

文章编号:1004-4574(2008)02-0093-06

北京沙尘天气成因概率研究

邱玉珺¹, 牛生杰¹, 邹学勇², 程 宏²

(1. 南京信息工程大学大气物理与大气环境重点实验室, 江苏 南京 210044; 2. 北京师范大学中国沙漠研究中心, 北京 100875)

摘要:沙尘天气的产生受到多种因素交错作用的影响, 如何客观量化各种因素对沙尘天气的影响已成为相关评价的难点, 建立有效的量化方法是问题的关键。基于沙尘天气的群聚群发性特征, 通过对沙尘天气发生的时空资料进行集合运算, 以北京为例建立了一种量化沙尘天气不同成因概率的方法。在北京及其周边 13 个国家基准站相关资料(1971—2000 年)的基础上, 评价出不同因素对北京沙尘天气的影响情况为: (1) 浑善达克沙地是北京沙尘暴天气的主要外地来源, 毛乌素沙地对北京沙尘暴天气的影响概率几乎为零, 前者对北京浮尘、扬沙天气的影响概率约为后者的 2 倍; (2) 外地沙源对浮尘、沙尘暴、扬沙天气的影响概率分别约是北京本地影响的 4.6、2.2 和 1.6 倍; (3) 北京本地沙源影响中, 自然因素对扬沙和沙尘暴天气的影响概率约为人为因素影响的 4 倍, 人为因素对浮尘天气的影响概率几乎为零。

关键词:沙尘天气; 成因; 沙源; 影响因素; 概率

中图分类号:P445⁺.4 **文献标识码:**A

Probability study on causes of dust events in Beijing

QIU Yu-jun¹, NIU Sheng-jie¹, ZOU Xue-yong², CHENG Hong³

(1. Key Laboratory of Atmospheric Physics and Atmospheric Environment, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. China Center of Desert Research, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The dust event occurs due to different influence of various factors. How to make the influence objective quantification is a difficulty in evaluating the dust events. It becomes key factor to give effective quantification method. Considering the temporal and spatial clustering features of dust events, a method to evaluate the dust events in Beijing is presented. By using the data of dust events in related stations, various influence probabilities of the dust events in Beijing are calculated. The result shows that the Otindag Desert area is the greatest external sand source to the dust events in Beijing, and the influence probability of Mu Us Desert area is nearly zero. The probability of influence of the former on the weather with floating dust and blown sand in Beijing is nearly 2 times of that of the latter. The influence probability of Beijing's floating dust from the external sand source is about 4.6 times of that from the local source, and dust storm is about 2.2 times, blown sand is 1.6 times. The influence probability of blown sand and sand storm due to natural factors is about 4 times of that due to the human factors in local source influence.

Key words: dust event; cause; sand source; influence factor; probability

北京早在公元 440 年(北魏太平真君元年)便有了沙尘天气的可靠记载^[1-2]。在地质时期, 不管沙尘天

收稿日期: 2007-08-20; 修订日期: 2007-10-16

基金项目: 科技部社会公益研究专项(2005DIB3J108); 国家自然科学基金(10532030)

作者简介: 邱玉珺(1975-), 女, 讲师, 博士, 主要从事大气边界层、气象灾害等方面的研究。E-mail: qyj@nuist.edu.cn

气的破坏力有多大,那时也只是自然力对自然物的破坏,是地球地质作用的一部分^[3],随着人类社会的发展,沙尘天气不单是一种自然天气过程,它还受到人类经济活动的影响^[1,3-7]。人类活动对沙尘天气究竟有多大的影响一直是人们关注的话题,但因人类活动的随机性和复杂性而难以直接量化,人们往往是从沙尘天气的次数统计中粗略估计^[8-10]。另外,北京处在我国沙尘天气多发区的下风向,上风向沙源对北京的沙尘天气有较大的影响^[3,8-11],许多研究指出^[12-15],位于北京北面的浑善达克沙地以及西侧的毛乌素沙地对北京沙尘天气的影响较大,也有一些学者认为北京沙尘天气的大部分是就地起沙,一小部分来自于境外沙源及上风向的境内外来沙源^[16-17]。因缺乏行之有效的办法量化外来沙源和本地沙源的贡献率,所以对沙尘天气的成因评价至今还停留在定性阶段。韩力慧等^[16]提出了从气溶胶不同的化学元素含量量化分析沙尘天气成因,这是一种行之有效的方法,但因缺乏样本的收集而只能对个别案例进行分析,对于长期以来的影响因素还无法辨别量化。

