

兰州大学

硕士学位论文

中国霾天气的时空分布特征及其与气候环境变化的关系

姓名：胡亚旦

申请学位级别：硕士

专业：大气科学、气象学

指导教师：周自江;王式功

20090501

摘 要

本论文利用全国 721 个站点 1961-2007 年的高密度观测资料, 阐述了我国霾现象的时空分布特征, 揭示中国霾现象在年际和年代际时间尺度上的演变规律。定义年霾日在 1 天以上的站点组成霾天气主体区域, 探讨风力条件、降水条件及季风环流的变化对霾天气增减趋势的影响。然后, 采用相关分析等统计方法研究了霾天气对能见度、太阳辐射、日照时数、大气光学厚度、城市热岛现象的影响, 给出了一般规律。

(1) 中国的霾天气主要分布在 100°E 以东、 42°N 以南地区, 即中东部和南部较多, 西部和东北部地区相对较少。在同一区域内, 大中城市的霾天气较乡村明显偏多, “浊岛”现象明显。全国平均年霾日为 5.5 天, 其中华北的中部和西部, 西北的东南部, 华中大部, 华东大部, 华南西部和南部地区大于等于 10 天, 是灰霾天气的多发区。(2) 霾天气的季节分布基本上是冬多夏少。(3) 灰霾出现日数 20 世纪 60 年代全国平均只有 2.4 天, 21 世纪以来的年霾日比 20 世纪 60 年代增加了 4 倍之多, 上升趋势非常明显。(4) 47 年中国霾天气的总体趋势为波动增多, 线性倾向率为 $3.19\text{天}/10\text{a}$, 20 世纪 60 年代至 70 年代中期处于少霾的负位相, 1976-2000 年在很弱的正位相内振荡, 但近 5 年霾天气显著增多。47 年间中国霾天气序列有 2 次明显的突变, 其一位于 20 世纪 70 年代中期, 以 1975 年为突变点; 其二位于 2000 年之后。(5) 具体站点霾的年际变化趋势大致可分为三类, 第一类是波动上升型, 这些站点主要位于我国东部和南部。第二类是七八十年代存在年霾日高峰期, 近年来霾日相对较少型, 这些代表站点主要位于我国的华北及靠近西部地区。第三类是年际振荡频繁型, 这些代表站点主要位于我国西南部地区。(6) 霾天气主体区域内(年霾日 ≥ 1 天) 站点平均的最大风速 $f \geq 5\text{ m/s}$ 、 $f \geq 10\text{ m/s}$ 的日数与静风或微风(最大风速 $f < 3\text{ m/s}$) 的日数, 与霾日数具有很好的对应关系, 相关系数分别为 -0.809、-0.734、0.788。如此高的相关关系表明风力条件的变化对霾天气增减趋势的影响非常显著, 也进一步证明了风力条件是大气污染物稀释扩散的最主要动力源。(7) 考察发现, 35°N 以南地区霾天气与最大风速 $f \geq 5\text{ m/s}$ 的日数与霾日数基本呈负相关, 35°N 以北大部地区呈正相关。这种情况的存在说明了我国北部地区的霾天气诱发的一个主要因子来自于西北部

的浮尘、沙尘暴和扬沙天气,大的风力有利于浮尘粒子的搬运。(8)降水条件的变化对霾天气的增减趋势有十分明显的影响。研究表明,日降水量 0.1-0.9mm 的降水日数与霾的相关系数达到-0.716,说明微量或小量的降水对于霾的出现也有非常明显的抑制作用。(9)近 5 年(2002-2007 年)霾日数明显上升。综合分析风力条件与降水的变化可以看到,华北中南部、长江中下游和华南等经济发达或经济快速发展的地区,近 5 年风力 $f \geq 5 \text{ m/s}$ 日数显著减少,并且降水都有了明显的下降,这是导致近几年霾日数激增的两个十分重要的原因。(10)综合施能季风指数 I_{SHI} 和朱艳峰季风指数 I_{EAWM} 与霾日序列的关系,我们发现强季风年年霾日少,弱季风年大部份年霾日多。 I_{SHI} 指数与 I_{EAWM} 指数的年代际变化与霾日的年代际变化相关性明显,相关系数分别为-0.420 和-0.387,都达到了 $\alpha=0.01$ 的显著性检验标准。(11)47 年来,大气能见度处于稳定的下降趋势。年霾日数占差能见度日(能见度在 1km 至 10km 之间)的百分比越来越高,1961 年只占 11.9%,而到 2007 年占到了 51.7%,增加了 4.34 倍,霾现象对能见度的影响越来越大。优能见度日、差能见度日与年霾日序列的相关系数分别达到了-0.783 和 0.785,相关性明显。(12)霾现象导致地面太阳辐射和日照时数明显减少。1997-2007 十年平均太阳总辐射比 20 世纪 60 年代足足降低了 10.7%;1997-2007 十年平均日照时数比 20 世纪 60 年代减少了 213 个小时,降低了将近 10.1%。(13)霾天气主体区域的光学厚度值要比非霾主体区域站点的光学厚度平均值高出四分之一多,说明霾对大气光学厚度有着明显的影响。计算霾天气主体区域站点的光学厚度与年霾日的相关系数达到了 0.773,远远超出了 $\alpha=0.001$ 的显著性检验标准,说明霾现象直接导致了大气光学厚度的增加。(14)城市站点热岛效应随年霾日增多而增强,考察北京等 12 个城市城市热岛的强度与霾现象的相关系数,大部份站点存在正的相关性,如上海的相关系数有 0.767,远远超过了 $\alpha=0.001$ 的信度检验标准。

关键词:霾 时空分布特征 气候变化 能见度累积百分率法 季风指数 太阳辐射 大气光学厚度 城市热岛 相关分析

Abstract

The purpose of this paper is to investigate the temporal and spatial distribution characteristics of hazes through analyzing observation data available from major 721 meteorological stations across China for the period of 1961 to 2007. The study focuses on the mechanism of how climate factors such as wind, precipitation and monsoon circumfluence impact on the haze. The paper statistically analyzes the effect of haze to atmospheric visibility, solar radiation, sunshine time, atmospheric optical thickness and urban heat island.

- (1) Preliminary results indicate that hazes occur mainly in eastern China, east of 100°E, and southern China, south of 42°N, with some significant high-incidence centers called “muddy island”. The nation as a whole average haze day per year is 5.65. Areas with more than 10 days per year are the middle and west part in northern China, southeast portion in Northwestern China, most areas in central China and eastern China, the west part in western China and southern China.
- (2) Hazes occur more frequently during winter than during summer.
- (3) The nation as a whole average haze day per year is only 2.4 in 1960s while more than quadrupled in 2000s. This is a statistically significant increase.
- (4) During a period of 47 years, hazes in China nationwide have increased with a linear tendency of 3.19 days per decade and two abrupt change points, respectively in the mid 1970s and after the year of 2000. From 1961 to 1975, hazes in China occur less than the average with negative phase. Hazes fluctuate in weak positive phase from 1976 to 2000. In recent 5 years, hazes drastically increase every year.
- (5) Interannual variabilities of haze days in detail stations can be roughly classified into three categories. The first category is undulately rising, such as stations located in the eastern and southern China. The second category is a haze days peak in 1970s-1980s and decreased recently such as stations located in northern China and near western China. The third category is interannual oscillation frequently such as stations located in southwestern China.

- (6) The correlation coefficients, interannual scale, between hazes and three wind force indices (i. e. the number of days with wind force $f \geq 5$ m/s, $f \geq 10$ m/s and $f < 3$ m/s) are -0.809, -0.734 and 0.788 respectively. These significant correlations explain that the change of wind's dilute ability for air pollution does exert obvious influence on tendency of hazes.
- (7) Most of the correlation coefficients between hazes and wind force $f \geq 5$ m/s is negative to the north of 35° N while positive to the south of 35° N. The distribution of correlation coefficients demonstrate that one kind of sources of the haze in northern China are flying dust, flying sand and sandstorms which often happens in the Northwestern China. Strong wind is favorable for the floating dusts carrying.
- (8) The precipitation impose an obvious effect on the increasing trend of haze day. The correlation coefficients between haze day number and the number of day precipitation 0.1-0.9mm reaches -0.716. It indicates that light rain can also significantly reduce the appearance of haze.
- (9) In recent 5 years, 2002-2007, hazes drastically increase each year. According to comprehensive analysis of the variation of precipitation and wind forces, two main reasons are found that the day of wind force $f \geq 5$ m/s decreased and the precipitation reduced in the 5 years.
- (10) Comprehensive analysis of the Shi Neng monsoon index I_{SH} and Zu Yanfeng monsoon index I_{EAWM} , the study finds less haze days in strong monsoon year and more haze days in weak monsoon year. Significantly correlation is found between the decadal variation of I_{SH} , I_{EAWM} and haze day, the correlation coefficients is -0.420 and -0.387 respectively which reach $\alpha = 0.01$ significance testing standard.
- (11) The visibility in atmosphere decreased steadily in the 47 years. The percentage of the number of haze day in bad visibility day (visibility 1km-10km) increased. It was 11.9% in 1961 while 51.7% in 2007, having multiplied 4.3 times. There were significantly correlation between hazes and good visibility, bad visibility, the correlation coefficients are -0.783, 0.785 respectively.
- (12) Haze result in going down of surface solar radiation and the decreasing of

sunshine time. The average surface solar total radiation in 1997-2007 were lower 10.1% than 1960s'; The average sunshine time in 1997-2007 decrease 213 hours than 1960s', about 10.1%.

- (13) Atmospheric optical thickness in main area of haze is one fourth higher than it not in main area . The results suggest haze has obvious effect on atmospheric optical thickness. Computing the correlation coefficients between the number of haze days and atmospheric optical thickness reaches 0.773, far beyond $\alpha = 0.001$ significance testing standard. It shows that haze thickening the atmospheric optical thickness directly.
- (14) With the increasing of the num of haze day, the urban heat island is higher than before. Among 12 city's correlation coefficients between haze and urban heat island, most of them are positive correlation. For example, the correlation coefficients of Shanghai is 0.676, far beyond $\alpha = 0.001$ significance testing standard.

Key Words: haze; temporal and spatial distribution; climate change; visibility cumulative percentage method; monsoon index; solar radiation; atmospheric optical thickness ; urban heat island; correlation analysis

原创性声明

本人郑重声明：本人所呈交的学位论文，是在导师的指导下独立进行研究所取得的成果。学位论文中凡引用他人已经发表或未发表的成果、数据、观点等，均已明确注明出处。除文中已经注明引用的内容外，不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的科研成果。对本文的研究成果做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名：胡亚恩 日期：2019.5.27

关于学位论文使用授权的声明

本人在导师指导下所完成的论文及相关的职务作品，知识产权归属兰州大学。本人完全了解兰州大学有关保存、使用学位论文的规定，同意学校保存或向国家有关部门或机构送交论文的纸质版和电子版，允许论文被查阅和借阅；本人授权兰州大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用任何复制手段保存和汇编本学位论文。本人离校后发表、使用学位论文或与该论文直接相关的学术论文或成果时，第一署名单位仍然为兰州大学。

保密论文在解密后应遵守此规定。

论文作者签名： 胡亚旦 导师签名： 王成功 日期： 2019.5.27

第一章 绪 论

1.1 霾的基本概念

1.1.1 定义

根据中国气象局 2003 年版的《地面气象观测规范》^[1], 霾(或灰霾)是指大量极细微的干尘粒, 均匀浮游在空中, 使空气普遍混浊, 水平能见度小于 10.0km 的现象, 远处光亮物体微带黄色, 红色, 黑暗物体微带蓝色。形成霾的天气条件一般是气团稳定、较干燥, 在一天中任何时候均可出现。按照气象出版社 1994 年出版的《大气科学词典》^[2]的解释, 霾指悬浮在大气中的大量微小尘粒、烟粒或盐粒的集合体, 组成霾的粒子极小, 不能用肉眼分辨。

霾的厚度比较厚, 可达 1-3 公里在左右, 一般霾的日变化不明显。霾与雾、云不一样, 与晴空区之间没有明显的界线, 霾粒子的分布比较均匀, 因而在霾中能见度非常均匀; 而且灰霾粒子的尺度比较小, 从 0.001 微米到 10 微米, 平均直径大约在 0.3-0.6 微米左右, 肉眼看不到空中飘浮的颗粒物。由于灰尘、硫酸、硝酸等粒子组成的霾, 其散射波长较长的光比较多, 因而霾看起来呈黄色或橙灰色。

世界各国对霾的定义并不完全相同。如美国^[3], 把颗粒物和气体污染物导致的可察觉到的能见度降低现象称之为霾。它将霾定义为人为污染造成的可察觉的能见度降低, 对灰霾没有 10.0KM 的量化限制, 范围更宽, 更强调了污染因素。

香港天文台和澳门地球暨气象局称霾为烟霞(Haze)。

霾作为一种天气现象, 对人们生活影响最显著的影响是它的污染性。所以最近几年, 国内学者对霾的概念在粒子、现象、组成等多方面进行了进一步的探讨。比较有代表性的, 是广州热带海洋气象研究所专家吴兑^[4]提出的霾的定义: 空气中的灰尘、硫酸与硫酸盐, 硝酸和硝酸盐, 有机碳氢化合物等粒子能使大气混浊, 视野模糊并导致能见度恶化, 当水平能见度小于 10000 米时, 将这种非水成物组成的气溶胶系统造成的视程障碍称为霾。还有学者^[5]从环境污染角度, 指出灰霾是一种气溶胶和气体污染造成的城市和区域性污染现象。

1.1.2 识别霾的标准

(1) 识别霾的定性标准

根据霾的定义,在区别易于混淆的几种视程障碍现象如轻雾、浮尘、烟、扬沙等有比较明确的定性标准。具体如下:

从几种天气现象的概念看:

轻雾:由微小水滴或已湿的吸湿性质粒所构成的灰白色的稀薄雾幕,出现是水平能见度为 1.0-10.0km 以内。

霾:大量极细微的干尘粒等均匀地浮游在空中,使水平能见度小于 10.0km 的空气普遍混浊现象。

烟幕:大量的烟存在空气中,使水平能见度小于 10.0km。

浮尘:尘土、细沙均匀地浮游在空中,使水平能见度低于 10.0km。

扬沙:由于风大将地面尘沙吹起,使空气相当混浊,水平能见度在 1.0-10.0km 以内。

从各种现象出现的特征看:

轻雾:呈灰白色或灰色;有时较浅薄,就出现在离地十几会尺以内;有时可弥漫整个空间。

霾:远处光亮物体微带黄、红色,黑暗物体微带蓝色。这是区别于其他现象的主要特征之一。

烟幕:一般来说比较容易判别,远处来的烟幕呈黑色、灰色或赫色,日出、黄昏太阳呈红色,浓时还可以闻到烟味。

浮尘:远处物体呈土黄色,太阳呈苍白色或淡黄色。行驶的汽车停下后能明显看到灰尘的影响。

扬沙:天空浑浊,一片黄色。行人能明显感到尘土所引起的呛鼻等不适症状。

从各种天气现象出现的成因看:

轻雾:是由空气中水汽凝结而成的稀薄的雾。

霾:是由于大量极细微的尘粒,目力不能看出,均匀地浮游于空中,使空气普遍混浊。

烟幕:是由于城市、工矿区或森林火灾等排出的大量烟粒弥漫空中而成的。

浮尘:是由于远地或本地产生沙尘暴或扬沙后,尘粒等细粒浮游空中而形成的。

扬沙:是由于本地或附近尘沙被风吹起,使能见度显著下降。

从各种现象的天气条件和出现时间看:

轻雾:出现在大气层结比较稳定和空气潮湿的条件下,一般在早晚比较常见。

霾:需要稳定的气团和干燥的空气,一天当中任何时候均可能出现。

烟幕:需要稳定的气团,若有逆温层则有利于形成,它也是早晚时候较为常见。

浮尘:一般出现在无风或风较小的天气条件下,它出现的时间通常在冷空气过境前后。

扬沙:需要在风较大的天气条件下,大致出现在冷空气过境或雷雨、飑线影响时。

在通晓了这些现象之间的特征、成因、出现条件等区别后,大部分情况下,观测中是不难分辨这些现象的。但由于这些标准大都只是定性的,有比较大的人为主观因素在里面,所以如果能对识别霾的标准确立一些量化的指标,如能见度、湿度、粒径范围、粒子成份等量化指标,将会大大减少人为因素的干扰。

(2) 识别霾的定量标准

对于霾识别的量化指标,由于与最新的大气气溶胶科学进展结合得比较紧密,涉及环境、细粒子、化学、污染、光学等等方面学科,国外学者作了不少的研究^[68-69],国内现在还没有形成统一的、权威的定论,不少学者仍在探讨中^[115-118]。

如在区别霾与轻雾的相对湿度量化指标方面,目前全国还没有统一的标准。一些省市在实际观测中采用一些不成文的规定,如在湖北,在低能见度情况下,相对湿度大于等于 70%一律记为雾,相对湿度小于 60%则记为霾,相对湿度在 60%-70%时可记为雾也可记为霾,视具体情况而定;北京观测员代代相传的不成文标准是以相对湿度大于 70%记为雾或轻雾,相对湿度小于 70%记为霾;安徽省气象局业务处规定,相对湿度大于 70%为雾,小于 70%为霾。目前学术界提出比较有理论依据的观点是中国气象局广州热带海洋气象研究所吴兑^[4,6]提出的:根据气溶胶研究的最新成果,建议将相对湿度小于 80%时的大气混浊视野模糊导致的能见度恶化的天气现象确定为霾,相对湿度大于 90%时的大气混浊视野模糊导致的能见度恶化的天气现象确定为雾,相对湿度介于 80%-90%之间时的大气混浊视野模糊导致的能见度恶化是霾和雾的混合物共同造成的,但其主要成份应该是霾。香港天文台认为相对湿度小于 85%时的大气混浊视野模糊导致的能见度恶化

是霾造成的，相对湿度大于 95%时的大气混浊视野模糊导致的能见度恶化是雾造成的，相对湿度介于 85%-95%之间时的大气混浊视野模糊导致的能见度恶化是霾和雾的混合物共同造成的。最近几年召开的气溶胶国际和区域学术讨论会，以及有关的气溶胶研究文献，均将研究对象限定在相对湿度 80%以下。不同的国家、机构对雾、霾也有不同的标准(表 1.1)。但也有不少学者^[15, 16]提出，判别霾与轻雾的标准不能只看相对湿度，还要结合其它天气条件，出现时间，颜色等。

表 1.1 不同国际机构的雾、轻雾、霾的标准

	雾	轻雾	霾
WMO 报告 266 号 ^[7]	能见度<1000m, 相对湿度能常接近 100%	相对湿度通常低于 100%	相对湿度<80%左右
WMO 报告 8 号 ^[8]	能见度<1000m	能见度 ≥ 1km, 相对湿度较高	能见度>1km, 相对湿度小于某个百分比, 如 80%
WMO 报告 782 号 ^[9]	能见度<1000m	能见度 1000-5000m, 相对湿度以 ≥ 95%, 通常<100%	能见度 ≤ 5000m
《观测人员手册》 ^[10]	能见度<1000m, 相对湿度能常接近 100%	能见度 ≥ 1000m, 相对湿度以 ≥ 95%, 通常<100%	能见度没有限制
《气象术语》 ^[11]	能见度<1000m	能见度 ≥ 1000m, 相对湿度以>95%左右	能见度没有限制
《航空气象手册》 ^[12]	能见度<1000m, 相对湿度能常接近 100%	能见度 ≥ 1000m, 相对湿度以 ≥ 95%, 通常<100%	相对湿度<95%

另外，灰霾发生时，细粒子浓度升高，能见度下降，颗粒物的粒径分布影响能见度，通过大气成份分析对灰霾进行定量，是比较客观的方法, 但国内在这方面的研究还比较少。

1. 2 研究灰霾现象的意义

1997 年，在东南亚发生了以其密度、污染范围、持续时间及受影响人群等

著称的被认为是在世界污染事件中最严重的灰霾现象,造成了巨大损失,从此人们对灰霾现象日益关注。目前我国灰霾现象形势相当严峻,许多大大小小的城市都有霾现象的发生。近年来,各种各样的霾现象报道频现于报纸、电视、网络等媒体上,越来越引起人们的普遍关注。在空气污染严重的城市,霾可以频繁出现。霾天气已经成为我国城市的又一种严重的灾害性天气现象。

灰霾是一种灾害性天气,它使能见度恶化。因为它主要发生在近地面层,严重的视程障碍影响交通。随着国民经济的快速发展,公路、机场、水道等对能见度的依赖性日趋增强,灰霾现象发生时能见度降低,交通事故发生的概率大大增加了。

灰霾又是一种污染型天气现象,严重危害人体健康。它的危害可追溯到 1952 年的伦敦烟雾事件^[13],该事件造成前两周死亡 4000 人,后两月内又有 8000 多人死亡。据 WHO 的一份报告^[14]指出,东南亚受灰霾污染最严重的 Brunei Darussalam 地区,2003 年住院死亡率前十位的疾病中,哮喘、上呼吸道感染均与较差的空气质量相关。研究表明,霾中的物质成份除了细尘以外,还包括硫酸与硫酸盐、硝酸与硝酸盐、碳氢化合物、黑碳等粒子,因此其发生的频数与人类活动所造成的气溶胶污染密切相关。正是由于大量极细微的污染性气溶胶的存在,霾天气对人类的身体健康具有极大的危害性^[15]。在灰霾天气中,由于污染空气中的大气气溶胶大部分可被人体吸入,尤其是亚微米粒子会分别沉积于上、下呼吸道和肺泡中,诱发鼻炎、支气管炎、哮喘、气管扩张出血、肺炎、甚至肺癌等呼吸道疾病。此外,由于太阳中的紫外线是人体合成维生素 D 的唯一途径,也是自然界杀灭大气微生物如细菌、病毒等的主要武器,灰霾天气导致近地层紫外线的减弱,将直接导致小儿佝偻病高发,并使得空气中的传染性病菌的易活性增强,扩大传染病的游行范围,严重危害人体健康,同时,灰霾还容易引发人的抑郁症等心理障碍。

灰霾现象影响旅游景观,对工农业生产、气候和生态系统、地球和大气化学循环等都有较大危害。灰霾还会导致农作物产量下降。灰霾能够降低到达地面的太阳总辐射,减少日照时数。而日照减少又会导致光合作用的减少;灰霾沉降到植物叶面,也会严重影响植物的呼吸和光合作用,使农作物减产。

在霾天气条件下,大气电导率下降,电力系统的雷击冲击耐压能力降低,还容易造成供电系统的污闪事故。

1.3 国内外研究现状

1.3.1 国外方面

上世纪 70 年代以来,突出的城市污染问题引起了学术界对大气污染研究的高度关注,灰霾问题也受到越来越多学者的重视。国外学者在灰霾引起能见度下降的机理、灰霾影响及其治理措施等方面取得了重要进展,国外政府也在防控霾现象方面制定了一些标准。

1995-1999 年,大型国际合作科研计划印度洋实验(INDOEX)发现每年的 12 月至来年 4 月间,在亚洲南部上空出现约 3 公里厚,面积约 900 万平方公里的棕色的污染尘霾,命名为亚洲棕色云^[17],简称 ABC (Asian Brown Clouds)。近年来在欧洲、美洲也发现类似尘霾,统称为大气棕色云 (Atmospheric Brown Clouds)。

Okada K^[18]指出,导致灰霾现象的是大气中的气溶胶颗粒。灰霾颗粒总是以单个粒子的状态悬浮在大气中,它们对环境的影响,是由粒子本身的大小、形态和化学成份所决定的。颗粒物的大小决定粒子在大气中滞留时间,从而影响灰霾现象的持续时间。对于粒子如何影响能见度,是否能成为可吸入颗粒物,进而影响人体的健康等等,颗粒物本身的大小、形态和化学成份也起着极其重要的作用。

Malm C^[19]对美国大陆的霾现象的分布特征与起源做了统计分析, Kerr RA^[20]揭示了污染霾的气候变冷效应。Sisler James, F, Appel, William C, Lioussse C 等^[21-24]对大气细粒子成份(如硫酸盐、硝酸盐、有机物、元素碳、及各类气体等)和对光的散射、反射、吸收等进行了研究,阐述了各类物质对能见度影响的程度、机理。Baik^[25]等人利用化学组成分析颗粒物的散射消光系数的对应关系,发现细小的颗粒物污染可以导致烟霾的发生。也有应用 LANDSETTM (Thematic Mapper) 和 SPOTHRV (High Resolution Visible) 进行大尺度的霾的观测^[26]。

在灰霾的影响方面, Andre Nel^[27]探讨了灰霾中吸入人体的颗粒物对人体健康产生危害的致病机理,可能的机理包括:炎症、细胞因子、化学因子释放等。T.M.A σ akymoba M. И. Γ apa η ж a^[28]研究了由于莫斯科上空大气重霾引起的入射太阳辐射的光谱成份的变化。

美国环保局 EPA^[21]根据已知粒子浓度,消光系数推算出美国能见度的自然本底值东部在 110-130Km,西部在 182-193Km 之间。理论计算发现,自然条件下,

气体分子对灰霾贡献最大,占到 40%-60%,其次是含碳颗粒。而目前监测结果表明:硫酸盐对美国东部贡献最大,占到 60%-90%,西部占到 30%。在理论研究的基础上,美国在 1999 年签署了区域-霾标准规划,该规划以 IMPROVE 的在线监测数据为依托,依靠科学应用软件开展,提出了各州际区域霾的控制标准,试图使美国的霾污染现象有所改善。

1.3.2 国内方面

目前,国内对灰霾的观测、形成机理、危害、防控方面也都开展了深入的研究。主要集中在以北京、广州为中心的两个城市群内,但针对全国范围内的灰霾现象的研究基本空白。

(1) 有关灰霾的观测识别标准

可能与灰霾混淆的其它视程障碍现象有雾、轻雾、烟幕、扬沙、尘卷风、沙尘暴、浮尘、吹雪和雪暴。由于中国气象局的地面观测规范中对霾粒子的大小、相对湿度的大小以及微粒的成份都没有明确的界定,因此在观测上有许多这方面的讨论。

中国气象局广州热带海洋气象研究所率先在国内开展了灰霾污染的研究,吴兑^[6, 29]认为,空气中的灰尘、硫酸与硫酸盐、硝酸与硝酸盐、有机碳氢化合物、黑炭等粒子能使大气混浊,视野模糊并导致能见度恶化,当水平能见度小于 10 公里时,将这种非水成物组成的气溶胶系统造成的视程障碍称为霾或灰霾 (Ash Haze)。霾与雾的区别在于发生霾时相对湿度不大,发生雾时相对湿度是饱和的。吴兑认为,一般相对湿度为 80%以下的大气混浊视野模糊导致的能见度恶化是霾造成的,相对湿度为 95%以上的大气混浊视野模糊导致的能见度恶化是雾造成的,相对湿度介于 80%到 95%之间时的大气混浊视野模糊导致的能见度恶化是雾和霾的混合物共同造成的,但其主要成份是霾。

其它还有一些观测员的经验性的讨论,如信志红^[30]认为记录霾与轻雾不应模式化。盘晓东^[31]认为相对湿度标准应该南北有别。不能硬性将某一相对湿度值作为划分轻雾和霾的绝对界限。

兰措、张永新^[32]根据 1993-1997 年各年冬季清晨晴朗少云条件下所获得的 NOAA-12 卫星云图资料,对西宁市区上空近地面大气层的污染物—阴霾做了初步分析。总结了阴霾在 NOAA-12 卫星云图上所呈现的图纹和物理量特征,利用

这些特征计算了阴霾的面积、经纬度范围和中心经纬度值,经分析得出阴霾发展的均势是其面积在逐渐扩大。

车慧正等^[33]对沙尘和灰霾天气下大气气溶胶的光学厚度、单次散射反照率、复折射指数、不对称因子、气溶胶粒子的分布、Angstrom 波长指数、体积浓度以及气溶胶粒子半径等光学和特理参数进行了分析。结果表明在沙尘天气和灰霾天气下,大气气溶胶的光学特性有显著的差异。

(2) 有关灰霾的粒子成份分析

赵灵霞、钱公望^[34]利用电子显微镜,采用形态分析法和 X 射线能谱分析法相结合的方法对 2003 年广州灰霾天气中单个气溶胶颗粒物的大小、形态结构和元素组成进行了研究。他们发现气溶胶中的卫星滴结构粒子与灰霾天气的形成具有较好的相关性;在灰霾天气发生过程中,酸性粒子增多。段菁春、毕新慧等^[35]对 2003 年广州严重灰霾期前后 9D 的大气样品进行了分析,通过对灰霾期 PAHs 在颗粒物中的粒径分布探究了灰霾对 PAHs 去除机制、来源和人体的危害水平所产生的影响。

(3) 有关灰霾成因的天气与气候学分析

有不少学者对局地的灰霾气候特征进行了研究,如江崑等^[36]对深圳,刘爱君等^[37]对广州,钱峻屏等对汕尾^[38]、广东省^[39],徐梅等^[40]对天津,吴兑^[41, 42]对珠江三角洲地区等地的大气灰霾现象进行了气候特征分析,总结得到灰霾年变化、季变化、日变化的一般时空分布规律。

对灰霾天气气候变化的成因方面,有学者^[37]结合空气质量资料,从经济发展联系的角度,分析灰霾现象的成因,主要影响因素及形成条件。也有学者^[40, 42-44]从天气学角度考虑,研究灰霾天气的近地层的输送条件,或从天气形势角度考虑,对霾的生成预报和消散预报从天气学角度提出了一些经验性的论断。

在灰霾的物理过程方面,有学者^[45]对灰霾过程进行数值模拟,研究灰霾过程中大气颗粒物的积聚、增加、清除等具体过程。

(4) 有关灰霾的危害及减少危害方面

在灰霾对能见度的影响方面,国内有不少学者作了探讨。陶俊等^[46]分析了冬季广州大气能见度变化趋势及灰霾天气关系,发现灰霾天气的发生与 $PM_{2.5}$ 浓度密切相关。在灰霾天气下, $PM_{2.5}$ 浓度是影响大气能见度的主要因子,大气能见度

不仅与细颗粒物浓度有关,还与细颗粒物的粒径大小密切相关。宋宇等^[47]讨论了北京市能见度下降与颗粒物污染的关系。对于大气细粒子质量浓度与能见度定量关系方面也有学者的探索^[48]。在灰霾天气下,颗粒物散射、化学成份、气溶胶来源等方面与能见度关系也有学者进行了探讨^[6]。

在灰霾对人体健康影响方面,白志鹏等^[16]提出灰霾中的颗粒物对人体健康影响机制、有沉积机制、化学成份影响等,还探讨了对人体健康影响的流行病学方面的研究结论。

在控制灰霾方面,我国政府也做出了不懈的努力,控制污染源。对于如何更好地控制霾现象的发生,提出了动态调控污染源排放总量是减小灰霾天气危害的有效途径^[49]。

另外与灰霾相关的一些科研项目也正在研制中:

“珠三角城市群陆气相互作用与大气灰霾科学试验”项目于 2004 在广州番禺启动。2006 年国家重点基础研究发展计划项目“中国大气气溶胶及其气候效应研究”也在研制中。

1.4 本论文的研究目标、内容和创新点

国内学者对霾现象的研究主要集中在以北京、广州为中心的两个城市群内。但是,对于中国霾天气的总体气候特征及演变趋势等问题,目前还很难从已有的研究中找到满意的答案。为此,本论文基于全国高密气象观测站网(全国 721 个站)过去 47 年积累的霾观测资料,将对中国的霾天气的时空分布特征及其演变趋势等进行归纳总结,并对影响我国霾现象的气候因子及霾对能见度,太阳辐射、大气光学厚度、热岛效应等的影响进行进一步的探讨。

