亚洲大陆最大和最强的环流系统，它与中国北方干旱大风天气有关^[68-70]，蒙古高压变弱也支持沙尘暴天气下降。因此有理由相信，国家气象局整理的沙尘暴资料没有问题。但是回答对沙尘暴资料的质疑，还需要解释“中国北方沙漠面积扩大”与“中国北方沙尘暴频次下降”为什么可以同时存在，因为沙漠面积扩大的确对沙尘暴的发生有影响，沙漠化加重或扩大可以使地面更干燥松软，沙尘暴更容易发生。

这是一个重要的问题，因为它涉及到该沙尘暴资料的可靠性，也涉及到得出“中国北方沙漠面积扩大”的研究工作的可靠性，它还涉及到中国国家气象局的公信力。本章尝试利用 LASD 原理分析沙漠化对沙尘暴的影响，进而尝试回答这个问题。

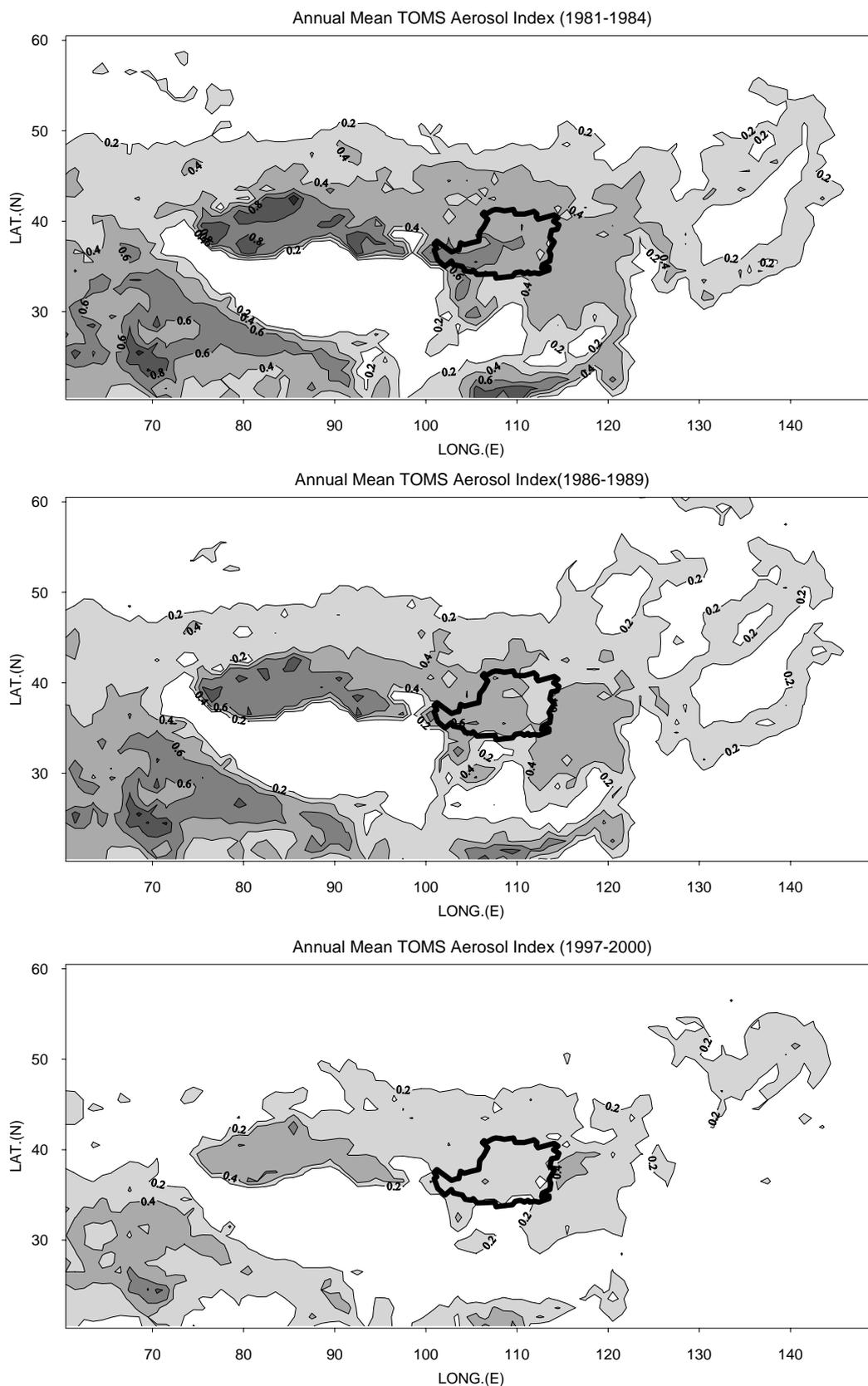


图 7.2 年平均气溶胶指数 (AI) (图中间隔为 0.2) [59]

Fig. 7.2 The annual mean TOMs Aerosol Index (AI), the contour interval is 0.2

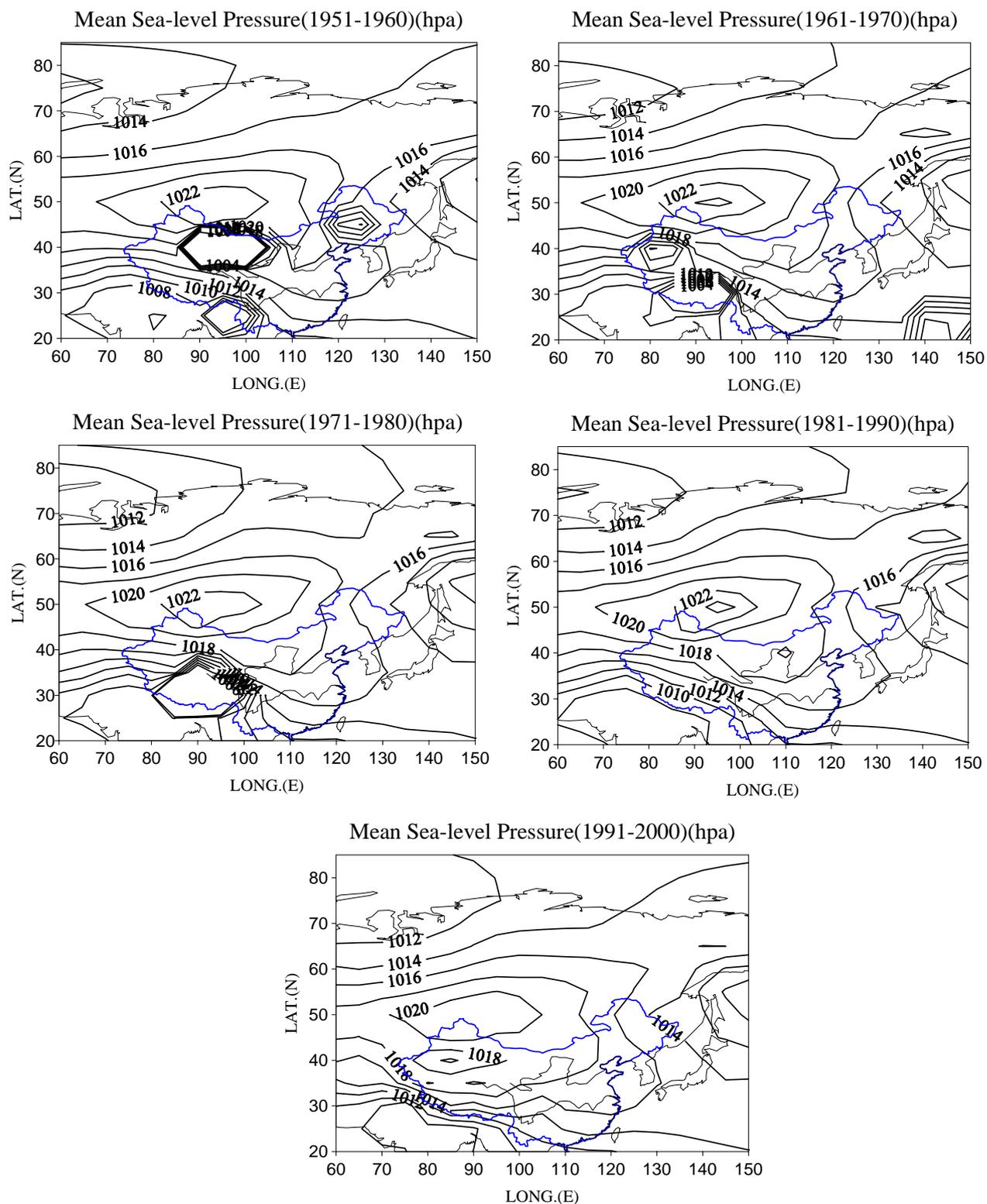


图 7.3 年平均海平面气压 (图中间隔 2hpa) ^[59] (注: 原图上下颠倒, 该图进行了修改)