因各种影响因素在沙尘天气过程中往往是你中有我、我中有你地密切联系着,使得量化评价沙尘天气的各种成因成为一个难题。尽管如此,由于沙尘天气的各种信息都隐含在了与之相关的气象资料中,这些资料在时间和空间尺度上都较完备,根据沙尘天气群聚群发性特征,从这些资料中量化出不同成因对沙尘天气的影响概率是完全可能的。本文在北京及其近周边和上风向沙源区 14 个站点沙尘天气资料的基础上,对北京沙尘天气发生时间进行交集运算,从沙尘天气发生概率角度出发量化评价了北京沙尘天气的各种成因情况,对沙尘天气方面的研究是一种补充。

1 资料来源

资料涉及到 14 个国家基准气象站(见图 1),分别为:阿拉善左旗、银川、盐池、呼和浩特、大同、太原、二连浩特、朱日和、阿巴嘎旗、多伦、张家口、怀来、丰宁、北京,内容包括浮尘、沙尘暴和扬沙天气的发生时间,时间从 1971-01-01 至 2000-12-31,时间分辨率为 d,资料来源于中国气象局。

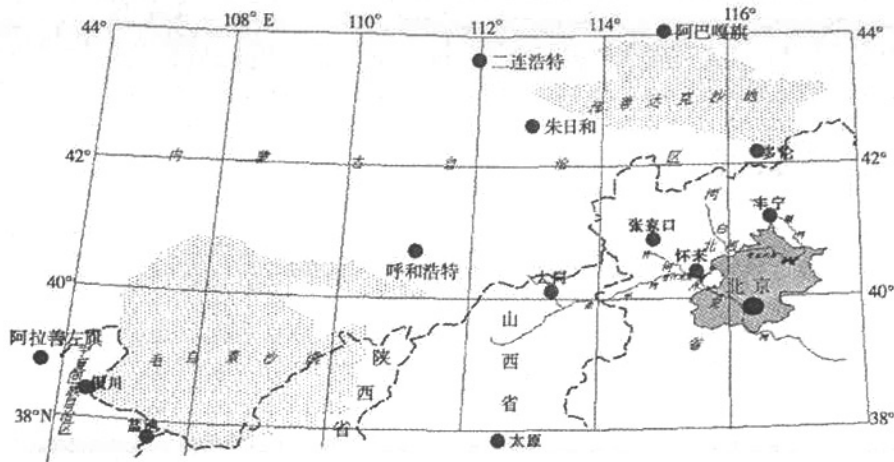


图 1 研究站点分布图

Fig. 1 Location map of fourteen research stations

2 评价方法

2.1 站点的区域划分

许多研究工作都指出影响北京沙尘天气的上风向沙源主要分布在西路、西北路和北路^[18-21],广阔的西北和华北地区是影响北京的境内沙尘源地^[22],北京周边地区各类裸露农田、沙荒地、建筑工地和其他裸地是本地沙源^[23]。所以选取浑善达克沙地和毛乌素沙地周边及其北京近周边的 13 个国家基准站来研究它们对北京沙尘天气的影响,根据这些站点所处的地理位置,将它们划分为 3 个大的区域,北京近周边地区的怀来、

张家口和丰宁记为区域 1;浑善达克沙地周边的阿巴嘎旗、二连浩特、朱日和多伦记为区域 2;毛乌素沙地周边的阿拉善左旗、银川、盐池、呼和浩特记为区域 3,另外还有太原和大同,它们虽然没有位于毛乌素沙地的近周边,考虑到毛乌素沙地影响北京沙尘天气时,太原和大同也会受其影响,所以将太原和大同归到区域 3。