1.4.1 本论文的研究目标和主要内容

本论文将对中国霾现象观测资料进行整理,建立起中国霾日数时间序列,给出中国霾现象的气候分布,并以此为基础采用客观分析方法,探讨大风、降水,季风环流等气候要素对霾天气增减趋势的影响。研究霾现象对能见度,太阳辐射、大气光学厚度、热岛效应的定量影响,给出了一般规律。

首先,收集整理全国 721 个国家基本、基准气象站 1961-2007 年的霾及相关的风力、降水、能见度、日照时数、温度等资料。为增加站点资料序列年限,

对迁站站点资料进行串接。收集整理了其它相关的非常规资料,包括 98 个站点的 1961–2007 年太阳辐射资料,100°E 以东 578 个站点的 1961–2007 年邱金桓、林耀荣的光学厚度资料,1961–2007 年施能东亚季风强度指数 I_{SH} 和朱艳峰季风指数 I_{EAWM} 资料。

第二,结合中国地理和地形特点,给出全年和各季节中国霾天气的时空分布特征,揭示中国霾现象在年和年代际时间尺度上的演变规律,研究其在区域性气候变化背景下的演变趋势。

第三,以相关分析方法探讨大风、降水,季风环流等气候要素对霾天气增减趋势的定量影响,给出一般规律,为开展霾现象的气候预测提供初步的科学依据。

最后,利用相关分析,累积百分率等统计方法研究霾天气对大气能见度、太阳辐射、日照时数、大气光学厚度、热岛效应等现象的影响,揭示霾天气对环境危害的程度,增加霾天气对气候影响的认识。

基于上述的研究目标和内容,本论文将以下章节编排:

第一章 绪论

第二章 资料来源与研究方法

第三章 中国霾的时空分布特征

第四章 气候因子变化对霾年际和年代际变化的影响

第五章 霾对气候环境指标的影响

第六章 全文总结与展望

1.4.2 本论文的特色与创新之处

(1)全面启用全国高密度观测网(721 个站)连续 47 年的霾天气实测资料,收集了大量相关天气常规资料及非常规资料。

(2)从全国大范围讨论中国霾天气的时空分布特征,较全面地揭示其在年际和年代际时间尺度上的演变规律。

(3)首次探讨风力条件、降水条件及季风指数对我国霾气候变化趋势的定量影响,对霾天气气候的预测有着明显的指示意义。

(4)首次研究了中国范围内霾主体区域(年霾日 1 天以上)能见度、太阳辐射、日照时数、大气光学厚度及城市热岛等年际变化趋势,揭示了霾现象对这些气候因子的影响程度。

第二章 资料的来源和研究方法

2.1 资料的来源与处理

从气候角度进行研究,全国范围内高密度长时间的观测资料序列还是非常有用的。我国地面气象观测站网承担的常规资料观测始于20世纪50年代初期,由于观测体系较完整、资料时间序列较长,是进行全国范围霾现象研究的重要基础。本文使用的霾资料及相关的大风、能见度、气温、降水、日照时数等气象要素资料,全部取自国家气象信息中心归档的原始气象记录月报表及其信息化产品,并经过严格的质量检查。选用的测站为国家基本和基准站。为增长站点资料的年限,保证资料的连续性,对迁站的站点进行了细致的调查,并对有比对资料的迁站站点进行资料比对,去除个别站点相差比较明显的,确定对以下迁站站点序列资料进行了合并。

表2.1 38个迁站站点前后站号及迁站时间对照表

迁站前	迁站后	站名	迁站时间
51848	51747	塔中	1999. 01. 01
52118	52112	淖毛湖	2003. 01. 01
52842	52833	乌兰	2001. 01. 01
52889	52884	兰州	2004. 01. 01
52957	52955	贵南	1999. 01. 01
52968	52974	同仁	1991. 01. 01
53947	57037	铜川	2000. 01. 01
54172	54171	永吉	1996. 01. 01
54192	54195	汪清	1989. 01. 01
54575	54579	长海	1993. 01. 01
54616	54618	沧州	1996. 01. 01
54714	54715	德州	1995. 01. 01
54736	54744	东营	2006. 01. 01
54765	54764	烟台	1992. 01. 01

54830	54824	淄博	1995. 01. 01
54906	54909	菏泽	1995. 01. 01
54938	54929	临沂	1998. 01. 01
56294	56187	成都	2004. 01. 01
56741	56643	泸水	2003. 01. 01
56994	56991	文山	2002. 01. 01
57006	57014	天水	2004. 01. 01
57016	57025	宝鸡	2005. 01. 01
57036	57131	西安	2006. 01. 01
57504	57503	内江	2002. 01. 01
57602	57604	泸州	2003. 01. 01
57883	57894	井冈山	1999. 01. 01
58144	58141	淮安	2001. 01. 01
58367	58362	上海	1991. 01. 01
58659	58752	瑞安	2001. 07. 01
58927	58926	漳平	1993. 07. 01
59224	59228	平果	1988. 01. 01
52447	52441	金塔	1989. 01. 01
53882	53887	长治	1986. 01. 01
56946	56945	孟定	1990. 01. 01
57687	57679	长沙	1987. 01. 01
58338	58334	芜湖	1986. 01. 01
58730	58726	武夷山	1992. 01. 01

经过站点合并后的资料，共计有 721 个站点。由图 2.1 可见，除青藏高原、北方沙漠和沙地无人区外，测站的空间分布相当均匀，这是迄今为止从全国大范围研究霾现象的最密站点分布。且经过迁站站点资料合并处理，大大提高了站点资料的连续性及纵向可比性。

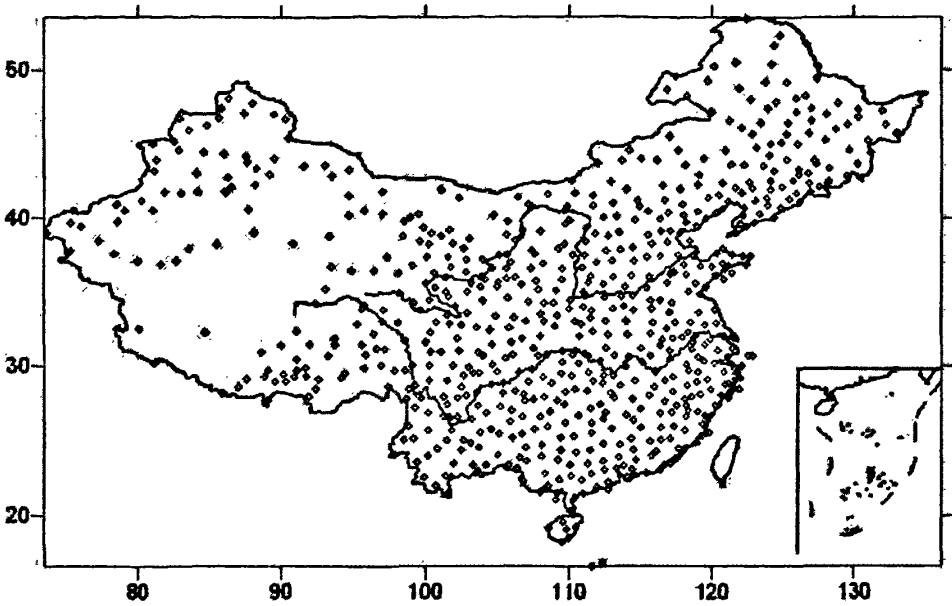


图 2.1 全国 721 个测站的地理分布

由于国家基本站点在1961年后基本趋于稳定,为了保证气候统计结果的可比性,在进行霾现象的时空分布研究时,需要考虑到站点的长期性和连续性,所以本文采用的资料主要为1961年以后。对于年代为1961—2007年的资料,满47年的站点有570个,占到了79.1%,时间序列长度达40年的站有639个,占88.6%。

需要说明一点,目前在霾的观测中存在一些学术上的争议,对霾现象的判定标准提出质疑,但至今尚未有明确的定论。另外,由于气象观测规范的局限,相对湿度记录大多数年份只能取到一日4次定时值(即北京时间02:00、08:00、14:00和20:00时),只凭四个观测时次的相对湿度值对历史霾现象重新计算是不合理的,所以本文还是以观测站实测的霾资料作为研究对象。

其它非常规资料,如98个站点的1961-2007年太阳辐射资料,也来自国家气象信息中心归档的原始气象记录月报表及其信息化产品;100°E以东578个站点的1961-2005年大气光学厚度资料,是依据邱金桓、林耀荣^[66]的大气光学厚度参数化模式计算而来;两个1961-2006年东亚冬季风强度指数资料序列,分别依据施能^[57]季风指数 I_{SHI} 定义和朱艳峰^[58]季风指数 I_{EAWM} 定义计算而来。

2.2 统计方法

2.2.1 霾的统计方法

本论文使用的资料统计方法均按《地面气象观测规范》和《1961-1990 年气候资料统计处理方法》执行。具体方法如下：

(1) 霾日数以气象台站实际观测的霾天气出现日数作为定量表征指标。按照规定，日界为 20:00 时。当某一次的霾天气过程跨越 20:00 时，按两个出现日计算；当某一天霾现象出现两次或以上时，按一个出现日计算。

(2) 月值和年值是基于日值统计而得。如果某月日值缺测六次或以下的，月值按实有记录做作月统计，缺测七次或以上的，月值按缺测处理；如果某年月值缺测一个月或以上的不做年统计，按缺测处理。

(3) 霾变化趋势统计：使用线性倾向估计方法^[67]，用 x_i 表示逐年大霾日数，用 t_i 表示与 x_i 一一对应的逐年年份，建立 x_i 与 t_i 之间的一元线性回归方程。

$$x_i = a + bt_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

其含义表示 x 与时间 t 之间的关系。其中回归系数 b 表示大霾的趋势倾向， $b > 0$ 说明随时间 t 的增加 x 呈上升趋势， $b < 0$ 说明随时间 t 增加 x 呈下降趋势，同时 b 值的大小反映上升或下降的速率。

再利用回归系数与相关系数的关系，可求得 R 与 b_1 的换算公式：

$$R = b_1 \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n t_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n t_i \right)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n f(t)^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n f(t) \right)^2}} \quad (2)$$

用 R 值进行显著性检验，如果 R 通过显著性检验，说明趋势变化是显著的。

(4) 霾变化年代际统计：采用九点二次滑动平均方法^[67]将霾日数年值序列的长期趋势变化分离出来，笼统地视作年代际分量。

(5) Mann-Kendall 法^[67]：是一种非参数统计检验方法。是常用的突变检测方法。对于具有 n 个样本量的时间序列 x ，构造一秩序列：

$$s_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad k=2, 3, \dots, n, \quad (3)$$

其中

$$r_i = \begin{cases} +1, & \text{当 } x_i > x_j \\ 0, & \text{当 } x_i \leq x_j \end{cases} \quad j=1, 2, \dots, i. \quad (4)$$

在时间序列随机独立的假定下, 定义统计量

$$UF_k = \frac{[s_k - E(s_k)]}{\sqrt{\text{var}(s_k)}}, \quad k=2, 3, \dots, n, \quad (5)$$

式中 $UF_1 = 0$, $E(s_k)$, $\text{var}(s_k)$ 是累计数 s_k 的均值和方差, 在 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 相互独立, 且有相同连续分布时, 它们可由下式算出:

$$\begin{cases} E(s_k) = \frac{n(n+1)}{4} \\ \text{var}(s_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \end{cases} \quad (6)$$

UF_i 为标准正态分布, 它是按时间序列 x 顺序 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 计算出的统计量序列, 给定显著性水平 α , 查正态分布表, 若 $|UF_i| > U_\alpha$, 则表明序列存在明显的趋势变化。

按时间序列 x 逆序 $x_n, x_{n-1}, \dots, x_1$, 再重复上述过程, 同时使 $UB_k = -UF_k$ ($k=n, n-1, \dots, 1$), $UB_1=0$

(6) 滑动 t -检验法^[67]: 通过考察两组样本平均值的差异是否显著来检验突变。

对于具有 n 个样本量的时间序列 x , 人为设置某一时刻为基准点, 基准点前后两段子序列 x_1 和 x_2 的样本分别为 n_1 和 n_2 , 两段子序列平均值分别为 $\bar{x}_1$ 和 $\bar{x}_2$, 方差分别为 s_1^2 和 s_2^2 。定义统计量:

$$t = \frac{\overline{x_1} - \overline{x_2}}{s \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}, \quad (7)$$

其中

$$s = \sqrt{\frac{n_1 s_1^2 + n_2 s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}$$

方程(7)遵从自由度 $\nu = n_1 + n_2 - 2$ 的 t 分布。

其它风、降水、气温、日照时数等数据统计方法同上。

2.2.2 能见度趋势分析方法-累积百分率法

大气能见度是观测员在当时天气条件下和规定的时间内,能够从天空背景中看到和辨认出的目标物的最大水平距离,但实际能见度等于或超过观测得到的能见度。观测者的主观意识增加了能见度的随机误差,而目标物与背景之间的反差率也往往使能见度被系统性地低估。因此,能见度观测记录往往低估了实际的能见距离。第 i 段能见度累积百分率定义为所有观测到的能见度等于或超过第 i 段区间能见度的百分率^[50]。因此,能见度资料很适合用累积百分率处理。累积百分率已被证明是能见度分析客观的、可靠的方法,并在世界各地广泛采用^[50-55]。

能见度的累积频率分布函数由下式给出:

$$\frac{n_i}{n} = \int_{v_i}^{\infty} f(v) dv$$

式中, $f(v)$ 表示能见度概率密度函数, v_i 表示第 i 段的能见度, n 表示能见度总的观测次数, n_i 表示在 n 次观测中有 n_i 次能见度等于或超过 v_i 的值。因此, $n_i/n \times 100\%$ 表示第 i 段能见度的累积百分率。计算出各段能见度的累积百分率后,即可做出累积百分率分布图。

能见度趋势就是与某一特定的累积百分率相对应的能见度随时间的变化。通常如果能见度资料是连续的、且分布范围较大,这个代表趋势的特定的累积百分优选法为 50%。但在实际应用中, 50%的累积百分率有些站点不能直接得到^[56]。根据累积百分率的定义,考虑我国站点的特点,可以选取 60%能见度累积百分率(即给出了能见度等于或超过 60%的出现次数)作为能见度中值,既可避免由于外

推或资料调整造成的误差，又可获取更高的精度。因此，在计算中以 60% 累积百分率所对应的能见度进行“能见度中值”趋势分析，90% 累积百分率所对应的能见度进行“能见度低值”趋势分析。“能见度中值”代表年平均的能见度水平。“能见度低值”代表年较差的能见度水平。

第三章 中国霾天气的时空分布特征

利用1961-2007年全国721个气象站点的霾天气观测资料,分析中国大陆地区霾天气的时空分布特征。通过对资料的考察发现,全国记有霾现象的站共有642个,占89.0%。1961-2007年47年平均霾天气日数大于等于1天的有299站,占41.5%。

3.1 霾天气的地理分布

对于霾天气的气候区划,目前尚没有统一的标准。为较准确地描述霾天气的全国分布,本文以1961-2007年47年平均的霾天气年总日数(记作 d_{47})为基准,暂定:1天 $\leq d_{47} < 10$ 天、10天 $\leq d_{47} < 20$ 天和 $d_{47} \geq 20$ 天的地区分别为霾天气的偶发区、多发区和高频区,三者基本构成了中国霾天气的主体区域(见图3.1)。

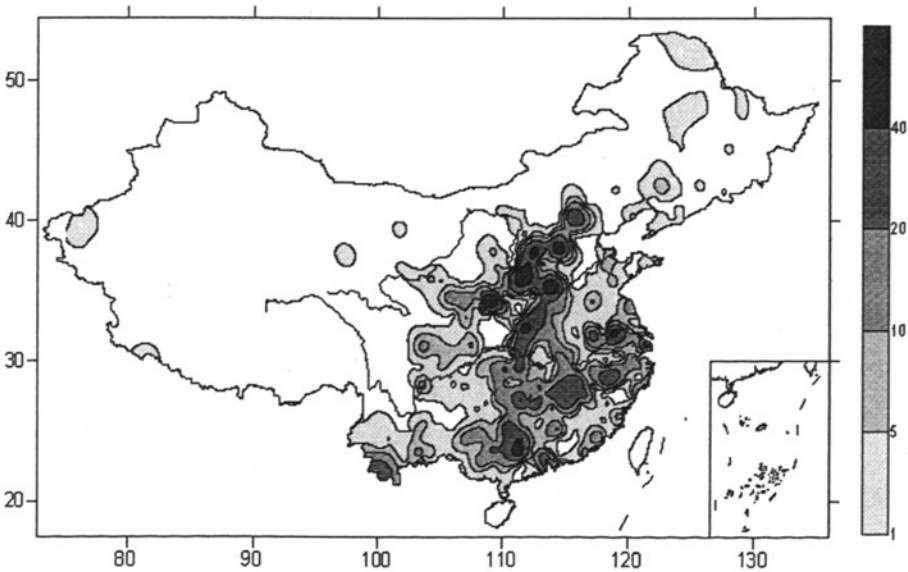


图 3.1 1961-2007 年 47 年平均霾天气年总日数的全国分布 (单位: 天)

图 3.1 绘制了 1961-2007 年 47 年平均霾天气年总日数的全国大致分布。可以看出:

- 中国的霾天气主要分布在 100° E 以东、42° N 以南地区,其中华北的中部和西部,西北的东南部,华中大部,华东大部,华南西部和南部地区

d_7 大于等于 10 天，是灰霾天气的多发区。

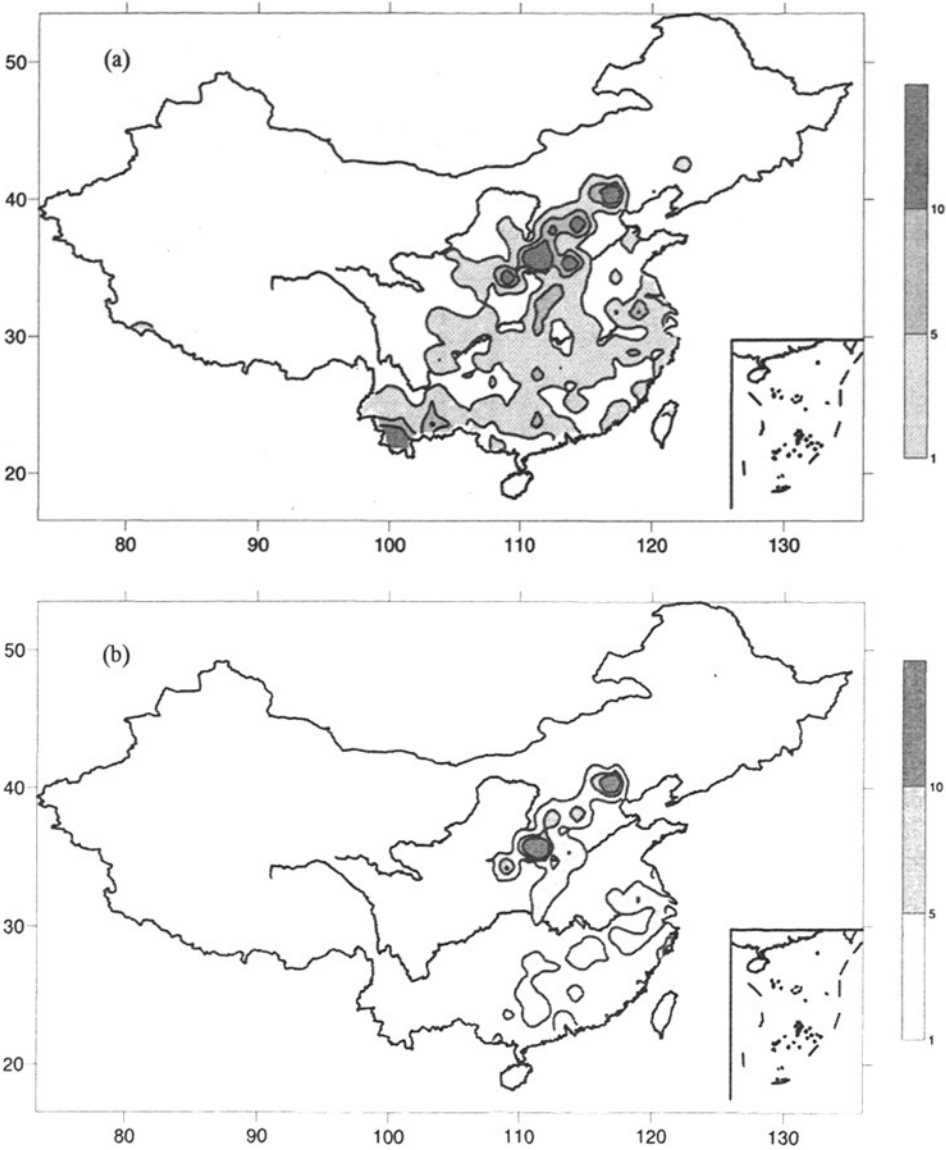
- d_7 大于等于 20 天的高频区主要集中在人口比较密集的大城市和煤矿基地，如环北京地区、山西中南部地区、陕西和河南局部地区、长江三角洲、珠江三角洲等地，在空间上形成多个离散的“浊岛”。其中不少城市成为“浊岛”中心，其中陕西西安高达 99.2 天，为全国最高值，其次是山西临汾 81.6 天，此外，像北京、广州、郑州、合肥、南昌等大城市的霾天气也比较频繁，分别为 24.5 天、40.2 天、39.5 天、38.9 天和 38.3 天。表 3.1 列出全国年霾日前 10 位站点及部份大城市年霾日数。
- 中国西部、东北大部及内蒙古地区霾出现相对较少，大多数站点多年平均年霾日不足一天。西藏、海南岛基本无霾日。

总而言之，中国中东部和南部霾天气较多，西部和东北部地区相对较少。在同一区域内，大中城市的霾天气较乡村明显偏多，“浊岛”现象非常明显。

表 3.1 全国年霾日前 10 位站点及部份大城市的年霾日数(单位：天)

站名	站号	省份	平均年霾日	排名
西安	57036	陕西	99.2	1
临汾	53868	山西	81.6	2
新乡	53986	河南	81.5	3
石家庄	53698	河北	71.7	4
南京	58238	江苏	65.7	5
梧州	59265	广西	63.6	6
上海	58367	上海	58.0	7
太原	53772	山西	57.8	8
老河口	57265	湖北	55.2	9
玉山	58634	江西	44.3	10
广州	59287	广东	40.2	
郑州	57083	河南	39.5	
合肥	58321	安徽	38.9	
南昌	58606	江西	38.3	

北京	54511	北京	24.5
杭州	58457	浙江	22.6
南宁	59431	广西	19.8
武汉	57494	湖北	17.3
福州	58847	福建	15.7



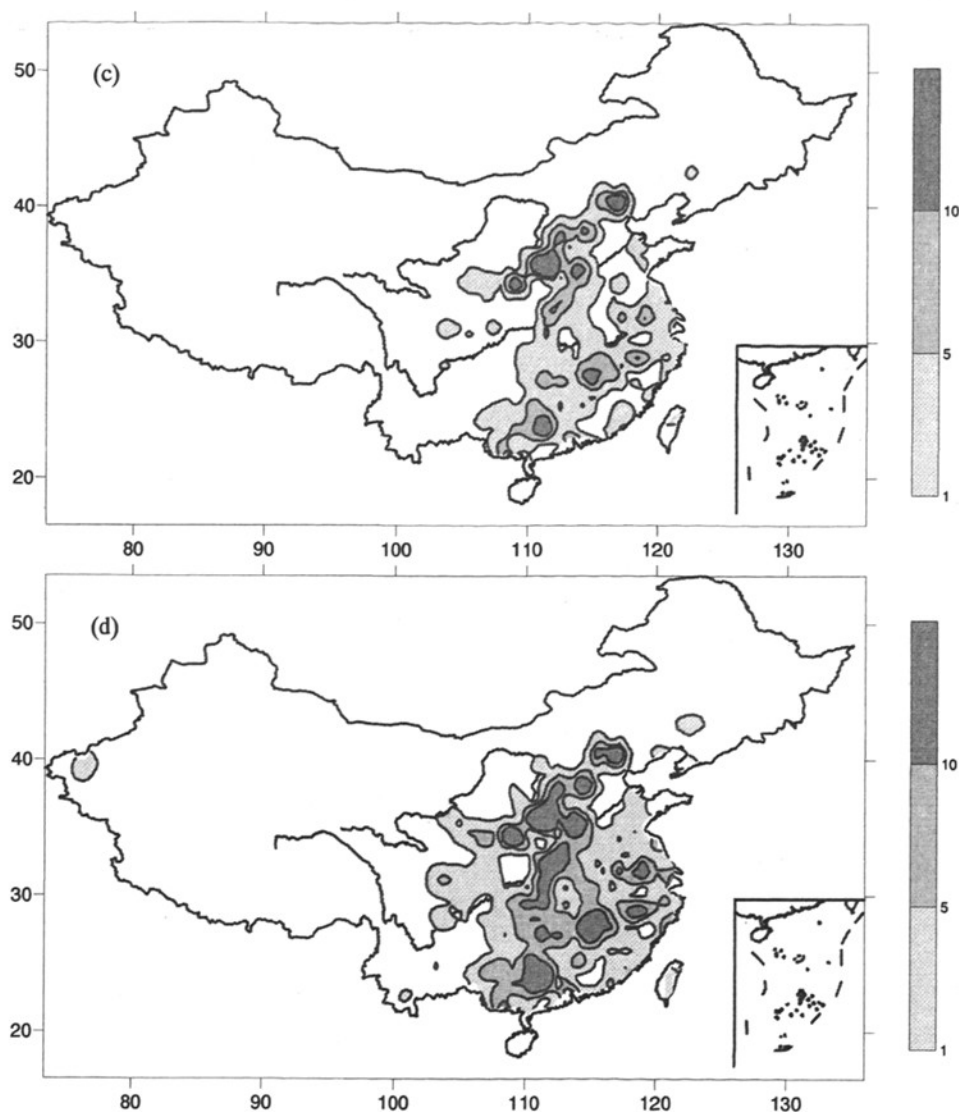


图 3.2 我国四个季节 1961-2007 年平均霾日空间分布 (单位: 天)

(a) 春季 (3-5 月) (b) 夏季 (6-8 月) (c) 秋季 (9-11 月) (d) 冬季 (12-2 月)

图 3.2 是我国 1961-2007 年各季节的霾日数空间分布图。可以看出: 从年平均发生次数来看, 夏季是霾日数最少的季节, 而冬季是霾发生最多的季节, 春季次之。从空间分布来看, 冬春季发生范围广, 而夏秋季范围相对小, 其中夏季最少。

春季, 霾日出现较多的地区主要是环北京地区, 山西中南部, 河南中部, 云南南部, 为 5-10 天, 局部地区有 10-30 天。值得一提的是云南南部地区霾日

夏秋冬均少发，只在春季多发。

夏季，是霾日发生最少的季节。大部分地区年霾日不足 1 天，仅山西中南部，河北、北京等地的局部地区有 5-10 天。

秋季，长江以北霾日分布与春季基本类似，霾日 5-10 天的地区主要分布在北环北京地区、山西中南部、河南中部。长江以南地区、江西西北部、广西东北部霾日增多，平均 5-10 天，局部地区达 10-20 天。

冬季是霾发生最多的季节。环北京地区、河北中部、山西中部南部、河南中部、安徽中部、江苏中部、浙江中北部、江西西部和北部、湖南中部和西部、广西中北部等地有 5-10 天，其中山西、河南、江西、广西等省（区）的部分地区有 10-30 天，局部超过 40 天。

3.2 霾天气的季节分布

3.2.1 全国站点平均霾天气季节变化

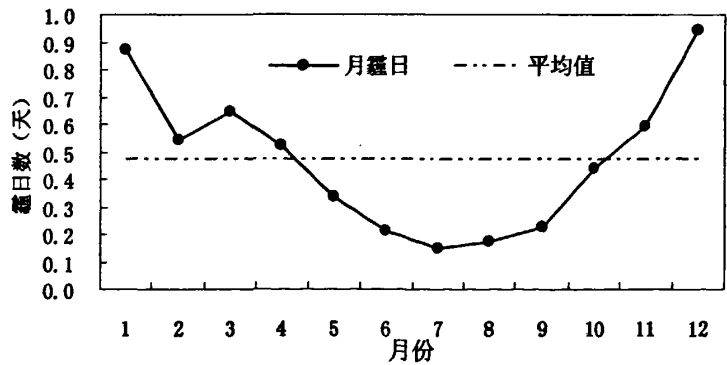


图 3.3 1961-2007 全国站点多年平均月霾日图

由全国站点多年平均月霾日图可以看出，灰霾现象的出现存在明显的季节变化。一年中的两头，也就是 1 月和 12 月是霾现象的高发月，而中间月份，尤其是夏季的 6、7、8、9 四个月处于明显的低谷。这与我国季节的气候特点存在明显的相关性。在我国冬季大部份时间地面都是由大陆高压控制，天气晴好，雨日、雨量较少，这时空气中细微的气溶胶粒子会逐渐的增多，在大气层结稳定的条件下，容易形成灰霾天气。与此相反，夏季是一年中降水最多的时期，雨水的冲刷带走了大量的气溶胶粒子，且夏季不稳定天气发生较多，有利于大气中粒子

的扩散,大气能见度得到改善。所以从总体来说,冬半年是灰霾现象的相对高发期,而夏季则是霾现象出现的低谷。

3.2.2 霾天气季节变化进一步分析

我国大部份地区霾天气的季节分布基本上是冬多夏少,但比较而言,各地区霾的季节分布又略有差异。根据上述我国霾的地理分布特点,本文在霾的相对多发区域选择了北京等16个代表站(见图3.4,考虑到霾的危害和影响,此处更侧重于城市站),并绘制了各个代表站的霾日数的逐月变化曲线。