Fig. 7.3 The annual mean sea - level pressure (the interval is 2 hpa)

7.2 沙漠化对 LASD 影响的原理

从沙尘暴的概念可以推断存在沙尘暴阈值风速。沙尘暴阈值风速反映地表的状况。起尘主要是来自一些局部区域，即所谓的“热点”^[71]。沙尘暴阈值风速应该与此类区域（热点）所占的比例有关^[72]。长期的降雨或径流使植被生长，地面形成结块，从而降低“热点”的比例。石块的覆盖也有类似植被的作用^[73]。

沙尘暴阈值风速 V_t 与 LASD(即持续时间大于 t 的沙尘暴次数 N 满足 $\lg(N)=a-bt$) 中的 b 值是单调递增关系。而沙尘暴持续时间累积的 Weibull 函数($N=N_0\exp(-(t/C)^K)$) 中的 K 值是判定 LASD 成立的条件。沙尘暴阈值风速为恒定时（或沙尘暴阈值风速的变化对沙尘暴持续时间累积分布影响可以忽略时），用 Weibull 分布描述的沙尘暴持续时间累积分布的 K 值接近 1，且用“ $\lg(N)=a-bt$ ”拟合沙尘暴持续时间累积分布的拟合相关指数 R_{LH}^2 较大。因此假设 $0.7 < K < 1.3$, $R_{LH}^2 > 0.95$, LASD 成立，其中的 b 值与该时段平均沙尘暴阈值风速一一对应，忽略该时段沙尘暴阈值风速的波动对 b 值的影响。也即存在较大 b 值对应较大沙尘暴阈值风速和较小“热点”面积所占比例。因此，同一区域不同时期 LASD 的 b 值的差异，反映其平均沙尘暴阈值风速的差异，也即反映容易起尘的“热点”面积所占比例的差异，或沙漠化程度的差异。上述原理的思路可以用图 7.4 描述。

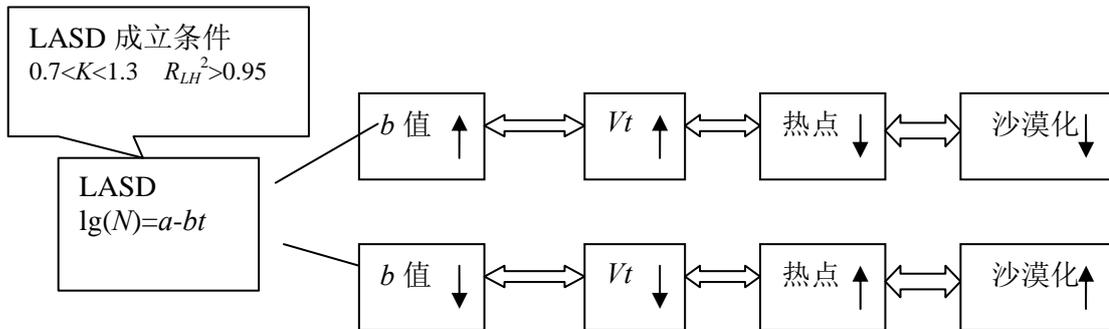


图 7.4 沙漠化和 LASD 关系示意图

Fig. 7.4 Schematic map for the relationship between the desertification and LASD

本章对比黄土高原以及其中的盐池站（图 3.1 的 29 号站）和榆林站（图 3.1 的 24 号站）1958-1978 年和 1979-2000 年春季沙尘暴持续时间累积分布的 b 值，来验证上述原理。

7.3 结果与分析

盐池在 1958-1978 年, 春季累积记录到 299 次沙尘暴, 其平均持续时间为 154.2min。图 7.5 为计算的 299 个持续时间值的分布, 持续时间大于 t 的个数 N 用 $lg(N)=a-bt$ 拟合, 其中的 b 值为 $0.1723 hr^{-1}$, 拟合相关指数 $R_{LH}^2=0.970 > 0.95$ 。 $K=0.9668$ 和 $C/T=0.9818$ 均接近 1。盐池在 1979-2000 年, 春季累积记录到 283 次沙尘暴, 其平均持续时间为 188.7min。图 7.6 为 283 个持续时间值的分布, 持续时间大于 t 的个数 N 用公式 $lg(N)=a-bt$ 拟合, b 值为 $0.1280 hr^{-1}$, 拟合相关指数 $R_{LH}^2=0.989 > 0.95$ 。 $K=0.9895$ 和 $C/T=1.0184$ 也接近 1。均满足 $0.7 < K < 1.3$, 且 $R_{LH}^2 > 0.95$, 因此认为由沙尘暴持续时间累积分布计算的 b 值与该时段平均沙尘暴阈值风速一一对应, 忽略该时段沙尘暴阈值风速的波动对 b 值的影响。

盐池 1958-1978 年春季的 b 值 ($0.1723 hr^{-1}$), 大于 1979-2000 年春季的 b 值 ($0.1280 hr^{-1}$)。因此, 对于盐池 1958-2000 年春季沙尘暴阈值风速减小。 b 值与沙尘暴平均持续时间倒数 $1/T$ 正相关性也很高, 1958-1978 年盐池春季沙尘暴平均持续时间为 154.2min 小于盐池 1979-2000 年春季沙尘暴平均持续时间(188.7min), b 值与 T 反映的规律一致。尽管盐池 1958-2000 沙尘暴天气次数减少微弱, 盐池春季沙尘暴阈值风速减小, 表明盐池土地沙漠化加重。

图 7.7 是榆林 1958-1978 年沙尘暴持续时间累积分布, 图 7.8 是榆林 1979-2000 年沙尘暴持续时间累积分布, 图 7.9 是黄土高原 56 个站 1958-1978 年沙尘暴持续时间累积分布, 图 7.10 是黄土高原 56 个站 1979-2000 年沙尘暴持续时间累积分布。表 7.1 为盐池、榆林和黄土高原 56 站 1958-1978 年和 1979-2000 年春季沙尘暴持续时间累积分布的 b 值、 T 、 N_0 、 K 、 C/T 和 R_{LH}^2 。可以发现 1958-1978 年的 b 值均大于对应 1979-2000 年的 b 值, 1958-1978 年的沙尘暴平均持续时间 T 小于对应 1979-2000 年的 T 。

上述只是盐池、榆林 2 个站和黄土高原 56 个站整体进行的分析, 对黄土高原 56 个站每个站计算的 1958-1978 年和 1979-2000 年春季沙尘暴平均持续时间 $T_{1958-1978}$ 和 $T_{1979-2000}$, 结果见表 8.2, 56 个站 T 增加的有 36 个站, T 减小的有 20 个站, 差的最大值为 240min, 最小值为 -149.5min, 图 7.11 为 T 增加站和减小站的分布, 还可以发现 T 减小的有 20 个站中有 15 个站是沿黄河分布, 可能是黄河水的灌溉使当地沙漠化逆转。

