

刘娜,余晔,陈晋北,等. 2012. 兰州春季沙尘过程 PM₁₀ 输送路径及其潜在源区[J]. 大气科学学报, 35(4):477-486.

Liu Na, Yu Ye, Chen Jin-bei, et al. 2012. A study on potential sources and transportation pathways of PM₁₀ in spring in Lanzhou[J]. Trans Atmos Sci, 35(4):477-486. (in Chinese)

兰州春季沙尘过程 PM₁₀ 输送路径及其潜在源区

刘娜^{1,2}, 余晔¹, 陈晋北¹, 何建军^{1,2}, 赵素平^{1,2}

(1. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所 寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:将 2001—2008 年分为沙尘天气相对多年和相对少年, 计算兰州市春季逐日 4 个时次的 4 d 气团后向轨迹。通过聚类分析得到春季到达兰州市区的主要气团轨迹组, 结合可吸入颗粒物 PM₁₀ 日均质量浓度资料, 通过计算潜在源贡献因子 PSCF (potential source contribution function) 和浓度权重轨迹 CWT (concentration-weighted trajectory), 得到影响兰州市春季 PM₁₀ 质量浓度的潜在源区以及不同源区对兰州市春季 PM₁₀ 质量浓度贡献的差异。结果表明, 在沙尘天气相对多年, 西路径和西北路径发生比例最高, 分别占总轨迹的 33% 和 19.4%, 其中有 50% 以上为污染轨迹, 是造成兰州市春季高质量浓度 PM₁₀ 污染的主要输送路径。沙尘天气相对少年的主要输送路径是西路径, 其次是北路径, 分别占 23.6% 和 18%。影响兰州市春季大气 PM₁₀ 质量浓度的潜在源区分布在新疆塔里木盆地、吐鲁番盆地、青海柴达木盆地、甘肃河西走廊、内蒙古中部和西部的沙漠戈壁地区。

关键词: HYSPLIT 轨迹模式; PM₁₀; 后向轨迹; 传输路径; 潜在源区

中图分类号: P472.5 文献标志码: A 文章编号: 1674-7097(2012)04-0477-10

A study on potential sources and transportation pathways of PM₁₀ in spring in Lanzhou

LIU Na^{1,2}, YU Ye¹, CHEN Jin-bei¹, HE Jian-jun^{1,2}, ZHAO Su-ping^{1,2}

(1. Key Laboratory of Land Surface Process and Climate Change in Cold and Arid Regions,

Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Three-dimensional 4-day backward trajectories arriving in Lanzhou at 500m high were calculated every 6 h by using HYSPLIT-4 trajectory model in spring of 2001 to 2008. The 8 years were divided into two categories: high dust year (2001, 2002, 2004 and 2006) and low dust year (2003, 2005, 2007 and 2008). Cluster analysis, potential source contribution function (PSCF) model, and concentration-weighted trajectory (CWT) method were used to evaluate the transportation pathways and potential source regions of Lanzhou PM₁₀ pollution in spring. Results indicate that the western and northwestern pathways, respectively accounting for 33% and 19.4% of all trajectories, were major pathways leading to high springtime PM₁₀ loadings in Lanzhou in 2001, 2002, 2004 and 2006. However, the major pathways were the western and the northern pathways in 2003, 2005, 2007 and 2008, accounting for 23.6% and 18%, respectively. There were six potential source regions that had effect on PM₁₀ concentration in Lanzhou, including Tarim Basin and Turpan Basin in Xinjiang, Qaidam Basin in Qinghai, Hexi Corridor in Gansu Province, the desert and gobi area in central and western Inner Mongolia.

收稿日期: 2011-04-20; 改回日期: 2011-11-03

基金项目: 中国科学院“百人计划”项目(O82763100)

作者简介: 刘娜(1982—), 女, 山西临汾人, 博士, 研究方向为大气污染与数值模拟等, liuna@lzb.ac.cn; 余晔(通信作者), 博士, 研究员, 研究方向为大气环境与大气边界层数值模拟等, yuyu@lzb.ac.cn.

Key words: HYSPLIT model; PM₁₀; back-trajectories; transportation pathways; potential sources

0 引言

随着国民经济的迅速增长和城市化进程的加快,我国城市大气污染的状况和性质正在发生显著的变化:传统的污染物 SO₂ 和总悬浮颗粒物得到了一定的控制,NO_x 浓度有上升的趋势,大气可吸入颗粒物 PM₁₀(空气动力学直径小于 10 μm 的气溶胶粒子)成为我国大部分城市的首要污染物(周玉素等,2001;任阵海等,2003)。PM₁₀对气候、环境和人体健康有重要的影响,它不仅可以降低大气能见度,使空气质量恶化,还可以通过改变地气系统的辐射平衡以及成云致雨过程,影响区域乃至全球的气候,它甚至可以通过呼吸进入人体,在呼吸系统的不同部位沉积,对人体健康造成危害,是近年来大气科学研究的热点(李青青等,1999;王宝鉴等,2001)。