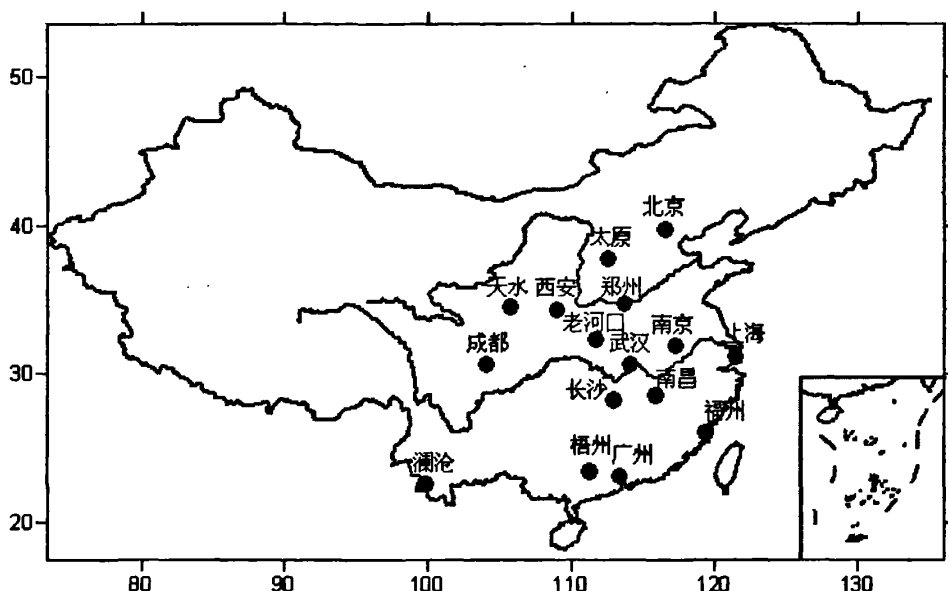
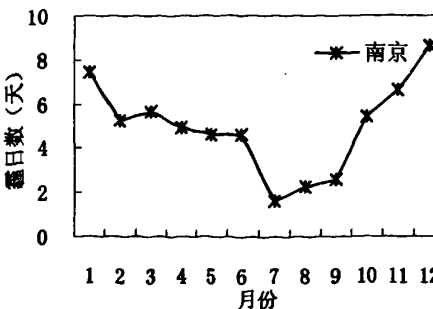
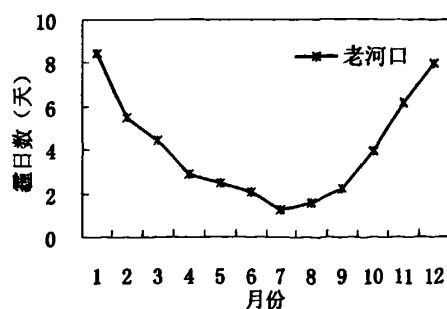
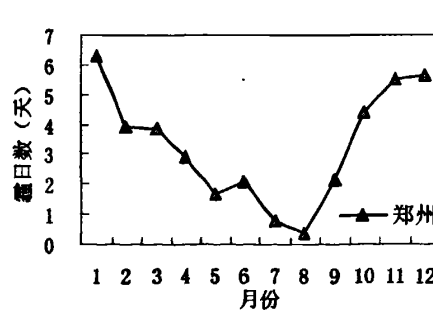
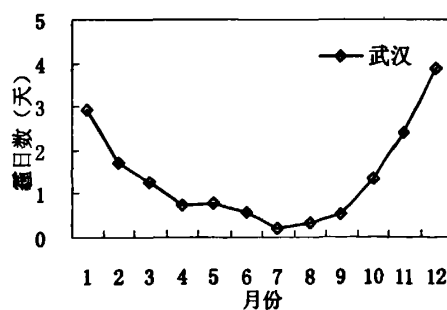
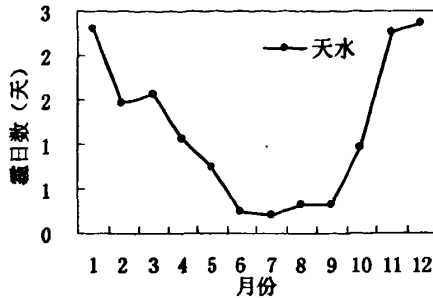
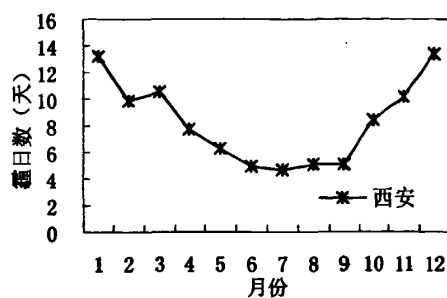
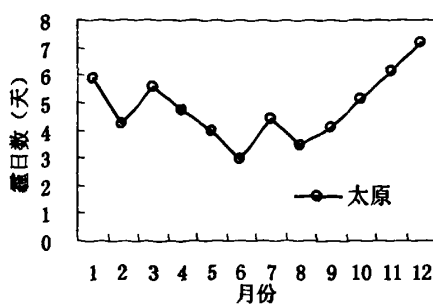
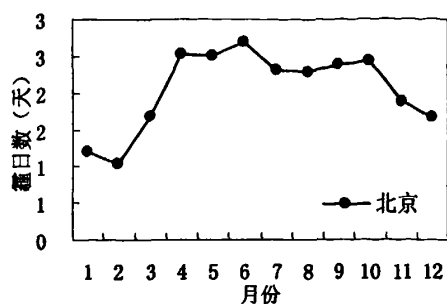


图3.4 16个代表站的地理分布

由图3.5可以看出,梧州、南昌、武汉和长沙主要集中在10月至次年1月,期间霾日数分别占全年总出现日数的65.3%、63.7%、63.7%、68.9%;西安以11月至次年3月为高发期,霾日数占全年的57.3%;郑州、广州、天水 and 老河口11月至次年1月霾天气较多,分别占全年的45.2%、44.1%、50.2%、46.3%,上海、南京和也大致类似,但他们都有明显的次高点,上海、南京在3月份,福州在4月份;太原霾天气的四季变化不太明显,最多月份(12月)约为最少月份(6月)的2.4倍,相对较少;比较特殊的有北京和澜沧两个站,北京夏季略多于冬季,而云南澜沧霾出现则主要集中在3、4月份,占了全年的95%。



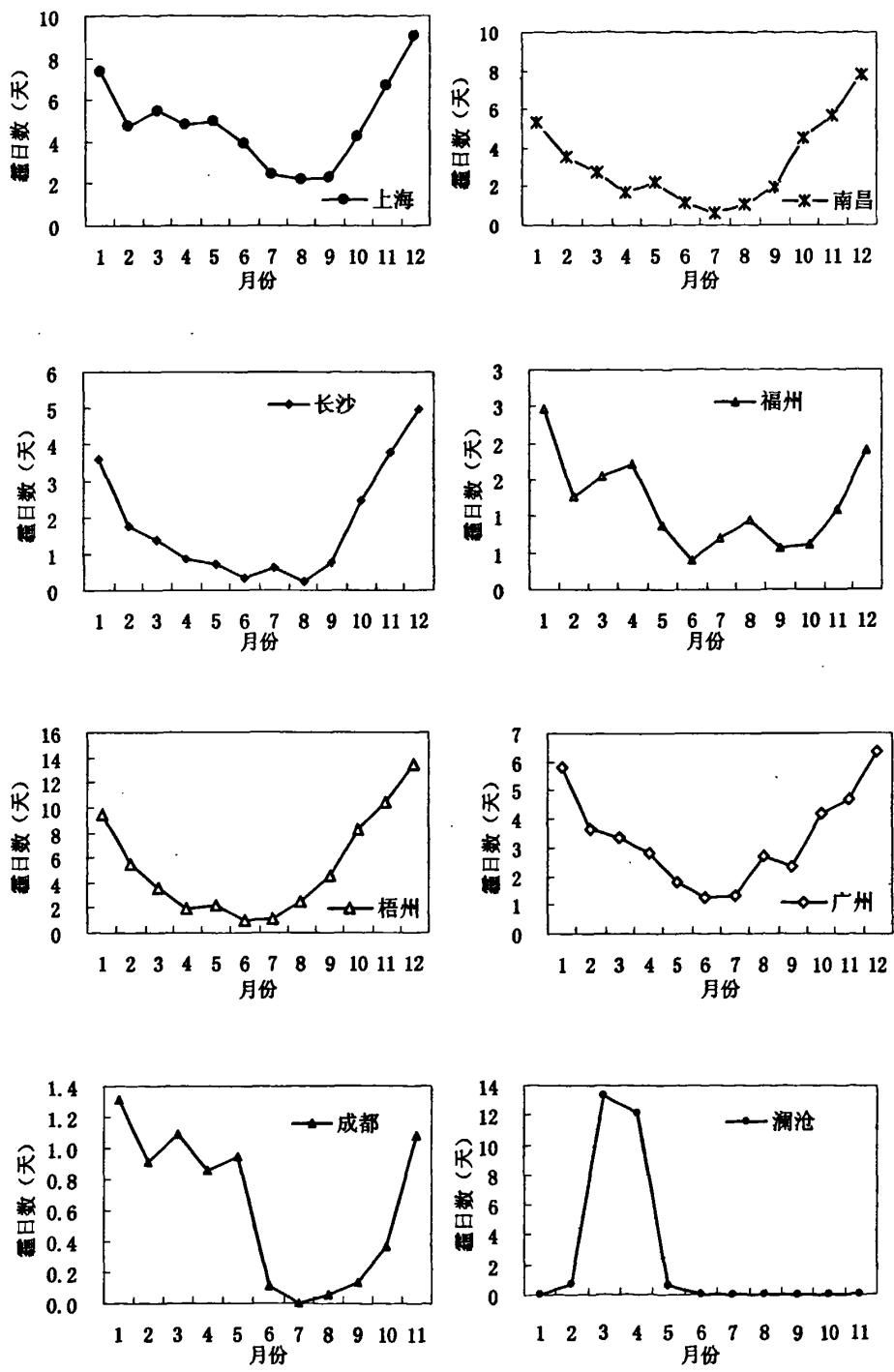


图 3.5 北京等 16 个代表站霾日数的季节变化

各城市不同的城市霾日数季节变化各不相同。究其原因,仍需从气候天气变化因素和空气中细微干尘粒子的含量多少两方面进行考虑。从前面分析得到、梧州、西安、郑州、上海等大部份城市10月至次年3月都有霾日明显较多,一方面原因如前面提到过的,冬季雨量雨日较少,大气稳定层结日较多,容易出现霾。另一方面,与沙尘暴,沙尘天气存在比较密切的联系,沙尘天气后空气中会有一段时间的颗粒物或浮尘的明显增多,这是导致霾现象的多发的另一个原因。另外有较大部份站点在3月存在一个霾日次高点,这与春节的沙尘天气的多发存在明显的关系。北京站是一个比较特殊的站点,北京的霾日夏季反而比冬季多。进一步考查北京地区近5年的空气质量报告、PM₁₀资料及其它气象资料,发现尽管北京冬季的空气质量略差于夏季,即气溶胶污染重于夏季,但是在局地的气候背景下,这种差异最终造成的是雾天气在冬季显著增多,而霾的观测记录并没有增加。天津地区也与此类似。对于另一个比较特殊的站点是云南澜沧,霾出现集中在3、4月份,我们进一步考察了云南的有霾记录站点,大部份站点都存在霾日集中在3至4月份的现象,显然这与局地的气候背景有明显的关系。进一步考察发现,云南地区霾现象的季节分布与云南地区的风力条件季节分布存在明显的正相关,月平均风力和日最大风力大于等于5米每秒的天数与月霾日的相关系数分别达到了0.722和0.744,说明正是云南地区春季风力相对较大的气候背景导致了云南的霾日主要集中在3、4月份。

3.3 中国霾的年代际变化

3.3.1 全国站点平均年代际变化

表 3.2 是全国站点平均不同年代灰霾出现日数。可以看出灰霾出现日数 20 世纪 60 年代全国平均只有 2.4 天,进入 70 年代有一个明显的上升,有霾日达到了 5.2 天。进入 80 年代后霾日变化不大,进入 90 年代霾日略有上升。2000 年后,霾日又有一个比较明显的上升,全国站点平均增加霾日 3.6 天。21 世纪以来的全国年霾日比 20 世纪 60 年代上升了 4 倍之多,所以从年代际变化上看,全国年霾日总的来说呈上升趋势非常明显。

表 3.2 全国站点平均各年代的平均年总霾日数

时间	1961-1970	1971-1980	1981-1990	1991-2000	2001-2007
年平均	2.4	5.3	5.2	6.1	9.7

3.3.2 代表站点年代际变化

进一步分析，表 3.3 是北京等 16 个代表站 1961-2007 年各年代平均的年总霾日数。统计结果表明，除西安、澜沧、天水 and 武汉少数几个站 2001-2007 年的霾日数少于 20 世纪 60 年代外，其它代表站 2001-2007 年的霾日数均多于 20 世纪 60 年代，并且前后差异还相当明显，例如南京、南昌、广州、上海、梧州和福州 2001-2007 年的霾日数分别是 20 世纪 60 年代的 155.6 倍、66.1 倍、42.4 倍、18.3 倍、22.1 倍和 30.3 倍。可见，我国东部和南部大中城市霾天气是在增多的，这可能与区域经济发展所引起的大气污染物排放增多有关。另外，从表 3.4 上，可以看出西安霾日数的年代际变化与沙尘天气日数的变化有很好的一致性，20 世纪 60 年代-80 年代中期，西安的沙尘天气频发，霾日数也明显偏多，此后，沙尘天气减少，霾日数也显著减少。表明沙尘气溶胶粒子可能是西安霾天气的最主要物质源。

表 3.3 北京等 16 个代表站各年代的平均年总霾日数

代表站	多年平均的年总霾日数（天）					
	1961-1970	1971-1980	1981-1990	1991-2000	2001-2007	1961-2007
北京	6.5	46.6	18.4	16.6	38.7	24.5
太原	12.4	50.0	142.8	41.3	36.1	57.8
西安	128.8	228.0	65.6	34.9	13.0	99.2
天水	36.7	31.1	0.2	0.0	0.3	14.5
武汉	16.4	32.5	30.9	0.1	2.1	17.3
郑州	6.6	27.4	47.2	47.7	81.1	39.5
老河口	8.4	27.8	63.2	88.7	102.1	55.2
南京	0.9	17.7	69.4	122.9	140.0	65.7
上海	7.7	17.7	91.4	57.2	141.0	58.0
南昌	1.6	4.7	28.6	71.3	105.7	38.3
长沙	4.5	28.6	12.2	27.9	54.3	23.7
福州	1.8	1.7	14.6	17.5	54.6	15.7
成都	6.0	2.0	11.6	11.9	10.4	8.3
梧州	5.5	30.6	73.0	104.5	121.6	63.6

澜沧	25.7	34.0	29.2	24.6	18.9	27.0
广州	2.0	9.3	46.4	71.8	84.7	40.2

表 3.4 西安站各年代霾日与沙尘日数对比

年数	1961-1970	1971-1980	1981-1990	1991-2000	2001-2007	1961-2007
霾日	128.8	228.0	65.6	34.9	13.0	99.2
沙尘日	12.4	50.0	142.8	41.3	36.1	57.8

3.4 中国霾的年际变化

3.4.1 全国霾天气总体变化

为概括出中国霾天气的总体变化特征，本文将图 1 所示的偶发区、多发区和高频区（即 $d_r \geq 1$ 天的霾天气主体区域）内共 299 个站逐年的霾日数进行算术平均，得到 1961-2007 年中国霾天气主体区域平均的霾日数时间序列（图 3.6）。曲线显示出 20 世纪 60 年代至 70 年代中期，中国霾天气总体较少，霾日数明显低于 47 年的平均值，对应的九点二次滑动平均值^[11]处于负位相。其后的 20 多年（1976-2000 年）霾天气变化趋势不明显，仅在很弱的正位相内振荡，但是最近 5 年霾天气却显著增多。中国霾天气 47 年的总体趋势为波动增多，线性倾向率为 3.19 天/10a。47 年间，1964 年平均每站仅出现 2.6 天霾，是历史最低值，而 2007 年却达到 29.3 天，是历史峰值，后者是前者的 11.3 倍。进一步利用 Mann-Kendall 法^[67]（取显著性水平 $\alpha = 0.05$ ）和滑动 t -检验法^[67]（取显著性水平 $\alpha = 0.01$ 、子序列 $n_1 = n_2 = 5$ 年）检测出中国霾天气序列有 2 次明显的突变，其一位于 20 世纪 70 年中期，以 1975 年为突变点；其二位于 2000 年之后，但因 2000 年以后的序列过短，其突变点暂不能确定，需进一步观察研究。

中国霾天气显著增多（即线性拟合趋势 b 通过 $\alpha = 0.05$ 的 F 检验）的区域大致对应着霾天气的多发区和和高频区，主要位于华北中南部，长江中下游和华南等经济发达和经济快速发展地区。这些地区霾天气的线性增多趋势普遍超过了 3 天/10a（图 3.7），决定着中国霾天气的总体变化趋势，因此从防灾减灾的角度，这些地区需要给予重点关注。

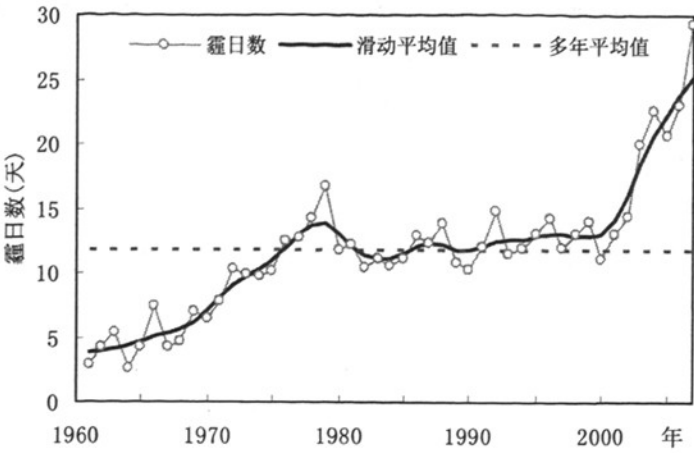


图 3.6 中国霾天气主体区域内 299 站平均霾日数的年际变化

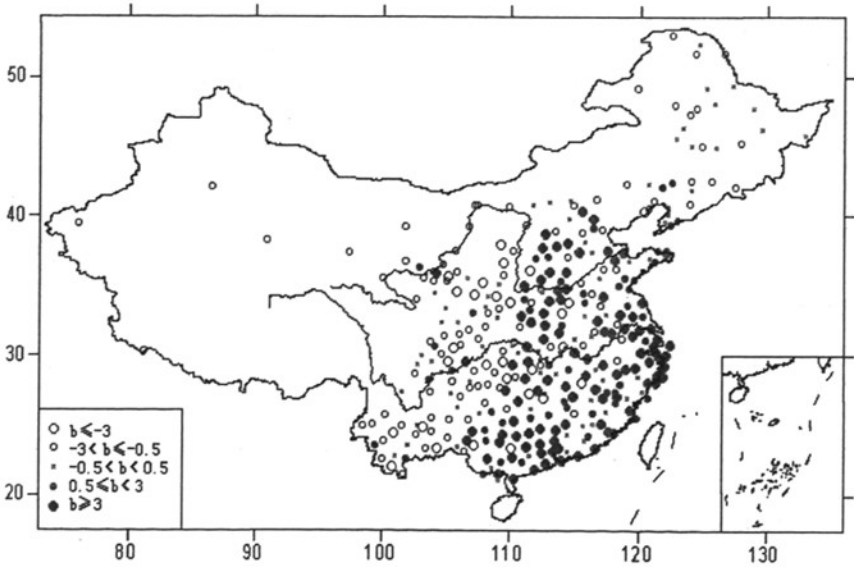
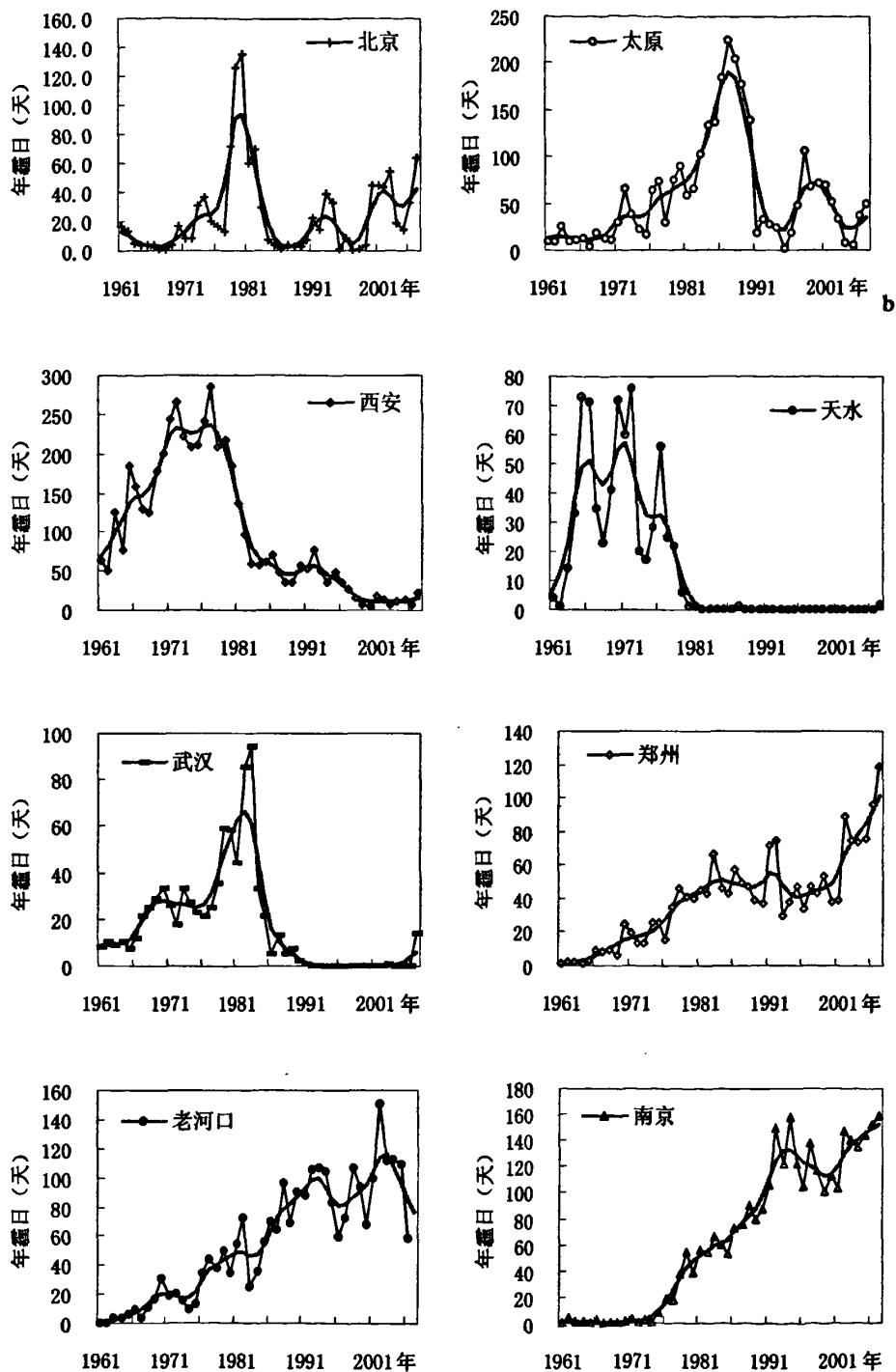


图 3.7 1961-2007 年霾日数变化趋势 b 的空间分布 (天/10a)

3.4.2 代表站点的年际变化特征



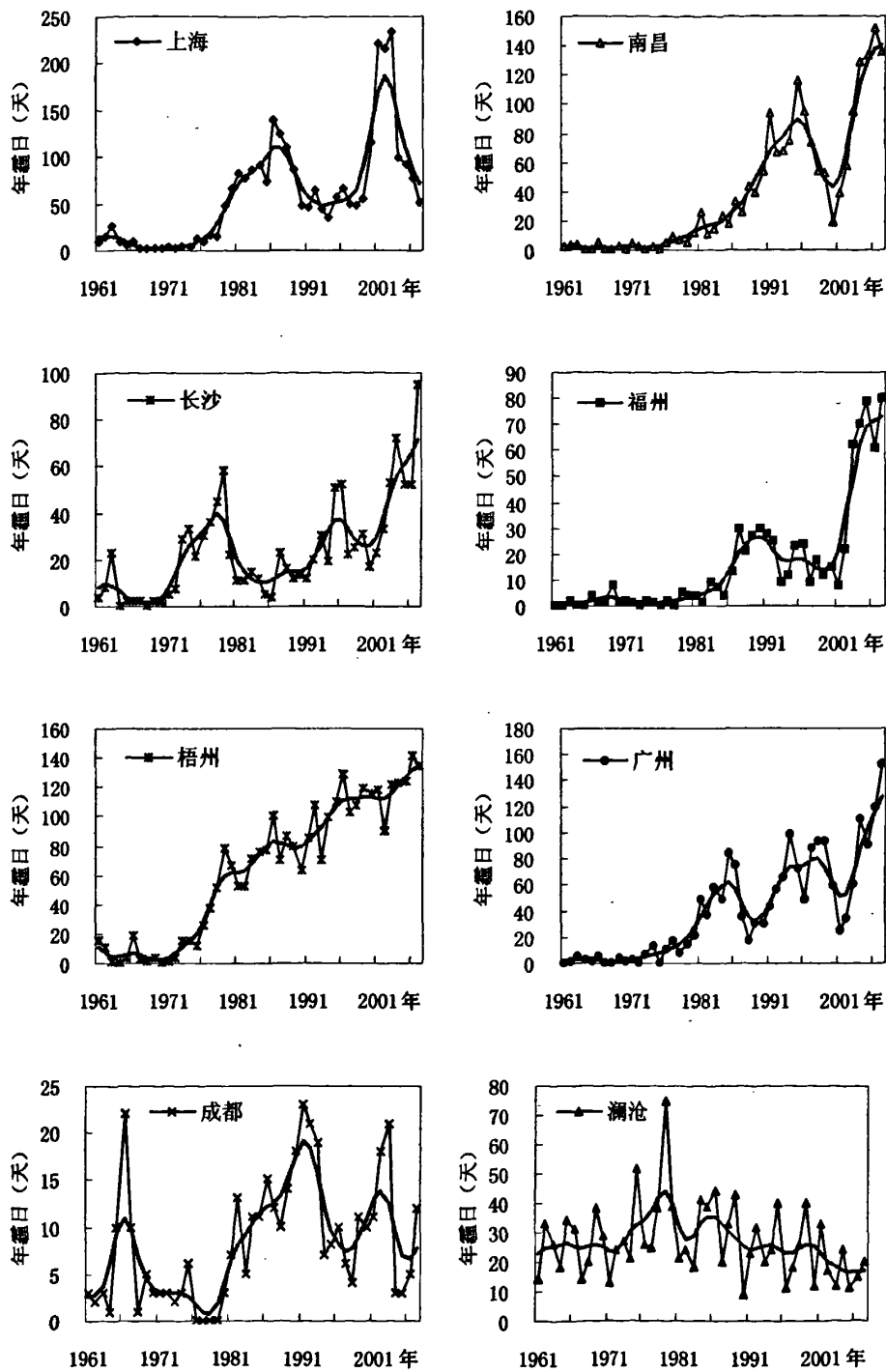


图 3.8 北京等 16 个代表站霾日数的年际变化

图 3.8 为北京等 16 个代表站 1961-2007 年霾年总日数的逐年变化曲线。如图

所示,十六个代表站大致可分为三类,第一类基本呈波动上升趋势的。如郑州、广州、梧州、南昌、福州、南京、长沙、老河口等,尽管年霾日的多少和年代振荡不同步,但总体上是在波动中呈上升趋势,包括上海在 2004 年前也是如此,2004-2007 年上海年霾日减少明显,估计和上海准备 2010 年世博会,政府强力控制城市空气质量有直接的关系。这类站点对应到图 3.4,可以发现基本处于我国东部南部地区,属于平原经济较发达地区,也是沙尘暴和扬沙天气影响较少地区。第二类代表站是在七八十年代存在霾日高峰期,近年来霾日较少的。这类站点,基本位于我国的华北及靠近西部地区,受到沙尘暴浮尘现象和经济发展的双重影响,主要代表城市有西安、天水、太原、武汉、北京等。如北京在 1978-1982 年之间存在一个年霾日高峰期,其中 1980 年年霾日达 135 天,高出平均年霾日 24.5 天 4 倍多;武汉在 1979-1983 年有也有一个年霾日高峰,其中以 1983 年为最高达 94,是平均年霾日的 5.4 倍;还有太原 1983-1990 年也存在一个年霾日高峰期,其中 1987 年达到了 225 天,是平均年霾日的 3.9 倍。西安的年霾日,1977 达到了最高 284 天,2000 年达到了最低值,只有 4 天,70 年代年霾日很多,1970-1980 年年霾日平均达到了 225 天,而近 10 年(1997-2007 年)平均只有 13 天。天水的情况也与西安类似。第三类代表站是年霾日年际振荡比较频繁的站点,总体趋势不明显。主要代表站为靠近我国的西南部的成都与澜沧。从图 3.8 可以看到,澜沧年霾日年际振荡比较频繁,年霾日在振荡中并没有明显的上升,还略有下降;成都年霾日的年际变化也很大,但总的来说 80 年代后略有上升。

3.5 小结

通过以上分析,可以对我国霾天气的时空特征得出以下几点认识:

(1) 中国的霾天气主要分布在 100°E 以东、 42°N 以南地区,即中东部和南部较多,西部和东北部地区相对较少。在同一区域内,大中城市的霾天气较乡村明显偏多,“浊岛”现象明显。全国平均年霾日为 5.65 天,其中华北的中部和西部,西北的东南部,华中大部,华东大部,华南西部和南部地区大于等于 10 天,是灰霾天气的多发区。其中环北京地区、山西中南部地区、陕西和河南局部地区、长江三角洲、珠江三角洲等地年霾日大部份大于等于 20 天,尤以陕西西安最高,为 99.2 天,其次是山西临汾 81.6 天。

(2) 霾天气的季节分布基本上是冬多夏少。冬季是霾发生最多的季节, 环北京地区、河北中部、山西中部南部、河南中部、安徽中部、江苏中部、浙江中北部、江西西部和北部、湖南中部和西部、广西中北部等地有 5-10 天, 其中山西、河南、江西、广西等省(区)的部分地区有 10-30 天, 局部超过 40 天。这是因为我国大部份地区冬季受大陆高压控制, 大气层结相对稳定, 雨日雨量较少, 易于低层大气中气溶胶粒子富集, 并形成灰霾天气。由于受沙尘与浮尘天气的影响, 春季仅次于冬季霾日较多, 我国东南部地区大部份为 1-10 天, 局部地区有 10-30 天, 值得一提的是云南南部地区霾日夏秋冬均少发, 只在春季多发。夏季, 是霾日发生最少的季节, 大部分地区年霾日不足 1 天, 仅山西中南部, 河北、北京等地的局部地区有 5-10 天。

(3) 灰霾出现日数 20 世纪 60 年代全国平均只有 2.4 天, 进入 70 年代有一个明显的上升, 有霾日达到了 5.2 天。进入 80 年代后霾日变化不大, 进入 90 年代霾日略有上升。2000 年后, 霾日又有一个比较明显的上升, 全国站点平均霾日比上个世纪 90 年代增加了 3.6 天, 达 9.7 天。21 世纪以来的全国年霾日比 20 世纪 60 年代上升了 4 倍之多, 所以从年代际变化上看, 全国年霾日呈上升趋势非常明显。

(4) 近 47 年中国霾天气的总体趋势为波动增多, 线性倾向率为 3.19 天/10a, 20 世纪 60 年代至 70 年代中期处于少霾的负位相, 1976-2000 年在很弱的正位相内振荡, 但近 5 年霾天气显著增多。47 年间中国霾天气序列有 2 次明显的突变, 其一位于 20 世纪 70 年中期, 以 1975 年为突变点; 其二位于 2000 年之后。

(5) 从 16 个代表站点分析可得, 霾多发区站点年霾日的年际变化趋势大致可分为三类, 第一类是波动上升型, 这些站点主要位于我国东部和南部。属于平原经济较发达地区, 也是沙尘暴和扬沙天气影响较少地区。第二类是七八十年代存在年霾日高峰期, 近年来霾日相对较少型, 这些代表站点主要位于我国的华北及靠近西部地区。受到沙尘暴浮尘现象和经济发展的双重影响, 主要代表城市有西安等。第三类是年际震荡频繁型, 这些代表站点主要位于我国西南部地区, 主要受沙尘暴和扬沙天气影响比较明显。

第四章 气候因子变化对霾年际和年代际变化的影响

如前所述,中国霾天气在20世纪60年代-70年代中期处于低发期,其后的20多年(1976—2000年)变化趋势不明显,仅在很弱的正位相内振荡,但是最近5年霾天气却显著增多。这种变化趋势,较大程度上取决于社会经济的发展因素。研究成果^[29]表明,霾天气的发生频数首先取决于其物质成分(大气污染物)的聚集强度,亦即在相同的天气气候背景下,大气污染的排放越少,霾天气发生的可能性就越小;反之,大气污染的排放越多,霾天气的发生频次就越高。随着社会经济的发展,城市化进程的加快,人类活动直接向大气排放了大量粒子,污染气体越来越多,污染气体通过非均相化学反应转化形成气溶胶粒子,导致大气气溶胶污染日趋严重,这是导致霾天气现象越来越多的直接诱因。