2.2 沙尘天气的成因分类

从气象学角度说,沙尘天气是大尺度大气环流背景和中小尺度的天气系统叠加所诱发产生的^[3],在这种环流背景下的沙尘天气一般不会只在一个或零星几个站点发生,如果发生,也可能是受到局部人为因素影响所致。另外,如果在较大范围内有许多站点同时发生了沙尘天气,则受这种沙尘天气过程影响的上风向地区对下风向的影响也较大,把这种沙尘天气确定为受到上风向沙源的影响。对于同一次沙尘天气过程的规模,我们通过对不同区域发生沙尘天气站点的数目来衡量。由于影响沙尘天气的外来沙源和本地沙源、自然因素与人为因素之间交互作用,对某一次沙尘天气,我们不能简单的将其确定为某一种因素所致,只能通过沙尘天气的群聚群发性,用各因素的影响概率来评价。以下是对北京沙尘天气不同成因的分类:

(1) 在北京沙尘天气日,如果区域 1、区域 2 和区域 3 中分别有大于等于阈值 M 的站点没有发生沙尘天气,即局地发生的沙尘天气,主要受本地人为因素所致,记为 G_1 :

$$\{(\text{区域 } i \text{ 站点沙尘天气} \cap \text{北京沙尘天气}) / \text{区域 } i \text{ 站点} \geq M \mid \text{没有发生沙尘天气}, i = 1, 2, 3\} \\ \in G_1 \mid \text{北京沙尘天气主要受本地人为因素的影响所致} \quad (1)$$

(2) 如果区域 1 和区域 2 中都有大于等于阈值 M 的站点发生了沙尘天气,则区域 2 对北京的沙尘天气产生了影响,记为 G_2 :

$$\{(\text{区域 } i \text{ 站点沙尘天气} \cap \text{北京沙尘天气}) / \text{区域 } i \text{ 站点} \geq M \mid \text{发生沙尘天气}, i = 1, 2\} \\ \in G_2 \mid \text{区域 2 对北京的沙尘天气产生了影响} \quad (2)$$

(3) 如果区域 1 和区域 2 中的所有站点都发生了沙尘天气,这种沙尘天气受到大尺度环流的影响,影响面较广,上风向的沙源很有可能被带到较远的下风向地区,这时区域 2 对北京的沙尘天气会产生短期影响,记为 G_3 :

$$\{(\text{区域 } i \text{ 站点沙尘天气} \cap \text{北京沙尘天气}) / \text{区域 } i \text{ 站点} = 1 \mid \text{发生沙尘天气}, i = 1, 2\} \\ \in G_3 \mid \text{区域 2 对北京的沙尘天气产生短期影响} \quad (3)$$

(4) 如果区域 1 和区域 3 中都有大于等于阈值 M 的站点发生了沙尘天气,区域 3 对北京的沙尘天气产生了影响,记为 G_4 :

$$\{(\text{区域 } i \text{ 站点沙尘天气} \cap \text{北京沙尘天气}) / \text{区域 } i \text{ 站点} \geq M \mid \text{发生沙尘天气}, i = 1, 3\} \\ \in G_4 \mid \text{区域 3 对北京的沙尘天气产生了影响} \quad (4)$$

(5) 如果区域 1 和区域 3 中的所有站点都发生了沙尘天气,与 c 同理,区域 3 对北京的沙尘天气产生了短期的影响,记为 G_5 :

$$\{(\text{区域 } i \text{ 站点沙尘天气} \cap \text{北京沙尘天气}) / \text{区域 } i \text{ 站点} = 1 \mid \text{发生沙尘天气}, i = 1, 3\} \\ \in G_5 \mid \text{区域 3 对北京的沙尘天气产生短期影响} \quad (5)$$