大气可吸入颗粒物的来源包括化石燃料燃烧、工农业生产活动等人为过程和地表扬尘、海洋飞沫、火山尘等天然过程以及二次气溶胶粒子等非均相化学反应过程等。发生在我国北方和中亚地区沙漠、戈壁的沙尘暴是春季影响东亚地区气候环境的主要天气现象,是我国春季大气颗粒物的主要来源(王明星和张仁健,2001;胡敏等,2009)。大量的观测和研究表明亚洲沙尘暴不仅会增加本地和邻近地区大气中的颗粒物含量,甚至还会随气流跨越太平洋影响北美地区(Duce et al., 1980; Uematsu et al., 1983; Husur et al., 2001; Tratt et al., 2001)。兰州市地处西北干旱半干旱区,位于青藏高原东北侧的黄河河谷盆地,其独特的盆地地形造成了静风频率高、逆温层结厚、持续时间长等不利于污染物扩散的大气条件。同时兰州也是亚洲沙尘向下游输送的经由之地,受沙尘天气影响大(Y. Q. Wang et al., 2006; 陶健红等,2007),因而兰州市大气环境质量不仅受局地气候条件和当地污染物排放等因素的影响,很大程度上还受外来入侵尘的影响。特别是每年春季河西走廊沙尘暴发生频繁(董安祥等,2003),是造成兰州市大气颗粒物污染最大的流动污染源(王式功等,1999a)。虽然很多学者已对兰州市的大气污染问题进行了大量的研究,在污染物扩散和输送特征、大气污染形成的物理机制和成因(胡隐樵和张强,1999;张强,2003)、沙尘天气影响(王式功等,1999b; S. G. Wang et al., 2005, 2006; 陶健红等,2007)、数值模拟(张强和吕世华,2001;安兴琴等,

2005)和治理对策(陈玉春等,2001)等方面取得一些比较重要的认识和研究成果,但目前对影响兰州市大气 PM₁₀污染的外来沙尘源地及其输送路径的研究还很少(S. G. Wang et al., 2006)。已有的研究(黄健等,2002;徐祥德等,2004;颜鹏等,2005;戚丹青等,2006;任永建等,2009)表明,大气可吸入颗粒物的时空分布与输送轨迹密切相关。因此,通过分析气团轨迹来研究一个地区大气可吸入颗粒物的输送特征,已成为了解一个地区大气颗粒物来源的一种常用方法。

本研究利用 HYSPLIT(hybrid single particle Lagrangian integrated trajectory)轨迹模式,通过聚类分析,得到了 2001—2008 年春季到达兰州地区的主要气团运动轨迹,即输送路径,结合兰州市逐日 PM₁₀观测资料,研究了不同输送轨迹类型与兰州市区 PM₁₀质量浓度之间的关系,确定了对兰州市 PM₁₀质量浓度影响较大的输送路径,定性地给出了兰州市春季 PM₁₀潜在源区和输送特征,为改善兰州市大气环境及周边地区生态环境提供科学依据,同时也可以为国内其他城市开展类似研究积累一些相关经验。

1 资料来源

本文采用的 2001—2008 年春季(3—5 月)兰州市 PM₁₀质量浓度数据,是利用环境保护部公布的重点城市空气质量日报数据中兰州市空气污染指数(air pollution index, API)资料,结合空气污染指数的定义和 API 分级表计算得到的(Zhang et al., 2003)。2001—2008 年逐日时刻沙尘资料取自甘肃省气象局沙尘暴数据集。轨迹计算所用气象资料取自美国环境预报中心和国家大气研究中心联合执行的全球再分析资料(Reanalysis Data),其水平分辨率为 2.5° × 2.5°,每日 4 个时次:0000、0600、1200、1800 UTC。

2 研究方法

2.1 轨迹聚类分析

将兰州市 2001—2008 年按照春季沙尘天气发生次数分为沙尘天气相对多年和相对少年。利用美国大气海洋局研制的 HYSPLIT 轨迹模式(Draxler and Hess, 1998)结合美国环境预报中心和国家大气研究中心联合执行的全球再分析资料,计算到达兰

州(103.85°E,36.05°N)的4 d后向轨迹。每天计算4个时次(02、08、14、20,北京时),得到分辨率为1 h的空气质点后向轨迹。轨迹计算起始点高度为500 m。将计算得到的后向轨迹根据气团水平移动速度和方向进行分组得出不同的输送轨迹组(Sirois and Bottenheim,1995;S. G. Wang et al.,2006;Y. Q. Wang et al.,2006)。把每组中各条轨迹对应的PM₁₀质量浓度进行平均,得到造成兰州市春季高质量浓度PM₁₀污染的输送路径。

2.2 潜在源贡献因子分析法

为了确定影响兰州市春季高质量浓度PM₁₀污染的潜在沙尘源区,使用潜在源贡献因子分析法(potential source contribution function, PSCF)(Ashbaugh et al.,1985)。许多研究者利用该方法确定了影响空气质量的污染源区(Zeng and Hopke,1989;Gao et al.,1993;Polissar et al.,1999;Cheng and Lin,2001)。PSCF值是所选研究区域内经过网格*ij*的污染轨迹数(m_{ij})与该网格上经过的所有轨迹数(n_{ij})的比值(Stohl and Kromp-Kolb,1994;Salvador et al.,2004),即

$$P_{\text{SCF}_{ij}} = \frac{m_{ij}}{n_{ij}} \quad (1)$$

PSCF的值越大表明该网格点对兰州市PM₁₀的质量浓度贡献越大。高PSCF值所对应网格组成的区域就是影响兰州市PM₁₀质量浓度的潜在源区,经过该区域的轨迹就是对兰州市PM₁₀质量浓度有影响的输送路径。本文中,分别取沙尘天气相对多年和相对少年兰州市春季PM₁₀的平均质量浓度作为判断一条轨迹是否为污染轨迹的标准,即在沙尘天气相对多年(相对少年)如果一条轨迹所对应的兰州市PM₁₀质量浓度大于沙尘天气相对多年(相对少年)的平均质量浓度,则认为该条轨迹是污染轨迹;反之,则为清洁轨迹。

由于PSCF是一种条件概率,当 n_{ij} 较小时,会有很大的不确定性。为了减小这种不确定性,不同研究者引入了权重函数 W_{ij} (Cheng et al.,1993;Hope et al.,1995;Polissar et al.,1999,2001;Xu and Akhtar,2010),当某一网格中的 n_{ij} 小于研究区内每个网格内平均轨迹端点数的3倍时(Polissar et al.,2001),就要使用 W_{ij} 来减小PSCF的不确定性。