那么,气候的变化对霾的年际和年代际变化是否也存在着影响呢?下面从地面风力条件、降水、季风环流等几个方面来探讨一下。

为便于分析,本文以中国霾天气主体区域内299个站(年平均霾日在1天以上,观测资料年限在20年以上)作为研究对象,具体位置如图4.1。

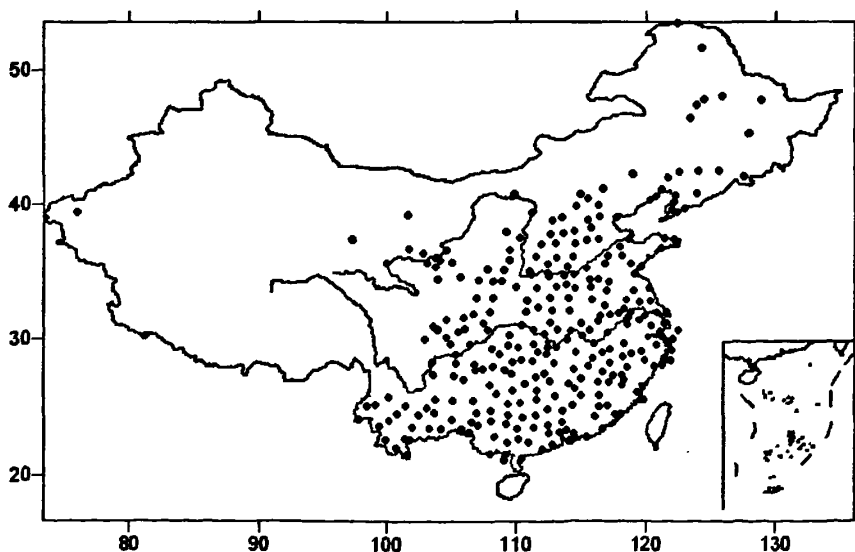


图 4.1 中国霾天气主体区域 299 站点图

4.1 风力条件的变化对霾天气增减趋势的影响

4.1.1 平均风力条件对霾天气的影响

地面风力条件被认为是大气污染物稀释扩散的最直接因素之一。为考察年际尺度地面风力条件对霾天气增减趋势的影响,本文统计了上述霾天气主体区域内站点平均的最大风速 $f \geq 5 \text{ m/s}$ 和 $f \geq 10 \text{ m/s}$ 的日数,发现两者均呈波动减少趋势(图 4.2)。将其与图 3.5 的霾日数变化曲线对比,发现霾日数与风力条件具有很好的反向对应关系。我们计算了 $f \geq 5 \text{ m/s}$ 日数和 $f \geq 10 \text{ m/s}$ 日数与霾日数的相关系数分别为-0.809 和-0.734,远远超出了 $\alpha=0.001$ 的显著性检验标准。如此高的相关关系表明风力条件的变化对霾天气增减趋势的影响非常显著,也进一步证明了风力条件是大气污染物稀释扩散的最主要动力源,其作用表现在两个方面^[12]: 其一是风的水平搬运作用,排入到大气中的污染物在风的推动下,被输送到其它地区;其二是风对大气污染物的稀释作用,污染物随风移动并得到风的搅动,不断与周围相对干净的空气混合而最终稀释。

进一步考察发现在上述的华北中南部、长江中下游和华南等经济发达或经济快速发展的地区,近 5 年风力 $f \geq 5 \text{ m/s}$ 日数显著减少,显然这是导致近几年霾日数激增的一个重要原因。

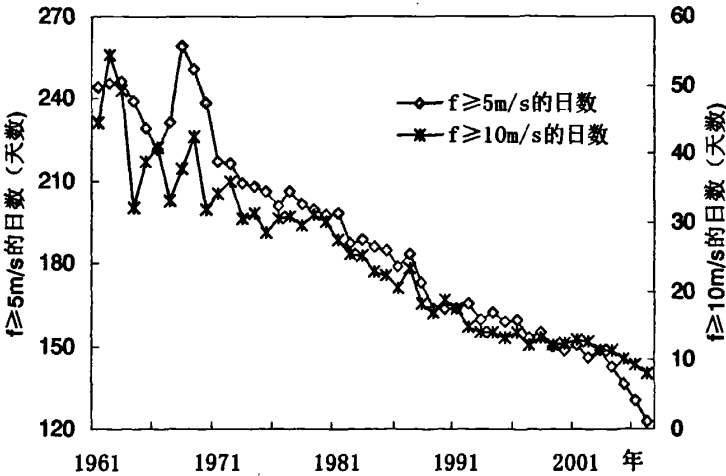


图 4.2 1961-2007 平均风力条件的年际变化

查看霾天气主体区域内各站点风力变化与年霾日数的相关系数分布图(图 4.3),可以发现霾天气主体区域内大部份站点与风力条件呈负相关,特别是风力

条件 $f \geq 5\text{m/s}$ 的天数与年霾日数的相关系数大部份在 0.25 以上, 达到 $\alpha=0.10$ 的显著性检验标准。风力条件 $f \geq 10\text{m/s}$ 的天数与年霾日数的相关性相对弱一些。但是两张图有一个共同点, 就是在 35°N 以北的大部份站点与年霾日数均为正相关, 这说明这些地区风力条件较大时, 霾日也多了。大的风力条件是引起扬沙和沙尘暴天气的必要条件, 扬沙和沙尘暴天气过后一段时期内, 空气中的浮尘粒子较多, 容易引起霾现象的发生, 所以在 35°N 以北的大部份地区的霾现象与风力条件反而成正的相关性。

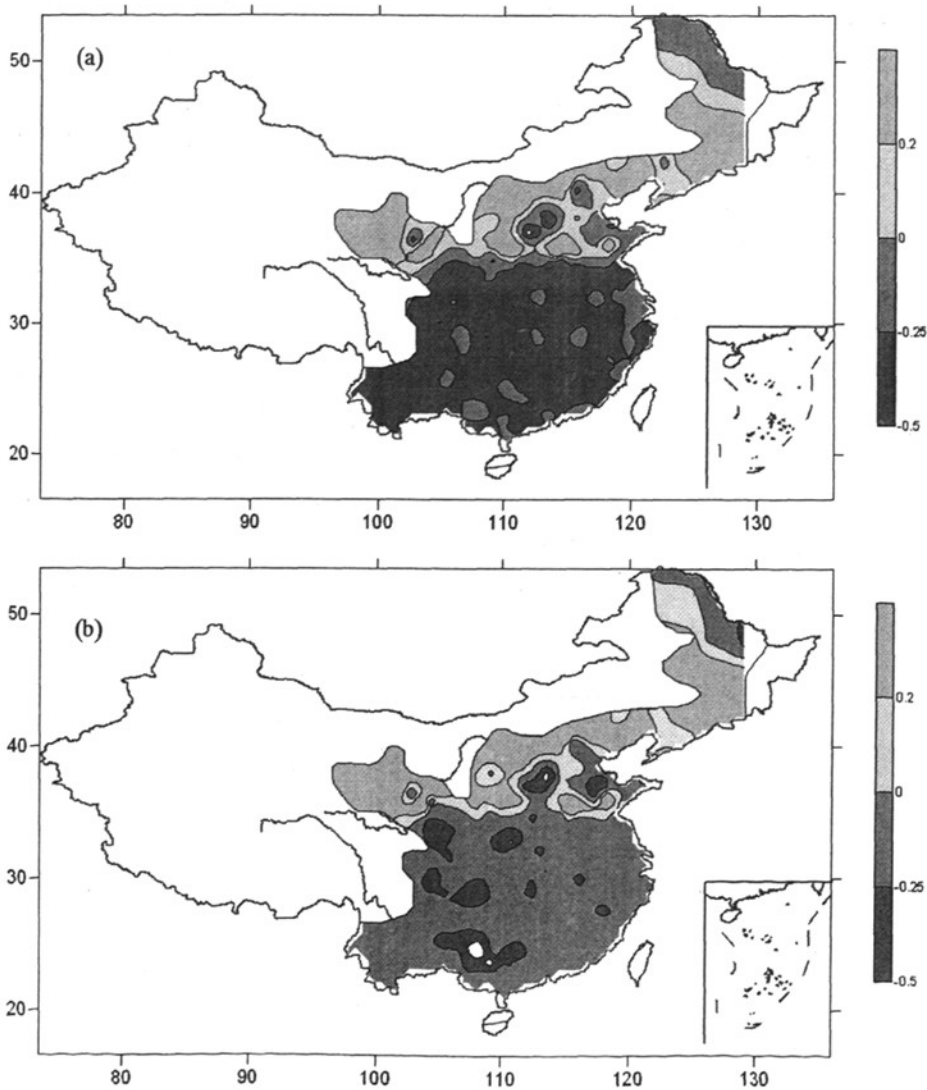


图 4.3 风力 $f \geq 5\text{m/s}$ 与 $f \geq 10\text{m/s}$ 年日数与年霾日数的相关系数分布图

(a) $f \geq 5\text{m/s}$ 日数与年霾日数相关系数 (b) $f \geq 10\text{m/s}$ 日数与年霾日数相关系数

静风或微风对霾天气现象的产生密切相关。统计霾天气主体区域内 299 个站点平均的静风或微风（最大风速 $f < 3 \text{ m/s}$ ）的日数，发现微风日数与 $f \geq 5 \text{ m/s}$ 日数、 $f \geq 10 \text{ m/s}$ 日数年际走向相反，呈波动增加趋势（图 4.4），与霾日数的年际变化同样有很好的对应关系。计算两者相关系数为 0.788，进一步说明了风力条件的变化对霾天气增减趋势的显著影响。对于霾天气主体区域内 299 个站的平均风力的年代际变化，我们认为，由于城市化进程加快，使得城市近地面层粗糙度增加，导致空气流动速度减缓，所以静风或微风日子日益增多，表现在年际变化上一个明显下降的趋势，这是导致霾年际变化增多一个重要因素。

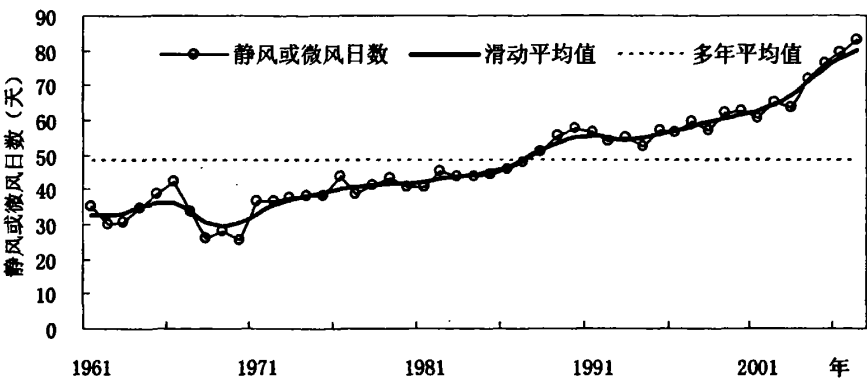


图 4.4 霾天气主体区域内静风或微风日数的年际变化

表 4.1 不同风力条件与霾天气的相关系数

	$f < 3 \text{ m/s}$	$f \geq 5 \text{ m/s}$	$f \geq 10 \text{ m/s}$	$f \geq 12 \text{ m/s}$	$f \geq 15 \text{ m/s}$	$f \geq 17 \text{ m/s}$
春季霾日数	0.104	-0.328	-0.272	-0.252	-0.283	-0.239
夏季霾日数	0.023	-0.818	-0.692	-0.633	-0.559	-0.475
秋季霾日数	0.741	-0.840	-0.761	-0.697	-0.629	-0.503
冬季霾日数	0.023	-0.569	-0.578	-0.547	-0.432	-0.388
全年霾日数	0.788	-0.809	-0.734	-0.690	-0.647	-0.574

从表 4.1 中可以看到不同季节不同风力条件对霾天气增减趋势影响也不同。其中对霾天气增减趋势的影响最明显的是 $f \geq 5 \text{ m/s}$ 的天数。一年四季里， $f \geq 5$

m/s 的相关性都是最高的，比静风或微风日数 ($f < 3 \text{ m/s}$) 还要高，夏秋季其相关性都达到了-0.8 以上。

四个季节中，霾与风的相关系数秋季最高，夏季次之，冬季稍差，春季最差。冬春季是沙尘暴和浮尘相对多发的季节角度，尤其是春季。风对霾粒子的搬运扮演了正负两方面的作用，导致风力条件对霾天气的增减趋势影响变得不明显。一方面，浮尘和沙尘暴爆发的天气下，风将灰尘粒子水平搬运，导致了霾天气主体区域内空气中的浮尘粒子明显增加；另一方面，风又将霾天气主体区域内的霾粒子进行搬运，稀释，减少了霾现象的发生。这种正反两方面的综合作用下，春季风与霾天气增减关系相对其它季节要不明显一些。

4.1.2 代表站点的风力变化与霾日变化分析

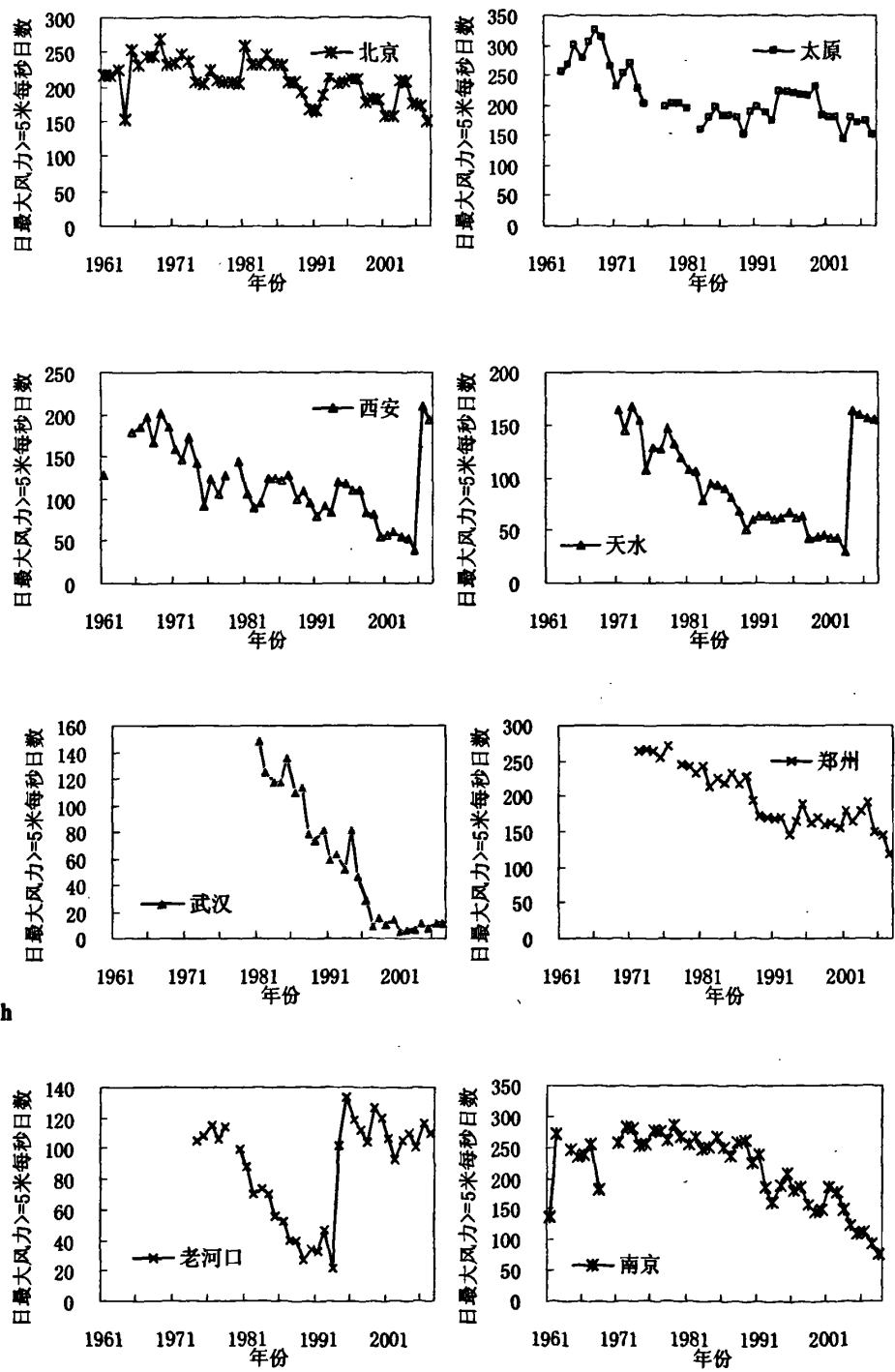
表 4.2 北京等 16 个站点 $f \geq 5\text{m/s}$ 天数与年霾日的相关系数

站名	北京	太原	西安	天水	武汉	郑州	老河口	南京
相关系数	-0.150	-0.452	0.488	0.504	0.634	-0.605	-0.180	-0.808

站名	上海	南昌	长沙	福州	梧州	广州	成都	澜沧
相关系数	-0.355	-0.819	-0.357	-0.455	-0.306	-0.676	0.466	-0.046

我们分别对北京等 16 个代表站点风力情况与年霾日的相关情况进行具体的考察（表 4.2）。站点与风力条件的关系可以分为三类，第一类是呈明显的负相关，代表城市有南昌，南京、郑州和广州等，都达到了-0.6 以上。从图 4.5 我们也可以对应地看到这些代表站的 $f \geq 5\text{m/s}$ 的天数近 47 年来下降的趋势十分明显，微风或静风日明显增多，导致霾天气明显增多。第二类是呈明显的正相关，代表城市有西安、天水、武汉、成都等，从图 4.5 可以发现，西安、天水、武汉的 $f \geq 5\text{m/s}$ 的天数整体呈明显的下降趋势，而霾日对应的也是处于较明显的下降趋势。这个可能与三站引发霾天气的气溶胶粒子来源主要来自于沙尘或扬沙天气有关系。当日最大风力 $f \geq 5\text{m/s}$ 的天数减少时，扬沙或沙尘天气减少，所以霾日也相对减少了。第三类是相关性不明显，代表城市有北京、老河口、澜沧等。这类城市霾粒子来源的复杂多样，导致风对霾粒子的搬运作用和扩散稀释作用同时

得到体现, 相同的风力有时会对霾天气的产生积极影响, 有时又会抑制霾天气的发生, 所以, 总的来说, 风与霾日数变化的直接影响就体现得不明显了。



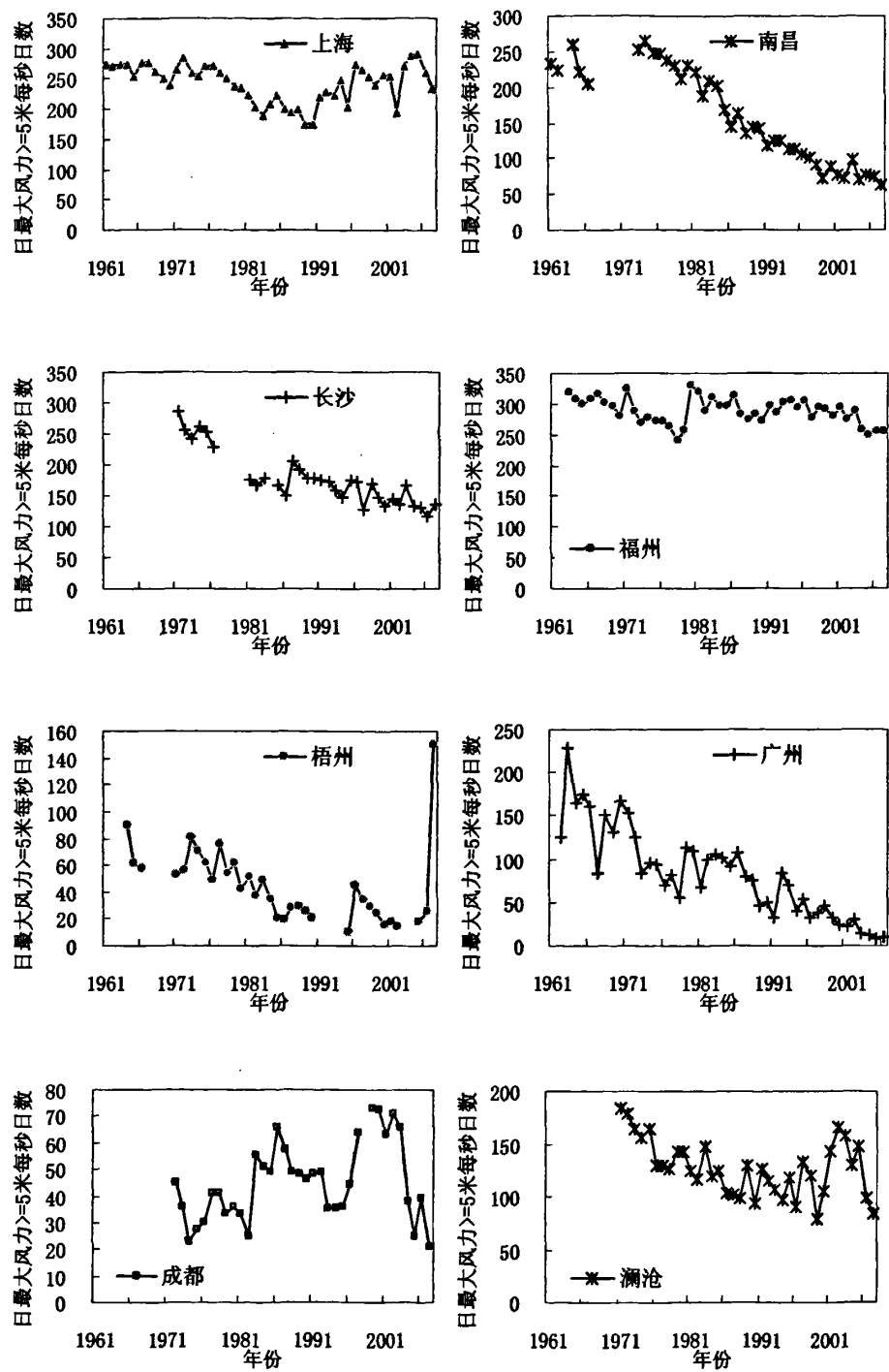


图 4.5 北京等 16 个代表站日最大风力 $f \geq 5 \text{ m/s}$ 的年日数的年际变化

(注：大部份站点有个别年份资料缺，但对分析结果基本无影响，西安 2006 年与天水 2004 年的突变是由迁站引起的)

4.2 降水的变化对霾天气增减趋势的影响

4.2.1 降水条件的变化对霾天气增减趋势的总体影响

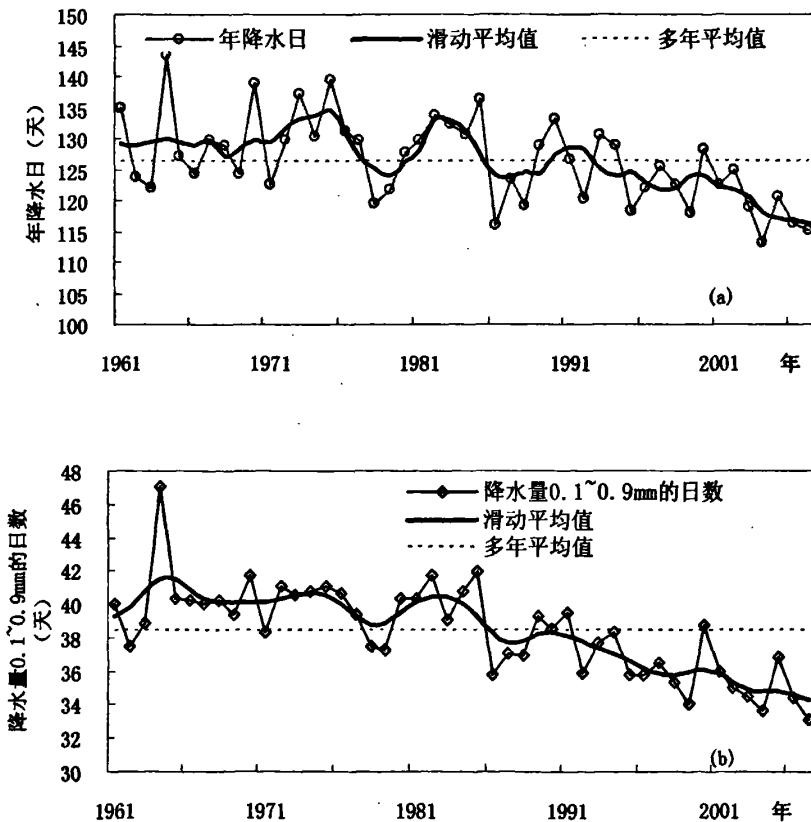
空气中的干尘粒子的积累有利于霾天气的发生,降水是冲刷空气中的干尘粒子重要天气过程之一。为考察降水强度、发生频率对霾天气的不同影响,我们将日降水量大于 0.1mm 的定义为一个降水日,统计了年降水日、各种强度年降水日数及月最大连续无降水日数的年均值与年霾日的相关系数(表 4.3),可以看到,最长连续无降水日数与霾日之间存在较明显的正相关,相关系数为 0.347,达到了 $\alpha=0.02$ 的显著性检验标准,说明连续无降水日多时,霾现象就容易出现。另一方面,年霾日与年降水日的相关性达到了-0.629,说明年降水日的增减对年霾日变化影响也是十分显著的。各种强度的降水日数及降水量都与年霾日之间存在着明显的负相关,尤其是降水量在 0.1-0.9mm 的降水日数与霾的相关性达到-0.716,远远超出了 $\alpha=0.001$ 的信度检验标准,可以指出,降水量在 0.1-0.9mm 的降水过程对空气的净化能力也是非常明显的。其它降水强度在 10mm 以下的年降水日与霾的相关性也都比较明显,基本达到-0.5 以上。10mm 以上的降水量日数与霾的相关性稍差些,只有-0.254,但也达到了 $\alpha=0.10$ 的显著性检验标准。综上所述,降水的强弱和频率都直接影响到霾天气的发生与维持。需要特别指出的是,一般理解,强降水对空气的净化作用比较明显,弱的降水对大气中颗粒物的冲刷作用不明显,但从表 4.3 上看,微量或小量的降水对于霾的出现也有明显的抑制作用。

表 4.3 月最大连续无降水日、年降水量及各种强度年降水日和各数值与年霾日的相关系数

	月最大连续无降水日数年均值	年降水量	降水量0.1mm以上年降水日数	降水量0.1-0.9mm年降水日数	降水量1.0-4.9mm年降水日数	降水量5.0-9.9mm年降水日数	降水量10mm以上年降水日数
平均年值	12.8天	1079.7mm	126.4天	38.4天	38.7天	18.1天	31.2天
与年霾日的相关系数	0.347	-0.230	-0.629	-0.716	-0.571	-0.493	-0.254

考察年际尺度总降水日、弱降水日(降水量0.1-0.9mm)、强降水(降水量10mm

以上)日的曲线变化(图4.6),均呈波动减少趋势。将其与图3.5的霾日数变化曲线对比,可看出霾日数与降水条件具有较好的反向对应关系。年降水日九点二次滑动曲线(图4.6a)显示出20世纪60年代至70年代中期,霾日数相对较少时,对应的年降水日数相对较高。70年代中期至80年代初有一个降水日的低谷及其后5年的一个波峰与图3.5的霾日数变化曲线的一个波峰和低谷反向对应十分吻合。其后近15年降水日在很弱的负位相内振荡,进入2000年后,降水日有了十分明显的下降,而霾日有了明显的上升。这里特别指出,3张降水日数年际变化图都显示了近5年降水日减少十分明显,这是导致近5年霾天气现象明显上升的又一重要原因。



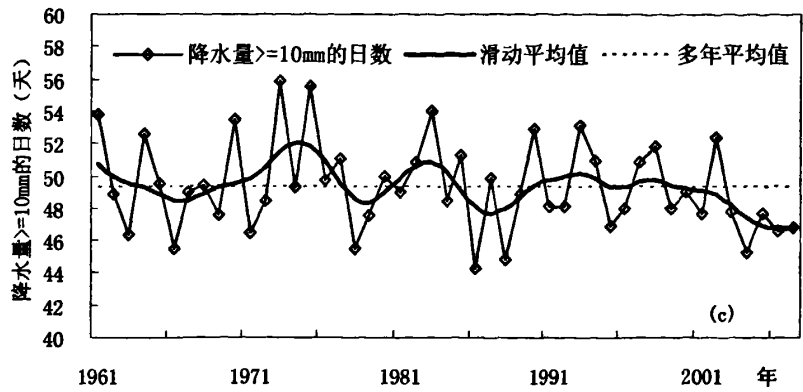


图 4.6 降水日数的年际变化图

4.2.2 代表站的降水条件的变化对霾天气增减趋势的影响

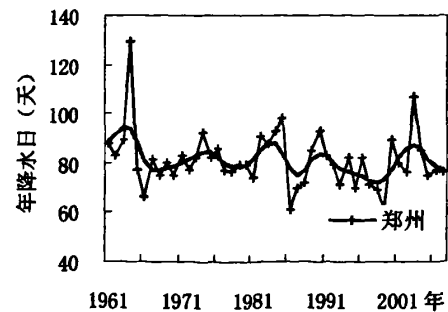
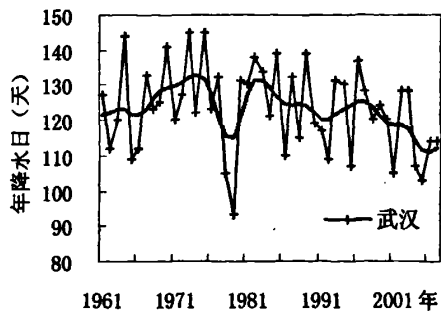
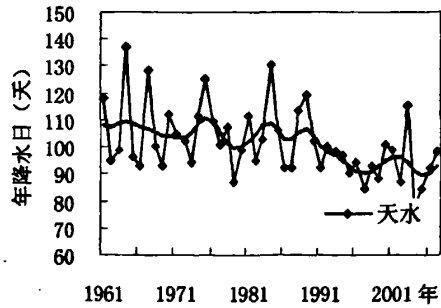
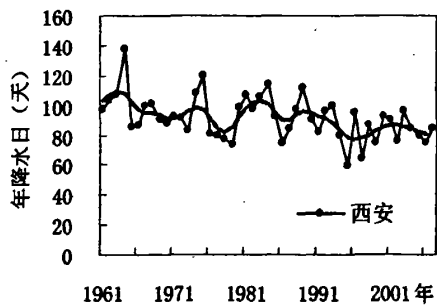
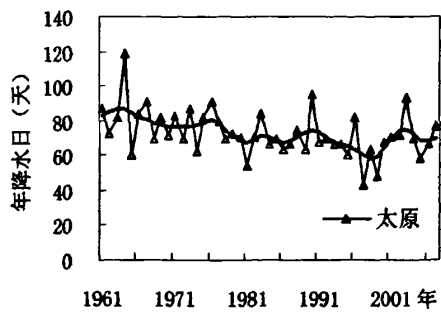
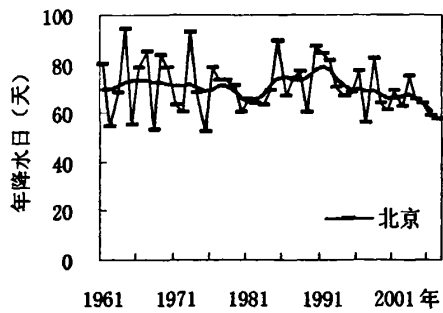
我们考察北京等 16 个站点年降水日与霾的相关系数表（表 4.4）及各代表站点降水年际变化图（图 4.7），对照第三章图 3.8，我们可以看到大部份站点降水日的波动与霾日的波动对应不是特别明显，相关系数绝对值只在 0.1-0.2 之间。考虑到降水的年际波动比较频繁，采用九点二次平滑提取了北京等 16 个站点的年代际变化，对应的霾日也进行了九点二次平滑，发现两者的相关性各代表站都明显提高。

