

沙尘天气发生频率对大气能见度方差的影响研究:以北京及其沙尘过往路径典型站点为例

邱玉珺^{1,2}, 邹学勇^{1,2}, 张春来^{1,2}

(1. 北京师范大学中国沙漠研究中心, 北京 100875; 2. 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875)

摘要:利用 1971~2000 年北京及其沙尘过往路径典型站点日能见度和各种沙尘天气发生日资料, 分析了沙尘天气发生频率与能见度方差的关系. 发现当沙尘天气频率减少(增加)1 次时, 能见度方差就偏强(偏弱)1 个标准差. 沙尘天气发生频率对日能见度变率的影响主要是通过风速的高频变率实现的, 当风速变率偏强(偏弱)1 个标准差时, 沙尘天气发生频率增强(减弱)约 30%, 近地面风场的高频变率影响了沙尘天气的产生, 从而影响日能见度方差的波动. 异常低能见度事件(日能见度距平 $< -2\sigma$, σ 为各站各日能见度距平的标准差)频次与能见度方差之间存在显著的正相关性. 风速距平频次增加, 使得沙尘天气发生频次增加, 从而导致低能见度事件频次上升; 反之, 异常低能见度事件下降. 浮尘、沙尘暴和扬沙与低能见度事件的相关程度是不同的.

关键词:沙尘天气; 能见度; 风速; 方差; 低能见度事件

中图分类号:X131.1; X169 **文献标识码:**A **文章编号:**0250-3301(2006)06-1046-06

Research on Impact of Dust Event Frequency on Atmosphere Visibility Variance: A Case Study of Typical Weather Stations Locating in the Dust Route to Beijing

QIU Yu-jun^{1,2}, ZOU Xue-yong^{1,2}, ZHANG Chun-lai^{1,2}

(1. China Center of Desert Research, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster of the Ministry of Education of China, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Relationship between dust event frequency and atmosphere visibility deviation is analyzed by using the data of daily visibility and various dust events in Beijing and other 13 typical weather stations locating in the dust events route to Beijing from 1971 to 2000. Results show that the visibility variance increases a standard deviation in the response to the dust event frequency decrease once. The influence of dust event to visibility comes from the high-frequency change of wind velocity. The change of wind velocity in one standard deviation can result in dust event frequency increasing by 30%. The high-frequency changes of near-surface wind influence the occurrence of dust event, and also the fluctuation of daily visibility deviation. The relationship between abnormal low visibility event and visibility deviation is in significant positive correlation. The increase of wind average distance leads to the enhance frequency of dust event and consequently the abnormal low visibility event. There are different relationships between abnormal low visibility event and floating dust, sandstorm and flying-dust respectively.

Key words: sand event; visibility; wind velocity; variance; abnormal low visibility event

近几十年来, 频频发生的沙尘天气对环境的影响已引起人们的广泛关注^[1~5]. 沙尘天气发生时, 大幅降低的大气能见度影响了人们正常的生活和工作. 如 2000-04-06 北京沙尘暴天气, 能见度下降到 100m 左右, 首都机场上百次航班延误^[6]; 2002-03-20 北京沙尘暴天气的总颗粒物浓度高达 10.9 mg/m³, 高出国家颗粒物污染标准的 54 倍^[7].

国家气象局编定的《地面气象观测规范》^[8]对沙尘天气划分的主要依据就是能见度, 风力也作为参考指标之一. 牛生杰^[9,10]等近几年在腾格里沙漠边缘吉兰泰等站的多次观测结果发现, 从背景大气到浮尘、扬沙、弱沙尘天气, 近地面大气平均总悬浮颗粒物(TSP)的浓度大约按公比为 3 的比率递增,

沙尘气溶胶光学厚度大约按公比为 1.5 的比率递增. 这些结果说明, 沙尘天气按照某种规律影响着能见度的变化, Shao 等^[11]也认为沙尘天气与能见度之间存在相关性.

关于沙尘天气对大尺度气候和环境的影响国内外已有许多的研究^[12~27], 但对于沙尘天气发生频率和能见度之间的相关性方面, 目前为止还没有过多的研究涉及. 本文选取了北京及其沙尘过往路径中的 14 个典型站点(图 1), 分析了包括北京在内的

收稿日期: 2005-05-11; 修订日期: 2005-09-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(40301025)

作者简介: 邱玉珺(1975~), 女, 博士, 主要研究方向为数学模型及风沙物理研究.