本文选择包含95%以上的轨迹所覆盖的地理区域为研究区。以沙尘相对多年为例,研究区的范围为(55~125°E,25~65°N),同时把该区域分成

11 200个0.5°×0.5°的小网格。该区域内的所有轨迹点数是142 784个,因此每个网格点平均的轨迹端点数大约是13个,即当 n_{ij} 约小于40的时候,就要通过使用权重函数来减小PSCF的不确定性。本文参考Y. Q. Wang et al.(2006),使用以下权重函数

$$W_{ij} = \begin{cases} 1.00, & 40 < n_{ij}; \\ 0.70, & 10 < n_{ij} \leq 40; \\ 0.42, & 5 < n_{ij} \leq 10; \\ 0.17, & n_{ij} \leq 5. \end{cases} \quad (2)$$

2.3 浓度权重轨迹分析法

PSCF反映的是一个网格中污染轨迹所占的比例,不能反映污染轨迹的污染程度,即轨迹所对应的PM₁₀质量浓度比平均质量浓度究竟大多少。因此PSCF只能给出潜在源区的分布,不能给出不同源区贡献的相对大小。为了弥补PSCF的这个不足,本文用浓度权重轨迹分析法(concentration-weighted trajectory method, CWT)(Seibert et al.,1994;Hsu et al.,2003),计算了轨迹的权重浓度,以反映不同轨迹的污染程度。在CWT分析法中,每个网格点都有一个权重浓度,它可以通过计算经过该网格的所有轨迹所对应的PM₁₀质量浓度的平均值来实现。计算方法如下

$$C_{ij} = \frac{1}{M} \sum_{l=1}^M C_{lrijl} \tau_{ijl} \quad (3)$$

其中: C_{ij} 是网格*ij*上的平均权重浓度; l 是轨迹; C_l 是轨迹*l*经过网格*ij*时对应的兰州市PM₁₀质量浓度; τ_{ijl} 是轨迹*l*在网格*ij*停留的时间(Seibert et al.,1994;Stohl,1996)。在PSCF分析法中所用的权重函数 W_{ij} 也适用于CWT分析法,以减少 n_{ij} 值较小时所引起的不确定性。当 C_{ij} 值较大时,说明经过网格*ij*的空气团会造成兰州市较高的PM₁₀质量浓度,该网格所对应的区域是对兰州市高质量浓度PM₁₀污染有贡献的主要外来源区,经过该网格的轨迹就是对兰州市PM₁₀污染有贡献的主要输送路径。

3 结果与讨论

3.1 兰州市春季PM₁₀污染特征

根据沙尘暴数据资料,统计得到了2001—2008年兰州市春季沙尘天气发生次数(表1),并按这8 a春季沙尘天气发生次数,将其分为沙尘天气相对多年(2001、2002、2004和2006年)和相对少年(2003、2005、2007和2008年)。

表 1 2001—2008 年兰州市春季沙尘天气发生次数

Table 1 Number of dust days in spring during 2001—2008

年份	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
发生次数	15	9	6	11	2	12	5	4

兰州市沙尘天气相对多年春季 PM_{10} 平均质量浓度为 $238.8 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (图 1), 其中超过平均值的天数达 138 d; 沙尘天气相对少年春季 PM_{10} 平均质量浓度为 $157.2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (图 2), 高于平均浓度的有 123 d。沙尘天气相对多年 PM_{10} 平均质量浓度比相对少年高出 34%。沙尘天气相对多年和相对少年日均 PM_{10} 质量浓度都超过了国家二级标准限值 $150 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 超标率分别为 67.7% 和 38.0%, 其中分别有 13.9% (51 d) 和 3.5% (13 d) 为 V 级重污染。

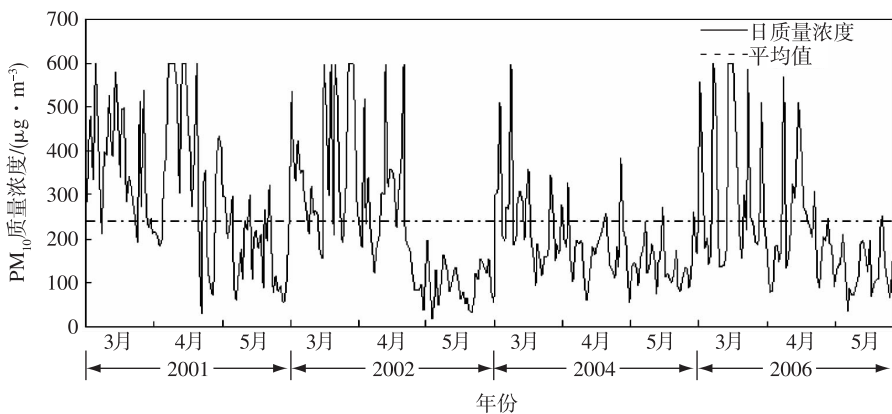
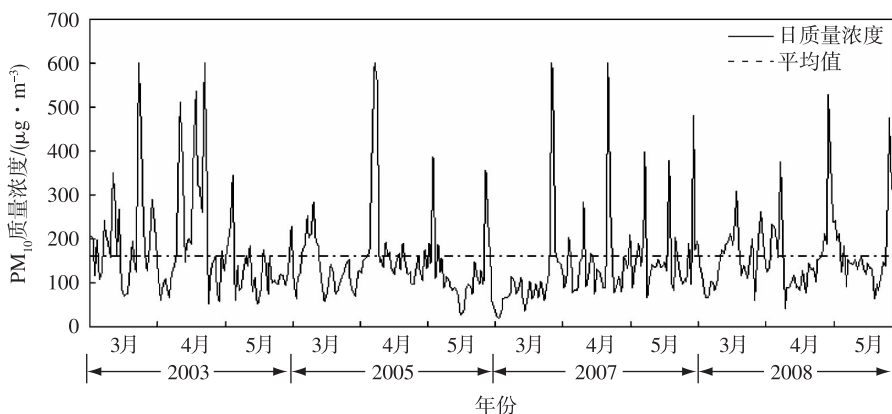
3.2 平均后向轨迹特征