需要说明的是 G_3 和 G_5 分别是 G_2 和 G_4 的真子集,也就是说,区域 2 和区域 3 对北京沙尘天气的影响概率中包括短期影响;对于不同的研究站点,确定沙尘天气站点数目的阈值 M 也有所不同,根据研究站点和相关区域站点的分布情况来确定。一般地,将阈值 M 取为 $2/3$,表示某一区域发生沙尘天气的站点占该区域的优势。阈值 M 的值决定了各种成因概率值的大小,理论上讲,从一个合适的阈值 M 计算出的各种成因概率和为 100%,实际计算中因为涉及到研究站点的不同空间分辨率,所以计算出的各种成因概率会有一定的出入,本着各种成因概率和为 100% 的原则进行调整。另一方面,计算出的各种成因概率和在不小于 60% 的情况下,对各成因概率进行对比分析,可粗略的得到各成因概率比。

2.3 影响概率的计算方法

将北京浮尘天气与其他区域站点沙尘天气发生时间的交集记为 F_w ,相应的沙尘暴与扬沙天气的交集分别记为 S_w 和 Y_w :

$$\{\text{北京沙尘暴} \cap \text{区域 } i \text{ 沙尘天气} \mid i = 1, 2, 3\} = S_w \quad (6)$$

$$\{\text{北京扬沙} \cap \text{区域 } i \text{ 沙尘天气} \mid i = 1, 2, 3\} = Y_w \quad (7)$$

$$\{\text{北京浮尘} \cap \text{区域 } i \text{ 沙尘天气} \mid i = 1, 2, 3\} = F_w \quad (8)$$

沙尘天气时间交集是指,如果北京发生沙尘天气的前一天或当天,在外沙源地也发生了沙尘天气,则将这样

的外沙源沙尘天气记为交集的一个组成元素。

在 F_W 中计算出的沙尘天气频率记为 P_{Fi} , 在 S_W 和 Y_W 中的频率分别记为 P_{Si} 和 P_{Yi} :

$$\{G_i \cap S_W | i = 1, 2, 3, 4, 5\} = P_{Si} \quad (9)$$

$$\{G_i \cap Y_W | i = 1, 2, 3, 4, 5\} = P_{Yi} \quad (10)$$

$$\{G_i \cap F_W | i = 1, 2, 3, 4, 5\} = P_{Fi} \quad (11)$$

用以上频率分别除以北京相应天气的总频率, 就是各种因素对北京沙尘天气的影响概率, G_i 在浮尘、沙尘暴和扬沙天气下的影响概率分别记为 P_{VFi} 、 P_{VSi} 和 P_{Yi} , 它们的计算公式如下:

$$P_{VFi} = (P_{Fi}/B_F) \times 100\% \quad (12)$$

$$P_{VSi} = (P_{Si}/B_S) \times 100\% \quad (13)$$

$$P_{Yi} = (P_{Yi}/B_Y) \times 100\% \quad (14)$$

公式(12), (13), (14)中的 B_F, B_S, B_Y 分别表示北京浮尘、沙尘暴、扬沙天气的总频率。

3 结果与分析

3.1 本地沙源的影响概率

3.1.1 人为因素影响

只在北京发生而其他3个区域一个站点都没有发生的沙尘天气显然与大的环流运动无关, 主要是由人类的短期极端行为导致产生, 由2中评价方法求出北京浮尘、沙尘暴和扬沙天气的这种影响概率分别约为: 0%, 4% 和 5.7% (见图2)。尽管该比例较小, 但从人类行为的优化管理考虑, 这种情况完全可以避免, 从而成为改善生态环境的关键环节。对于人类行为的长期影响概率, 还有待进一步的研究。

3.1.2 自然因素影响

北京近周边地区的大部分站点与北京同时发生了沙尘天气, 而在区域2和区域3却只有零星几个站点发生, 这主要受中小尺度的天气系统下局部热力条件发生变化所致, 由于局部低层大气不稳定, 对流层低层存在着强烈的垂直方向的不稳定强对流, 受到扰动后的沙尘被卷起产生沙尘天气, 此时的外来沙源影响力还没有巨大到对北京的沙尘天气发生作用, 这种情况下发生的沙尘天气往往是本地源起沙。计算出本地沙源对北京浮尘、沙尘暴和扬沙天气的影响概率见图2, 分别为 12.9%, 16%, 21.7%。3种沙尘天气中, 扬沙天气受本地沙源的影响最大, 分别是沙尘暴和浮尘天气的 1.4 和 1.7 倍, 这与实际情况是相符的, 因为发生扬沙天气的各种临界值比浮尘和沙尘暴天气更容易满足, 前者较后两种天气频繁。