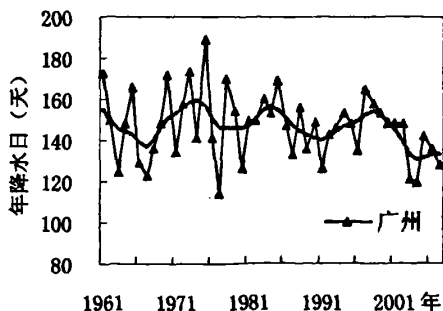
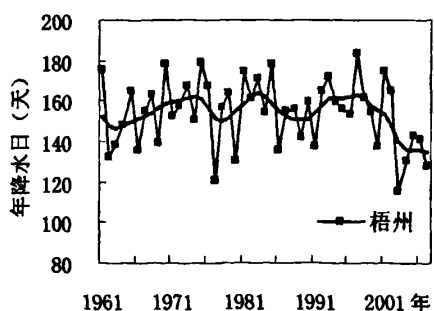
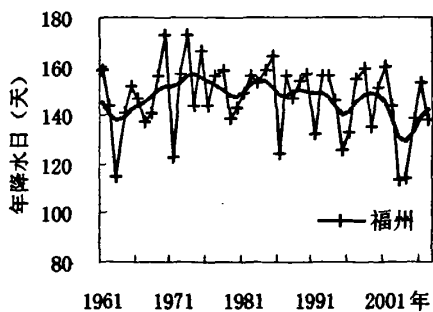
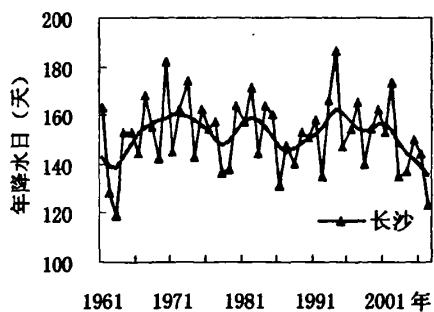
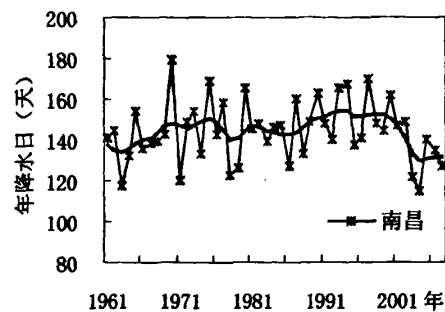
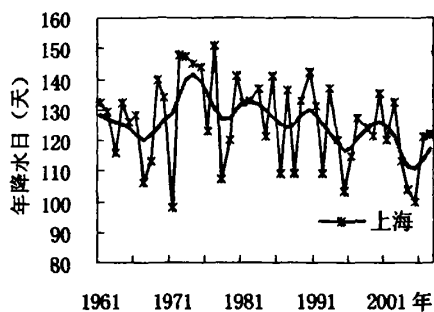
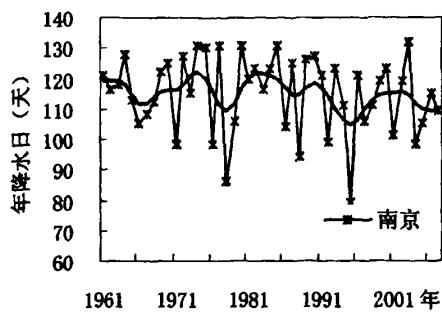
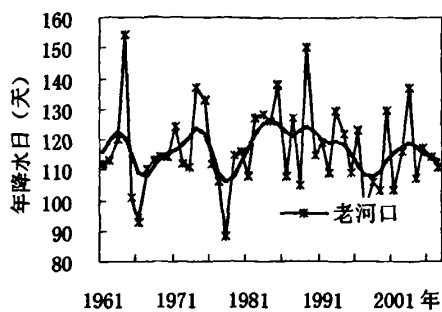
考察降水对霾日的年代际影响，也可以分为三种类型。第一类呈负相关，这一类占到代表城市的绝大部份，如北京、南京、福州、太原、郑州、上海、长沙、梧州、广州、成都等均通过了 $\alpha=0.01$ 的信度检验。查看图 4.7 可以看到，这些站点的降水多年趋势以下降为主，降水的减少直接导致霾日的多发。第二类呈正相关，如西安、天水、武汉等。西安等三站的降水日年代际变化也是略有下降的，但同期沙尘和浮尘现象减少明显，所以霾日也呈下降趋势。第三类相关性不明显，代表站点有南昌、老河口和澜沧。

表 4.4 北京等 16 个站点年降水日与年霾日的相关系数

站名	北京	太原	西安	天水	武汉	郑州	老河口	南京
相关系数	-0.190	-0.151	0.073	0.214	0.241	-0.175	-0.057	-0.224
平滑后相关系数	-0.537	-0.378	0.338	0.543	0.445	-0.269	0.032	-0.511

数								
站名	上海	南昌	长沙	福州	梧州	广州	成都	澜沧
相关系数	-0.196	-0.159	-0.355	-0.374	-0.184	-0.160	-0.277	-0.394
平滑后 相关系数	-0.399	-0.157	-0.300	-0.612	-0.248	-0.368	-0.375	0.139





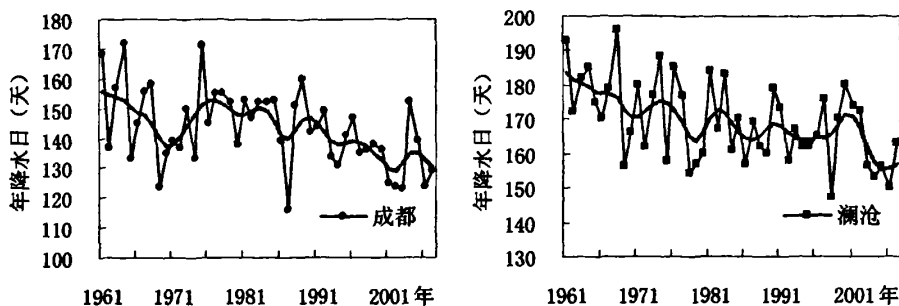


图 4.7 北京等代表站年降水日数的年际变化图

4.3 季风环流对霾天气增减趋势的影响

季风对全球环流特征及天气、气候有很大的影响,季风的强弱变化与大尺度天气流场直接相关。从大尺度气候背景的角度,季风是一个非常重要的影响因子,对于霾现象的趋势变化必将产生影响。从第三章,我们已经分析得到,霾现象一般在冬季多发,所以下面本文将选用两个典型冬季风指数分别讨论一下季风对霾天气趋势的影响。

4.3.1 施能季风指数 I_{SHI} 与霾天气增减趋势的关系

施能^[57]的东亚季风强度指数 I_{SHI} 的定义:用 $20^{\circ}\sim 50^{\circ}N$ (7个纬带)的 $110^{\circ}E$ 与 $160^{\circ}E$ 的季的标准化海平面气压之和的标准化值,来代表东亚季风强度。冬季的强度指数越大,表示冬季风越强。本文得到的施能冬季风指数 I_{SHI} 资料是10月至次年1月的平均,年份按12月所在的年份标记。图4.8给出了施能冬季风指数序列和10月至次年1月霾日数序列。从图4.8a可见,在1961~2006年期间, I_{SHI} 冬季风指数最强的年份是1973年,最弱的年份是2000年。如果把 I_{SHI} 季风指数距平超过1倍标准差作为强季风年和弱季风年的判定标准,则1962、1967、1973、1975、1976、1982、1998和2006等为强季风年,1964、1972、1986、1987、1997、1999、2000和2004等为弱季风年。我们可以发现强季风年大部份出现在六七十年代,而弱季风年大部份在80年代后,这与霾日在六七十年代较少,而80年代后较多相呼应。利用九点二次滑动平均方法,将 I_{SHI} 季风指数序列和霾日序列的长期趋势变化分离出来,笼统地视作年代际分量(图4.8粗实线)。可以

看出, 1960~1983 年是 I_{SHI} 季风指数偏强的正位相, 而 1983 年后, 一直处于 I_{SHI} 季风指数偏弱的负位相, 而与之相呼应的是, 霾日变化在 1960~1983 年期间也是大部份处于较少负位相和很低的正位相, 1983 年后是持续稳定在霾日较高的正位相。计算 I_{SHI} 季风指数序列和霾日序列的相关系数, 为-0.09, 相关性不是很明显, 但是计算两者序列的年代际分量的相关系数达到了-0.420, 通过了 $\alpha=0.01$ 的信度检验标准, 年代际相关性还是十分明显的。显然, 在强的冬季风年份, 冬季干冷^[57], 地面风力较大, 对于霾天气的形成比较不利。80 年代后冬季风相对较弱, 也是导致霾日增多的一个重要气候因素。

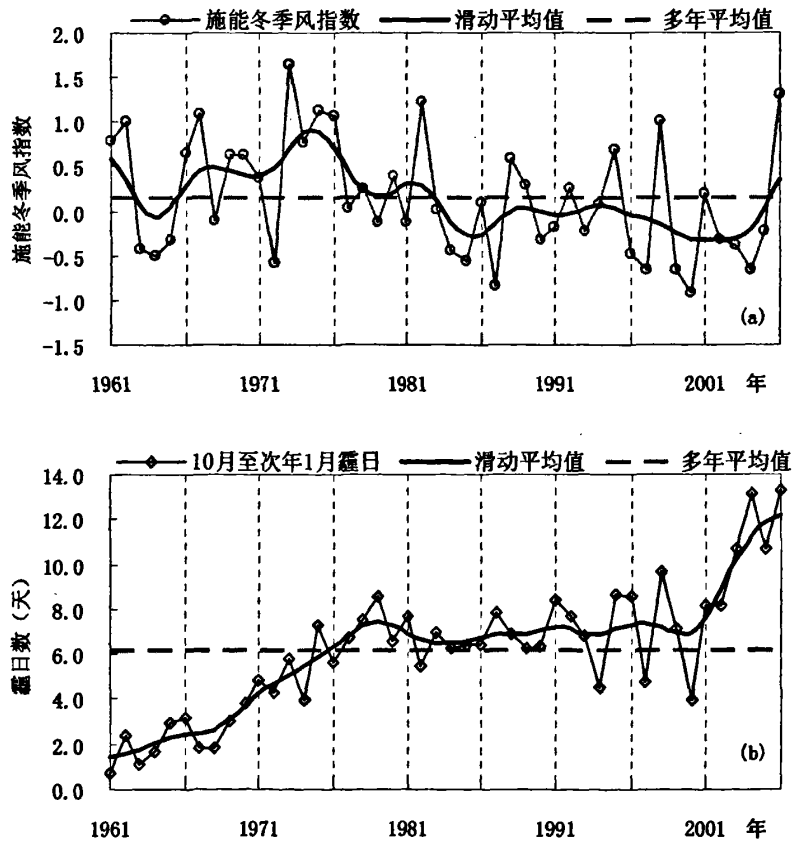


图 4.8 施能冬季风指数 I_{SHI} 序列及相应时间的霾日序列

4.3.2 朱艳峰季风指数 I_{EAWM} 与霾天气增减趋势的关系

施能的季风指数 I_{SHI} 是采用海平面气压值计算出来的, 从地面气压场的角

度反映了季风强弱。和高空形势场结合较好的朱艳峰^[58]季风指数 I_{EAWM} ，能够更好地反映东亚冬季风系统各成员的变化，兼顾北方和南方的环流状况和东西部热力差异的影响。因此，下面本文将朱艳峰季风指数 I_{EAWM} 与霾日关系进一步探讨季风对霾天气的影响。

朱艳峰季风指数 I_{EAWM} 的定义如下：

$$I_{EAWM} = \overline{U_{500(25^{\circ}-35^{\circ}N, 80^{\circ}-120^{\circ}E)}} - \overline{U_{500(50^{\circ}-60^{\circ}N, 80^{\circ}-120^{\circ}E)}} \quad (1)$$

其中 $\overline{U_{500(25^{\circ}-35^{\circ}N, 80^{\circ}-120^{\circ}E)}}$ 为 $25^{\circ}-35^{\circ}N, 80^{\circ}-120^{\circ}E$ 范围内 500hPa 纬向风的平均值， $\overline{U_{500(50^{\circ}-60^{\circ}N, 80^{\circ}-120^{\circ}E)}}$ 为 $50^{\circ}-60^{\circ}N, 80^{\circ}-120^{\circ}E$ 范围内 500hPa 纬向风的平均值。计算得到的 I_{EAWM} 经过标准化处理。 I_{EAWM} 冬季风指数是指当年 12 月至次年 2 月的平均值，年份指 12 月所在年。

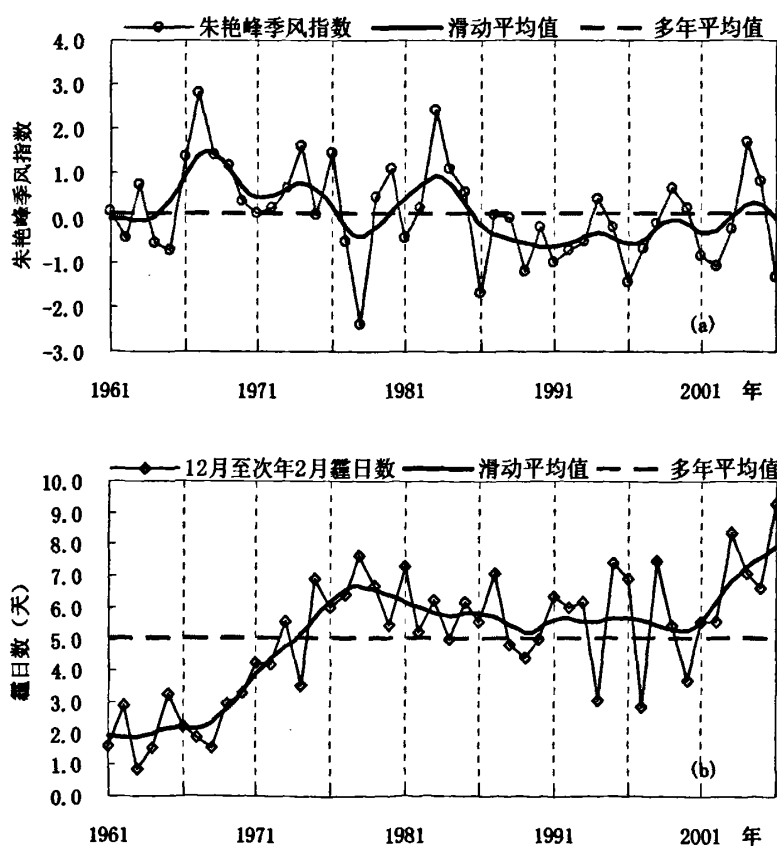


图 4.9 朱艳峰冬季风指数 I_{EAWM} 序列及相应时间的霾日序列

图 4.9 给出了 1961~2006 年朱艳峰冬季风指数 I_{EAWM} 序列及相应时间的霾日序列。当 I_{EAWM} 为正值时, 表示对流层中层的东亚中高纬度中低纬之间的纬向风切变强, 东亚地区纬向气流偏弱, 冬季风偏强。反之, 当 I_{EAWM} 为负值时, 对应冬季风偏弱。同 I_{SHI} 季风指数类似, I_{EAWM} 序列得出强季风年 1966、1967、1968、1974、1976、1983 和 2004 等 7 个强季风年中, 5 个出现在六七十年代; 弱季风年 1978、1986、1989、1991、1996、2002 和 2006 等 7 个弱季风年中, 6 个出现在 80 年代后。其中 1967 年是 1961~2006 年中的 I_{EAWM} 季风指数最强年份, 对应的霾日处于较低水平, 只有 1.84 天; 1978 年是 1961~2006 年中的 I_{EAWM} 季风指数最弱年份, 对应的霾日处于较高的峰值, 达到 7.65 天, 为 1961~2002 年里的最高峰, 这种反向对应关系表现得十分明显。观察两个序列的年代际分量 (图 4.9 实线), 在 1961~1965 年期间, I_{EAWM} 季风指数强度和霾日数都维持少变; 在 1966~1978 年期间, I_{EAWM} 季风指数呈波形下降, 同时霾日数则呈相对稳定上升趋势; 1979~1985 年期间 I_{EAWM} 季风指数上升后下降, 而霾日数则下降后略有上升; 1985 后, I_{EAWM} 季风指数基本处于负位相, 而霾日数则都处于正位相的高发期。计算 I_{EAWM} 季风指数和霾日数的年际变化序列和年代际变化序列的相关系数分别为 -0.333 和 -0.387, 均达到了 $\alpha=0.05$ 的信度检验标准。 I_{EAWM} 季风指数高时, 即冬季风偏强时, 西伯利亚高压偏强, 东亚大槽偏强, 副热带西风急流偏强, 位置偏西, 对流层低层东亚沿岸北风偏强^[36], 当冬季风弱时则相反。这些大尺度环流的变化明显影响到了中国大尺度范围内的风向、风力、降水和其它天气因素的变化, 使季风对中国霾天气的增多和减少趋势产生了明显的影响。

4.4 小结

本章主要讨论气候因子对霾年际和年代际变化的影响。霾现象的年际和年代际变化趋势比较大的程度上和人类活动引起的空气中霾粒子 (大气污染物) 的浓

度变化有着明显的关系。另一方面,气候因子也是造成霾现象明显增加重要原因:

(1) 风力条件变化对霾天气增减趋势有着明显的影响。霾天气主体区域内(即华北的中部、西部和南部,西北的东南部,华中大部,华东,华南和南部地区)站点平均的最大风速 $f \geq 5 \text{ m/s}$ 和 $f \geq 10 \text{ m/s}$ 的日数,与霾日数具有很好的反向对应关系,相关系数分别为-0.809 和-0.734,远远高于 $\alpha=0.001$ 的显著性检验标准。如此高的相关关系表明风力条件的变化对霾天气增减趋势的影响非常显著,也进一步证明了风力条件是大气污染物稀释扩散的最主要动力源。

(2) 静风或微风(最大风速 $f < 3 \text{ m/s}$)的日数与霾日数的相关系数达到了0.788,进一步说明了风力条件的变化对霾天气增减趋势的显著影响。对于霾天气主体区域内299个站点的静风日的年际变化,我们认为,由于城市化进程加快,高楼大厦日益增多,使得城市近地面层粗糙度增加,导致空气流动速度减缓,所以静风或微风日子日益增多,表现在年际变化上呈明显上升的趋势,这是导致霾年际变化增多的一个重要因素。

(3) 考察发现, 35°N 以南地区霾天气与最大风速 $f \geq 5 \text{ m/s}$ 的日数与霾日数基本呈负相关, 35°N 以北大部地区呈正相关。这种情况的存在说明了我国北部地区的霾天气诱发的一个主要因子来自于西北部的浮尘、沙尘暴和扬沙天气。大的风力条件是发生浮尘和扬沙天气的必要条件,而浮尘和扬沙天气引起空气中漂浮的粒子明显增多,在一段时间内会明显增加霾天气出现的可能性。

(4) 不同季节不同风力条件中,对霾天气增减趋势的影响最明显的是日最大风力 $f \geq 5 \text{ m/s}$ 的天数。四个季节中风力条件对霾日影响最明显的是秋季,夏季次之,春季最差。冬春季霾日多发时,风力条件对霾现象的影响是多重的,风对霾粒子的搬运扮演了正负两方面的作用,导致风力条件对霾天气的趋势影响变的不明显。

(5) 代表站点与风力条件的关系分为三类。第一类是呈明显的负相关,代表城市有南昌,南京、郑州和广州等。这类代表站的风力条件近47年来下降趋势十分明显,微风或静风日明显增多,导致霾天气增多明显。第二类是呈明显的正相关,代表城市有西安、天水、武汉、成都等,这类代表站风力条件也呈下降趋势,由于引发这类站点的霾天气的气溶胶粒子与沙尘或扬沙天气有较明显的关系,当风力条件下降时,扬沙或沙尘天气减少,所以霾日也相对减少了。第三类

是相关性不明显,代表城市有北京、老河口、澜沧等。这类站点霾粒子来源复杂多样,风对霾粒子的搬运正反两方面的作用同时得到体现,以致风与霾日数变化的直接关系就体现得不明显了。

(6) 降水条件的变化对霾天气的增减趋势也有十分明显的影响。最长连续无降水日数与霾日之间存在较明显的正相关,相关系数为 0.347,达到了 $\alpha=0.02$ 的显著性检验标准,说明连续无降水日多时,霾现象就容易出现。另一方面,年霾日与年降水日(降水量 $\geq 0.1\text{mm}$)的相关性达到了-0.629,也达到了 $\alpha=0.001$ 的显著性检验标准,充分说明,降水清洁空气,对空气中的干尘粒子存在明显的冲刷作用。

(7) 考察发现,降水的强弱和频率都直接影响到霾天气的发生与维持。需要特别指出的是,一般理解,强降水对空气的净化作用比较明显,弱的降水对大气中颗粒物的冲刷作用不明显,但研究指出,降水量在 0.1-0.9mm 的降水日数与霾日数的相关性达到-0.716,远远超出了 $\alpha=0.001$ 的信度检验标准,可以得出,弱的降水过程对空气的净化能力也是非常明显的,微量或小量的降水对于霾的出现也有非常明显的抑制作用。

(8) 近 5 年年霾日数有了明显的上升,本文对这点特别关注后发现,在华北中南部、长江中下游和华南等经济发达或经济快速发展的地区,近 5 年日最大风力 $f \geq 5 \text{ m/s}$ 日数显著减少,同时各种强度降水都有了明显的下降,这是导致近几年霾日数的激增的两个十分重要的原因。

(9) 代表站点降水对霾日的年代际影响也分为三种类型。第一类呈负相关,这一类占到代表城市的绝大部份,如北京、南京等,降水的减少直接导致霾日的多发。第二类呈正相关,如西安等。西安等三站降水日略有下降,但这三站的沙尘或扬沙天气的减少更加明显,故霾日也呈下降趋势。第三类相关性不明显,代表站点有南昌、老河口和澜沧。

(10) 综合分析施能季风指数 I_{SHI} 和朱艳峰季风指数 I_{EAWM} , 我们发现强季风年大部份发生在六七十年代,弱季风年大部份发生在 80 年代后,这与六七十年代霾日较少,而 80 年代后霾日明显较多相吻合。 I_{SHI} 指数与 I_{EAWM} 指数的年代际变化与霾日的年代际变化相关性十分明显,相关系数分别为-0.420 和-0.387,都达到了 $\alpha=0.01$ 的显著性检验标准,说明季风的强弱变化对霾天气的增减趋势

有十分明显的影响。在强的冬季风年份，风力普遍较大，对于霾天气的形成比较不利，80年代后冬季风相对较弱，也是导致霾日增多的一个重要气候因素。

第五章 霾对气候环境指标的影响

大气灰霾本身就是气候环境指标的一种,气候因子变化与霾天气变化之间应该是双向性的,前者影响后者,后者也会影响前者。深入研究大气灰霾对气候因子的气候影响,将对区分自然与人为的气溶胶贡献有重要参考价值。因此本章主要探讨灰霾对能见度、太阳辐射、大气光学厚度、城市热岛等现象的影响。

5.1 霾对能见度的影响

灰霾现象发生时,空气中飘浮着大量的极细微尘粒、烟粒和盐粒等,这些细颗粒物和气体污染物吸收太阳光、或散射、反射太阳光,降低了大气能见度^[59]。国外有许多研究结果都表明能见度的变化与大气中的气溶胶粒子污染有密切关系^[60-62],国内也有不少研究就大气细粒子质量浓度与能见度的关系作了定量的讨论^[63,47,48]。灰霾现象对能见度长期变化趋势必然有着明显的影响,下面将对霾天气主体区域内 299 个站点能见度资料进行研究,对霾对能见度变化趋势影响作进一步的探讨。

5.1.1 能见度资料的处理

大气能见度资料来自国家气象局地面气象观测站 1961-2007 年常规大气能见度观测。能见度是一个带有主观性的概念,气象上把它定义为视力正常的人,在当时天气条件下,能够从天空背景中看到或辨认出的,大小适度的,黑色目标物的最大水平距离;夜间能看到和确定出一定强度灯光的最大水平距离。能见度观测在 1961-1979 年执行《气象观测暂行规范(地面部分)》的观测方法^[64],观测分为 10 个级别,1980 年后执行新的《地面气象观测规范》^[65],能见度观测不再分级,观测值以 km 为单位记录,并保留一位小数。根据上述观测规范对能见度资料进行一致性处理,将 1980 年后的能见度距离换算为 1980 年前的能见度分级标准,使 1980-2007 年与 1961-1979 年的能见度分级保持一致。对于研究长期能见度趋势的资料,国外研究一般使用 14 点资料值^[63,64],考虑到白天与夜间晚参照物的一致,及 08 点资料较多受雾现象的干扰,所以本文也采用 14 点能见度值作为研究对象。

5.1.2 霾天气主体区域能见度变化趋势

我们暂把能见度划分为三个区间，7 级以上，即能见度大于 10km 的为优能见度日；4 级-6 级，即能见度在 1km 至 10km 之间为差能见度日；3 级及以下，即能见度在 1km 以下天气为恶劣能见度日。

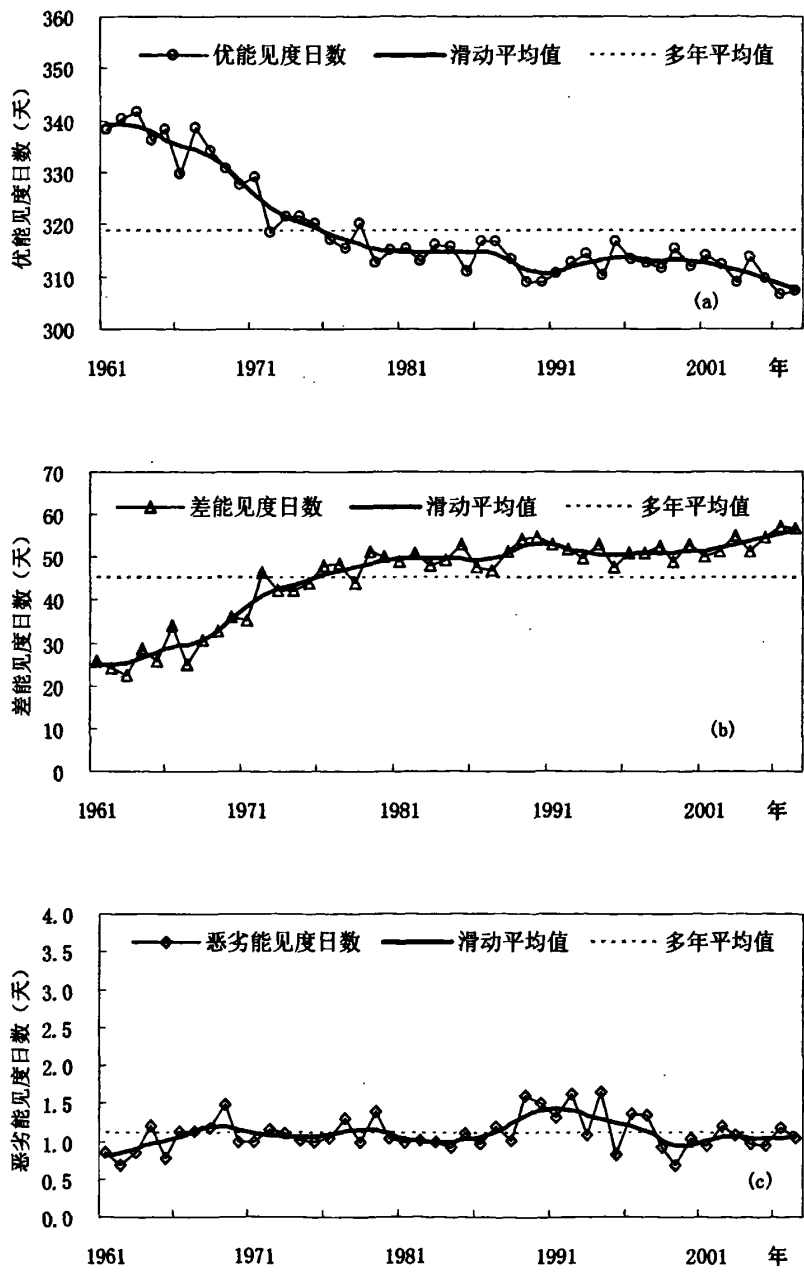


图 5.1 299 站霾天气主体区域站三种能见度日数年际序列

统计考察霾天气主体区域三种能见度日数年际序列(图 5.1),可以发现近 47 年来,大气能见度处于稳定的下降趋势。60 年代初,大气能见度最好,1963 年大气优能见度日占全年的 93.4%,达到了 341 天,而 2007 年大气优能见度日下降到 307 天,只占全年的 83.8%;1963 年差能见度日为 22 天,只占全年天数的 6%,到 2007 年差能见度日为 57 天,增加了一倍多,达到全年总数的 15.6%。差能见度日的增多,其中的一个影响因子就是霾。我们计算了近 47 年年霾日数占差能见度日的百分比(图 5.2),可以看到年霾日占差能见度日百分比 1961 年只占 11.9%,而到 2007 年占到了 51.7%,增加了 4.34 倍,可见霾现象对能见度的影响越来越大。计算优能见度日、差能见度日和恶劣能见度日与年霾日序列的相关系数,分为-0.783、0.785、0.075,可知年霾日与优能见度日成明显的负相关,与差能见度日为明显的正相关,而恶劣能见度日的出现与霾日相关性不明显,主要还是由大雾引起。