14 个站点的沙尘天气发生频率与北京大气能见度方差的相关性以及能见度方差与异常低能见度事件

频次的关系,该结果为进一步研究北京地区大气质量以及沙尘天气对大气环境的影响提供了参考。

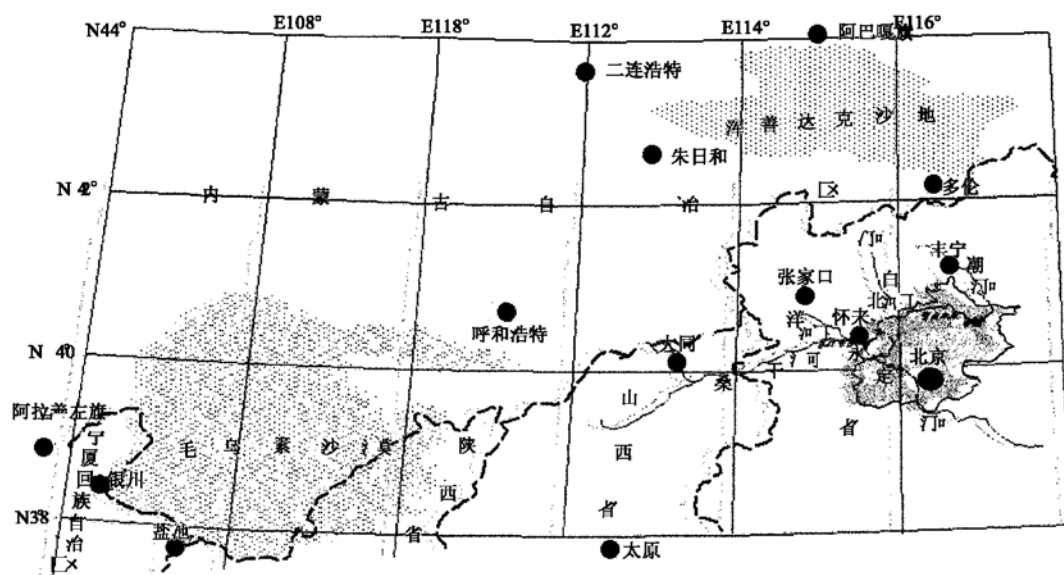


图 1 研究站点分布图

Fig. 1 Location map of the fourteen research stations

1 资料与方法

本研究所用日平均能见度(VI)、沙尘天气发生日(S)、日平均风速值(v)都由中国气象局提供,站点的资料时段为 1971-01-01~2000-12-31,资料没有缺失值。为得到日平均能见度距平,先计算每日多年平均气候值。

$$VI_k = \frac{1}{21} \sum_{i=k-10}^{k+10} VI_i \quad (1)$$

VI_k 表示第 k 日的 VI 值,取第 k 日前 10d、第 k 日、 k 日后 10d 共 21d 的平均,见(1)式。在 1971~2000 年期间对所有 k 日(共 630 个 k 日)的 VI_k 取平均,得到每日多年平均气候值,这样可以尽可能消除天气波动(通常时间尺度在 2~3 周以内)对气候平均值的影响。能见度距平的计算见(2)式:

$$VI_{k\text{距平}} = VI - VI_k \quad (2)$$

即日能见度距平值为每日能见度原始值减掉气候值。闰年 2 月 29 日气候值由 2 月 28 日与 3 月 1 日的平均值代表。

2 能见度方差

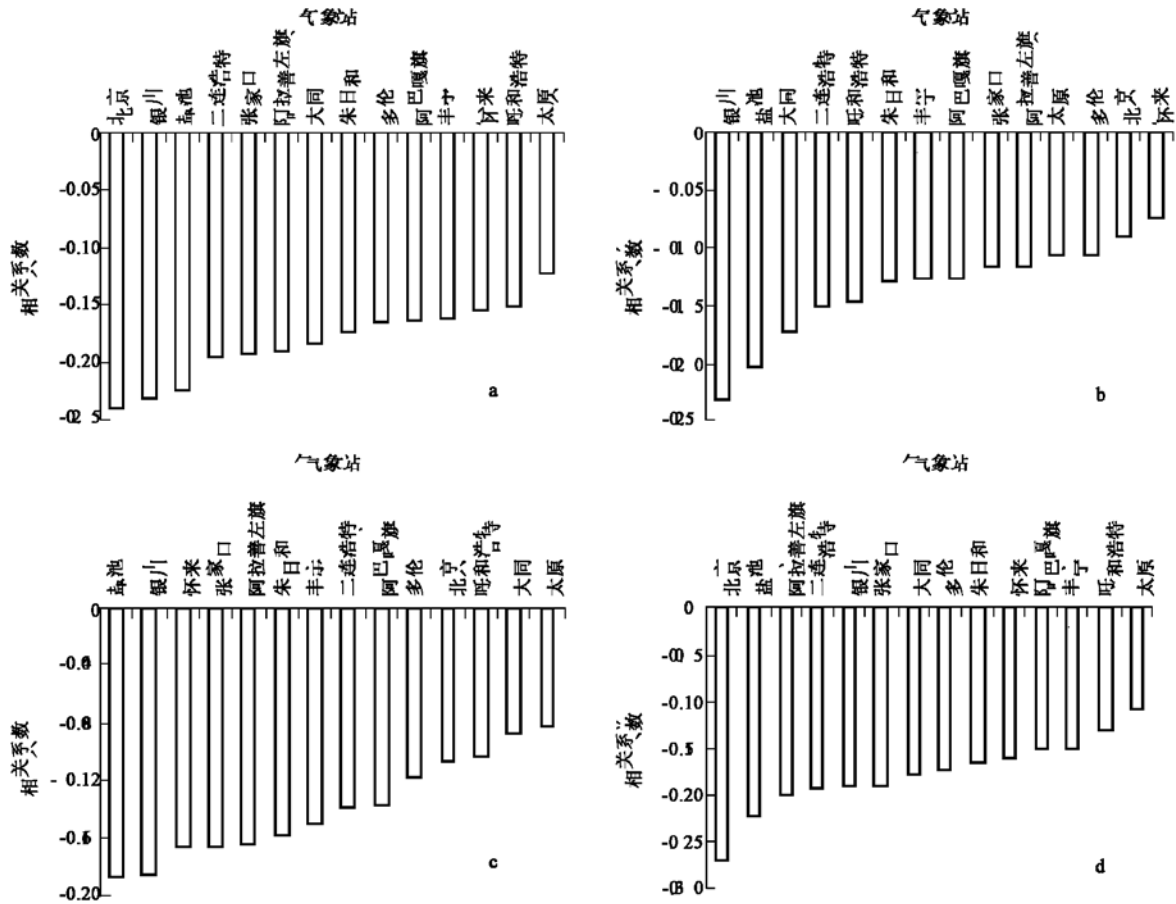
度量能见度变率的一个重要指标是其方差(即 σ^2 , σ^2 为标准差),这里的 σ 是根据每年的日能见度距平计算的。因为分析的是距平,去掉了季节循环的

影响,所以计算的每年日能见度的方差主要表示该年能见度高频变化的强弱。方差值越高表示天与天之间能见度的波动和差异大,整体上看能见度更不稳定。反之,如果方差小则能见度变化比较平稳,天与天之间波动比较小。

计算每年北京 VI 方差与所有站 S 频率的相关系数(图 2),发现包括北京在内的 14 个站点与北京 VI 方差均为负相关,其中,北京本地 S 频率与自身的 VI 方差相关性最好,分布在毛乌素沙地周边的银川、盐池和浑善达克沙地周边的二连浩特的 S 频率与北京的 VI 方差相关性极为显著。对于浮尘天气,除北京和怀来浮尘频率与北京 VI 方差的相关性不显著外,其他 12 个站点的浮尘与北京的 VI 方差显著相关,都通过了 95% 的信度水平。14 个站中,银川、盐池和二连浩特仍然对北京 VI 方差的相关性最显著,大同的浮尘与北京 VI 方差的相关也较显著。北京的浮尘天气反而与其自身的 VI 方差不显著相关,说明外地沙源是影响北京浮尘天气的主要原因,远周边地区的自由大气输送和近周边地区的边界层输送造成了北京地区的浮尘天气,这与文献[28]的观点相同。对于沙尘暴天气,除大同和太原外,其他的站与北京 VI 方差的相关性都很显著,通过了 95% 的信度水平,其中银川和盐池相关性仍然最显著。但与浮尘不同的是,北京周边站点中,怀来和张家口与北京 VI 方差