3.2 区域2和区域3对北京沙尘天气的影响

3.2.1 区域2对北京沙尘天气的影响

区域2对北京浮尘、沙尘暴、扬沙天气的长期影响概率分别约为 41.1%, 44%, 28.4%, 见图3。3种沙尘天气中, 沙尘暴天气的影响概率最大, 浮尘天气与之相差不多, 而扬沙天气则相对较小, 沙尘暴是扬沙天气的 1.6 倍, 这种比例分配刚好与本地沙源的影响相反。以上影响概率说明区域2对北京沙尘天气的贡献较大, 特别是北京的沙尘暴和浮尘天气受区域2的影响很大, 扬沙天气则相对小一些。

区域2对北京沙尘暴、浮尘、扬沙天气的短期影响概率依次约为 32%, 23.4%, 14.3%, 这种概率分布与长期影响有所不同, 他们依次呈阶梯状递减。

3.2.2 区域3对北京沙尘天气的影响

区域3对北京浮尘天气的长期影响概率约为 17.7%, 沙尘暴约为 16%, 扬沙天气约为 14.3%, 见图4。与区域2不同的是, 区域3对北京3种沙尘天气的影响中, 浮尘天气的概率最大, 但对3种沙尘天气的影响概率相差不大。

区域3对北京浮尘、沙尘暴和扬沙天气的短期影响概率分别为 8.1%, 4% 和 5.2%。这3个值都较小, 说明北京沙尘天气受到区域3的短期影响不大。

与区域3相比, 区域2分别是区域3对北京浮尘、沙尘暴和扬沙天气影响概率值的 2.3, 2.8, 2.0 倍, 区域3对北京沙尘天气的影响概率相对较小。

3.2.3 各种成因影响概率的对比

以上计算的各种影响概率的和并没有达到 100%, 浮尘、沙尘暴和扬沙天气下还分别约有 22.6%, 20% 和 30.4% 的剩余, 说明评价方法 2 中的 M 取得偏大, 还需对 M 进行调整。在这里考虑到上面计算出的各种成因概率和占大部分, 各成因间的关系可以通过相互对比得出, 所以将各成因概率归一化得到表 1 中的近似估计值, 如对于浮尘天气, 用北京本地沙源和区域 2、区域 3 的影响概率分别除以三者和便可以得到各种影响概率所占的比例, 沙尘暴和扬沙天气的评价与浮尘相同。

表 1 区域 2、区域 3 和本地沙源对北京沙尘天气的影响概率
Table 1 Influence probabilities of Region 2, Region 3 and local sand source on Beijing dust events %

	本地人为	本地自然	区域 2	区域 3
浮尘	0	18	57	25
沙尘暴	6	24.7	69	0.3
扬沙	8	31	41	20

对于浮尘天气, 区域 2 的影响概率约为 57%, 分别是北京本地和区域 3 的 3.2 和 2.3 倍。沙尘暴天气中区域 2 的影响仍然最大, 是本地影响概率的 2.2 倍, 但区域 3 的影响概率几乎为 0, 说明北京的沙尘暴天气主要受到区域 2 和本地沙源的影响。北京的扬沙天气受区域 2 和本地沙源的影响都较大, 受区域 3 的影响相对小一些, 区域 2 约为区域 3 的 2 倍。

另外, 北京本地自然因素与人为因素相比, 自然因素占主要地位, 沙尘暴和扬沙天气的自然因素影响概率分别是人为因素影响的 4 倍和 3.8 倍, 浮尘天气的人为因素影响概率为 0。与其他影响概率相比, 尽管人为短期影响概率较小, 但如果我们不合理控制这种极端行为, 导致产生的负面影响是无法估量的, 而这种影响完全可以避免发生。