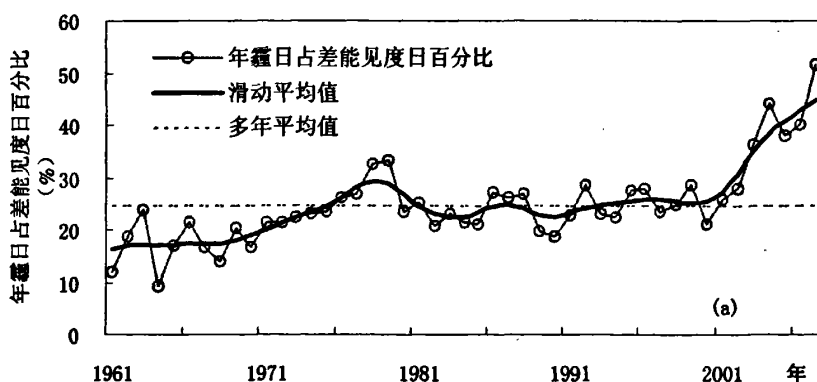


图 5.2 霾天气主体区域年霾日占差能见度日数的百分比年际序列

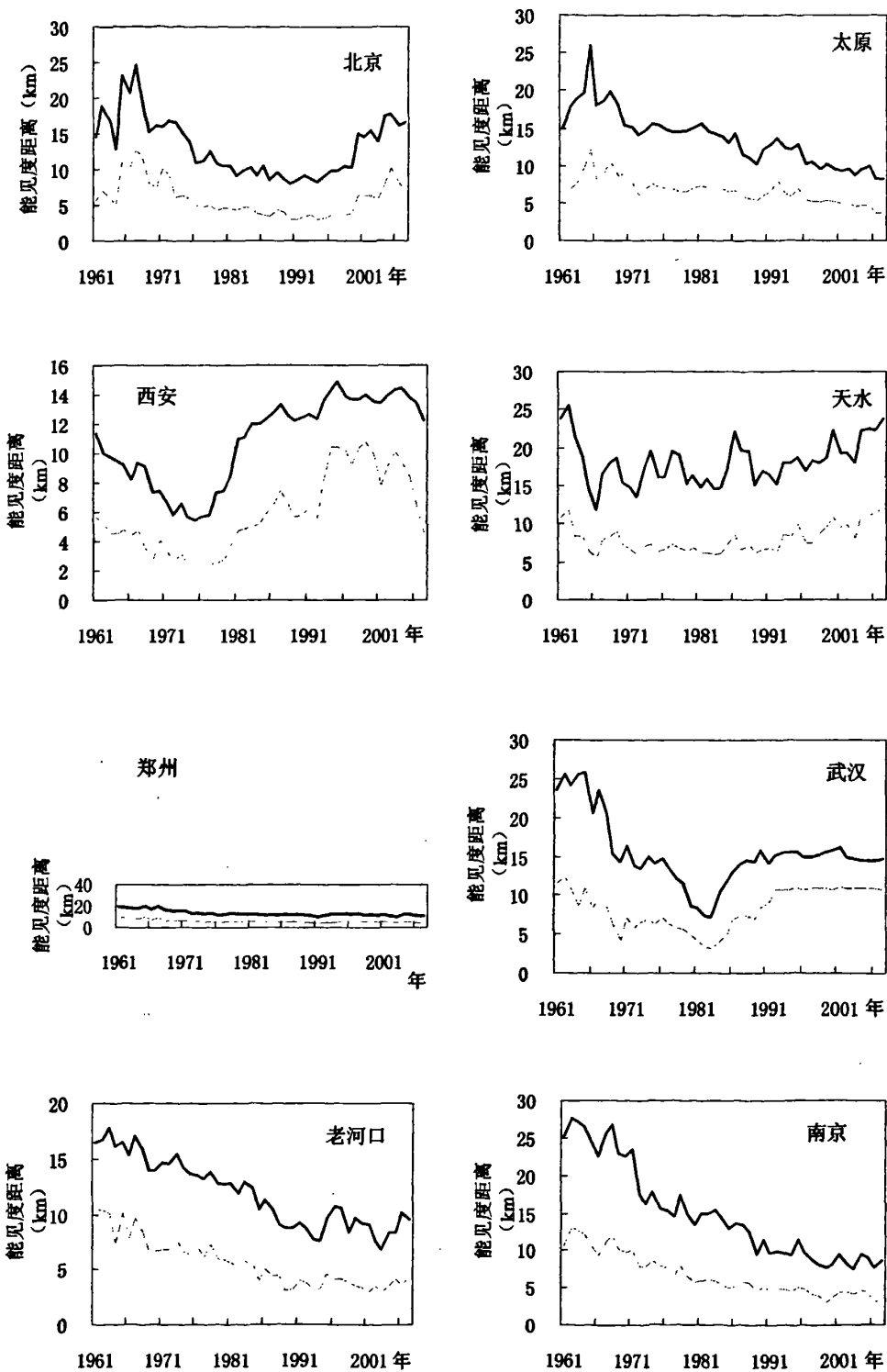
5.1.3 代表站点能见度趋势具体分析

我们对 16 个代表站采用能见度累积百分率法,分别计算得到了能见度中值即累积百分率为 60%所对应的能见度的年际序列和能见度低值即累积百分率为 90%所对应的能见度的年际序列。查看相关系数表 5.1,我们发现除北京、上海站外,能见度变化趋势与年霾日变化趋势普遍呈明显负相关。查看能见度中值和低值的变化曲线(图 5.3),对于年霾日变化第一类波动上升型站点,如郑州、广州、梧州、南昌、福州、南京、长沙、老河口等能见度中值和能见度低值变化曲线基本呈波动下降趋势。郑州,1961 年能见度中值为 19km,2007 年为 11km,

下降了 42%；南京 1961 年能见度中值为 25km，到 2007 年下降到 9km，下降了 64%；广州 1961 年能见度中值为 27km，到 2007 年下降到 12km，下降了 56%。这些站点的能见度与年霾日的相关性都很高，如老河口能见度中值、低值与年霾日的相关性分别达到了-0.947 和-0.865；南京能见度中值、低值与年霾日的相关性分别达到了-0.874 和-0.855；还有梧州能见度中值、低值与年霾日的相关性分别达到了-0.910 和-0.939，达到了极高的相关性，说明这些城市的能见度降低基本上是由霾现象引起的。对于第二类站点，西安、天水、武汉的霾现象都是七八十年代存在年霾日高峰期，近年来霾日相对较少型，这三个站点的能见度中值呈现了与年霾日相反的变化趋势，在七八十年代相对较差，而后能见度中值逐渐有所好转。西安能见度中值、低值与年霾日的相关系数分别达到了-0.950 和-0.833。对于第三类站点，成都的能见度变化与年霾日相关性不是特别明显，能见度中值和低值与霾日的相关系数为-0.228 和-0.272。澜沧代表站能见度非常好，2000 年后能见度 50km 以上日数达到了 80%以上，所以导致 60%的中值计算值偏高，但从澜沧能见度低值与霾日数的相关系数达到-0.604，也可以说明霾现象对澜沧能见度影响还是明显的。而北京和上海两个大都市能见度中值近十几年都有缓慢上升的趋势，这估计和政府努力改善城市环境有比较大的关系。

表 5.1 16 个北京等代表站能见度中值、低值与年霾日的相关系数

站名	北京	太原	西安	天水	武汉	郑州	老河口	南京
中值								
相关	-0.135	-0.312	-0.950	-0.457	-0.505	-0.761	-0.947	-0.874
系数								
低值								
相关	-0.170	-0.282	-0.833	-0.368	-0.805	-0.677	-0.865	-0.855
系数								
站名	上海	南昌	长沙	福州	梧州	广州	成都	澜沧
中值								
相关	0.343	-0.749	-0.498	-0.667	-0.910	-0.730	-0.228	-0.228
系数								
低值								
相关	0.372	-0.816	-0.570	-0.575	-0.939	-0.874	-0.272	-0.604
系数								



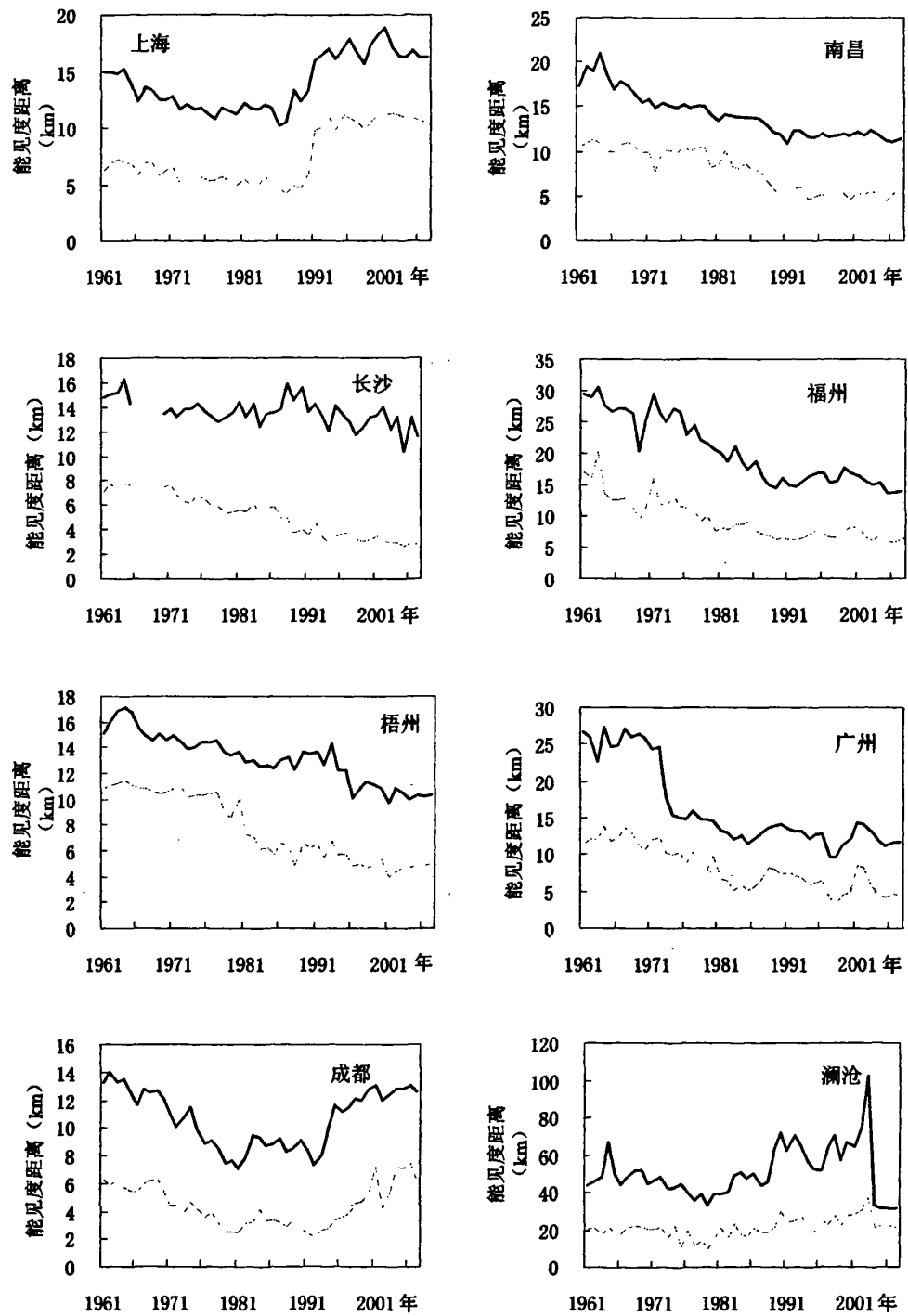


图 5.3 16 个代表站点能见度中值与能见度低值的变化趋势

(实线为能见度中值曲线，虚线为能见度低值曲线)

5.2 霾对太阳辐射和日照时数的影响

5.2.1 霾对太阳辐射的影响

太阳辐射穿过大气层到达地面时，由于大气中空气分子、水蒸汽和尘埃等对太阳辐射的吸收、反射和散射，使辐射强度减弱。灰霾天气发生时，这种辐射减弱现象将更加明显，接下来本文将就霾对太阳辐射的影响进行研究。

太阳总辐射是指水平表面上，在 2π 立体角内所接收到的太阳直接辐射和散射太阳辐射之和，为投射在垂直于阳光的单位面积上单位时间内的能量，单位是 MJ/m^2 。辐射资料取自国家气象信息中心的中国太阳辐射数据集，数据资料经过质量控制，可靠性高。全国范围内辐射观测站点共有 98 个，其中位于霾天气主体区域内测站 39 个（图 5.4）。

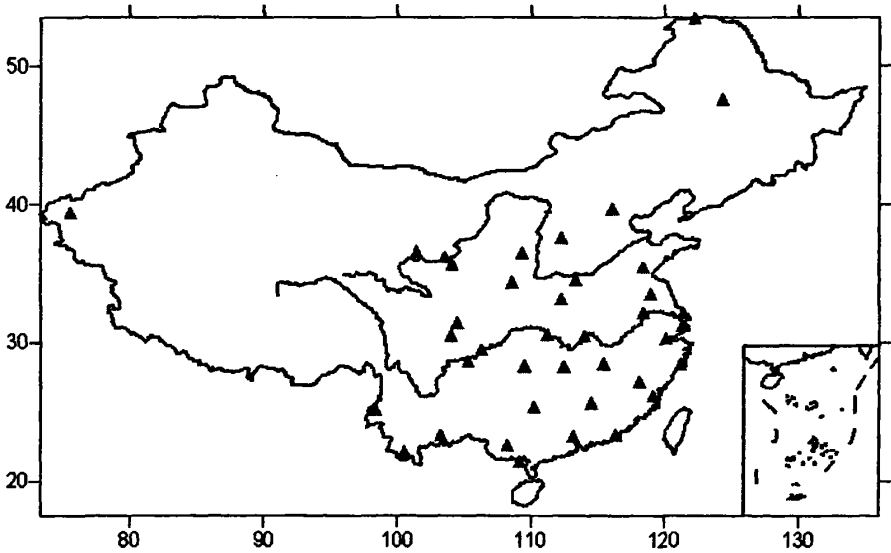


图 5.4 39 个辐射测站图

考察这 39 个站点平均的年总辐射序列和年霾日序列（图 5.5）可以看到，1961-2007 年期间霾天气主体区域内太阳总辐射平均为 $4752.55 \text{ MJ}/\text{m}^2$ ，最高太阳总辐射在 1963 年，辐射值为 $5356.51 \text{ MJ}/\text{m}^2$ ，最低辐射出现在 1989 年为 $4191.56 \text{ MJ}/\text{m}^2$ 。60 年代太阳总辐射平均值为 $5144 \text{ MJ}/\text{m}^2$ ，而近十年太阳总辐射平均值为 $4594 \text{ MJ}/\text{m}^2$ ，降低了 10.7%，太阳辐射减少明显。而这 39 代表站平均的年霾日则呈现出反向的波形走势，两个年际序列的相关系数有 -0.666，达到了 $\alpha=0.001$

的显著性检验标准。显然，随着霾现象的日益增多，到达地面的太阳总辐射量有所减少。

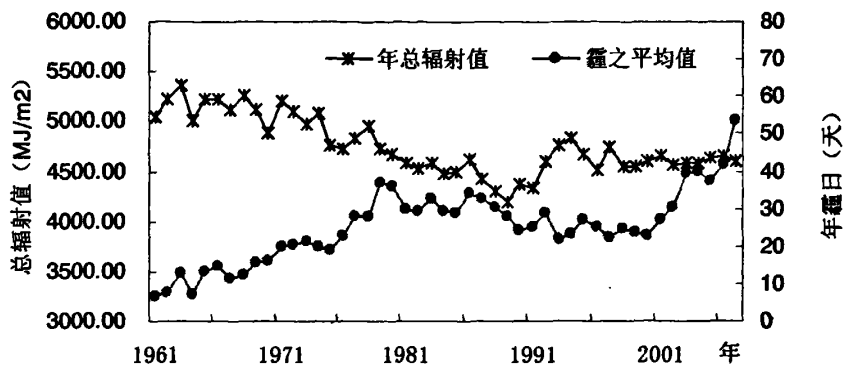
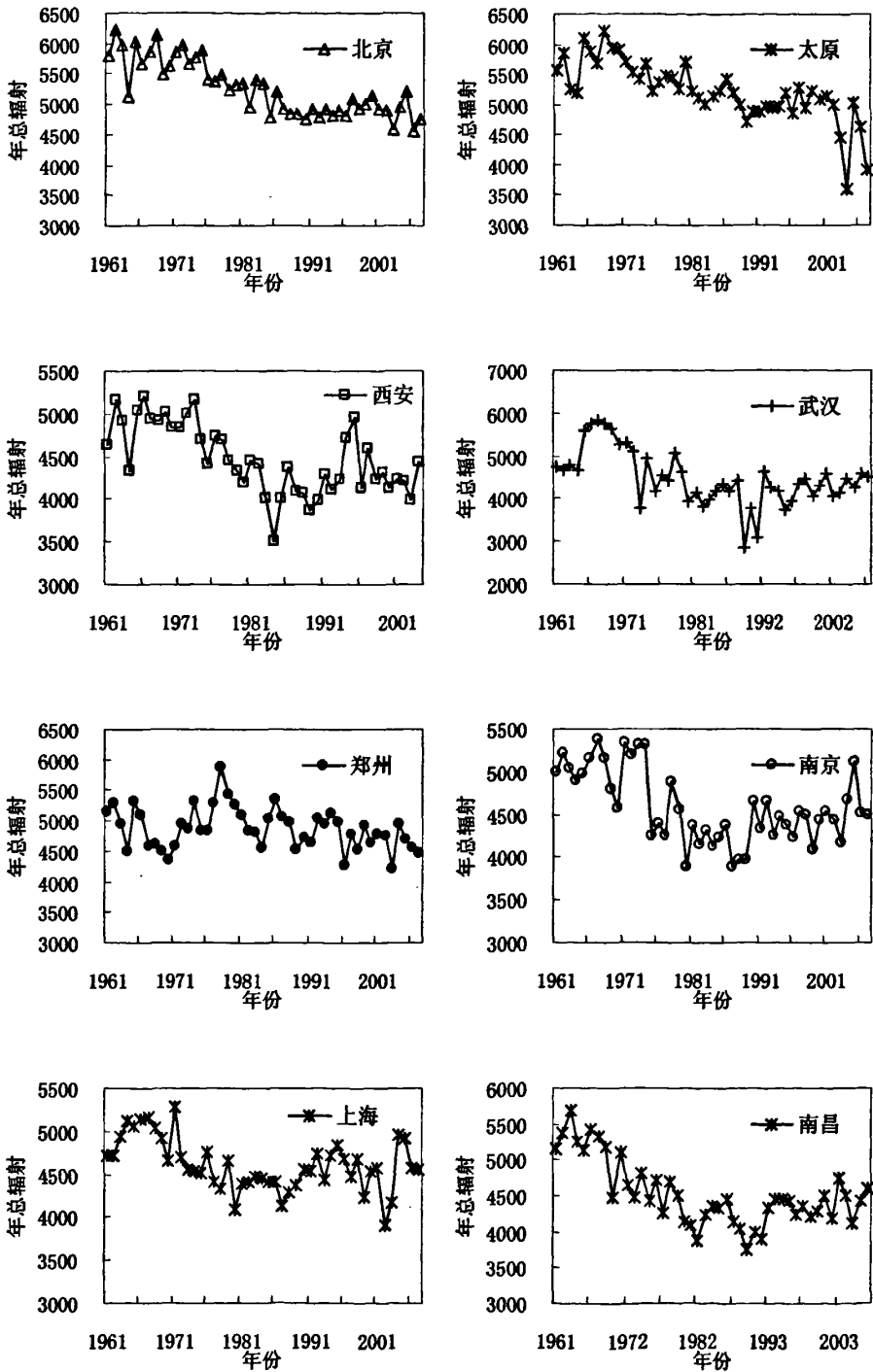


图 5.5 39 个测站平均年总辐射与年霾日对比图

我们对 12 个具体站点作进一步的考察。如表 5.2 所示，12 个代表站全年总辐射量与年霾日年际序列相关系数基本为负相关，年总辐射量年际变化均有减少的趋势（图 5.6）。其中相关系数最高的是上海，为-0.571，超过了 $\alpha=0.001$ 的信度检验标准，成都和南京也达到了 $\alpha=0.001$ 的信度检验标准，其它还有南昌和广州通过了 $\alpha=0.02$ 的信度检验标准，这些站点霾日增多的同时，太阳年总辐射量减少都十分明显。另外，如武汉、长沙、福州、北京、郑州和太原等站点相关性不太明显，相关系数只有-0.2 至 0.1 之间，没有通过 $\alpha=0.10$ 的显著性检验。可能的原因在于这些站的霾日并不是特别多，如福州，武汉年霾日分别只有 16、17 天，所以较少的霾日对太阳总辐射影响上就不是特别明显，长沙的站点资料时间序列较短（图 5.6），如果资料年限较长，相关性可能会更明显些。西安呈明显的正相关，虽然霾日也呈下降趋势，太阳总辐射总体仍呈下降趋势。

表 5.2 12 个北京等代表站年总辐射与年霾日的相关系数

站名	北京	太原	西安	武汉	郑州	南京
相关系数	-0.142	-0.165	0.543	0.035	-0.151	-0.483
站名	上海	南昌	长沙	福州	广州	成都
相关系数	-0.571	-0.367	0.010	0.012	-0.381	-0.549



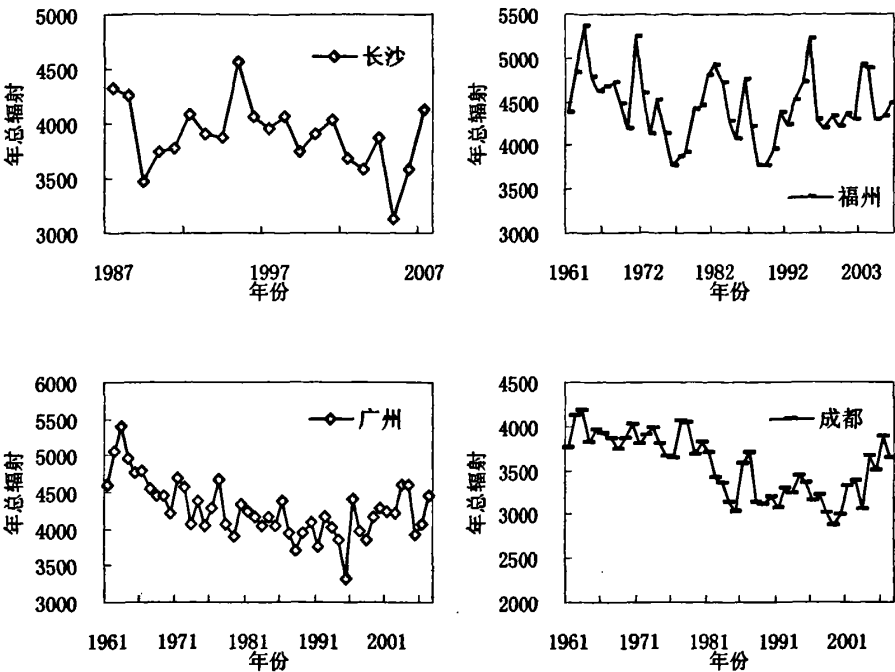
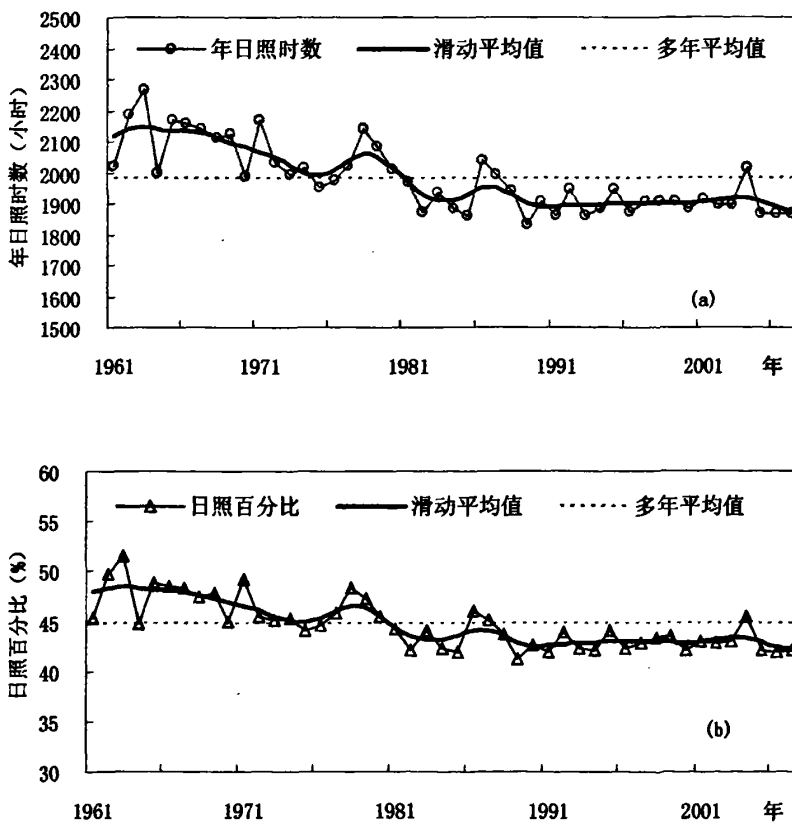


图 5.6 12 个北京等代表站年总辐射序列 (单位: MJ/m²)

5.2.2 霾对日照的影响

日照是气候形成的重要因素，是太阳辐射最直观的表现，与太阳辐射直接相关。由于日照观测作为常规的观测项目，资料站点更多，所以考察霾与日照的关系更有说服力。我们还是选取霾天气主体区域 299 个站作为研究对象。统计得出，霾天气主体区域内年日照平均时数为 1980 小时，也就是平均每天 5.4 小时，比全国所有站点资料平均年日照时数为 2297 小时，少了 317 小时，也就是霾天气主体区域内的 299 站的日平均日照时数比全国平均少了 0.87 小时。我们考察霾天气主体区域内站点的年日照时数的年际变化(图 5.7a)，类似太阳总辐射，1963 年出现了年日照时数的最高值，为 2267 小时。年日照时数的最低值出现在 2007 年，为 1864 小时，60 年代和 70 年代年日照时数基本都在 2000 小时以上，而进入 80 年代后年日照时数有了明显的下降，基本都在 2000 小时以下，近 5 年这种下降趋势更加明显。60 年代年平均日照时数为 2115 小时，而近 10 年日照时数只有 1902 小时，减少了 213 个小时，降低了将近 10.1%。日照百分比的年际序列与年日照时数基本类似(图 5.7b)，60 年代和 70 年代的日照百分比分别为

47.7%和46.0%，而到了2000年后，日照百分比只有42.8%，下降了3个百分点多。同样，日照百分率小于20%的天数，也是在振荡中不断增加（图5.7c），到2007年达到了129.3天，比1963年96.6天增加了22.6天；日照百分率大于60%的天数，也总体呈不断下降趋势（图5.7d），1963年最高时有186.1天，到2007年达到最低值为147.2天，降低了20.9%。年日照时数与年霾日的相关系数是-0.516，达到了 $\alpha=0.001$ 的显著性检验标准。日照百分比、日照百分率小于20%的天数及日照百分率也大于60%的天数与年霾日的相关系数分别达到了-0.497、0.347和-0.476，均达到了 $\alpha=0.02$ 的显著性检验标准。



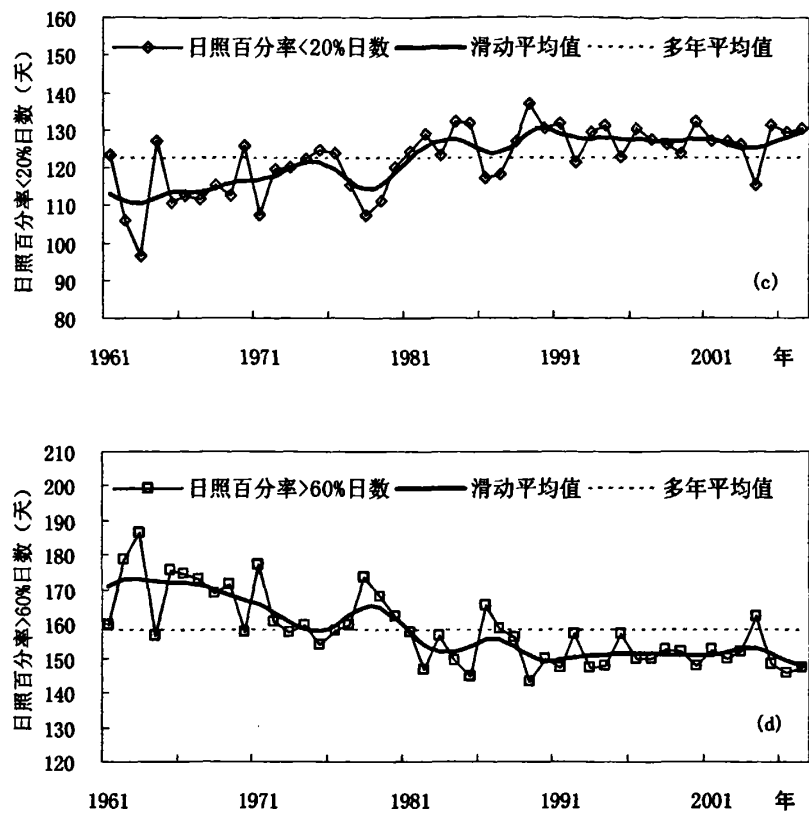


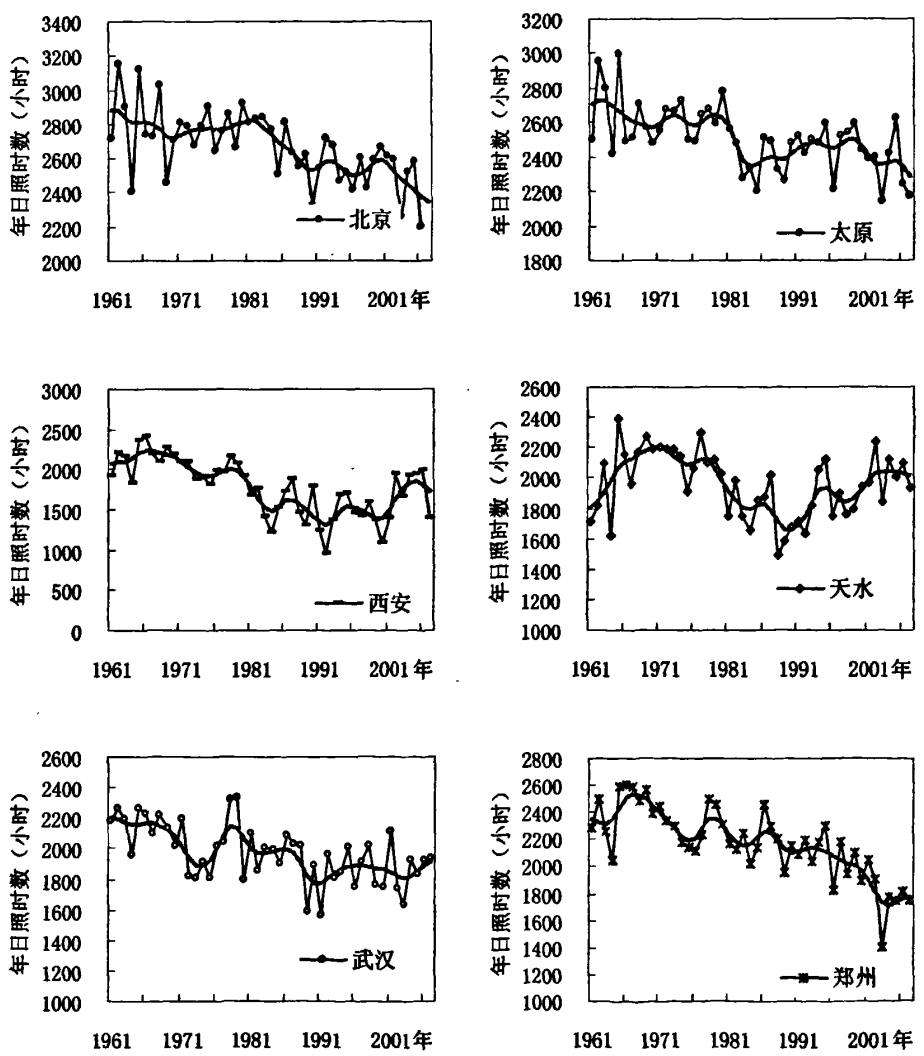
图 5.7 299 站霾天气主体区域站日照时数及日照百分比序列

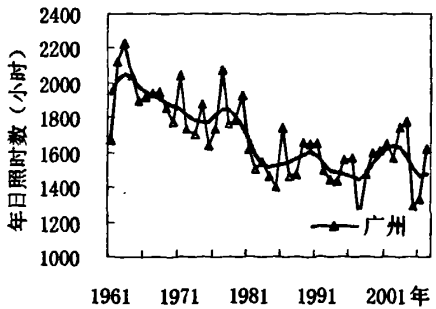
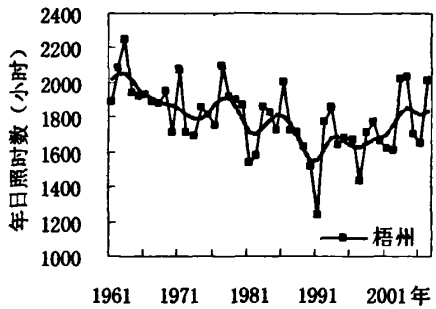
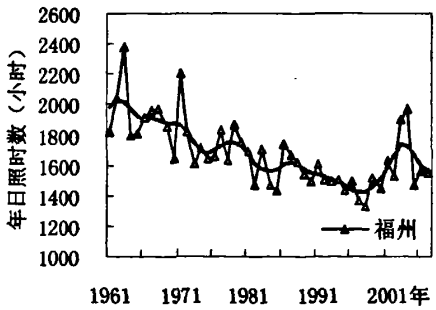
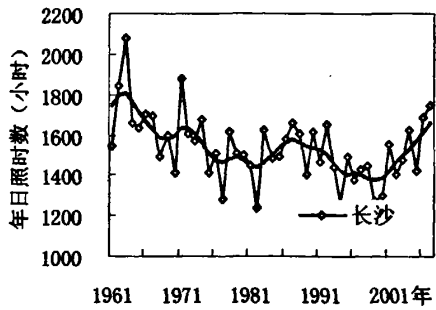
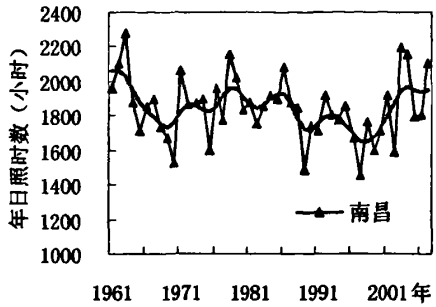
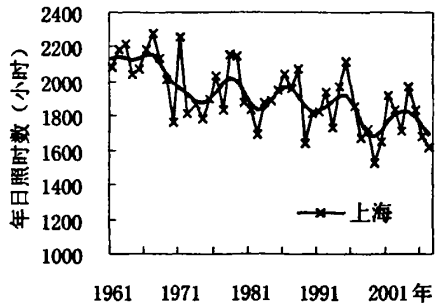
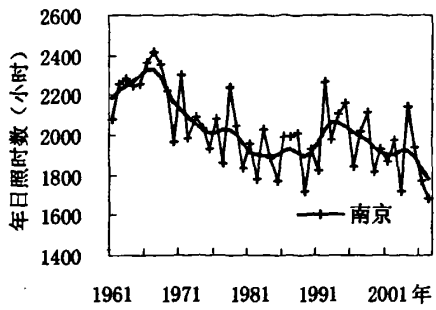
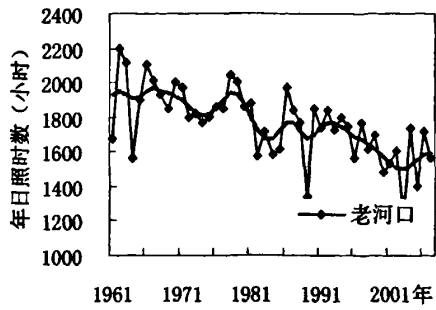
考察 16 个代表站点的年霾日对年日照时数的影响(表 5.4 和图 5.8), 不同城市年霾日与年日照时数的相关性并不完全一致。按相关系数还是分为三大类, 第一类, 也是主要的大类, 年霾日与年日照时数呈明显的负相关, 如广州、郑州、老河口等站点相关系数均达到了 99.9% 的显著性检验标准。前面提到的太阳总辐射与年霾日呈明显负相关的城市, 如上海、成都、南京等也同样呈现出比较高的负相关性, 在年代际变化上表现的尤其明显。第二类, 呈明显的正相关。此类站点太阳总辐射与年霾日也呈正相关, 代表站点为西安、天水、武汉等。第三类, 相关性不明显的站点, 主要代表城市有北京、南昌、长沙、福州、澜沧等。