3.2.1 平均后向轨迹输送路径特征

沙尘天气相对多年和相对少年分别得到 7 组

(聚类 1—7) 和 6 组 (聚类 1—3, 5—7) 不同的后向轨迹。各组的平均轨迹分布如图 3 所示。轨迹的路线和方向表示气团在到达受点 (兰州市) 以前所经过的地区, 根据其长短可以判断气团移动的速度, 长的轨迹对应快速移动的气团, 短的轨迹对应移动缓慢的气团。西和西北方向的轨迹比其他方向的轨迹长, 表明来自西方和西北方向的气团移动都比较快。

沙尘天气相对多年的 7 组轨迹中, 与聚类 1 对应的气团来源于青藏高原北部腹地, 青海和新疆交界处的沙漠戈壁地带, 这组轨迹沿东南方向移动, 途经柴达木盆地, 在甘肃与四川交界处向北到达兰州。聚类 2 和聚类 3 对应的气团均来自新疆境内。聚类 2 对应的气团来自新疆南部的塔里木盆地, 途径塔克拉玛干沙漠腹地, 向东经青海北部的柴达木盆地到达兰州。聚类 3 对应的气团来自新疆北部的准噶尔盆地, 这组气团向东南方向移动, 进入甘肃境内后, 沿着河西走廊, 到达兰州。聚类 4 和 5 对应的气

图 1 兰州市春季沙尘天气相对多年 PM_{10} 质量浓度分布Fig. 1 Daily mean PM_{10} mass concentrations in Lanzhou in spring of 2001, 2002, 2004 and 2006图 2 兰州市春季沙尘天气相对少年 PM_{10} 质量浓度分布Fig. 2 Daily mean PM_{10} mass concentrations in Lanzhou in spring of 2003, 2005, 2007 and 2008

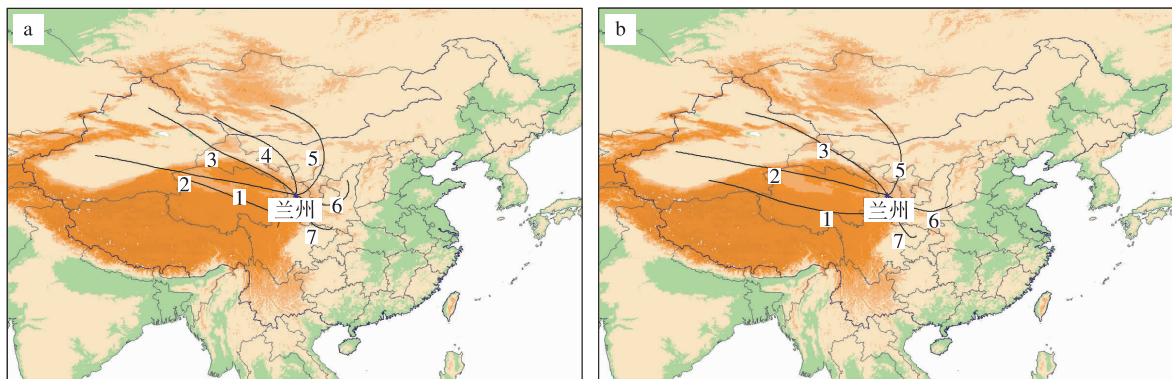


图3 兰州市春季后向轨迹聚类分析 a. 沙尘天气相对多年;b. 沙尘天气相对少年

Fig. 3 Cluster-mean back-trajectories arriving in Lanzhou in spring of (a) 2001, 2002, 2004 and 2006, and (b) 2003, 2005, 2007 and 2008

团来自蒙古国境内的沙漠戈壁地带,前者自蒙古国的西南部,向东南移动经内蒙古西部巴丹吉林沙漠,到达兰州;后者自蒙古国中部,向南移动到内蒙古中部地区,经腾格里沙漠后转向西南,最后到达兰州。聚类6和7对应的气团分别来自黄土高原地区,以及四川、陕西、甘肃交界地带。

为了便于与沙尘天气相对多年的聚类分析结果进行对比,沙尘天气相对少年各轨迹组的聚类标号取与沙尘天气相对多年气团来源与输送路径相似的轨迹组的聚类标号。沙尘天气相对少年的6组轨迹与沙尘天气相对多年相比少了聚类4。沙尘天气相对少年和相对多年相似的输送路径在总轨迹中所占比例、污染轨迹在各组中所占比例以及各组所对应的兰州市 PM₁₀ 质量浓度都存在明显的差别(表2、3)。在沙尘天气相对少年,聚类1对应的气团来自塔里木盆地南缘,经新疆和青海、西藏交界地带向东输送,横跨青海省南部后转向北到达兰州。虽然相对少年聚类3对应的气团也来自新疆北部的准格尔盆地,但该组轨迹在甘肃省境内的输送路径有些差异,途经甘肃与内蒙古交界的沙漠戈壁地带后到达兰州。聚类5对应的气团,在沙尘天气相对少年没有经过宁夏境内,而是从内蒙古进入甘肃后到达兰州。与沙尘天气相对多年相比,聚类6在相对少年对应的轨迹移动路径偏南。