上述分析, 可以认为 1958-2000 年春季黄土高原大多数地区沙尘暴阈值风速减小(也

即其土地沙漠化加重), 也存在部分地区沙尘暴阈值风速增大(也即其土地沙漠化减轻)。

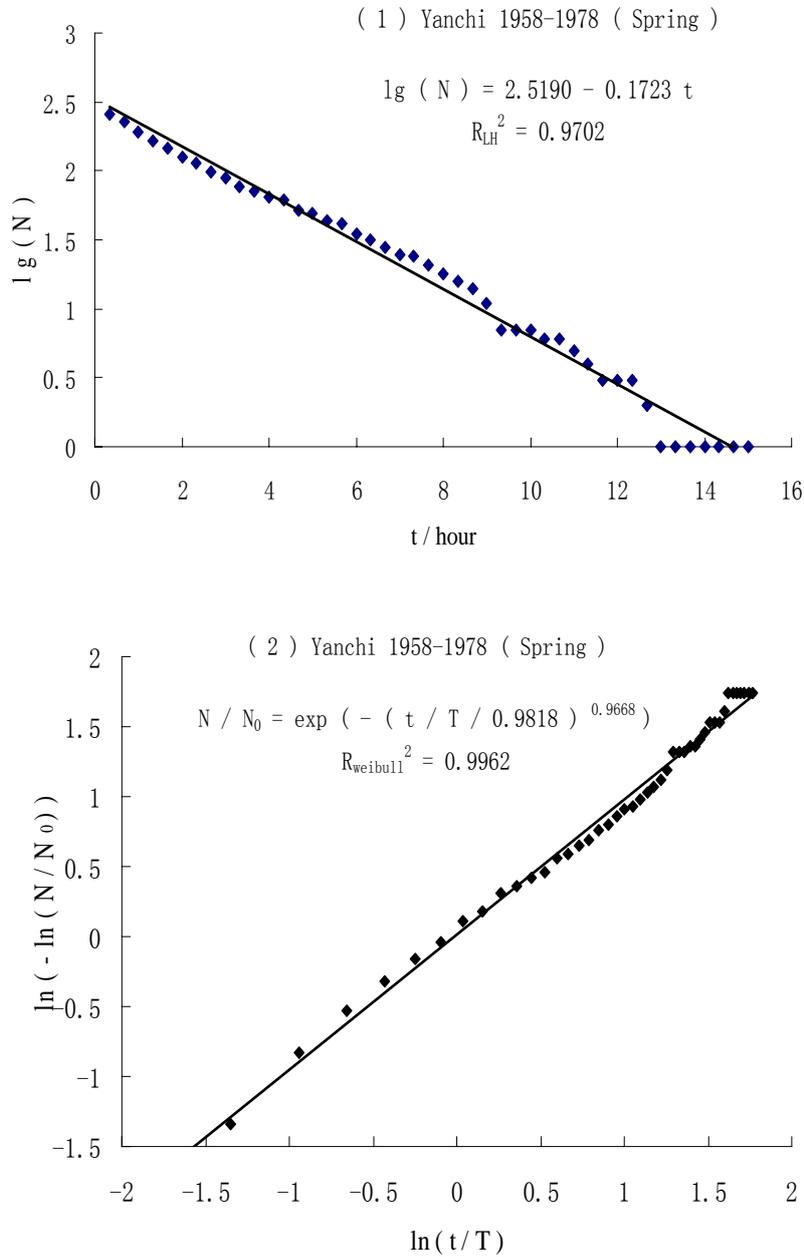


图 7.5 1958-1978 年盐池春季沙尘暴持续时间累积分布 (使用同样的数据绘制, 1): $\lg(N)=a-bt$ 拟合 (LASD); 2): $N=N_0\exp(-(t/C)^K)$ 拟合 (Weibull 分布), $T=154.2 \text{ min}$ $N_0=299$)

Fig. 7.5 Cumulative distribution of the duration time for the spring sand-dust storms data in Yanchi for 1958-1978 (Figures show the same data plotted with different values on the axes; 1): regressed with $\lg(N)=a-bt$, 2): regressed with $N=N_0\exp(-(t/C)^K)$, $T=154.2 \text{ min}$, $N_0=299$)

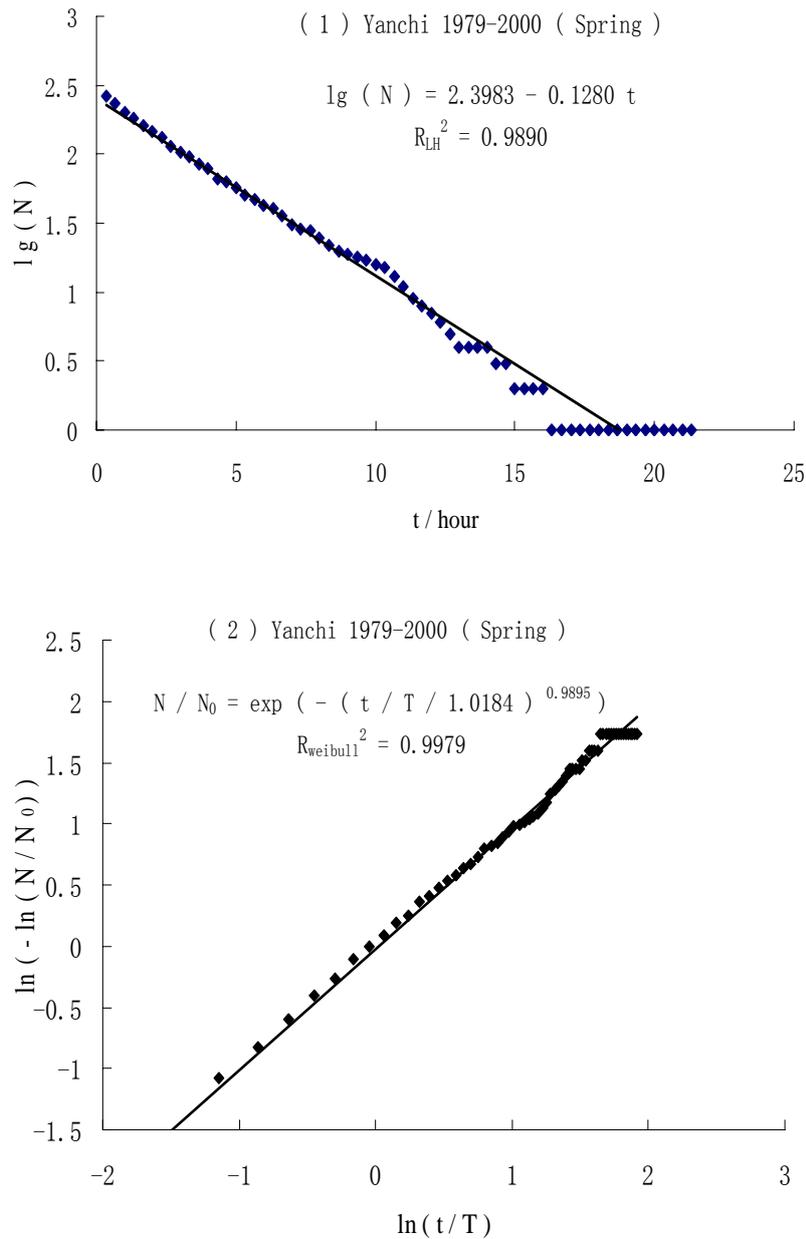


图 7.6 1979-2000 年盐池春季沙尘暴持续时间累积分布（使用同样的数据绘制，1）： $\lg(N)=a-bt$ 拟合（LASD）；2）： $N=N_0\exp(-(t/C)^K)$ 拟合（Weibull 分布）， $T=188.7 \text{ min}$ ， $N_0=283$ ）

Fig. 7.6 Cumulative distribution of the duration time for the spring sand-dust storms data in Yanchi for 1979-2000 (Figures show the same data plotted with different values on the axes; 1): regressed with $\lg(N)=a-bt$, 2): regressed with $N=N_0\exp(-(t/C)^K)$, $T=188.7 \text{ min}$ and $N_0=283$)