表 5.4 北京等 16 个站点年霾日与年日照时数的相关系数

站名	北京	太原	西安	天水	武汉	郑州	老河口	南京
----	----	----	----	----	----	----	-----	----

相关系数	0.063	-0.300	0.578	0.546	0.229	-0.637	-0.521	-0.463
平滑后相关系数	0.097	-0.507	0.677	0.753	0.424	-0.874	-0.868	-0.660
站名	上海	南昌	长沙	福州	梧州	广州	成都	澜沧
相关系数	-0.315	-0.007	-0.063	-0.209	-0.350	-0.644	-0.389	0.237
平滑后相关系数	-0.602	-0.142	-0.359	-0.199	-0.654	-0.874	-0.617	-0.267





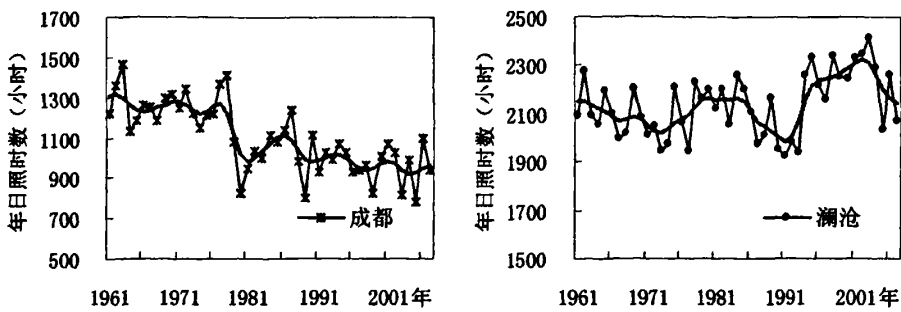


图 5.8 16 个北京等代表站年日照时数序列图

5.3 霾对气溶胶光学厚度的影响

大气柱气溶胶光学厚度是表征大气浑浊度的一个重要物理量。根据邱金恒、林耀荣^[66]的光学厚度参数化模式：

$$\Gamma_{\lambda} = \left(\frac{3.192}{V} - 0.0116 \right) \frac{0.55}{\lambda} \left[H_1 \left(e^{\frac{z}{H_1}} - e^{\frac{5.5}{H_1}} \right) + 12.5 e^{\frac{5.5}{H_1}} + H_2 e^{\frac{5.5}{H_1}} \right] f \quad (1)$$

式(1)中, V 为海平面的能见度, λ 为波长, z 为台站海拔高度, $H_1 = 0.886 + 0.0222V$ (Km)。 f 为订正系数, 选取二个不同的模式, 对东北的沈阳和哈尔滨两地,

$$f = e^{-0.32 + 0.02V_z} \quad (2)$$

对中国东北以外的其它地区,

$$f = e^{(0.42 + 0.0046 p_w + 0.015 V_z) \exp(-0.0047 V_z^2 / p_w)} \quad (3)$$

我们得到 100° E 以东所有 578 个站点 (图 5.9) 的 1961-2005 年光学厚度序列资料, 下面本文将以此为基础进行分析。

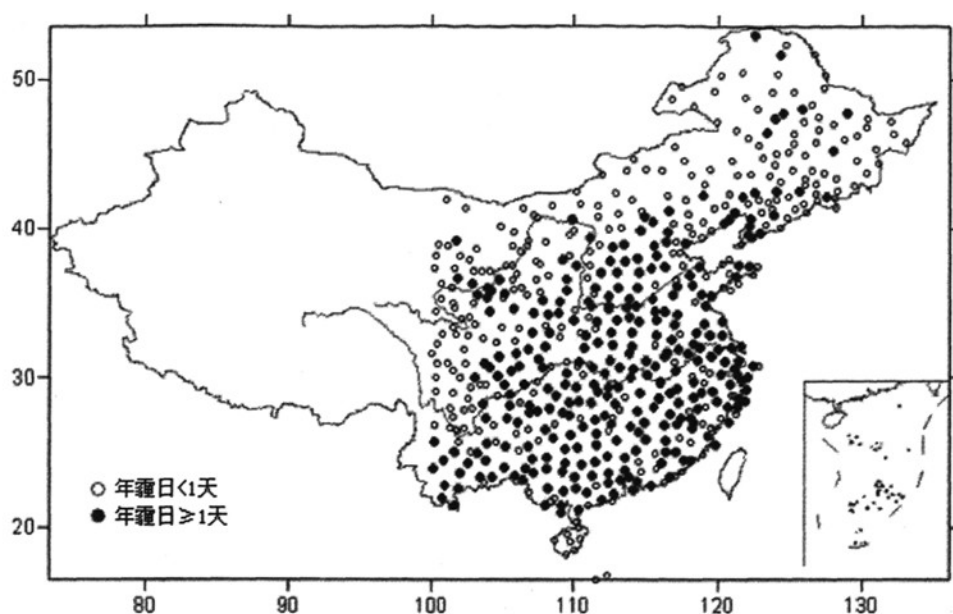


图 5.9 100° E 以东 578 个站点及其中霾天气主体区域站的分布图

我们首先计算得到所有站点多年平均光学厚度序列。统计得出, 大气光学厚度均值为 0.43, 光学厚度最低值出现在 1963 年为 0.37, 最高值出现在 2003 年, 为 0.49, 上升了 32%, 上升幅度比较明显。从光学厚度年际变化图(图 5.10a), 也可以看到光学厚度随年际变化呈持续稳定的上升趋势。我们分别计算了霾天气主体区域站点(年霾日 ≥ 1 天)的光学厚度年际序列和非霾天气主体区域站点(年霾日 < 1 天)的光学厚度年际序列(图 5.10b), 对比发现霾天气主体区域站点的光学厚度值明显要比非霾天气主体区域站点的光学厚度高, 非霾天气主体区域站点的光学厚度平均为 0.32, 霾天气主体区域站点的光学厚度值平均在 0.54, 高出平均值四分之一多, 说明有霾站大气光学厚度明显要高于无霾站。计算霾天气主体区域站点的光学厚度与年霾日的相关系数达到了 0.773, 远远超出了 $\alpha=0.001$ 的显著性检验标准, 说明霾现象确实对大气气溶胶的光学厚度存在直接的关系。一方面, 霾现象的发生是大气中气溶胶的浓度达到了一定的程度后, 空气中的尘埃粒子明显增多引起能见度下降到 10 公里以内时才发生的一种视程障碍现象, 所以随着大气气溶胶的光学厚度增大, 必然导致霾现象的多发。另一方面, 霾现象发生时, 大气稳定, 污染物不易扩散, 将导致大气气溶胶浓度的增大, 两者互为因果关系。

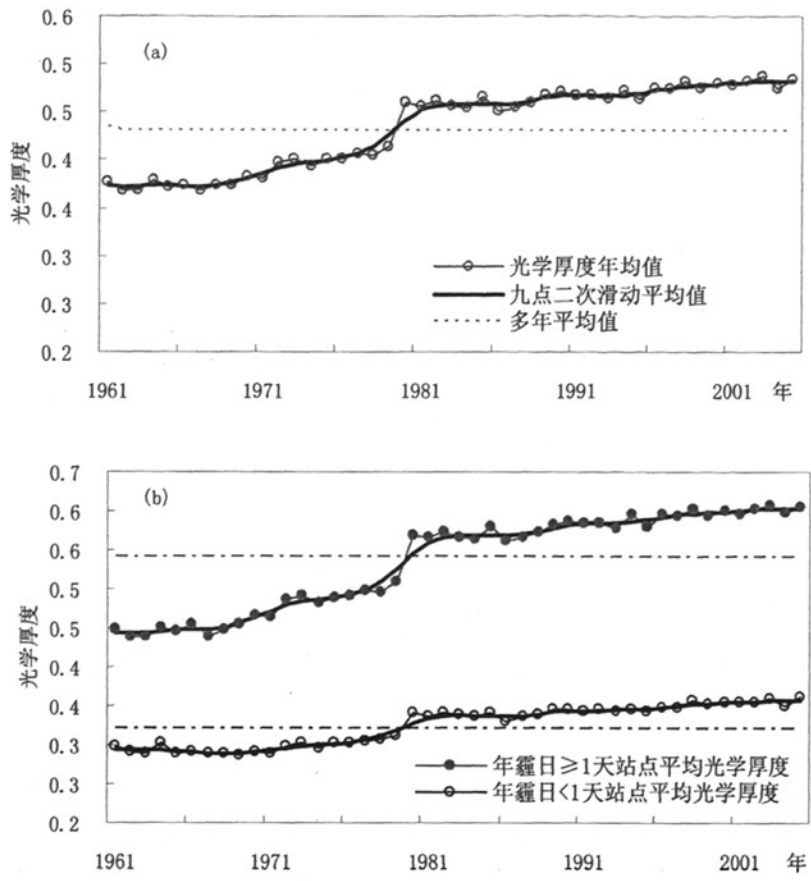


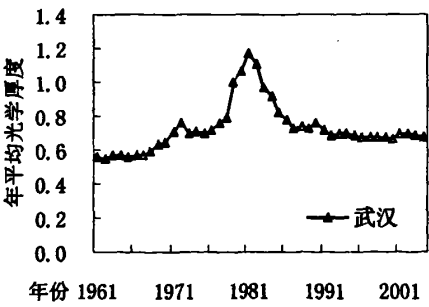
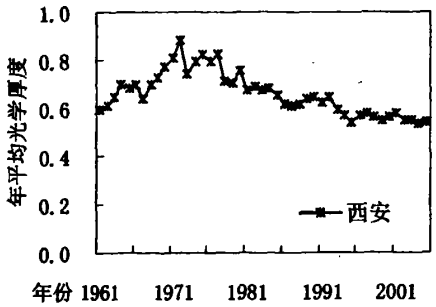
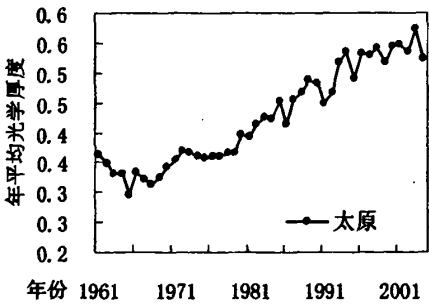
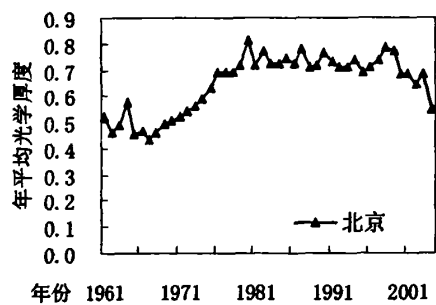
图 5.10 100° E 以东大气光学厚度年际变化图

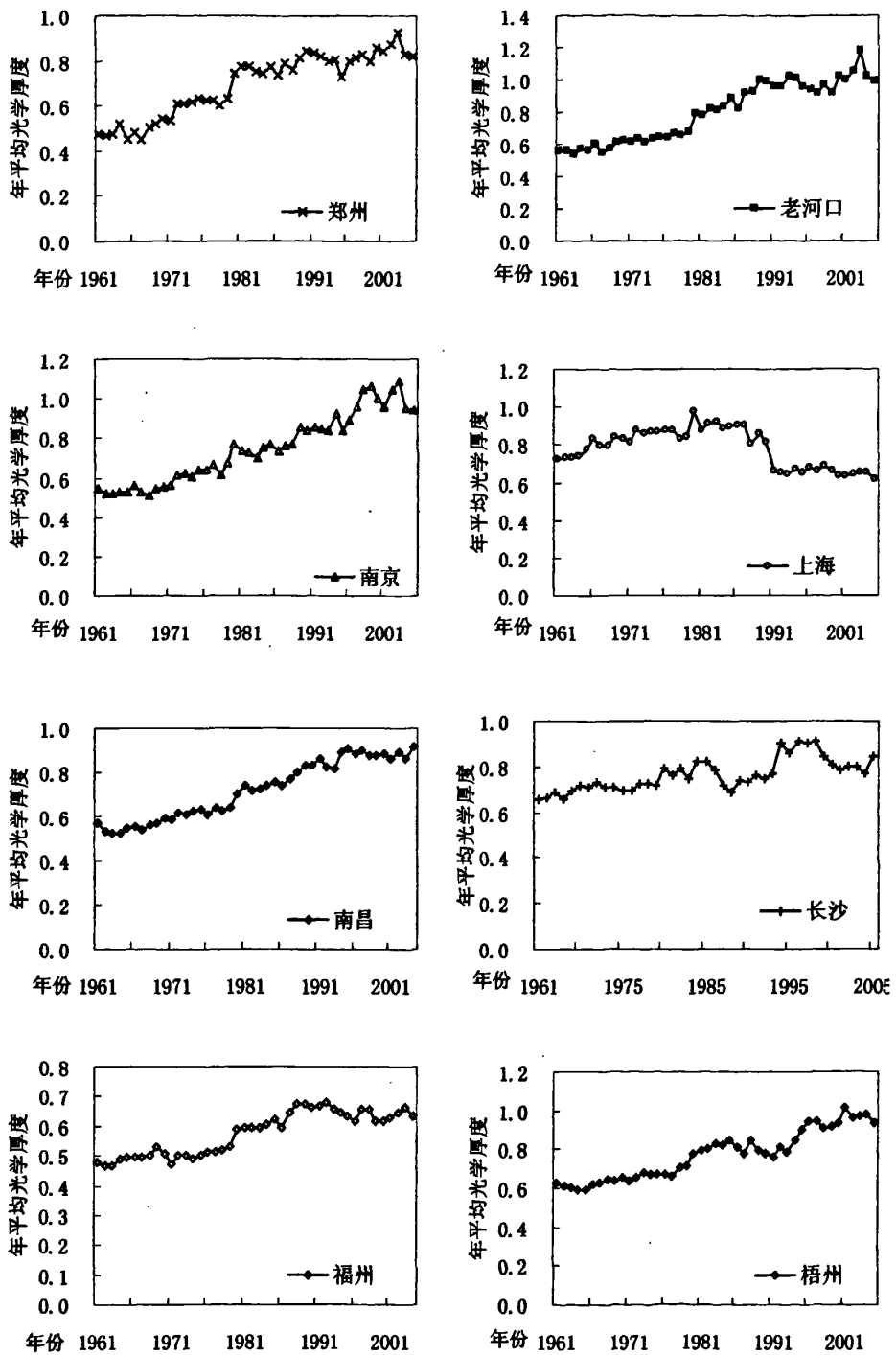
下面我们对北京等 14 个站点的光学厚度与霾现象的关系作进一步的分析。由表 5.4 可以看到，除上海站外，其它所有站点霾日数与光学厚度都是呈正相关的，而且都通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验标准，其中西安，郑州，广州、南昌、老河口、南京、梧州等年霾日与大气气溶胶的光学厚度相关系数达到了 0.8 以上，远远超过了 $\alpha=0.001$ 的显著性检验标准，更有甚者，梧州、西安、老河口、南京等 4 个站达到了 0.9 以上，表明这些站的霾现象与大气气溶胶光学厚度的年际变化存在非常紧密的关系，也就是说这些站的霾现象与大气气溶胶浓度的年际变化存在直接的关系。图 5.11 表明，大部份站点的大气气溶胶浓度随年际变化是呈上升趋势的，但不是所有站点都呈稳定上升趋势。如西安，1972 年光学厚度值达到了最高，为 0.881，这时西安的年霾日达到了 265 天，一个相当高的水平，而 2004 年光学厚度值达到了最低，为 0.531，这时西安的年霾日只有 12 天，对

比图 3.8 的西安年霾日曲线，两条曲线对应十分紧密。类似的还有武汉，可以看到武汉在 1982 年有一个高峰，之后光学厚度明显下降，而武汉的年霾日在 1983 年达到顶峰，1984 年后也逐渐下降，即随着武汉光学厚度值的下降，年霾日也明显下降了。上海的光学厚度值 90 年代后处于一个相对平稳较低的水平，而年霾日 2001-2003 年都有大幅增多，这是个十分奇怪的现象，需要进一步的探讨。

表 5.4 北京等 14 个站点年霾日与气溶胶光学厚度的相关系数

站名	北京	太原	西安	武汉	郑州	老河口	南京
相关系数	0.330	0.274	0.922	0.718	0.838	0.922	0.921
站名	上海	南昌	长沙	福州	梧州	广州	成都
相关系数	-0.295	0.850	0.316	0.636	0.943	0.884	0.310





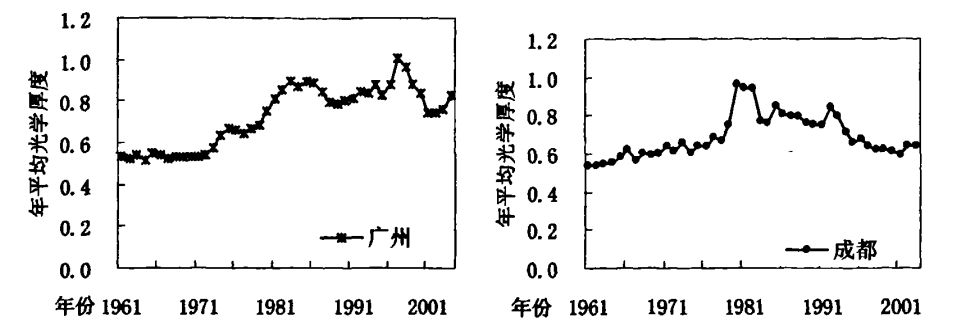


图 5.11 北京等 14 个站点光学厚度年际变化图

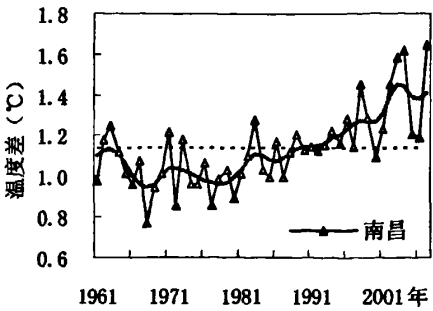
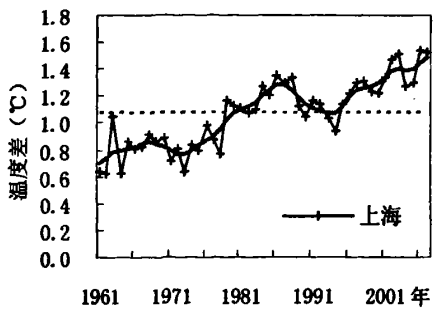
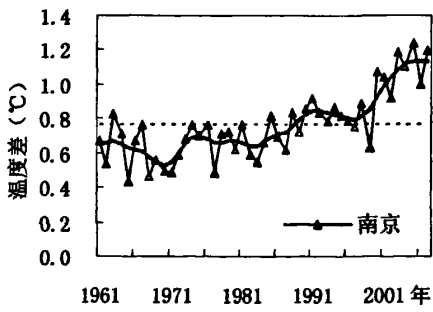
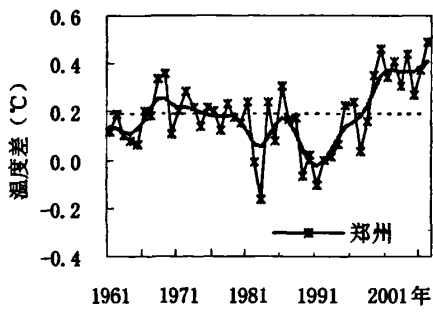
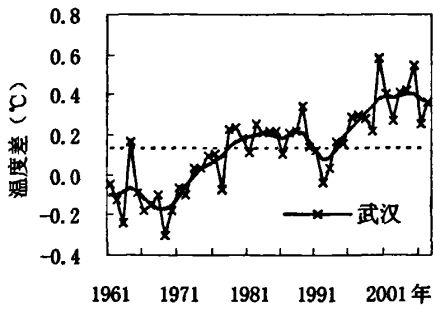
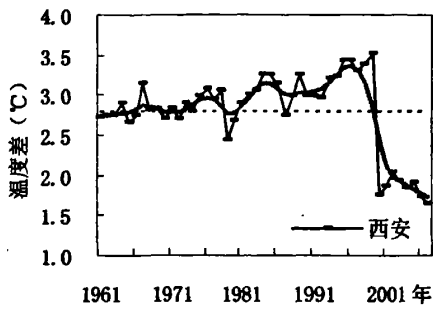
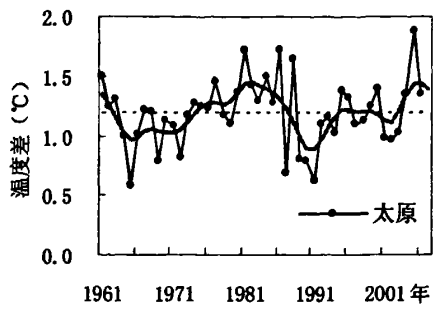
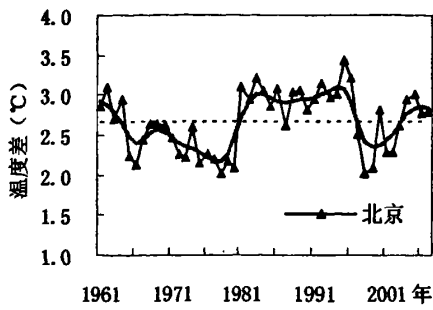
5.4 霾对城市热岛的影响

城市热岛效应，指的是由于城市化的发展，导致城市中的气温高于外围郊区的这种现象。定义某站气温距平与受城市发展影响较小的对照站气温距平之差为该站的热岛强度。霾多发区对应着一个个城市“浊岛”，“浊岛”和“热岛”之间是否存在一定的关系呢？我们从前面 16 个代表站里，选出 12 个大城市站进行深入探讨。12 个城市站及郊区站的站名及平均气温如表 5.5 所示，可以看出这 12 个城市存在着明显的热岛现象。

表 5.5 北京等 12 城市热岛现象代表站及相应郊区站

城市站名	城市站号	平均气温	相应郊区站名	相应郊区站号	平均气温
北京	54511	12.3	怀来	54405	9.6
太原	53772	10.0	兴县	53664	8.8
西安	57036	13.8	铜川	53947	11.0
武汉	57494	16.8	天门	57483	16.6
郑州	57083	14.5	新乡	53986	14.3
南京	58238	15.6	盱眙	58138	14.9
上海	58367	16.2	吕泗	58265	15.1
南昌	58606	17.8	修水	57598	16.6
长沙	57687	17.3	平江	57682	16.9
福州	58847	19.9	平潭	58944	19.8
广州	59287	22.1	佛冈	59087	21.0

成都 56294 16.2 都江堰 56188 15.3



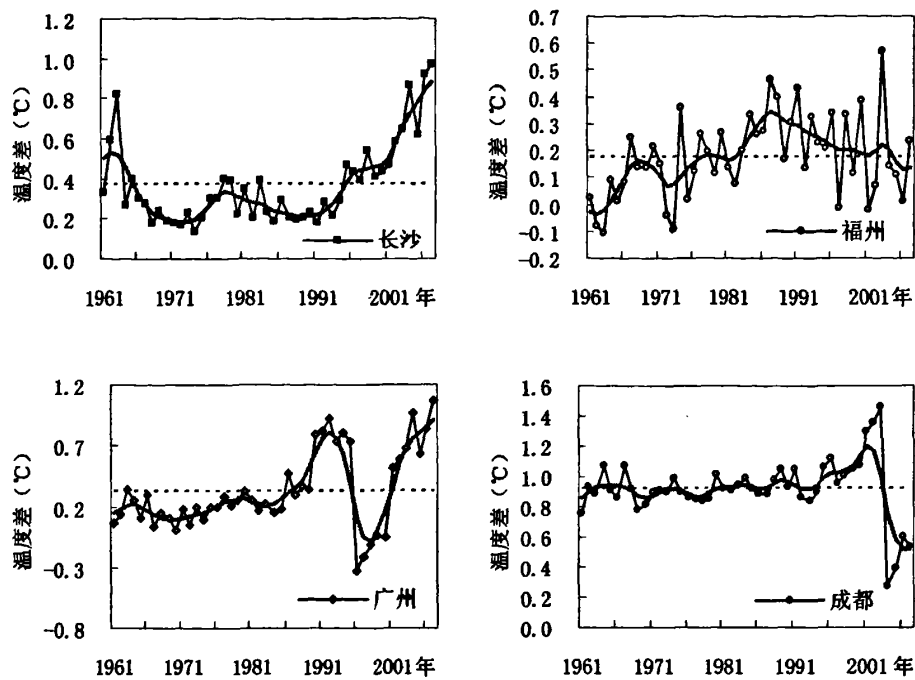


图 5.12 北京等 12 个城市站与郊区站的年平均气温差值的逐年变化

考察北京等 12 个城市站与郊区站的年平均气温差值的逐年变化图 5.12，曲线显示大部份城市站点与郊区站的年平均气温差值随年际变化有所加大，这说明大部份城市热岛效应现象随年际变化有所加强。统计得出各站城市站与郊区站的年平均气温差值序列与各城市站的年霾日序列的相关系数（表 5.6）。我们可以看到大部份站点城市热岛的强度与霾现象之间存在正的相关性，其中上海的相关系数最高，为 0.767，远远超过了 $\alpha=0.001$ 的信度检验标准，这种热岛强度随霾日增加而明显增加的站点还有南京、长沙、南昌、广州等，均达到了 $\alpha=0.001$ 的信度检验标准。这种霾现象的增长与城市热岛强度的增加呈明显的正相关的主要原因是，由于受太阳辐射和人类排放作用的影响，使城市上空大气和烟尘吸收了大量的长波热辐射，具有较大的热容量和热惯量，所以增大了城市的热岛效应强度。另外，霾现象发生时，城市上空空气中的干尘粒子浓度较大，不断聚集，增大了自然风在经过城市上空大气环境时的运动阻力，使空气的流动性减弱，再加上一般霾出现时，大气层结稳定，风力较小，影响了空气中热量在大尺度空间的扩散，也会加大城市的热岛效应强度。

表 5.6 北京等 12 个城市热岛效应温度差值与霾日数的相关系数表

站名	北京	太原	西安	武汉	郑州	南京
相关系数	-0.240	0.037	0.177	-0.144	0.232	0.734
平滑后相关系数	-0.272	0.161	0.248	-0.242	0.355	0.870
站名	上海	南昌	长沙	福州	广州	成都
相关系数	0.767	0.647	0.688	0.272	0.466	0.349
平滑后相关系数	0.882	0.864	0.727	0.295	0.573	0.316

5.5 小结

(1) 近 47 年来，大气能见度处于稳定的下降趋势。1963 年大气优能见度（能见度大于 10km）日占全年的 93.4%，达到了 341 天，而 2007 年大气优能见度日下降到 307 天，只占全年的 83.8%。差能见度（能见度在 1km 至 10km 之间）日增多，主要原因是霾现象的增多。年霾日占差能见度日百分比 1961 年只占 11.9%，而到 2007 年占到了 51.7%，增加了 4.34 倍，霾现象对能见度的影响越来越大。计算优能见度日、差能见度日和恶劣能见度（能见度在 1km 以下）日与年霾日序列的相关系数，分为-0.783、0.785、0.075，可知年霾日与优能见度日成明显的负相关，与差能见度日为明显的正相关，而恶劣能见度日的出现与霾日相关性不明显，主要还是由大雾引起。