的相关性较为显著,说明北京近周边地区边界层输送导致的沙尘暴天气比浮尘天气的影响度大,而浮尘天气的远周边自由大气动量下传则比近周边边界层输送的影响更广.对于扬沙天气,14个站的扬沙

频率与北京 $VI_{\text{方差}}$ 的相关都极为显著,通过了 95% 的信度水平.与浮尘和沙尘暴不同的是,北京的扬沙与其自身 $VI_{\text{方差}}$ 相关最为显著,说明北京扬沙天气与本地沙源有关,这与文献[29,30]的观点相同.



a. 沙尘天气频率与北京 $VI_{\text{方差}}$ 的相关系数(全部通过 95% 的显著性检验); b. 浮尘频率与北京 $VI_{\text{方差}}$ 的相关系数(北京、怀来没有通过 95% 的显著性水平); c. 沙尘暴频率与北京 $VI_{\text{方差}}$ 的相关系数(大同、太原没有通过 95% 的显著性水平); d. 扬沙频率与北京 $VI_{\text{方差}}$ 的相关系数(全部通过 95% 的显著性水平)

图 2 14 个气象站的各种沙尘天气频率与北京能见度方差的相关系数

Fig. 2 Correlation coefficients between dust events frequency of fourteen stations and visibility variance of Beijing

14 个站点沙尘天气频率取平均,相应的 $S_{\text{频率}}$ 与同期北京 $VI_{\text{方差}}$ 的相关系数是 -0.229,相关性超过 99% 的信度水平.说明当沙尘天气频率较强时,总体上看能见度方差变率减小,而当 $S_{\text{频率}}$ 较弱时,能见度方差变率增加.二者之间的线性回归分析表明,当沙尘天气频率减少(增加)一次时, $VI_{\text{方差}}$ 就偏强(偏弱)一个标准差.根据统计,14 个站点的平均沙尘天气频率每年约有 35 次,这意味着相当多的时间,北京能见度变率的强烈变化与 $S_{\text{频率}}$ 的波动有密切关系.沙尘天气频率除有较强的季节变化外,还表现出明显的长期趋势(图 3):14 个站的平均沙尘天气频率有 12.8%/10a 的减少趋势,这个值达到

99% 的信度水平.近 30 年北京 $S_{\text{频率}}$ 也有显著的减少趋势,达到 7.3%/10a,超过 99% 的信度水平,这个趋势的数值相当于 2.7 倍标准差,是一个不小的量,可见 $S_{\text{频率}}$ 对 $VI_{\text{方差}}$ 的长期影响也是明显的.

造成日能见度波动的最直接的因子是天气过程, $S_{\text{频率}}$ 对日能见度的影响很可能是通过空气流动高频变化而实现的.因为风速值的正负位相表征气流的稳定和强弱,这是沙尘天气发生的最重要的一个判据和指标.笔者的分析表明,风速值的强弱对 $S_{\text{频率}}$ 的变化有显著调制作用.为了检查可能的影响途径,计算了北京能见度方差和其他各站风速值方差的相关,见图 4.风速的方差也是根据每年日风速

距平计算的,日风速距平值处理方法与日能见度距平相同,其方差的大小表示了近地面大气环流高频变化的强弱. $VI_{\text{方差}}$ 与风速方差的相关系数中,丰宁、多伦、张家口、北京、大同、太原和二连浩特是正相关,其中丰宁、多伦、张家口、北京、大同通过了 95% 的信度水平. 银川、怀来、呼和浩特、朱日和、盐池、阿拉善左旗和阿巴嘎旗与北京 $VI_{\text{方差}}$ 是负相关,都没有通过显著性检验. 显然,北京 $VI_{\text{方差}}$ 与各站风速方差的相关中,北京周边地区是其显著相关区,这种空间分布特征很明显和 $S_{\text{频率}}$ 与 $VI_{\text{方差}}$ 相关性的分布特征相似. 前面的分析说明 $S_{\text{频率}}$ 与 $VI_{\text{方差}}$ 有显著的负相关,对于离北京地区较远的毛乌素沙地和浑善达克沙地周边地区的 $S_{\text{频率}}$ 与北京 $VI_{\text{方差}}$ 也有很强的相关性,而它们的风速方差却与北京 $VI_{\text{方差}}$ 的相关性不显著,估计是因为纯空气流动的高频变化比带动沙尘运移的风速高频变化对北京 $VI_{\text{方差}}$ 的影响反应更敏感,这种现象不妨称为沙尘滞后影响.