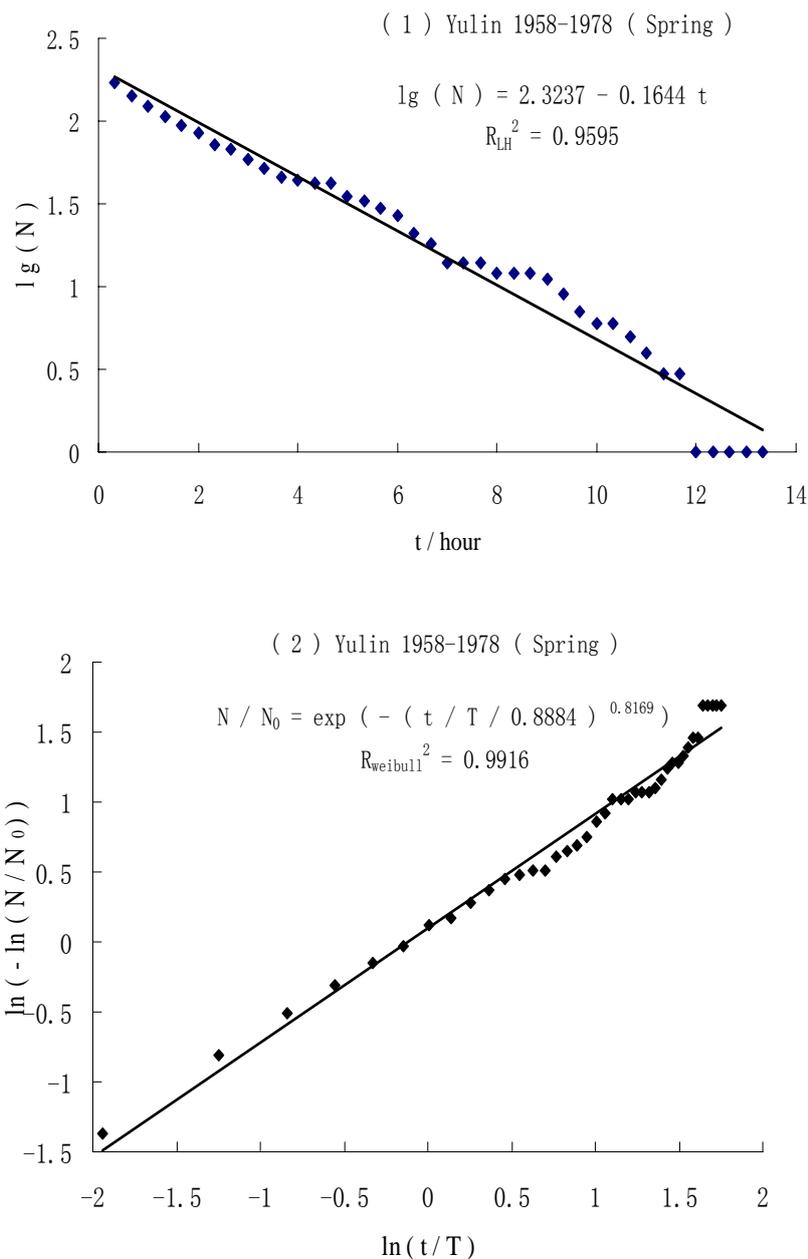


图 7.7 1958-1978 年榆林春季沙尘暴持续时间累积分布 (使用同样的数据绘制, 1): $\lg(N)=a-bt$ 拟合 (LASD); 2): $N=N_0\exp(-(t/C)^K)$ 拟合 (Weibull 分布), $T=139.1 \text{ min}$, $N_0=222$)

Fig. 7.7 Cumulative distribution of the duration time for the spring sand-dust storms data in Yulin for 1958-1978 (Figures show the same data plotted with different values on the axes; 1): regressed with $\lg(N)=a-bt$, 2): regressed with $N=N_0\exp(-(t/C)^K)$, $T=139.1 \text{ min}$ and $N_0=222$)

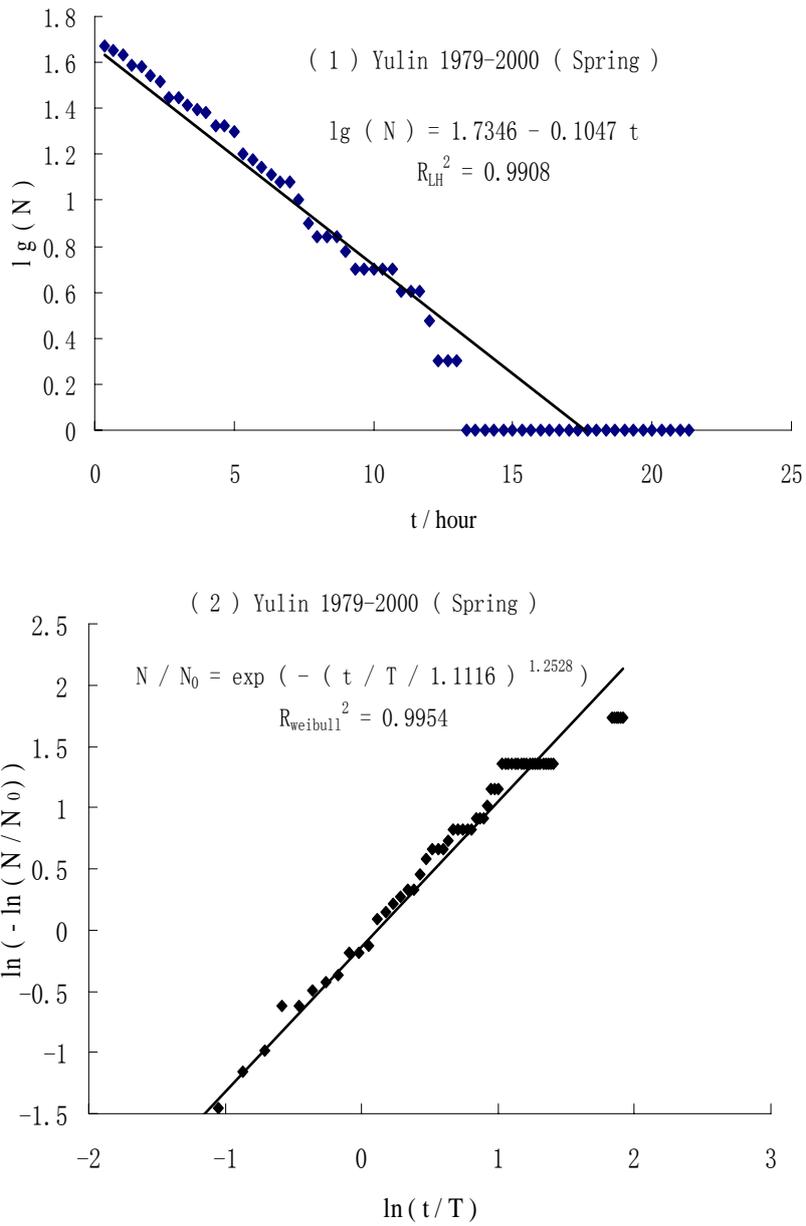


图 7.8 1979-2000 年榆林春季沙尘暴持续时间累积分布 (使用同样的数据绘制, 1): $lg(N)=a-bt$ 拟合 (LASD); 2): $N=N_0exp(-(t/C)^K)$ 拟合 (Weibull 分布), $T=285.9$ min, $N_0=48$)

Fig. 7.8 Cumulative distribution of the duration time for the spring sand-dust storms data in Yulin for 1979-2000 (Figures show the same data plotted with different values on the axes; 1): regressed with $lg(N)=a-bt$, 2): regressed with $N=N_0exp(-(t/C)^K)$, $T=285.9$ min and $N_0=48$)

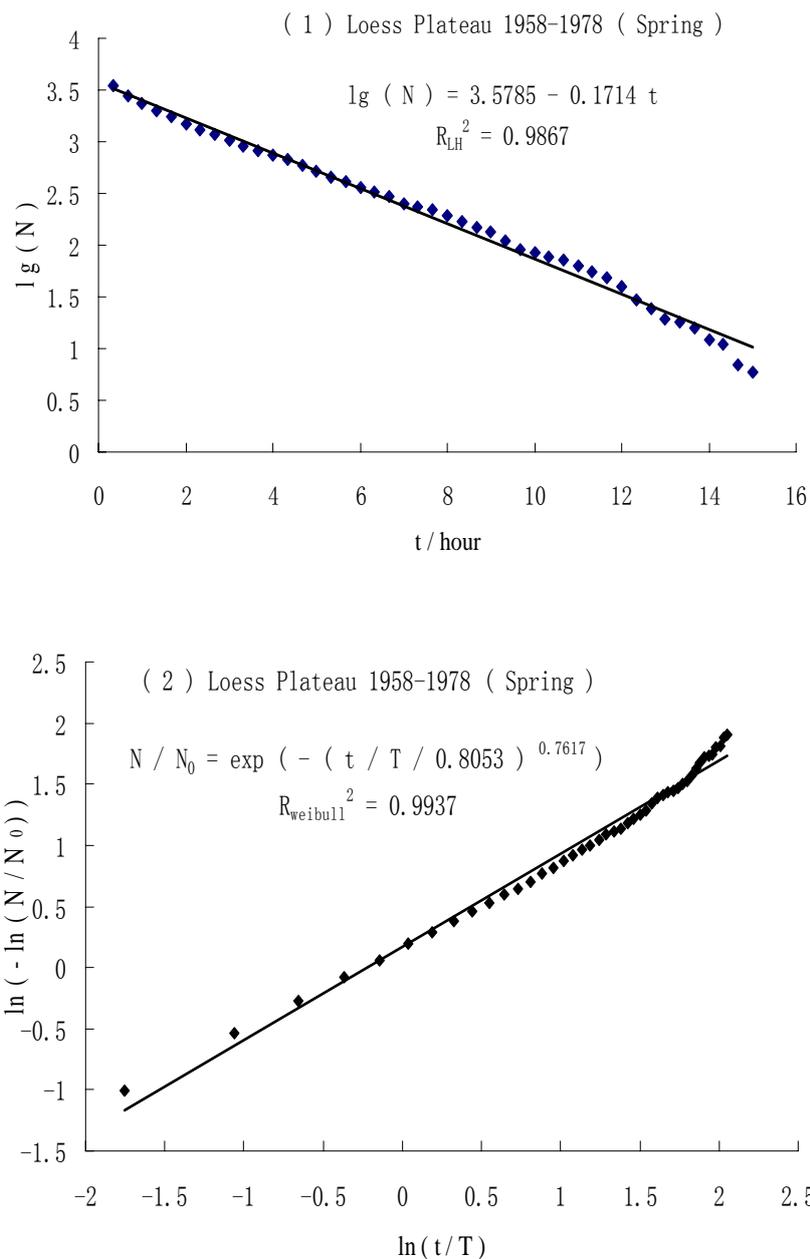


图 7.9 1958-1978 年黄土高原春季沙尘暴持续时间累积分布(使用同样的数据绘制, 1): $\lg(N)=a-bt$ 拟合 (LASD); 2): $N=N_0 \exp(-(t/C)^K)$ 拟合 (Weibull 分布), $T=115.7\text{min}$, $N_0=4994$)