4 评价结果的合理性分析

发生沙尘天气的风速一般都较大, 起沙风速一般都大于等于 5m/s , 各种影响因素下的沙尘天气与风速风向分布有着密切的关系, 用北京地区风速风向资料对以上成因概率评价结果进行检验。收集了北京地区延庆、怀柔、顺义、平谷、门头沟和大兴 6 个分气象站的风速风向资料, 时间从 1980 年到 2000 年, 时间分辨率为 1 小时(h), 风速有 16 个方向。考虑到北京与 3 个区域的位置关系, 将风向分为 4 个主要的方向, 方向 1 包括: N, NNW, NW, WNW; 方向 2 包括: W, WSW, SW, SSW; 方向 3 包括: S, SSE, SE, ESE, E; 方向 4 包括: ENE, NE, NNE。区域 2 位于北京风向 1 的上风向, 区域 3 位于北京风向 2 的上风向。统计出北京地区风速在 4 个风向的频率比见表 2。

从表中看到风向 1 下的起沙风频率最高, 约为 60%, 处在风向 1 上风向的区域 2 对北京各种沙尘天气的影响概率区间为[41%, 69%], 平均在 55%, 基本上在起沙风频率比例的上下波动, 对区域 2 影响概率的估计是合理的。区域 3 对北京浮尘和扬沙天气的影响概率与风向 2 下的起沙风频率较接近, 而区域 3 正好位于该风向的上风向, 对区域 3 的估计也较合理。北京在风向 3 的上风向没有明显的沙源地, 所以在这个方向上发生的沙尘天气很可能是本地起沙, 风向 3 下约有 9% 的起沙风产生的沙尘天气很可能是北京本地沙源造成的, 而从全部风向相对均匀分布的情况看, 其他风向下如果有与风向 3 类似的情况, 也可能发生本地起沙, 从这个意义上说, 本地起沙的概率应该是 9% 的四倍, 约为 32%, 这与本地沙源对扬沙天气的影响概率较接近。另外, 因风向 3 和风向 4 下没有明显的沙源地, 所以在这两个风向下发生的沙尘暴天气极有可能是本地沙源影响产生的, 两个风向下起沙风频率约为 20%, 与本地沙源对沙尘暴的影响概率较接近, 说明对北京本地沙源影响概率的估计也是合理的。

表 2 北京 4 个风向的风速频率比
Table 2 Frequency ratios of 4 main wind directions in Beijing area %

单风向频率/总风向频率	区域 2	区域 3
风向 1	29.7	60.2
风向 2	20.6	20.4
风向 3	30.7	9.5
风向 4	19.0	9.9

5 结论与讨论

沙尘天气在时空上具有群聚群发特征,这种信息隐含在沙尘天气的气象资料中,对该资料进行集合运算,可以量化出不同成因对沙尘天气的影响概率,文中对北京沙尘天气的评价结果显示,这种方法是行之有效的,从评价结果的稳定性考虑,要求沙尘天气资料在时间和空间上要完备,时间尺度一般不小于 30 a。

因浑善达克沙地与毛乌素沙地所处地理位置不同,它们对北京沙尘天气的影响情况也明显不同,北京沙尘天气受前者的影响较大,特别是沙尘暴天气主要受到前者的影响,而後者的影响概率几乎为 0。浑善达克沙地对北京浮尘和扬沙天气的影响概率约为毛乌素沙地的 2 倍。外来沙源与北京本地沙源相比,前者的浮尘天气影响概率是後者的 4.6 倍,沙尘暴和扬沙天气则为 2.2 和 1.6 倍。北京本地沙源影响中,自然因素对扬沙和沙尘暴天气的影响概率约为人为因素的 4 倍,人为因素对浮尘天气的影响概率几乎为 0。以上评价结果对于北京沙尘防治工程以及相关政策法规的制定有着重要的指导与参考价值。