3.2.2 污染轨迹特征

根据3.1节给出的沙尘天气相对多年和相对少年 PM₁₀ 的平均质量浓度以及每条后向轨迹所对应的兰州市 PM₁₀ 日均质量浓度,将后向轨迹划分为清洁轨迹和污染轨迹。当某条后向轨迹所对应的兰州市 PM₁₀ 日均质量浓度小于平均质量浓度时,就将其定义为清洁轨迹;当其对应的兰州市 PM₁₀ 日均质量

浓度大于平均质量浓度时,就将其定义为污染轨迹。表2和表3分别给出了沙尘天气相对多年和相对少年每组聚类轨迹的轨迹数、所占比例及其对应的兰州市 PM₁₀ 日均质量浓度以及每组聚类中污染轨迹数、污染轨迹所占比例及其对应的 PM₁₀ 质量浓度。

从表2可以看出,沙尘天气相对多年每组聚类中轨迹数占总轨迹数的百分比变化幅度较大,从最小的5.9%(聚类1)到最大的33%(聚类2);每组聚类中污染轨迹所占百分比变化也较大,从最小的16.4%(聚类7)到最大的52.7%(聚类2)。与沙尘天气相对多年相比,相对少年变化幅度要小一些,每组聚类中轨迹数占总轨迹数的百分比最小为10.9%(聚类1),最大为23.6%(聚类2),污染轨迹所占百分比最小为20.4%(聚类6),最大为47.8%(聚类1)。

在沙尘天气相对多年,聚类2包含的轨迹数最多,聚类3次之。聚类2和3对应的平均 PM₁₀ 质量浓度分别为 $287.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $275.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,均大于沙尘天气相对多年的平均值($238.8 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)。这两组聚类所包含的污染轨迹最多,占各自组的50%以上,说明聚类2和3对应的气团在输送路径上会携带较多的颗粒物到兰州,造成兰州市春季高质量浓度 PM₁₀ 污染。聚类2和3是沙尘天气相对多年影响兰州市春季 PM₁₀ 污染水平的重要输送路径,其中聚类2对应着沙尘移动的西方路径,是影响兰州市春季 PM₁₀ 质量浓度的主要输送路径。聚类3对应着沙尘移动的西北路径,是影响兰州市春季 PM₁₀ 质量浓度的次要输送路径。聚类1、5、6、7与聚类2和3相比包含的轨迹数量少,对应的兰州市 PM₁₀ 质量浓度也低于沙尘天气相对多年平均值,污染轨迹所占比例也小,是沙尘天气相对多年相对清

表 2 沙尘天气相对多年每组聚类的轨迹数、每组聚类中轨迹占总轨迹百分数及其对应的兰州市日均 PM_{10} 质量浓度Table 2 Number of trajectories, percentage of trajectories and polluted trajectories in each cluster and corresponding daily mean PM_{10} mass concentration in Lanzhou in spring of 2001, 2002, 2004 and 2006

聚类	总轨迹特征			污染轨迹特征		
	轨迹数	占总轨迹百分数/%	PM_{10} 质量浓度/ ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	污染轨迹数	占该组聚类百分数/%	PM_{10} 质量浓度/ ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)
1	87	5.9	218.1	21	24.1	381.0
2	486	33.0	287.7	256	52.7	399.0
3	286	19.4	275.5	148	51.7	402.2
4	190	12.9	213.3	61	32.1	389.6
5	147	10.0	179.9	29	19.7	431.0
6	117	7.9	150.5	11	9.4	362.6
7	159	10.8	184.8	26	16.4	342.5

表 3 沙尘天气相对少年每组聚类的轨迹数、每组聚类中轨迹占总轨迹百分数及其对应的兰州市日均 PM_{10} 质量浓度Table 3 Number of trajectories, percentage of trajectories and polluted trajectories in each cluster and corresponding daily mean PM_{10} mass concentration in Lanzhou in spring of 2003, 2005, 2007 and 2008

聚类	总轨迹特征			污染轨迹特征		
	轨迹数	占总轨迹百分数/%	PM_{10} 质量浓度/ ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	污染轨迹数	占该组聚类百分数/%	PM_{10} 质量浓度/ ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)
1	161	10.9	171.6	77	47.8	235.0
2	348	23.6	177.1	153	44.0	255.8
3	255	17.3	148.9	78	30.6	247.3
5	265	18.0	170.1	88	33.2	312.6
6	162	11.1	126.3	33	20.4	259.6
7	281	19.1	137.3	63	22.4	224.8

洁的气团输送路径。刘晓东等(2004)利用卫星遥感数据分析了我国 29 个大城市春季大气 PM_{10} 质量浓度与塔克拉玛干沙区及其周边地区上空沙尘活动的相关性,结果表明,该区大气沙尘活动的强弱与中国西北地区(西宁、兰州、银川和西安)大气 PM_{10} 含量高低有显著的正相关关系。结合轨迹输送路径及污染轨迹特征,本文的研究结果与之类似。

在沙尘天气相对少年,聚类 2 所包含的轨迹数和污染轨迹数最多,对应的 PM_{10} 平均质量浓度为 $177.1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 大于沙尘天气相对少年的平均值 ($157.2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), 在 348 条轨迹中有 44% 的轨迹所对应的兰州市 PM_{10} 质量浓度值大于平均值, 聚类 2 是沙尘天气相对少年造成兰州市春季 PM_{10} 污染的主要输送路径。从轨迹数量上看, 聚类 3、5、7 所包含的轨迹都大于 250 条, 但从对应的 PM_{10} 质量浓度以及污染轨迹所占比例来看, 聚类 5 是反项于聚类 2 的输送路径, 聚类 3 是第三重要输送路径。聚类 7 所对应的 PM_{10} 质量浓度小于沙尘天气相对少年的平均值, 而且只有 22.4% 的轨迹为污染轨迹, 不是沙尘天气相对少年影响兰州市春季 PM_{10} 质量