Fig. 7.9 Cumulative distribution of the duration time for the spring sand-dust storms data in the Loess Plateau for 1958-1978 (Figures show the same data plotted with different values on the axes; 1): regressed with $\lg(N)=a-bt$, 2): regressed with $N=N_0 \exp(-(t/C)^K)$, $T=115.7 \text{ min}$ and $N_0=4994$)

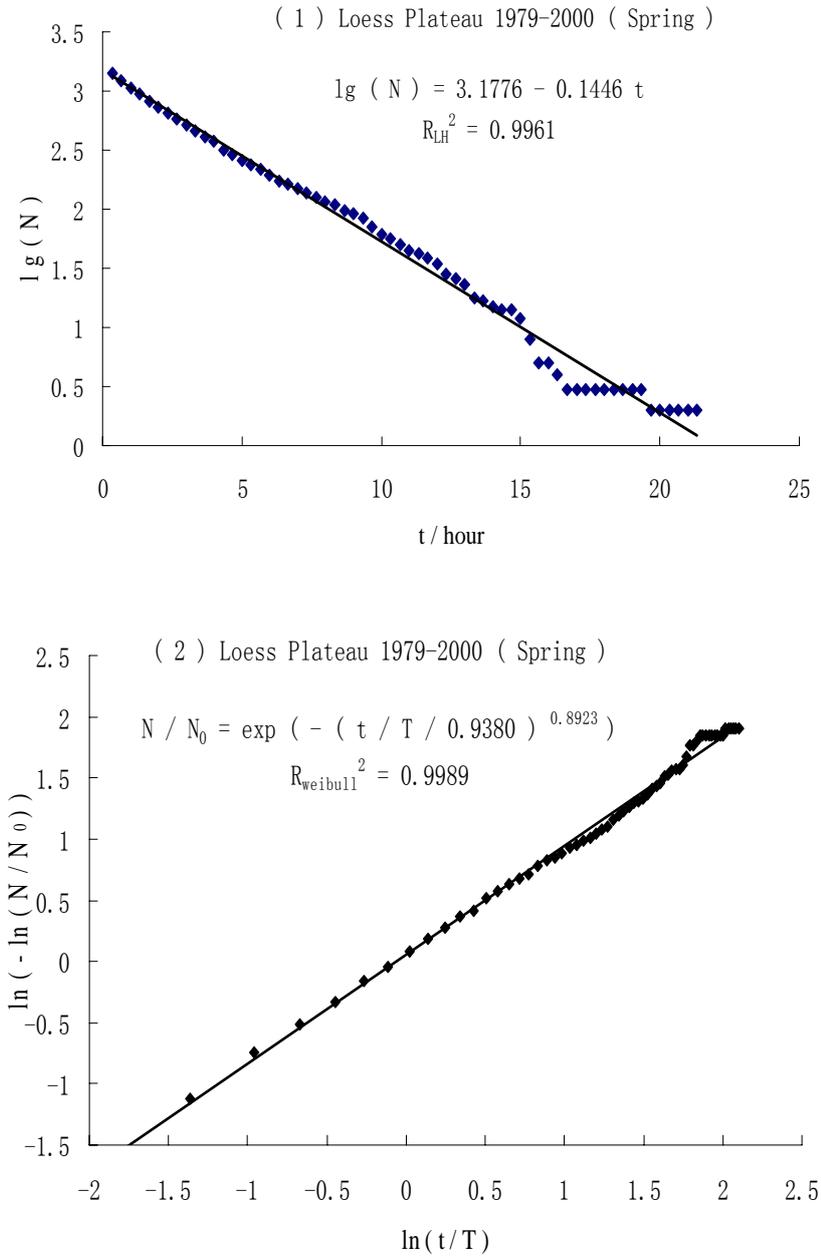


图 7.10 1979-2000 年黄土高原春季沙尘暴持续时间累积分布 (使用同样的数据绘制, 1): $\lg(N)=a-bt$ 拟合 (LASD); 2): $N=N_0\exp(-(t/C)^K)$ 拟合 (Weibull 分布), $T=156.7$ min, $N_0=1707$)

Fig. 7.10 Cumulative distribution of the duration time for the spring sand-dust storms data in the Loess Plateau for 1979-2000 (Figures show the same data plotted with different values on the axes; 1): regressed with $\lg(N)=a-bt$, 2): regressed with $N=N_0\exp(-(t/C)^K)$, $T=156.7$ min and $N_0=1707$)

表 7.1 盐池、榆林和黄土高原 1958-1978 年和 1979-2000 年春季沙尘暴持续时间累积分布的参数比较

Table 7.1 Comparing the characters of sand-dusts storms duration time distribution of the spring of 1958-1978 and 1979-2000 for Yanchi, Yulin and the Loess Plateau

		盐池	榆林	黄土高原
沙尘暴总次数 N_0	1958-1978	299	222	4994
	1979-2000	283	48	1707
平均持续时间 T (min)	1958-1978	154.2	139.1	115.7
	1979-2000	188.7	285.9	156.7
K	1958-1978	0.9668	0.8169	0.7617
	1979-2000	0.9895	1.2528	0.8923
C/T	1958-1978	0.9818	0.8884	0.8053
	1979-2000	1.0184	1.1116	0.9380
$b(\text{hr}^{-1})$	1958-1978	0.1723	0.1644	0.1714
	1979-2000	0.1280	0.1047	0.1446
R_{LH}^2	1958-1978	0.9702	0.9595	0.9867
	1979-2000	0.9890	0.9908	0.9961

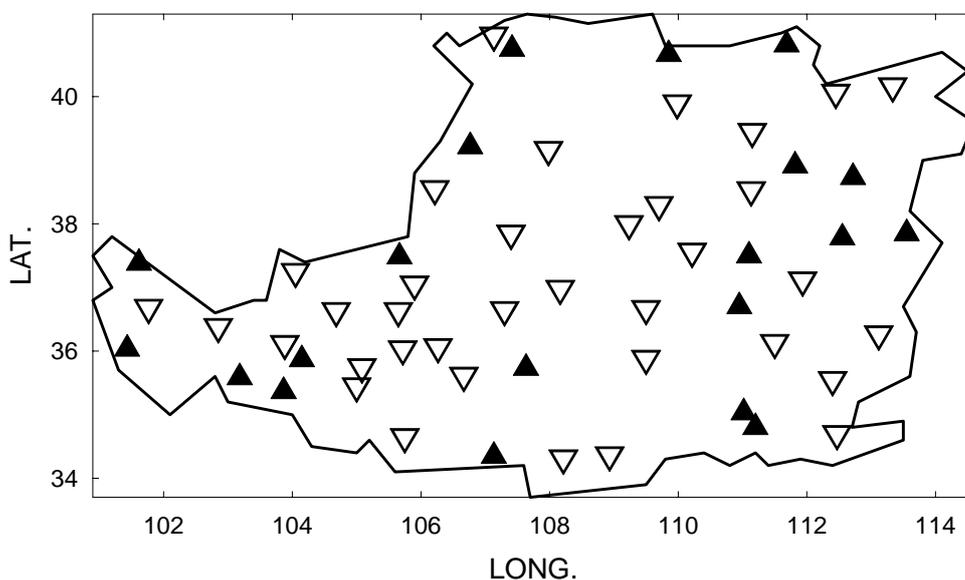


图 7.11 平均沙尘暴持续时间 T 增加站和减小站的分布 (▲: 减小站; ▽: 增加站)

Fig. 7.11 Distribution of increased stations and decreased stations for mean sand-dust storm duration time T (▲: Decreased station; ▽: Increased station)