本文做出的成因概率评价是基于沙尘天气发生时间的时空资料、从概率论思想出发进行的,这对现有的沙尘天气发生频率和沙尘天气强度是一种补充,评价方法中只涉及了沙尘天气发生时间,没有考虑沙尘天气强度,在相关资料(诸如沙尘浓度、能见度)的积累下,这方面的工作还需要进一步开展。

参考文献:

- [1] 陈广庭. 北京沙尘暴史及治理对策[J]. 科学对社会的影响, 2000, 4: 31-36.
- [2] 景爱. 北京沙尘何时了[J]. 科技潮, 2001(5): 28-31.
- [3] 杨德保, 尚可政, 王式功. 沙尘暴[M]. 北京: 气象出版社, 2003.
- [4] 宋迎昌. 北京沙尘暴成因及其防治途径[J]. 城市环境与城市生态, 2002, 15(6): 26-28.
- [5] 胡金明, 崔海亨, 唐志. 中国沙尘暴时空特征及人类活动对其发展趋势的影响[J]. 自然灾害学报, 1999, 8(4): 49-56.
- [6] 陈广庭. 北京强沙尘暴史和周围生态环境变化[J]. 中国沙漠, 2002, 22(2): 210-213.
- [7] 史培军, 严平, 高尚玉, 等. 我国沙尘暴灾害及其研究进展与展望[J]. 自然灾害学报, 2000, 9(3): 71-77.
- [8] 陈广庭. 北京沙尘暴史及治理对策[J]. 科学对社会的影响, 2000, 4: 31-36.
- [9] 方翔, 郑新江, 陆均天, 等. 2002 年春季北京沙尘天气成因及源地分析[J]. 国土资源遥感, 2002, 4: 17-22.
- [10] 杨维西. 北京沙尘天气的沙尘来源及其治理[J]. 林业经济, 2002(7): 19-22.
- [11] 方修琦, 李令军, 谢云. 沙尘天气过境前后北京大气污染质量浓度的变化[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2003, 39(3): 407-411.
- [12] 张炅, 董旭辉. 碳酸盐碳测定在沙尘暴源地识别中的应用[J]. 中国环境监测, 2002, 18(2): 13-17.
- [13] 李令军, 高庆生. 2000 年北京沙尘暴源地解析[J]. 环境科学研究, 2001, 14(2): 1-3.
- [14] 张志刚, 赵燕华, 陈万隆, 等. 北京沙尘天气与源地气象条件的关系[J]. 安全与环境学报, 2003, 3(1): 20-24.
- [15] 郑新江, 杨义文, 李云. 北京地区沙尘天气的某些特征分析[J]. 气候与环境研究, 2004, 9(1): 18-27.
- [16] Wang X M, Dong Z B, Zhang J W, Liu L C. Modern dust storms in China: an overview[J]. Journal of Environments, 2004, 58: 559-574.
- [17] 韩力慧, 庄国顺, 孙业乐, 王自发. 北京大气颗粒物污染本地源与外来源的区分[J]. 中国科学 B, 化学, 2005, 35(3): 237-246.
- [18] 宗慧. “探索沙尘暴”科考团报告结论有五点[N]. 北京日报, 2001-4-25.
- [19] 张炅, 董旭辉. 碳酸盐碳测定在沙尘暴源地识别中的应用[J]. 中国环境监测, 2002, 18(2): 13-17.
- [20] 李令军, 高庆生. 2000 年北京沙尘暴源地解析[J]. 环境科学研究, 2001, 14(2): 1-3.
- [21] 张志刚, 赵燕华, 陈万隆, 等. 北京沙尘天气与源地气象条件的关系[J]. 安全与环境学报, 2003, 3(1): 20-24.
- [22] 胡培兴. 治沙止漠建屏障, 绿色护卫北京城[J]. 林业经济, 2003(7): 20-23.
- [23] 陈效述, 谭文星, 刘大平, 郭玉泉, 潘卫锋. 北京平原地区裸露土地的时空分布[J]. 水土保持研究, 2003, 10(3): 18-25.