取 14 个站平均 $VI_{\text{方差}}$ 与风速方差的相关系数,显示显著相关的站点与沙尘发生频率与能见度相关

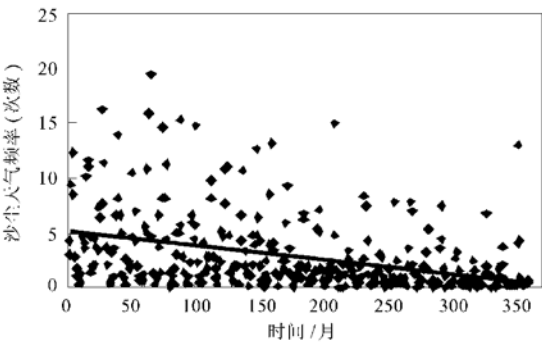


图 3 14 个站点平均沙尘天气频率图

Fig. 3 Mean dust events frequency graph of fourteen stations

的站点吻合. 风速值方差的频次与强弱是影响日能见度波动的一个重要原因. 前面分析发现的 $S_{\text{频率}}$ 与 $VI_{\text{方差}}$ 的显著相关,就是通过风速影响 $S_{\text{频率}}$ 而影响 $VI_{\text{方差}}$ 的. 表 1 给出了 $S_{\text{频率}}$ 与风速方差的相关关系. 从表 1 看到,北京周边地区 4 个站点(北京、怀来、张家口、丰宁)的 $S_{\text{频率}}$ 均值与平均风速的相关系数高于浮尘、沙尘暴和扬沙分别对平均风速的相关系数,这与实际情况相符合,因为除了风速值影响沙尘天气外,还有地面沙尘源和不同地面覆盖类型同时影响沙尘天气的产生^[17, 31, 32]. 浮尘天气与风速值方差显著相关,而沙尘暴和扬沙与风速值方差的相关性则不明显,说明风速值的较大波动增加了浮尘天气的产生. $S_{\text{频率}}$ 与能见度明显相关(相关系数为 0.196,通过了 99% 的信度水平),其中,在各种沙尘天气中,扬沙与能见度的相关最明显. 此外, $S_{\text{频率}}$ 与风速具有很强的季节性,在不同的时间尺度上,它们表现出的规律是不同的,其与能见度高频变率的关系用简单的线性相关不能很好地描述出来,这些问

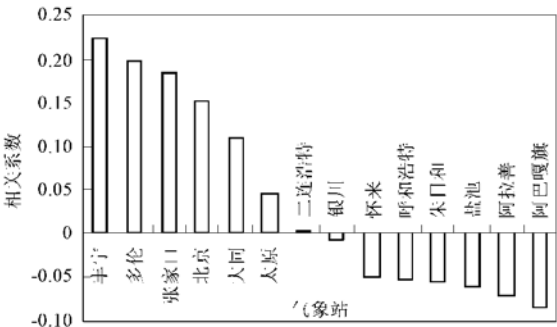


图 4 北京能见度与各站风速方差相关系数

Fig. 4 Correlation coefficient between visibility variance and wind speed variance of Beijing

表 1 沙尘天气发生频率与北京地区能见度和风速的相关关系
Table 1 Correlation between $S_{\text{频率}}$ and $VI_{\text{方差}}$, wind speed of Beijing

北京周边地区	风速平均	风速平均方差	能见度平均	能见度距平方差	异常低能见度事件频次
沙尘频率均值	0.265 ^{a)}	0.138 ^{a)}	0.196 ^{a)}	- 0.028	0.177 ^{a)}
浮尘	0.247 ^{a)}	0.144 ^{a)}	0.156 ^{a)}	0.008	0.177 ^{a)}
沙尘暴	0.195 ^{a)}	0.116	0.138 ^{a)}	0.023	0.2 ^{a)}
扬沙	0.251 ^{a)}	0.118	0.198 ^{a)}	- 0.053	0.152 ^{a)}

a) 表示达到 99% 的信度水平; 表中能见度和风速取北京周边站的平均

题还有待进一步地研究.