表 7.2 黄土高原 56 站 1958-1978 年和 1979-2000 年春季沙尘暴平均持续时间

Table 7.2 Mean sand-dust storms duration times in spring of 1958-1978 and 1979-2000 for 56 stations of the Loess Plateau

编号	站名	$T_{1958-1978}$ (min)	$T_{1979-2000}$ (min)	差	编号	站名	$T_{1958-1978}$ (min)	$T_{1979-2000}$ (min)	差
1	门源	27.2	21.4	-5.9	29	盐池	154.2	188.7	34.5
2	景泰	110.2	140.3	30.2	30	吴旗	149.8	240.1	90.3
3	西宁	40.4	57.5	17.1	31	横山	130.9	192.8	61.9
4	贵德	115.3	0.0	-115.3	32	绥德	136.4	197.1	60.6
5	民和	101.5	107.0	5.5	33	忻州	195.0	45.5	-149.5
6	兰州	53.7	74.5	20.7	34	太原	208.3	115.8	-92.5
7	靖远	80.7	121.9	41.2	35	阳泉	226.2	152.3	-73.9
8	榆中	209.3	71.8	-137.6	36	海源	107.5	184.5	76.9
9	临夏	146.2	138.6	-7.6	37	同心	111.8	157.7	45.9
10	临洮	167.3	114.6	-52.7	38	固原	114.5	138.9	24.4
11	会宁	175.5	209.7	34.2	39	环县	183.8	199.0	15.3
12	华家岭	204.1	237.6	33.5	40	延安	117.7	247.4	129.7
13	杭锦后旗	111.4	222.9	111.5	41	隰县	303.3	265.9	-37.4
14	包头	72.6	67.2	-5.3	42	介休	156.1	311.7	155.5
15	呼和浩特	90.0	78.4	-11.7	43	临汾	113.9	253.3	139.3
16	右玉	161.1	191.7	30.6	44	长治	54.5	153.2	98.6
17	大同	109.6	122.5	12.8	45	西吉	118.1	162.9	44.9
18	临河	107.9	93.2	-14.7	46	平凉	153.1	188.1	35.0
19	惠农	141.7	131.9	-9.8	47	西峰镇	154.3	148.6	-5.7
20	鄂托克旗	141.9	190.0	48.1	48	洛川	167.6	407.6	240.0
21	东胜	140.4	198.3	57.9	49	运城	146.1	85.0	-61.1
22	河曲	110.5	172.9	62.4	50	阳城	198.8	265.0	66.3
23	银川	62.3	86.0	23.7	51	天水	50.7	62.2	11.5
24	榆林	139.1	285.9	146.7	52	宝鸡	180.6	178.0	-2.6
25	五寨	92.9	48.3	-44.6	53	武功	0.0	83.7	83.7
26	兴县	332.2	469.3	137.1	54	西安	188.6	295.3	106.7
27	原平	192.4	141.9	-50.5	55	三门峡	102.5	0.0	-102.5
28	中宁	192.4	150.3	-42.1	56	洛阳	83.6	193.0	109.4

7.4 结论与讨论

上述分析显示,黄土高原 1958-2000 年沙漠化扩大、沙尘暴频次下降,这与我们目前的认识一致。从 LASD 推断沙漠化扩大可以使 LASD 的 b 值减小(或沙尘暴平均持续时间 T 延长),上述分析也印证了该推断。同时分析也表明:黄土高原 1958-1978

年春季沙尘暴次数高于 1979-2000 年春季的沙尘暴次数,但对应时期的 b 值或 $(1/T)$ 显示沙漠化加重。也即“土地沙漠化加重”和“沙尘暴减少”这两个在我们概念中似乎互相冲突的现象,是由同一个沙尘暴资料展现出来的现象。“沙尘暴减少趋势”,“沙漠化加重”是这个沙尘暴资料不同角度的现象。把该结论推广到整个中国北方,还需要通过分析更大范围的资料来确证,但通过对黄土高原的分析,是可以说明对整个中国北方“沙尘暴呈减少趋势”和“沙漠面积呈扩大趋势”也是可以同时存在的,它们不是两个理论上互相冲突的现象,因“中国北方沙漠化扩大”和“国家气象局整理的沙尘暴资料所反应的下降趋势”而质疑国家气象局整理的沙尘暴资料的可靠性,逻辑上不成立。

本文的分析显示对盐池和榆林以及黄土高原整体,1958-2000 年沙尘暴阈值风速减小,土地沙漠化加重。也即反应气候变化或人类活动导致除风速之外的其它影响沙尘暴的因素的变化使春季沙尘暴更容易发生。结合图 2.1 所示模型,推测 1958-2000 年黄土高原沙尘暴天气的整体下降趋势主要是风速变化造成的,并且这种作用还抵消了土地沙漠化加重对沙尘暴天气影响的效果。在沙尘天气功率谱分析中^[60]发现的沙尘暴天气与风速变化低频对应,而与降雨量和蒸发量低频不同步,对沙尘天气的功率谱分析是支持上述推测的。尽管上述分析只是对黄土高原进行的分析,能否给整个中国北方下同样的结论,还需进一步的分析,但这个解释可以作为初步的猜测,它也为进一步研究指明方向。

目前认为沙尘暴也是土地沙漠化发展到一定程度的具体体现,对沙漠化具有一定的指示意义。上述分析表明 LASD 的 b 值或沙尘暴平均持续时间 T 可以作为土地沙漠化的指示指标来考虑。

8 结论

本文以黄土高原为例，对 LASD（即沙尘暴发生频次与持续时间满足： $\lg N = a - bt$ ， N 为持续时间大于 t 的沙尘暴次数）进行了深入细致的研究，发现 LASD 成立的条件，并应用 LASD 原理分析了沙漠化对沙尘暴的影响。

LASD 最早是作者通过分析实际沙尘暴资料发现的一个规律，作者早期的研究也表明在沙尘暴阈值风速存在的假设下就可以推导出 LASD，LASD 的 b 值随沙尘暴阈值风速单调递增。本文对 LASD 研究的新成果是：（1）发现 LASD 成立要求沙尘暴阈值风速近似不随时间变化。（2）沙尘暴持续时间累积分布（即 N 与 t 的关系）也可以用以下两种形式来拟合： $N = N_0 \exp(-(t/C)^K)$ （Weibull 分布， K 和 C 为拟合常数 N_0 为沙尘暴总次数）和 $N = N_0 \exp(-t/T)$ （ K 取 1， C 取平均沙尘暴持续时间 T 的特殊 Weibull 分布），这两种形式都有价值，对 LASD 都有意义，其中 $N = N_0 \exp(-(t/C)^K)$ 统计上效果最好，它可以提供实践中判断 LASD 成立的条件，即 K 值在 1 附近，本文假设为 $0.7 < K < 1.3$ （实践上 LASD 成立还需要一个条件：即用 $\lg N = a - bt$ 拟合 N 与 t 的拟合相关指数较大，本文取 ≥ 0.95 ，这两个条件合在一起可以替代“沙尘暴阈值风速近似不随时间变化”）， $N = N_0 \exp(-t/T)$ 对单站较好，参数不受沙尘暴次数的限制，容易计算（只有平均沙尘暴持续时间 T 和沙尘暴总次数 N_0 ），在 LASD 的 b 值计算误差较大，或无法计算 b 值，可以考虑用 $1/T$ 乘系数替代（本文图 7.11 就是用 $1/T$ 定性地替代 b 的一个例子）。（3）本文依据 LASD 原理中“LASD 的 b 值随沙尘暴阈值风速单调递增”的定性关系，推断沙漠化可以使 LASD 中的 b 值减小，通过分析黄土高原沙尘暴资料，该推断得到了印证。对实际沙尘暴资料的分析，同时也显示同一个沙尘暴资料既可以展现 1958 - 2000 年黄土高原沙尘暴整体下降，又可以展现黄土高原沙漠面积扩大。这个结果为说服对国家气象局整理沙尘暴资料的可靠性尚有疑虑的人提供了参考。

本文主要是对 LASD 的理论研究，对 LASD 的应用也仅是利用了 b 值与沙尘暴阈值风速 V_t 的定性关系。对 LASD 进一步的应用，应考虑在建立了 b 与 V_t 定量关系的基础上进行，这也是今后进一步研究的内容。 b 与 V_t 的定量关系可能有助于实现，在沙尘暴的天气预报中利用气象站整理的沙尘暴时间记录资料。图 2.1 所示力学模型，是沙尘暴阈值风速概念模型，LASD 的理论研究均是以该模型为基础进行的。建立 b 与 V_t 的定量关系，我们也考虑利用该模型。