(2) 采用能见度累积百分率法，分别计算得到 16 个代表站点能见度中值及低值序列。除北京、上海站外，能见度变化趋势与年霾日变化趋势普遍呈明显负相关。对于年霾日变化第一类波动上升型站点，能见度中值和能见度低值变化曲线都基本呈波动下降趋势，与年霾日有非常明显的负相关性。对于第二类站点，西安、天水、武汉的霾现象都是七八十年代存在年霾日高峰期，近年来霾日相对较少型，这三个站点的能见度中值呈现了与年霾日相反的变化趋势，负相关性也非常明显。对于第三类站点，成都的能见度变化与年霾日相关性不是特别明显，能见度中值和低值与霾日的相关系数为-0.228 和-0.272。澜沧代表站能见度低值与霾日数的相关系数达到-0.604，霾现象对能见度影响也非常明显。而北京和

上海两个大都市能见度中值近十几年都有缓慢上升的趋势,这估计和政府努力改善城市环境有比较大的关系。

(3) 1961-2007 年期间霾天气主体区域内 39 个代表站太阳总辐射平均为 4752.55 MJ/m^2 , 最高太阳总辐射在 1963 年, 辐射值为 5356.51 MJ/m^2 , 最低辐射出现在 1989 年为 4191.56 MJ/m^2 。60 年代太阳总辐射平均值为 5144 MJ/m^2 , 而近十年太阳总辐射平均值为 4594 MJ/m^2 , 降低了 10.7%, 太阳辐射减少明显。对比代表站平均的年霾日呈现出反向的波形走势, 两个年际序列的相关系数有 -0.666, 达到了 $\alpha=0.001$ 的显著性检验标准。

(4) 12 个代表站年总辐射量与年霾日年际序列相关系数基本为负相关, 年总辐射量年际变化均有减少的趋势。其中相关系数最高的是上海, 为 -0.571, 超过了 $\alpha=0.001$ 的信度检验标准, 成都和南京也达到了 $\alpha=0.001$ 的信度检验标准, 其它还有南昌和广州通过了 $\alpha=0.02$ 的信度检验标准, 这些站点霾日增多的同时, 太阳年总辐射量减少都十分明显。

(5) 灰霾天气的增多导致年日照时数的明显减少。霾天气主体区域内年日照平均时数为 1980 小时, 也就是平均每天 5.4 小时, 比全国所有站点资料平均年日照时数 2297 小时, 少了 317 小时, 也就是霾天气主体区域内的 299 个站的日平均日照时数比全国平均少了 0.87 小时。霾天气主体区域内站点年日照时数呈逐渐下降趋势, 1963 年出现了年日照时数的最高值, 为 2267 小时, 年日照时数的最低值出现在 2007 年, 为 1864 小时。60 年代和 70 年代年日照时数基本都在 2000 小时以上, 而进入 80 年代后年日照时数有了明显的下降, 基本在 2000 小时以下, 近 5 年这种下降趋势更加明显。60 年代年平均日照时数为 2115 小时, 而近 10 年日照时数只有 1902 小时, 减少了 213 个小时, 降低了将近 10.1%。日照百分比的年际序列与年日照时数基本类似。年日照时数与年霾日的相关系数是 -0.516, 达到了 $\alpha=0.001$ 的显著性检验标准。日照百分比、日照百分率小于 20% 的天数及日照百分率大于 60% 的天数与年霾日的相关系数分别达到了 -0.497、0.347 和 -0.476, 均达到了 $\alpha=0.02$ 的显著性检验标准。

(6) 不同城市年霾日与年日照时数的相关性并不完全一致。按相关系数分为三大类, 第一类, 年霾日与年日照时数呈明显的负相关, 如广州、郑州、老河口等站点。太阳总辐射与年霾日呈明显负相关的城市, 如上海、成都、南京等

在年际和年代际上都呈现出比较高的负相关性。第二类,年日照时数呈明显的正相关。这些站点太阳总辐射与年霾日也呈正相关,如西安、天水、武汉等站点,第三类,相关性不明显的站点,主要代表城市有北京、南昌等。

(7) 100° E 以东站点多年平均大气光学厚度均值为 0.43,光学厚度最低值出现在 1963 年,为 0.37,最高值出现在 2003 年,为 0.49,上升了 32%,上升幅度比较明显。非霾天气主体区域站点(年霾日 <1 天)的光学厚度平均为 0.32,霾天气主体区域站点(年霾日 ≥ 1 天)的光学厚度值平均在 0.54,高出平均值四分之一多,说明有霾站大气光学厚度明显要高于无霾站。计算霾天气主体区域站点的光学厚度与年霾日的相关系数达到了 0.773,远远超出了 $\alpha=0.001$ 的显著性检验标准,说明霾现象确实对大气气溶胶的光学厚度存在直接的关系。

(8) 对北京等 14 个站点光学厚度与霾现象的关系进行进一步的分析得到,除上海站外,其它所有站点霾日数与光学厚度都是呈正相关的,其中梧州、西安、老河口、南京等 4 个站年霾日与大气气溶胶的光学厚度相关系数达到了 0.90 以上,郑州,广州、南昌等达到了 0.80 以上,表明这些站点霾现象的增加直接导致了大气气溶胶浓度的增高。

(9) 霾现象的增多导致城市热岛强度的增加明显。考察北京等 12 个城市站与郊区站的年平均气温差值的逐年变化,大部份城市热岛效应现象随年际变化有所加强。考察各站城市站与郊区站的年平均气温差值序列与各城市站的年霾日序列的相关系数,大部份站点城市热岛的强度与霾现象之间存在正的相关性,其中上海的相关系数最高,为 0.767,远远超过了 $\alpha=0.001$ 的信度检验标准,这种热岛强度随霾日增加而明显增加的站点还有南京、长沙、南昌、广州等,均达到了 $\alpha=0.001$ 的信度检验标准。

第六章 总结与讨论

6.1 总结

本论文利用全国 721 个站点 1961–2007 年的高密度观测资料,阐述了我国霾现象的时空分布特征,揭示中国霾现象在年际和年代际时间尺度上的演变规律。定义年霾日在 1 天以上的站点组成霾天气主体区域,探讨风力条件、降水条件及季风环流的变化对霾天气增减趋势的影响。然后,采用相关分析等统计方法研究了霾天气对能见度、太阳辐射、日照时数、大气光学厚度、城市热岛现象的影响,给出了一般规律。

(1) 中国的霾天气主要分布在 100°E 以东、 42°N 以南地区,即中东部和南部较多,西部和东北部地区相对较少。在同一区域内,大中城市的霾天气较乡村明显偏多,“浊岛”现象明显。全国平均年霾日为 5.5 天,其中华北的中部和西部,西北的东南部,华中大部,华东大部,华南西部和南部地区大于等于 10 天,是灰霾天气的多发区。

(2) 霾天气的季节分布基本上是冬多夏少。冬季是霾发生最多的季节。这是因为我国大部份地区冬季受大陆高压控制,大气层结相对稳定,雨日雨量较少,易于低层大气中气溶胶粒子富集,并形成灰霾天气。由于受沙尘与浮尘天气的影响,春季仅次于冬季霾日较多,值得一提的是云南南部地区霾日夏秋冬均少发,只在春季多发。夏季,是霾日发生最少的季节,大部分地区霾日不足 1 天。

(3) 20 世纪 60 年代,全国灰霾出现日数平均只有 2.4 天;进入 70 年代有一个明显的上升,有霾日达到了 5.2 天;进入 80 年代后,霾日变化不大;进入 90 年代霾日略有上升;2000 年后,霾日又有一个比较明显的上升,全国站点平均增加霾日 3.6 天。21 世纪以来的全国年霾日比 20 世纪 60 年代上升了 4 倍之多。所以从年代际变化上看,全国年霾日总的来说上升趋势非常明显。

(4) 近 47 年中国霾天气的总体趋势为波动增多,线性倾向率为 3.19 天/10a,20 世纪 60 年代至 70 年代中期处于少霾的负位相,1976–2000 年在很弱的正位相内振荡,但近 5 年霾天气显著增多。47 年间中国霾天气序列有 2 次明显的突变,其一位于 20 世纪 70 年代中期,以 1975 年为突变点;其二位于 2000 年之后。

(5) 从 16 个代表站点分析可得,霾多发区站点年霾日的年际变化趋势大致可分为三类:第一类是波动上升型,这些站点主要位于我国东部和南部;属于平原

经济较发达地区,也是沙尘暴和扬沙天气影响较少地区。第二类是七八十年代存在年霾日高峰期,近年来霾日相对较少型,这些代表站点主要位于我国的华北及靠近西部地区。受到沙尘暴浮尘现象和经济发展的双重影响,主要代表城市有西安等。第三类是年际震荡频繁型,这些代表站点主要位于我国西南部地区,主要受沙尘暴和扬沙天气影响比较明显。

(6) 风力条件对霾天气增减趋势有着明显的影响。霾天气主体区域内(即华北的中部、西部和南部,西北的东南部,华中大部,华东,华南和南部地区)站点平均的最大风速 $f \geq 5 \text{ m/s}$ 和 $f \geq 10 \text{ m/s}$ 的日数,与霾日数具有很好的反向对应关系,相关系数分别为-0.809 和-0.734,远远超出了 $\alpha=0.001$ 的显著性检验标准。如此高的相关关系表明风力条件的变化对霾天气增减趋势的影响非常显著,也进一步证明了风力条件是大气污染物稀释扩散的最主要动力源。

(7) 静风或微风(最大风速 $f < 3 \text{ m/s}$)的日数与霾日数的相关系数达到了0.788,进一步说明了风力条件的变化对霾天气增减趋势的显著影响。由于城市化进程加快,高楼大厦日益增多,使得城市近地面层粗糙度增加,导致空气流动速度减缓,静风或微风日子日益增多,表现在年际变化上呈明显上升的趋势,这是导致霾年际变化增多一个重要因素。

(8) 考察发现, 35°N 以南地区霾天气与最大风速 $f \geq 5 \text{ m/s}$ 的日数与霾日数基本呈负相关, 35°N 以北大部地区呈正相关。这种情况的存在说明了我国北部地区的霾天气诱发的一个主要因子来自于西北部的浮尘、沙尘暴和扬沙天气,大的风力有利于浮尘粒子的搬运。

(9) 不同季节不同风力条件中,对霾天气增减趋势的影响最明显的是日最大风力 $f \geq 5 \text{ m/s}$ 的天数。四个季节中风力条件对霾日影响最明显的是秋季,夏季次之,春季最差。冬春季霾日多发时,风力条件对霾现象的影响是多重的,风对霾粒子的搬运扮演了正负两方面的作用,导致风力条件对霾天气的趋势影响不明显。

(10) 代表站点与风力条件的关系分为三类,第一类是呈明显的负相关,代表城市有南昌,南京、郑州和广州等,风力条件近47年来下降的趋势十分明显,微风或静风日明显增多,导致霾天气增多明显。第二类是呈明显的正相关,代表城市有西安、天水、武汉、成都等,这类代表站风力条件也呈下降趋势,由于引

发这类站点的霾天气的气溶胶粒子来源主要来自于沙尘或扬沙天气有关系,当风力条件下降时,扬沙或沙尘天气减少,所以霾日也相对减少了。第三类相关性不明显,代表城市有北京、老河口、澜沧等。这种站点霾粒子来源复杂多样,导致风对霾粒子的搬运正反两方面的作用同时得到体现,以致风与霾日数变化的直接关系就体现得不明显了。

(11) 降水条件的变化对霾天气的增减趋势也有十分明显的影响。最长连续无降水日数与霾日之间存在较明显的正相关,相关系数为 0.347,达到了 $\alpha=0.02$ 的显著性检验标准。年霾日与年降水日(降水量 $\geq 0.1\text{mm}$)的相关性达到了-0.629,达到 $\alpha=0.001$ 的显著性检验标准。。

(12) 考察发现,降水的强弱和频率都直接影响到霾天气的发生与维持。需要特别指出的是,一般理解,强降水对空气的净化作用比较明显,弱的降水对大气中颗粒物的冲刷作用不明显,但研究指出,降水量在 0.1-0.9mm 的降水日数与霾日数的相关性达到-0.716,远远超出了 $\alpha=0.001$ 的信度检验标准,可以得出,弱的降水过程对空气的净化能力也是非常明显的,微量或小量的降水对于霾的出现也有非常明显的抑制作用。

(13) 近 5 年霾日数明显上升,本文对这点特别关注后综合分析风力条件与降水的变化可以看到,华北中南部、长江中下游和华南等经济发达或经济快速发展的地区,近 5 年风力 $f\geq 5\text{ m/s}$ 日数显著减少,且各种强度降水都有了明显的下降,这是导致近几年霾日数的激增的两个十分重要的原因。

(14) 综合分析施能季风指数 I_{SHI} 和朱艳峰季风指数 I_{EAWM} , 我们发现强季风年大部份发生在六七十年代,弱季风年大部份发生在 80 年代后,这与六七十年代霾日较少,而 80 年代后霾日明显较多相吻合。 I_{SHI} 指数与 I_{EAWM} 指数的年代际变化与霾日的年代际变化相关性明显,相关系数分别为-0.420 和-0.387,都达到了 $\alpha=0.01$ 的显著性检验标准,说明季风的强弱变化对霾天气的增减趋势有十分明显的影响。

(15) 近 47 年来,大气能见度处于稳定的下降趋势。1963 年大气优能见度(能见度大于 10km)日占全年的 93.4%,达到了 341 天,而 2007 年大气优能见度日下降到 307 天,只占全年的 83.8%。年霾日占差能见度(能见度在 1km 至 10km 之间)日百分比 1961 年只占 11.9%,而到 2007 年占到了 51.7%,增加了 4.34

倍,霾现象对能见度的影响越来越大。计算优能见度日、差能见度日和恶劣能见度(能见度在 1km 以下)日与年霾日序列的相关系数,分为-0.783、0.785、0.075,可知年霾日与优能见度日成明显的负相关,与差能见度日为明显的正相关,而恶劣能见度日的出现与霾日相关性不明显,主要还是由大雾引起。

(16) 采用能见度累积百分率法,分别计算得到 16 个代表站点能见度中值及低值序列。除北京、上海站外,能见度变化趋势与年霾日变化趋势普遍呈明显负相关。对于年霾日变化第一类波动上升型站点,能见度中值和能见度低值变化曲线都基本呈波动下降趋势。对于年霾日变化趋势第二类站点,西安、天水、武汉的能见度也存在七八十年代高峰期,近年来能见度较高。对于第三类站点,成都的能见度变化与年霾日相关性不是特别明显,能见度中值和低值与霾日的相关系数为-0.228 和-0.272。澜沧代表站能见度低值与霾日数的相关系数达到-0.604,霾现象对能见度影响也非常明显。而北京和上海两个大都市能见度中值近十几年都有缓慢上升的趋势,这估计和政府努力改善城市环境有比较大的关系。

(17) 霾现象的出现,不但引起水平能见度的恶化,也引起了重直大气透明度的恶化。1961-2007 年期间霾天气主体区域内 39 个代表站太阳总辐射平均为 4752.55 MJ/m²,最高太阳总辐射在 1963 年,辐射值为 5356.51 MJ/m²,最低辐射出现在 1989 年为 4191.56 MJ/m²。60 年代太阳总辐射平均值为 5144 MJ/m²,而近十年太阳总辐射平均值为 4594 MJ/m²,降低了 10.7%,太阳辐射减少明显。对比代表站平均的年霾日呈现出反向的波形走势,两个年际序列的相关系数有-0.666,达到了 $\alpha=0.001$ 的显著性检验标准。

(18) 霾天气主体区域内年日照平均时数为 1980 小时,比全国所有站点资料平均年日照时数为 2297 小时少了 317 小时。霾天气主体区域内站点年日照时数呈逐渐下降趋势。60 年代年平均日照时数为 2115 小时,而近 10 年日照时数只有 1902 小时,减少了 213 个小时,降低了将近 10.1%。年日照时数与年霾日的相关系数是-0.516,达到了 $\alpha=0.001$ 的显著性检验标准。日照百分比、日照百分率小于 20%的天数及日照百分率大于 60%的天数与年霾日的相关系数分别达到了-0.497、0.347 和-0.476,均达到了 $\alpha=0.02$ 的显著性检验标准。

(19) 不同城市年霾日与年日照时数的相关性并不完全一致。按相关系数分为三大类,第一类,年霾日与年日照时数呈明显的负相关,如广州、郑州、老河

口等站点。太阳总辐射与年霾日呈明显负相关的城市,如上海、成都、南京等在年际和年代际上都呈现出比较高的负相关性。第二类,年日照时数呈明显的正相关。这些站点太阳总辐射与年霾日也呈正相关,如西安、天水、武汉等站点,第三类,相关性不明显的站点,主要代表城市有北京、南昌等。

(20) 100° E 以东站点多年平均大气光学厚度均值为 0.43,光学厚度最低值出现在 1963 年为 0.37,最高值出现在 2003 年,为 0.49,上升了 32%,上升幅度比较明显。非霾天气主体区域站点(年霾日 <1 天)的光学厚度平均为 0.32,霾天气主体区域站点(年霾日 ≥ 1 天)的光学厚度值平均在 0.54,高出平均值四分之一多,说明有霾站大气光学厚度明显要高于无霾站。计算霾天气主体区域站点的光学厚度与年霾日的相关系数达到了 0.773,远远超出了 $\alpha=0.001$ 的显著性检验标准,说明霾现象确实对大气气溶胶的光学厚度存在直接的关系。

(21) 对北京等 14 个站点光学厚度与霾现象的关系进行进一步的分析分析得到,除上海站外,其它所有站点霾日数与光学厚度都是呈正相关的,其中梧州、西安、老河口、南京等 4 个站年霾日与大气气溶胶的光学厚度相关系数达到了 0.90 以上,郑州、广州、南昌等达到了 0.80 以上,表明这些站点霾现象的增加直接导致了大气气溶胶浓度的增长。

(22) 霾现象的增加导致城市热岛强度的增加明显。考察北京等 12 个城市站与郊区站的年平均气温差值的逐年变化,大部份城市热岛效应现象随年际变化有所加强。考察各站城市站与郊区站的年平均气温差值序列与各城市站的年霾日序列的相关系数,大部份站点城市热岛的强度与霾现象之间存在正的相关性,其中上海的相关系数最高,为 0.767,远远超过了 $\alpha=0.001$ 的信度检验标准,这种热岛强度随霾日增加而明显增加的站点还有南京、长沙、南昌、广州等,均达到了 $\alpha=0.001$ 的信度检验标准。

6.2 展望

获得气溶胶与气候变化及区域大气污染本质联系的准确和系统的科学认识,是国际科学界对工业革命以来全球气候变化的原因识别和未来百年预估(包括变幅与变率)的一大难题,是当今国际全球变化研究瞄准的焦点命题。对我国霾现象的研究,可以为气溶胶对气候变化影响的研究提供相关的科学依据。今后可以重点对区域霾现象研究、霾现象的气候预测及霾对气候的影响预测进行更深一步

的探讨。

参 考 文 献

- [1] 中国气象局, 地面气象观测规范, 北京: 气象出版社, 2003, 23-25
- [2] 《大气科学词典》编委. 大气科学词典. 北京: 气象出版社, 1994, 677, 408.
- [3] John G. Watson. 2002 Critical Review-Visiblity:Science and Regulation. Journal of the Air & Waste Management Association. 2002, 52: 625-713
- [4] 吴兑. 关于霾与雾的区别和灰霾天气预警的讨论. 气象, 2005, 31 (4) :3-7
- [5] 白志鹏 董海燕 蔡斌彬等 灰霾与能见度研究进展. 第八届全国气溶胶会议暨海峡两岸气溶胶技术研讨会 173-177
- [6] 吴兑. 霾与雾的区别和灰霾天气预警建议. 广东气象, 2004, 4 :1-4
- [7] World Meteorological Organization, WMO-No. 266—Compendium of Lecture Notes for Training Class IV Meteorological Personnel Volume II—Meteorology [S]. 1984(2nd edition), 65, 244
- [8] World Meteorological Organization, WMO-No. 8 -Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation [S]. 1996(6th edition), 114-3
- [9] World Meteorological Organization, WMO-No. 782—Aerodrome Reports and Forecasts A Users' Handbook to the Codes[S] . 2005(4th edition), 18, 71, 72
- [10] Meteorological Office, Observer' s Handbook [S]. London HMSO. 1982(4th edition), 60, 61, 64, 78
- [11] Meteorological Office, Meteorological Glossary [S]. London HMSO. 1991(6th edition), 116, 145, 189
- [12] Meteorological Office, Handbook of Aviation Meteorology [S] . London HMSO, 1994(3rd edition), 144, 200
- [13] 阚海东, 陈秉衡, 汪宏 上海市城区大气颗粒物污染对居民健康危害的经济学评价. 中国卫生经济, 2004, 23 (2) : 8-11
- [14] Environmental Health Country Profile World Health Organization. www.wpro.who.int/NR/rdonlyres/CC03E151-7FCA-47A1-A587-6443C7F051E7/0/brunei_ehcp_19Nov2004.pdf, 2004-11-9/2005-05-11
- [15] 白志鹏 蔡斌彬 董海燕 边海, 灰霾的健康效应 环境污染与防治, 2006 28 (3) : 198-201
- [17] RAMANATHAN V CRUTZEN P J, MITRA A P, et al. The Indian Ocean Experiment and the Asian Brown Cloud[J]. Current Science, 2002, 83:947-955.
- [18] Okada K, M Ikegami, Y Zaizen, Y Makino, J B Jensen, J I Gras. The mixture state

of individual aerosol particles in the 1997 Indonesian haze episode[J]. *J Aerosol Sci.*, 2001, 32:1269-1279

[19] Malm W C. Characteristics and origins of haze in the continental united states. *Earth-Science Reviews*, 1992, 33(1): 1-36.

[20] Kerr R A. Climate study unveils climate cooling caused by pollutant haze. *Science*, 1995, 268(5212): 802-802.

[21]William C. Malm. Introduction to visibility. II Section 4: Transport and Transformation of Atmospheric Particulates and Gases URL: <http://www.epa.gov/visibility/pdfs/introvis.pdf>

[22]Sisler James F, Malm William C. The relative importance of soluble aerosols to spatial and seasonal trends of impaired visibility in the United States. *Atmospheric Environment*, 1994, 28(5):851-862

[23]Appel B R, Health Serv. Berkeley Visibility as related to atmospheric aerosol constituents. *Atmospheric Environment*, 1985, 19(9):1525-1534

[24]Lioussse C, Cachier H, Jennings S G, Optical and Thermal Measurements of Black Carbon Aerosol Content in Different Environments: Variation of the specific Attenuation Cross-Section, Sigma(s), *Atmospheric Environment*. 1993, 27(A):1203-1209

[25]Baik N, Kim Y P, Moon K C. Visibility study in Seoul, 1993[J]. *Atmospheric Environment*, 1996, 30:2319-2328

[26]Rudolf Richer. Atmospheric Correction of Satellite Data with Haze Removal Includeing a Haze/Clear Transition Region. *Computers & Geosciences*, 1996, 22(6): 675-681

[27]Andre Nel. Air pollution related illness: effects fo particles. *Science*, 2005, 308(5723):804-806

[28]《Метеор. и Гидрол》1986, No. 11

[29]吴兑 再论都市霾与雾的区别, *气象*, 2006, 32(4): 9-15

[30]信志红 轻雾与霾的记录不应模式化, *河南气象*, 2001, 4: 46

[31]盘晓东 浅谈轻雾与霾的区别, *广东气象*, 1999, 1: 35

[32]兰措 张永新 冬季西宁市区上空阴霾的监测与分析, *气象*, 2002. 24(6): 26-28

[33]车慧正 张小曳 石广玉、李杨等 沙尘和灰霾天气下毛乌素沙漠地区大气气溶胶的光学特征, *中国粉体技术*, 2005. 3: 4-7

[34]赵灵霞 钱公望 对广州灰霾天气中单个气溶胶颗粒物的研究, *四川环境*, 2006 25(2): 40-44

[35] 段青春, 毕新慧等 广州灰霾期大气颗粒物中多环芳烃粒径的分布, *中国环境科学*,

2006 26 (1) : 6-10

[36]江崧 曹春燕 2003 年深圳市灰霾气候特征及影响因素, 广东气象, 2004. 4: 14-15

[37]刘爱君 杜尧东 王惠英 广州灰霾天气的气候特征分析, 气象, 2005 30 (12): 68-71

[38]钱峻屏 黄菲 黄子眉等 汕尾市雾霾天气的能见度多时间尺度特征分析, 热带地理,

2006 26 (4) : 308-313

[39]钱峻屏 黄菲等 广东省雾霾天气能见度的时空特征分析 1: 季节变化, 生态环境, 2006 15 (6) : 1324-1330

[40]徐梅 朱玉强 余文韬 天津地区灰霾我处初步研究, 中国颗粒学会 2006 年年会暨海峡两岸颗粒技术研讨会 : 492-496

[41]吴兑 毕雪岩 邓雪娇 李非等 珠江三角洲大气灰霾导致能见度下降问题研究 气象学报 2006. 8 第 64 卷第 4 期 : 510-517

[42]吴兑 廖国莲 邓雪娇等 珠江三角洲灰霾天气的近地层输送条件研究 中国气象学会 2006 年会“大气成分与气候、环境变化”分会场论文集 : 81-94

[43]胡天玉 杨显宇 谢巨伦 雷州半岛霾的初步分析与预报, 广东气象 2005. 1 : 21-22

[44]胡天玉 霾对海口地区大气环境影响的分析与预报, 广西气象 2005. 9 26 增刊 1 : 61-63

[45]陈训来 冯业荣等 珠江三角洲一次灰霾过程的数值模拟, 中国气象学会 2006 年年会“大气成分与气候、环境变化”分会场论文集 : 934-935

[46]陶俊 谢文彰 许振成 彭晓春 冬季广州大气能见度影响因子分析, 城市环境与城市生态, 2007 20 (1) : 17-20

[47]宋宇、唐效炎 北京市能见度下降与颗粒物污染的关系 环境科学学报 2003 7 23(4):54-57

[48]王京丽 刘旭林 北京市大气细粒子质量浓度与能见度定量关系初探 气象学报 2006 4 64 (2) : 221-227

[49]肖红 肖荣欣 夏文前 刘铁顺 王立伟, 动态调控污染源排放总量是减小灰霾天气危害的有效途径 环境科学与管理, 2007 32 (1) : 58-60 75

[50] Sloane C S. Meteorologically adjusted air quality trends: visibility. Atmosphere Environment, 1983, 17:151-159

[51]黄健 吴兑 黄敏辉等 1954-2004 年珠江三角洲大气能见度变化趋势. 应用气象学报 2008 2 19 (1) : 61-69

[52]范引琪, 李二杰, 范增禄, 河北省 1960-2002 年城市大气能见度的变化趋势 大气科学 2005 7 29(4):526-535

[53] Sloane C S. Visibility trends - I. Methods of analysis. Atmospheric

Environment, 1982, 16:41-51

[54] Sloane C S. Summer time visibility declines: meteorological influences. Atmospheric Environment, 1982, 16:2309-2321

[55] Sloane C S. Meteorologically adjusted air quality trends: visibility. Atmospheric Environment, 1982, 16:2309-2321

[56] Doyle M, Dorling S. Visibility trends in UK 1950-1997 [J]. Atmospheric Environment, 2002, 36 (19): 3161-3172

[57] 施能 杨永胜, 1873~1996年东亚冬、夏季风强度指数及其主要特征 南京气象学院学报, 1998 21 (2): 208-214

[58] 朱艳峰, 一个适用于描述中国大陆冬季气温变化的东亚冬季风指数 气象学报, 2008 66 (5): 781-788

[59] 周淑贞, 张超. 城市气候学导论. 上海: 华东师范大学出版社, 1985, 196pp.

[60] Ozakaynak H A, Schatz D, Thurston G D, et al. Relationships between aerosol extinction coefficients derived from airport visual range observations and alternative measure of airborne particle mass. Journal of Air Pollution Control Association, 1985, 35:1176-1185.

[61] NAPAP. Acid deposition: State of Science and Technology Irving PM. Visibility: Existing and Historical Conditions-Causes and Effects. Report 24, National Acid deposition Assessment Program. Washington DC 1990.

[62] Malm W C, Sisler J F, Huffman D, et al. Spatial and seasonal trends in particle concentrations and optical extinction in the United States. J Geophys Res, 1994, 99:1347-1985

[63] 国家环境保护局科技标准司. 大气污染物综合排放标准详解. 北京: 中国环境科学出版社, 1997, 68pp

[64] 中央气象局. 气象观测暂行规范(地面部分). 北京: 中央气象局, 1951.

[65] 中央气象局. 地面气象观测规范. 北京: 气象出版社, 1979.

[66] 邱金桓 林耀荣, 关于中国大气气溶胶光学厚度的一个参数化模式 气象学报, 2001 59 (3): 368-372

[67] 魏凤英. 现代气候统计诊断预测技术. 北京: 气象出版社, 1999, 15-76.

[68] Watson J G. 2002 Critical Review-Visibility: Science and Regulation [J]. J. Air Waste Manage. Assoc., 2002, 52: 625-713

[69] Regional Haze/Particulate Matter [R]. <http://www.epa.gov/airnow/particle/airborne.html>

在学期间研究成果

- 1、2006-2007 年 参加课题《浙江省热带气旋灾情评估预估式的建立》
- 2、参与《台风海棠与泰利的降水对比分析》文章的撰写, 该文参与了 2006 年的气象年会交流
- 3、2007-2009 年 参加国家科技支撑计划课题 课题编号: 2007BAC29B01
课题名称: 极端天气气候事件的检测和可预测性关键技术研究
- 4、2008-2009 年 参加课题《气象因子对杭州湾大桥通行的影响》
- 5、胡亚旦, 钱燕珍, 陈蕾娜等, 加强电视气象工作中的相互合作和复合型人才的培养, 浙江气象科技, 2008 29 (2): 44-46
- 6、胡亚旦, 周自江, 中国霾天气的气候特征分析, 气象, 2009, 已录用待发

致 谢

自从 1998 年离开校园走上工作岗位,已经整整 11 个年头了。在工作的实践当中让我重新学到了许多,然而随着工作领域和难度的不断深入也让我逐渐意识到自身知识结构的缺陷和不足,因此,重返校园继续深造一直以来都是我的梦想。感谢单位、兰大和中国气象局培训中心给了我这个机会,让我如愿以偿地重新走进校园继续我的求学之梦。同时,我也非常珍惜这次宝贵的机会,珍惜每次的课堂教学,课上认真做笔记、课余认真复习,每门专业课程都取得了优异的成绩。在此,我要感谢兰大和培训中心的每一位任课老师,是你们的付出让我顺利完成了专业课的学习,是你们的付出让我进一步完善了我的知识结构。同时,我要感谢樊兰峰老师,在他的热情帮助下,我才能如此顺利地完成任务并安排好答辩日程。

本论文是在周自江研究员的悉心指导下完成的。从论文的选题和设计、数据的收集和分析到论文每个章节的撰写、修改等各个环节都倾注了导师大量的心血和汗水。导师实事求是、精益求精的科学态度,勇于探索、力求创新的开拓精神以及诲人不倦的精神风范是引导我不断前进的动力,这些都让我受益匪浅。谨在此向导师致以崇高的敬意和最衷心的感谢!感谢王式功教授对我论文研究思路的指引,王教授严谨的治学态度、渊博的知识,活跃的学术思想和孜孜不倦的敬业精神,都给我留下了深刻的印象。

感谢我的师兄张强、臧海佳在论文完成过程中给予我的指导和热心帮助,感谢我单位刘建勇博士在论文的研究过程中和我一起研究文献,给我启发,与我讨论。在此向你们表示真诚的感谢!

此外,我要特别感谢我的公婆、父母和我的丈夫,在生活上他们给了我太多的关心和照顾,为我提供了良好的工作和学习环境,他们无怨的付出和无声的支持一直是我克服困难的勇气和动力,谨以此文献给他们!

最后，向所有帮助和关心过我的人真诚地说一声：谢谢你们！