浓度的主要输送路径。聚类 1 中虽然有 47.8% 的轨迹所对应的 PM_{10} 质量浓度大于平均值, 但由于其所包含轨迹数占总轨迹数比例小, 因此也不是影响兰州市春季 PM_{10} 质量浓度的主要输送路径。与聚类 2、5、3 相比, 聚类 1、6、7 是沙尘天气相对少年的清洁路径轨迹。

3.3 潜在源区分布及其相对贡献

图 4 给出兰州市春季沙尘天气相对多年和相对少年 PSCF 计算结果。图中颜色越深, 表示 PSCF 值越大, 该网格区域对受点兰州市 PM_{10} 质量浓度影响越大。从图 4a 可见, 沙尘天气相对多年的高 PSCF 区域主要集中在新疆、青海和甘肃三省境内, 即造成兰州市高 PM_{10} 质量浓度的潜在源区在新疆南部的塔里木盆地、东部的吐鲁番盆地、青海北部的柴达木盆地和甘肃的河西走廊。这些潜在源区的气团主要沿着聚类 2 和 3 所在的轨迹通过远距离输送到达兰州。从图 4b 可以清楚地看到, 沙尘天气相对少年的高 PSCF 值主要分布在新疆南部的塔里木盆地、青海境内的柴达木盆地、青海、四川和甘肃交界的草原退化地带以及内蒙古中部和西部的沙漠戈壁, 气团

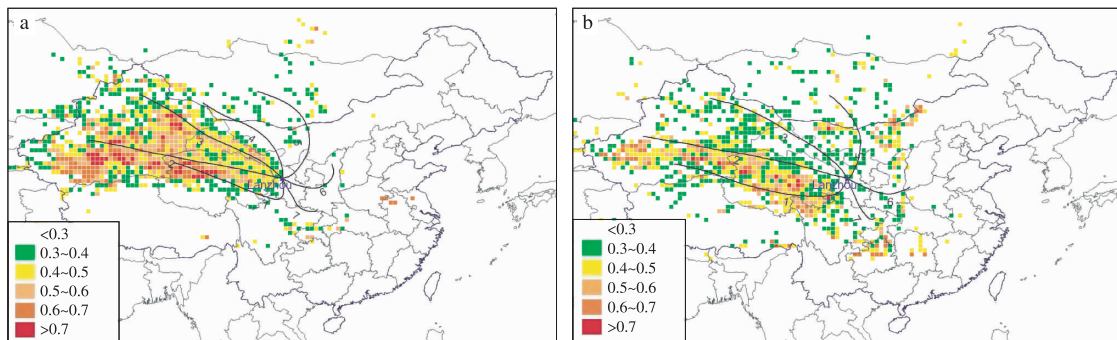


图 4 兰州市春季潜在源贡献因子 (PSCF) 分布 (颜色越深表示潜在源区对受点兰州市 PM₁₀ 质量浓度的影响越大)
a. 沙尘天气相对多年; b. 沙尘天气相对少年

Fig. 4 Contribution of potential source of PM₁₀ in Lanzhou in spring during (a) 2001, 2002, 2004 and 2006, and (b) 2003, 2005, 2007 and 2008 (Darker colors indicate potential sources of greater influence)

携带着这些源区的颗粒物沿着聚类 1、2 和 5 轨迹输送到兰州,影响兰州市 PM₁₀ 质量浓度。沙尘天气相对少年的 PSCF 最大值比沙尘天气相对多年小 3% 左右,出现大值的网格数量占相对多年的 1/4,沙尘源区对兰州市 PM₁₀ 的影响较沙尘天气相对多年要小得多。

浓度权重轨迹 CWT 分布 (图 5) 给出了潜在源区对受点兰州市 PM₁₀ 质量浓度贡献的大小。在沙尘天气相对多年 (图 5a),新疆的塔里木盆地和吐鲁番盆地,青海、新疆和甘肃交界的沙漠地区,青海的柴达木盆地以及甘肃河西走廊对兰州市日均 PM₁₀ 质量浓度贡献在 250 μg · m⁻³ 以上;在沙尘天气相对少年 (图 5b),新疆南部塔克拉玛干沙漠、新疆东部戈壁沙漠、内蒙古中部和西部的戈壁沙漠以及青海柴达木盆地对兰州市日均 PM₁₀ 质量浓度贡献在 150 ~ 200 μg · m⁻³。此外,在沙尘天气相对多年和相对少年,都有极少部分戈壁沙漠地区的贡献值在

250 μg · m⁻³, 这些地区位于内蒙古以及蒙古中部。

以上两种确定潜在源区的方法得到的结果不尽相同。与 PSCF 方法相比, CWT 方法得到的潜在源区更加详尽,而且可以清晰地看到不同贡献程度源区的分布情况。对于沙尘天气相对多年,除了对兰州市 PM₁₀ 质量浓度贡献在 250 μg · m⁻³ 以上的强潜在源区,还有 PM₁₀ 质量浓度贡献在 150 ~ 250 μg · m⁻³ 的中等强度潜在源区,它主要分布在强潜在源区的周边地区。与 PSCF 方法相比, CWT 方法得到的贡献源区比 PSCF 方法多了内蒙古境内的沙漠戈壁源区、黄土高原源区和四川东部以及四川与甘肃、陕西交界地带源区。其中前两个源区对兰州的影响相对小一些,不是主要的潜在源区,第三个源区也称为南方源区 (Y. Q. Wang et al., 2006), 由于该区没有沙尘源地,且在输送路径上有较好的地表植被覆盖和较多的降水影响,对兰州的贡献较弱,所以不是主要的潜在源区,但该区域 PM₁₀ 质量浓度贡