参 考 文 献

- [1] 中国气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 2003
- [2] 杨德保, 尚可政, 王式功. 沙尘暴[M]. 北京: 气象出版社, 2003
- [3] Brazel A J. The relationship of weather types to dust storm generation in Arizona (1965 —1980) [J]. *Journal of Climatology*, 1986, 6: 255-275
- [4] 焦彦军, 钱正安. “93.5.5”特强沙尘暴成因的数值模拟研究. 中国沙尘暴研究[C]. 北京: 气象出版社, 1997: 134-141
- [5] 王式功, 杨德保, 孟梅芝, 等. 甘肃河西“5. 5”黑风天气系统结构特征及其成因分析[J]. *甘肃气象*, 1993, 11 (3): 28-31
- [6] 郑新江, 刘诚, 崔小平, 等. 沙暴天气的云图特征分析[J]. *气象*, 1995, 21(2): 27-31
- [7] 徐希慧. 塔里木盆地沙尘暴的卫星云图分析与研究. 中国沙尘暴研究[C]. 北京: 气象出版社, 1997: 88-91
- [8] Yang D Z. A case study on sandstorm [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1991, 5(2): 150-155
- [9] 江吉喜. 一次特大沙尘暴成因的卫星云图分析[J]. *应用气象学报*, 1995, 6 (2): 177-184
- [10] 邱金桓, 孙金辉. 沙尘暴的光学遥感及分析[J]. *大气科学*, 1994, 18 (1): 1-10
- [11] 王式功, 董光荣, 陈惠忠, 等. 沙尘暴研究的进展[J]. *中国沙漠*, 2000, 20 (4) : 349-356
- [12] 徐国昌. 甘肃“4.22”特大沙暴分析[J]. *气象学报*, 1979, 37(4): 26-35
- [13] 陈敏连, 郭清台, 徐建芬, 等. 黑风暴天气的研究和探讨[J]. *甘肃气象*, 1993, 11(3): 16-27
- [14] 胡泽勇, 黄荣辉, 卫国安, 等. 2000年6月4日沙尘暴过境时敦煌地面气象要素及地表能量平衡特征的变化[J]. *大气科学*, 2002, 26(1):1-8
- [15] McNaughton D L. Possible connection between anomalous anticyclones and sandstorms[J]. *Weather*, 1987, 42(1):8-13
- [16] 周自江, 王锡稳, 牛若芸. 近 47 年中国沙尘暴扬沙天气. 沙尘暴监测预警服务

- 研究[C].北京:气象出版社,2002:12-19
- [17] 刘国梁,郝丽珍.中国沙尘暴的下降趋势与气候变迁的对比[J].中国环境科学,2003,(23)4:341-343
- [18] Wang X-M, Dong Z-B, Zhang J-W, et al. Modern dust storms in China: an overview[J]. Journal of Arid Environments, 2004, 58:559-574
- [19] Wang, S-G, Wang J-Y, Zhou Z-J, et al. Regional characteristics of three kinds of dust storm events in China[J]. Atmospheric Environment, 2005, 39:509-520
- [20] Natsagdorj L, Jugder D, Chung Y-S. Analysis of dust storms observed in Mongolia during 1937–1999[J]. Atmospheric Environment, 2003, 37:1401-1411
- [21] Shaw G E. Transport of Asian dust desert aerosol to the Hawaiian island[J]. Journal of Applied Meteorology. 1980,19:1254-1259
- [22] Husar R B, Prospero J M, Stowe L L. Characterization of tropospheric aerosols over the oceans with the NOAA advanced very high resolution radiometer optical thickness operational product[J]. Journal of Geophysical Research, 1997,102:16889-16909
- [23] Jaffe D A, Anderson T, Covert D, et al. Transport of Asian air pollution to North America[J]. Geophysical Research Letter, 1999, 26:711-714
- [24] Merrill J T, Uemastu M, Bleck R. Meteorological analysis of long-range transport of mineral aerosols over the North Pacific[J]. Journal of Geophysical Research, 1989, 94:8584-8598
- [25] Park S U, Lee E H. Parameterization of Asian dust (Hwangsa) particle-size distributions for use in dust emission models[J]. Atmospheric Environment, 2004, 38:2155-2162
- [26] Tan S C, Shi G Y, Wang H. Long-rang transport of spring dust storms in Inner Mongolia and impact on the China seas[J]. Atmospheric Environment, 2012, 46:299-308
- [27] Gong D Y, Mao R, Fan Y D. East Asian dust storm and weather disturbance: Possible links to the arctic oscillation [J] . International Journal of Climatology, 2006, 26:1379-1396
- [28] Gong D Y, Mao R, Shi P J, et al. Correlation between East Asian dust storm frequency and PNA [J]. Geophysical Research Letter, 2007, 34: L14710, DOI:10.

1029/2007GL029944

- [29] Qian W H , Quan L S, Shi S Y. Variations of the dust storm in China and it's climatic control [J] . Journal of Climate, 2002, 15:1216-1229
- [30] Din g R Q, Li J P, Wang S G, et al. Decadal change of the spring dust storm in northwest China and the associated atmospheric circulation[J]. Geophysical Research Letter, 2005, 32: L02808, DOI: 10. 1029/ 2004GL021561
- [31] Zhu C, Wang B, Qian W. Why do dust storms decrease in northern China concurrently with the recent global warming? [J]. Geophysical Research Letter, 2008, 35: L18702, DOI: 10. 1029/2008GL034886
- [32] 仪垂祥. 非线性科学及其在地学中的应用[M]. 北京:气象出版社, 1995
- [33] 刘式达, 刘式适. 分形和分维引论[M]. 北京: 气象出版社,1993
- [34] 刘式达, 刘式适. 非线性动力学和复杂现象[M]. 北京: 气象出版社,1989
- [35] 李后强, 程光钺. 分形与分维: 探索复杂性的新方法[M]. 四川: 四川教育出版社,1990
- [36] 刘国梁, 郝丽珍. 沙尘暴次数和持续时间呈指数关系 $N=A \cdot 10^{-bt}$ [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2005, 41(4):642-645
- [37] 刘国梁, 郝丽珍. 对中国沙尘暴发生频次和持续时间的关系研究[J]. 中国环境科学, 2006, 26(z1): 1-3
- [38] Liu G L, Park S U. The logarithm-linear relationship of the occurrence frequency to the duration of Sand-dust storms: evidence from observational data in China[J]. Journal of Arid Environments, 2007,71:243-249
- [39] Liu G L, Hao L Z, Zhang F. Time interval distribution of sand-dust storms in theory: test with observational data in Yanchi, China[J]. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 2012, doi: 10.1088 / 1742-5468 / 2012 / 11/ P11015
- [40] 刘国梁. 地震时间间隔统计机理. 中国地球物理 2013 第十分会场论文集 [C]. 2013
- [41] Sumiyoshi A, Norikazu S. Scale-free statistics of time interval between successive earthquakes[J]. Physica A , 2005, 350: 588–596
- [42] 李强, 徐桂明. 中强地震时间间隔威布尔分布的预报应用[J] . 山西地震, 2002, (4) :22-23

- [43] Hasumi T., Akimoto T., Aizawa Y. The Weibull - log Weibull transition of the interoccurrence time statistics in the two-dimensional Burridge - Knopoff earthquake model[J]. *Physica A*, 2009,388: 483-490
- [44] Hasumi T., Chen C., Akimoto T., Aizawa Y. The Weibull-log Weibull transition of interoccurrence time for synthetic and natural earthquakes[J]. *Tectonophysics*, 2010,485: 9-16
- [45] 钱晓东, 秦嘉政, 李琼. 最大熵原理在地震时间间隔和震级分布中的应用. *地震地磁观测与研究*, 2009,30(5): 5-13
- [46] Orlovskya L., Orlovskya N., Durdyev A. Dust storms in Turkmenistan. *Journal of Arid Environments*[J], 2005, 60:83-97
- [47] 冯鑫媛, 王式功, 程一帆, 等. 中国北方中西部沙尘暴气候特征[J]. *中国沙漠*, 2010, 30(2): 394-399
- [48] Briggs G A, Thompson R S, Snyder W H. Dense gas removal from a valley by crosswinds[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1990, 24:1-38
- [49] 宣捷. 低层大气中固体粒子运动及其物理模拟[J]. *环境科学学报*, 1998, 18(4): 350-355
- [50] Alghamdi A A A, Akyurt M. On sandstorms and energy recovery from sandstorms[J]. *Energy conversion & Management*, 2001, 42:1153-1156
- [51] Bagnold R A. *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*[M]. London: Methuen, 1941
- [52] Lu H, Shao Y P. Toward quantitative prediction of dust storms: an integrated wind erosion modelling system and its applications[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2001, 16:233-249
- [53] Xuan J. Dust emission factors for environment of northern China[J]. *Atmospheric Environment*, 1999, 33:1767-1776
- [54] 刘国梁. 1991-2000年中国北方地面起尘[J]. *干旱地区资源与环境*, 2007, 21(10): 57-61
- [55] 蒋维楣, 孙鉴泞, 曹文俊, 等. *空气污染气象学教程*[M], 北京: 气象出版社, 2004
- [56] 杜荣骞. *生物统计学*[M]. 北京: 高等教育出版社, 海德堡: Springer, 1999
- [57] 刘国梁, 张峰. 1958~2000年黄土高原沙尘天气基本特征分析[J]. *干旱地区资源*