3 能见度方差与异常低能见度事件频次的关系

上面的分析表明 $S_{\text{频率}}$ 对能见度有显著的影响. 对日能见度而言, 方差变化对极值的影响很可能要

比平均值变化所造成的影响更明显. 统计 14 个站每年日能见度距平低于 -2σ 的天数, 这里 σ 由该站该年日能见度距平值求得, 得到的天数定义为异常低能见度事件频次. 从表 1 可看出, 各种沙尘天气和沙尘天气总频率与低能见度事件频次的相关性都很显

著,都通过了 99% 的信度水平. 其中,沙尘暴对异常低能见度事件的影响最大,它们的相关系数达到 0.2,其次是浮尘对异常低能见度事件的相关性,它们的相关系数达到 0.177,扬沙对异常低能见度事件的相关系数最小,且小于总沙尘天气频率与低能见度事件的相关系数. 分析表明异常低能见度频次的变化与沙尘天气发生频次的确有密切的联系,北京周边地区平均相关系数是 0.177,超过 99% 的信度水平. 说明沙尘天气发生频次较大时,异常低能见度事件频次偏多,而沙尘天气发生频次较小时,异常低能见度事件频次偏少. 另外,不同类型的沙尘天气对异常低能见度事件的影响程度也不同,沙尘暴的影响度最大,其次是浮尘天气,扬沙对异常低能见度事件的影响度最小. 从中说明由沙尘暴天气产生的破坏性极强,而扬沙天气则相对较小.

异常低能见度事件与能见度方差表现为显著的正相关,能见度方差较大时,异常低能见度事件频次上升,能见度方差较小时,异常低能见度事件频次下降. 北京周边地区能见度方差与相应的异常低能见度事件的相关系数达到 0.541,毛乌素沙地周边能见度方差与异常低能见度事件的相关系数高达 0.892,浑善达克沙地周边是 0.849. 沙源是产生沙尘天气的物质基础,沙源充足与否直接影响沙尘天气的产生,毛乌素沙地周边和浑善达克沙地周边的沙尘天气频率就较高于北京地区. 从以上分析看到,在不同的沙源区,相应的异常低能见度事件频率以及其与能见度的相关性也不同,与北京周边地区相比,毛乌素沙地周边和浑善达克沙地周边的沙源比较充足,则对应的能见度方差与异常低能见度事件有较大的相关系数,说明沙尘天气对能见度有显著的影响.

4 结论

(1) 沙尘天气发生频率对北京及其周边地区日平均能见度的方差有显著的影响,当沙尘天气频率减少(增加)1次时,VI就偏强(偏弱)1个标准差. 沙尘天气发生频率的强弱与近地面风速的变率有显著的相关,当风速变率偏强(偏弱)1个标准差时,沙尘天气发生频率增强(减弱)约30%. 沙尘天气发生频率对日能见度变率的影响主要是通过风速的高频变率实现的. 北京周边地区风速的高频变化与平均日能见度方差之间有高达0.2344的相关.

(2) 北京及其周边地区异常低能见度频次的变化与能见度方差之间表现为显著的正相关,能见度

方差大(小)时,异常能见度事件频次上升(下降),这明显受沙尘天气发生频率的影响. 风速距平的频次增加,使得沙尘天气发生频次增加,从而导致低能见度事件频次上升;反之,异常低能见度事件下降.

(3) 不同类型的沙尘天气对异常低能见度事件的影响程度也不同,沙尘暴的影响度最大,其次是浮尘天气,扬沙对异常低能见度事件的影响度最小.

(4) 沙尘天气发生频率对日能见度方差与异常低能见度事件的影响,对理解北京地区沙尘天气对大气质量的影响有较好的参考价值,但关于沙尘天气与能见度具体的量化关系还需要进一步研究.

参考文献:

- [1] 周允华, 项月琴. 北京地区大气浑浊度的测量和沙尘污染的初步研究[J]. 环境科学, 1984, 5(5): 50~54.
- [2] 陈静生, 邓宝山, 贾振邦. 关于“外来尘”对北京大气质量影响的研究[J]. 中国环境科学, 1984, 4(1): 10~17.
- [3] 高尚武, 陆鼎煌. 京津廊坊地区风沙污染及防治对策研究[J]. 环境科学, 1984, 5(5): 47~50.
- [4] 任阵海, 高庆先, 苏福庆. 北京大气环境的区域特征与沙尘影响[J]. 中国工程科学, 2003, 5(2): 49~56.
- [5] 方修琦, 李令军, 谢云. 沙尘天气过境前后北京大气污染物质量浓度的变化[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2003, 39(3): 407~411.
- [6] 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.
- [7] 孙业乐, 庄国顺, 袁惠, 等. 2002年北京特大沙尘暴的理化特性及其组分来源分析[J]. 科学通报, 2004, 49(4): 340~346.
- [8] 中国气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 1979. 22.
- [9] 牛生杰, 孙继明, 陈跃, 等. 贺兰山地区春季沙尘气溶胶质量浓度的观测分析[J]. 高原气象, 2001, 20(1): 82~87.
- [10] 牛生杰, 章澄昌. 贺兰山地区春季沙尘气溶胶的化学组分和富集因子分析[J]. 中国沙漠, 2000, 20(3): 264~268.
- [11] Shao Y, Yang Y, Wang J, et al. Real-time Numerical Prediction of Northeast Asian Dust Storms Using an Integrated Modeling System[J]. J. Geophys. Res., 2003, 108: 4591~4609.
- [12] Goudie A. Dust storms in space and time[J]. Progress Physical Geography, 1983, 7: 502~530.
- [13] Pye K. Aeolian Dust and Dust Deposits[M]. London: Academy Press, 1987.
- [14] Toon O B, Turco R P, Westphal D, et al. A multidimensional model for aerosols: Description of computational analogs[J]. J. Atm. Sci., 1988, 45(15): 2124~2143.
- [15] Littmann T, Steinrücke J. Atmospheric boundary conditions of recent Saharan dust influx into Central Europe[J]. Geo. Journal, 1989, 18: 399~406.
- [16] Hogan T F, Rosmond T E. The description of the Navy operational global atmospheric prediction system's spectral forecast model[J]. Monthly Weather Rev., 1991, 119: 1786~1815.

- [17] Littmann T. Dust storm frequency in Asia: Climatic control and variability[J]. *International Journal of Climatology*, 1991, **11**: 393~ 412.
- [18] Goudie A S, Middleton N J. The changing frequency of dust storms through time[J]. *Climatic Change*, 1992, **20**: 197~ 225.
- [19] Nickovic S, Dobricic S. A model for long-range transport of desert dust[J]. *Monthly Weather Rev.*, 1996, **124**: 2537~ 2544.
- [20] Shao Y. A model for mineral dust emission[J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**: 20239~ 20254.
- [21] Lu H, Shao Y. Toward a quantitative prediction of dust storms: an integrated wind erosion modeling system and its applications[J]. *Env. Modelling and Software*, 2001, **16**: 233~ 249.
- [22] 方宗义, 朱福康, 江吉喜, 等. 中国沙尘暴研究[M]. 北京: 气象出版社, 1997. 1~ 10.
- [23] 全林生, 时少英, 朱亚芬, 等. 中国沙尘天气变化的时空特征及其气候原因[J]. *地理学报*, 2001, **56**(4): 477~ 485.
- [24] 钱正安, 宋敏红, 李万元. 近 50 年来中国北方沙尘暴的分布及变化趋势分析[J]. *中国沙漠*, 2002, **22**(2): 106~ 111.
- [25] 周自江, 王锡稳. 西北地区东部群发性强沙尘暴序列的建立与分析[J]. *地理学报*, 2002, **57**(4): 437~ 442.
- [26] 张高英, 赵思雄, 孙建华. 近年来强沙尘暴天气气候特征的分析研究[J]. *气候与环境研究*, 2004, **9**(1): 101~ 115.
- [27] 陈玉福, 唐海萍. 近 50 年首都圈沙尘暴的变化趋势及其与气温、降水和风的关系[J]. *环境科学*, 2005, **26**(1): 32~ 37.
- [28] 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~ 4.
- [29] 高庆先, 苏福庆, 任阵海, 等. 北京地区沙尘天气及其影响[J]. *中国环境科学*, 2002, **22**(5): 468~ 471.
- [30] 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**(3): 210~ 213.
- [31] Prospero J M, Ginoux P, Torres O, *et al.* Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the nimbus 7 total ozone mapping spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product [J]. *Reviews of Geophysics*, 2002, **40**(1): 1~ 31.
- [32] 叶笃正, 丑纪范, 刘纪远, 等. 关于我国华北沙尘天气的成因与治理对策[J]. *地理学报*, 2000, **55**(5): 513~ 522.