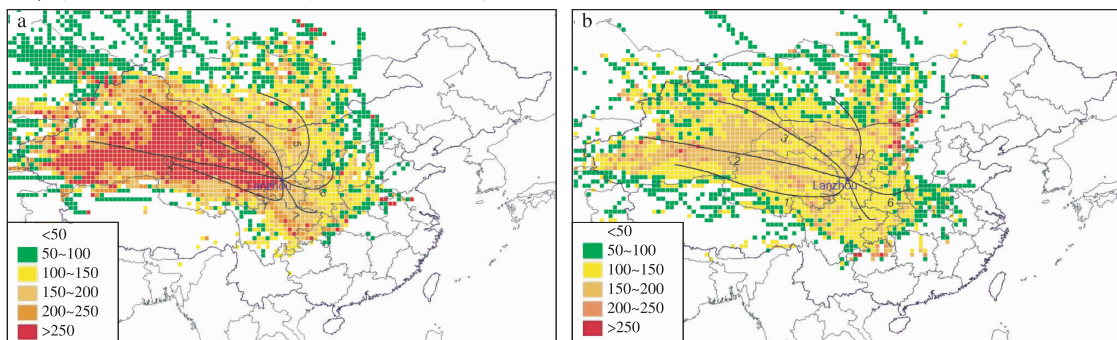


图 5 兰州市春季浓度权重轨迹 (CWT) 分布 (颜色越深代表潜在源区的贡献越大) a. 沙尘天气相对多年; b. 沙尘天气相对少年

Fig. 5 Distribution of concentration-weighted trajectory method analysis in Lanzhou in spring during (a) 2001, 2002, 2004 and 2006, and (b) 2003, 2005, 2007 and 2008 (Darker colors indicate potential sources of greater influence)

献在 $150 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上,主要是人为源的贡献。同时黄土高原源区与南方源区,一年中大部分时间都处于兰州市的下风区,也无法将这两个区域认为是兰州市 PM_{10} 的外来潜在源区。对于沙尘天气相对少年,也有类似的分布特征,分布在最强贡献源区周边的中等强度潜在源区的质量浓度贡献在 $100 \sim 150 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,相对最强源区而言,中等强度的源区分布面积要广泛得多。与 PSCF 分析结果相比,最强沙尘源区增加了腾格里沙漠源区。与图 4b 中 PSCF 结果相比,图 5b 最大的特征是中等强度的源区大大增多,包括古尔班通古特沙漠边缘地区、甘肃西北部地区和青海北部地区以及内蒙古境内的沙漠戈壁地区。从图 5 还可以看出,沙尘天气相对多年最强外来沙尘源区与相对少年相比不仅贡献大很多,而且分布范围也广,中等强度源区分布面积与沙尘天气相对少年相比要小一些。

简而言之,影响兰州市春季大气 PM_{10} 质量浓度的潜在源区分布在新疆塔里木盆地、吐鲁番盆地、青海柴达木盆地、甘肃河西走廊、内蒙古中部和西部的沙漠戈壁地区,这些潜在源区可以概括为西方源区、西北源区(主要是塔克拉玛干沙漠及其周边地区)和北方源区(主要是戈壁沙漠地区)。

西方源区主要分布在新疆塔里木盆地以及周边地区。地面天气环流分析发现,塔克拉玛干沙漠地区的大气沙尘主要是通过青藏高原东北缘的绕流以及翻越高原东北部柴达木盆地的偏西风输送到西北部地区,进而影响到当地空气质量的(刘晓东等,2004)。西北源区主要分布在吐鲁番盆地,主要也是通过偏西风进行输送。北方源区主要分布在戈壁沙漠地区。该区高空受西伯利亚冷空气、锋区和急流的影响,地面受锋面系统和蒙古高压的控制,为该区沙尘天气频繁发生提供了有利条件,在西北风的作用下向东南方向输送(Sun et al.,2001)。潜在源区上空沙尘活动的强弱跟兰州大气 PM_{10} 的输送强弱密切相关。有关文献表明东亚大槽向西移动,随之气压场出现西高东低的压力偶极子,增强了西北气流,大气变得异常干燥,最终导致沙尘天气频繁发生(Yu et al.,2010),反之,沙尘天气减少。从行星环流上来说,带状波结构的改变(增多)会导致沙尘天气频繁发生,这一改变需要考虑气候因子的影响(Gong et al.,2007)。对于大气环流结构影响大气 PM_{10} 的输送机制的研究,科研工作者大多集中在个例分析,目前许多结论仍然具有争议,需要进一步的分析 and 研究。

4 结论

本文利用空气质点后向轨迹聚类分析,潜在源贡献因子(PSCF)和浓度权重轨迹(CWT)方法,结合兰州市逐日 PM_{10} 平均质量浓度,研究了不同输送轨迹类型与兰州市 PM_{10} 质量浓度之间的关系,得到了兰州市春季气团主要输送轨迹以及影响兰州市春季大气 PM_{10} 质量浓度的潜在源区及其贡献大小。结果表明:

1)在沙尘天气相对多年,西方路径和西北路径发生的比例最高,对兰州市春季 PM_{10} 质量浓度影响最大;在沙尘天气相对少年,西方路径发生的比例最高,对兰州市春季 PM_{10} 质量浓度影响较大。西方路径与西北路径对应的潜在源区分别为西方源区和西北源区。