- 源与环境, 2013, 27(4):76-80
- [58] 盛骤, 谢式千, 潘乘毅. 概率与数理统计 (第二版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 1988
- [59] 刘国梁, 郝丽珍. 中国沙尘暴天气减少趋势的其它证据[J]. 中国沙漠, 2005, 25(3):448-449
- [60] 刘国梁, 郝丽珍, 张峰. 对中国北方沙尘天气和气候的功率谱比较[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(12): 88-91
- [61] 张琼, 钱永甫, 张学洪. 南亚高压的年际和年代际变化[J]. 大气科学, 2000, 24 (1) :67-78
- [62] 朱震达, 刘恕. 关于沙漠化的概念及其发展程度的判断[J]. 中国沙漠, 1984, 4(3): 2-8
- [63] 朱震达, 王涛, 刘恕. 从若干典型地区的研究对近 10 余年来中国土地沙漠化演变趋势的分析[J]. 地理学报, 1990, 45(4): 16-24
- [64] Kassas M. Desertification: a general review[J]. Journal of Arid Environments, 1995, 30(2):115-128
- [65] 王涛. 沙漠化研究进展[J]. 中国科学院院刊, 2009, 24(3):290-296
- [66] 慈龙骏. 全球变化对我国荒漠化的影响[J]. 自然资源学报, 1994, 9(4):289-303
- [67] 林年丰, 汤洁. 第四纪环境演变与中国北方的荒漠化[J], 吉林大学学报 (地球科学版), 2003, 33(2):183-191
- [68] 章基嘉. 中长期天气预报基础[M]. 北京:气象出版社, 1994
- [69] 丁一汇, 温市耕, 李运锦, 1991.冬季西伯利亚高压动力结构的研究[J]. 气象学报, 1991,49(6):430-439
- [70] 丁一汇. 高等天气学[M]. 北京: 气象出版社, 2005
- [71] Gillette D A. A qualitative geophysical explanation for “hot spot” dust emitting source regions[J]. Control of atmospheric Physics,1999, 72 (1):67-77
- [72] 刘国梁, 郝丽珍. 中国北方沙尘暴阈值风速的估计[J]. 中国沙漠, 2005, 25(1): 134-136
- [73] Li X Y, Liu L Y, Gong J D. Influence of pebble mulch on soil erosion by wind and trapping capacity for wind blown sediment[J]. Soil & Tillage Research, 2001,59: 137-142

研究成果

攻读学位期间发表论文清单 (* 通讯作者)

1. 刘国梁, 郝丽珍, 张峰. 对中国北方沙尘天气和气候的功率谱比较[J]. 干旱地区资源与环境, 2011, 25(12): 89-91(二级主学报:1C)
2. 刘国梁. 对企业内部三角形条件的探讨[J]. 经济研究导刊, 2011,(9): 1-32 (2B)
3. 郝丽珍, 刘国梁*. 一个复杂地形下空气污染物长期浓度计算模式[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2011, 34(4): 671-674(统计源:2A)
4. 郝丽珍, 赵钦, 刘国梁. 本专科大一学生问卷调查案例对比分析[J]. 太原大学学报, 2011, 12(3): 89-90(2B)
5. 郝丽珍, 刘国梁. 本专科院校学生群体心理调查对比分析[J]. 教育理论与实践, 2012, 32(2): 40-42(2A)
6. Liu G-L(刘国梁), Hao L-Z, Zhang F*. Time interval distribution of sand-dust storms in theory: test with observational data in Yanchi, China[J]. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 2012, doi: 10.1088/1742-5468/2012/11/P11015 (SCI, 特 2)
7. Hao Y-H, Liu G-L(刘国梁), Li H, et al. Investigation of karstic hydrological processes of Niangziguan Springs (North China) using wavelet analysis[J]. Hydrological Processes, 2012, 26: 3062-3069 (SCI, 特 2)
8. 刘国梁, 张峰*. 1958~2000 年黄土高原沙尘天气基本特征分析[J]. 干旱地区资源与环境, 2013, 27(4): 76-80(二级主学报: 1C)
9. 刘国梁. 地震时间间隔统计机理. 中国地球物理 2013 第十分会场论文集 (国内会议) [C]. 2013 (2B)
10. Mao J-J, Liu G-L(刘国梁), Cao B-B, Hao, Y-H*, Chen J-M, J. Yeh T-C. Identification of Strong Karst Groundwater Runoff Belt by Cross Wavelet Transform. Water Resour Manage, 2014, doi:10.1007/s11269-014-0645-8 (SCI, 特 2)
11. Liu G-L(刘国梁). The effect of climate change on the sand-dust storm duration times distribution for Loess Plateau, China. Proceeding of the Eighth International Conference on Aeolian Research, 2014, 175 (国际会议) (2A)
12. 郝丽珍, 刘国梁*. 黄土高原沙尘暴持续时间 LH 现象分析 [J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(1):145-148(二级主学报: 1C)

致 谢

首先要向每一个曾认真或试图认真阅读本论文的读者表示感谢!

随着论文完稿,我也越来越认识到论文的完成和论文所能达到的学术高度与我的父母分不开,与曾经培养我的母校和老师不开,与曾给予我帮助和鼓励的人分不开。在此也向他们表达我的谢意!

在此也向我不同时期的导师表达敬意和谢意!北京大学的宣捷老师, Seoul National University 的 Park Soon-Ung 老师,山西大学的张峰教授,他们是我先后不同时期的导师。他们都是令人尊敬的学者,他们严谨的学风、极端认真的为学态度和豁达的心态,感染着周围的人,他们是我一生学习的榜样。我的科研能力正是在他们的培养下不断得以提高。

另外,在攻读博士期间,黄土高原研究所的王琰老师、石伟老师、刘勇所长、王孟本教授、李洪建教授、史建伟老师、狄晓燕老师,以及生命科学学院的董刚老师曾给予了无私的帮助和支持,桑楠院长等环境与资源学院的领导和同事也给予了我很大的关怀和支持,校领导杨军教授给论文提出了宝贵的建议,校领导贾锁堂教授、刘维奇教授和研究生院张天才教授等也给予了我很大的支持和帮助,董川教授、程芳琴教授和赵艺学教授在论文完成阶段也提出了宝贵的建议和意见。在此也向他们表示我的感谢!

最后申明,本论文是在张峰教授的指导下完成,郝丽珍也在资料整理和计算机编程上给予协助。

刘国梁

2015年6月

个人简况及联系方式

个人简况： 刘国梁，男，山西平鲁人，主要从事大气物理与大气环境、生态学、气候变化等领域的研究，现就职于山西大学环境与资源学院。已发表学术论文 20 多篇，含 6 篇 SCI。毕业后继续在山西大学环境与资源学院任教。

联系方式： 山西大学 环境与资源学院 030006

电话： 13934246106

电子信箱： glliu@sxu.edu.cn

承 诺 书

本人郑重声明：所提交的学位论文，是在导师指导下独立完成的，学位论文的知识产权属于山西大学。如果今后以其他单位名义发表与在读期间学位论文相关的内容，将承担法律责任。除文中已经注明引用的文献资料外，本学位论文不包括任何其他个人或集体已经发表或撰写过的成果。

作者签名：

2015 年 6 月 10 日

学位论文使用授权声明

本人完全了解山西大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留并向国家有关机关或机构送交论文的复印件和电子文档，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或扫描等手段保存、汇编学位论文。同意山西大学可以用不同方式在不同媒体上发表、传播论文的全部或部分内容。

保密的学位论文在解密后遵守此协议。

作者签名：

导师签名：

2015 年 月 日