2)对于沙尘天气相对多年,影响兰州市春季大气 PM_{10} 质量浓度的西方源区和西北源区主要分布在新疆塔里木盆地和吐鲁番盆地、新疆、青海和甘肃交界地带以及甘肃河西走廊;对于沙尘天气相对少年,其西方源区主要分布在新疆塔里木盆地和吐鲁番盆地和新疆、青海、甘肃交界地带。

3)对于沙尘天气相对多年和相对少年,还存在着不同强度的中等贡献源区,包括北方源区、南方源区和黄土高原源区,其中北方源区主要分布在内蒙古境内的沙漠戈壁地区,南方源区主要分布在四川、甘肃、陕西交界地带,黄土高原源区主要分布在陕西中部地区,前者是潜在源区,后两者是非潜在源区。总体来说,影响兰州市春季大气 PM_{10} 质量浓度的潜在源区有 3 个,它们分别是西方源区、西北源区、北方源区。虽然沙尘天气相对多年和相对少年存在着相似的潜在源区,但是其源区所对应的输送路径存在差别,不同源区对兰州市春季大气 PM_{10} 质量浓度的贡献也存在差异。

需要强调的是,本文主要针对 2001—2008 年兰州市春季的情况进行了研究,对由沙尘天气携带的外来颗粒物引起的高质量浓度 PM_{10} 所造成的兰州市区空气质量降低有普遍适用性,但不适用于兰州市其他季节。在以后的工作中,将对兰州市其他季节尤其是冬季的潜在源区分布和输送路径进行研究,结合个例分析以及高精度数值模拟,为改善兰州市空气质量和周边地区生态环境提供更加详尽的科学依据。

参考文献:

- 安兴琴,左洪超,吕世华,等. 2005. Model-3 空气质量模式对兰州市污染物输送的模拟[J]. 高原气象,24(5):748-756.
- 陈玉春,安兴琴,吕世华. 2001. 改变兰州市地表植被对大气污染影响防治对策[J]. 高原气象,20(增刊):126-131.
- 董安祥,白虎志,俞亚勋,等. 2003. 影响河西走廊春季沙尘暴的物理因素初步分析[J]. 甘肃科学学报,15(3):25-30.
- 胡敏,何凌燕,黄晓峰,等. 2009. 北京大气细粒子和超细粒子理化特征、来源及其形成机制[M]. 北京:科学出版社.
- 胡隐樵,张强. 1999. 兰州山谷大气污染的物理机制与防治对策[J]. 中国环境科学,19(2):119-122.
- 黄健,颜鹏,Draxler R. 2002. 利用 HYSPLIT-4 模式分析珠海地面 SO₂ 浓度的变化规律[J]. 热带气象学报,18(4):407-413.
- 李青青,陆晨,刘彦,等. 1999. 北京地区呼吸道疾病与气象条件关系的分析[J]. 气象,25(3):8-12.
- 刘晓东,田良,张小曳. 2004. 塔克拉玛干沙尘活动对下游大气 PM₁₀ 浓度的影响[J]. 中国环境科学,24(5):528-532.
- 戚丹青,谭季青,孙长. 2006. 一次强沙尘暴长距离输送的数值模拟研究[J]. 浙江大学学报:理学版,33(2):216-222.
- 任永建,周锁铨,石顺吉,等. 2009. 2005 年南京市 PM₁₀ 浓度时间序列分析[J]. 气象科学,29(3):375-380.
- 任阵海,高庆先,苏福庆,等. 2003. 北京大气环境的区域特征与沙尘影响[J]. 中国工程科学,5(2):49-56.
- 陶健红,黄玉霞,陆登荣. 2007. 河西走廊沙尘活动对兰州 PM₁₀ 浓度的影响及其评估[J]. 中国沙漠,27(4):672-676.
- 王宝鉴,黄玉霞,王式功,等. 2001. 大气 TSP 含量对兰州市呼吸系统疾病的影响[J]. 高原气象,20(增刊):110-113.
- 王明星,张仁健. 2001. 大气气溶胶研究中的前沿问题[J]. 气候与环境研究,6(1):119-124.
- 王式功,杨民,祈斌,等. 1999a. 甘肃河西走廊对兰州市空气污染的影响[J]. 中国沙漠,19(4):354-358.
- 王式功,张镭,陈长和,等. 1999b. 兰州地区大气环境研究的回顾和展望[J]. 兰州大学学报:自然科学版,35(3):189-201.
- 徐祥德,周丽,周秀骥,等. 2004. 城市环境大气重污染过程周边源影响域[J]. 中国科学 D 辑,34(10):958-966.
- 颜鹏,黄健,Draxler R. 2005. 北京地区 SO₂ 污染的长期模拟及不同类型排放源影响的计算与评价[J]. 中国科学 D 辑,35(增刊):167-176.
- 张强. 2003. 兰州大气污染物浓度与局地气候环境因子的关系[J]. 兰州大学学报:自然科学版,39(1):99-106.
- 张强,吕世华. 2001. 兰州市大气污染物越山输送与地形和小气候特征的关系[J]. 高原气象,20(增刊):118-125.
- 周玉素,尚可政,王式功,等. 2001. 兰州市主要颗粒污染物(PM₁₀)重污染的天气形势分析[J]. 高原气象,20(增刊):45-50.
- Ashbaugh L L, Malm W C, Sadeh W Z. 1985. A residence time probability analysis of sulfur concentrations at grand Canyon National Park[J]. Atmos Environ,19:1263-1270.
- Cheng M D, Lin C J. 2001. Receptor modeling for smoke of 1998 biomass burning in Central America [J]. J Geophys Res, 106: 22871-22886.
- Cheng M D, Hopke P K, Barrie L, et al. 1993. Qualitative determination of source regions of aerosol in Canada high Arctic[J]. Environ Sci Technol,27:2063-2071.
- Draxler R P, Hess G D. 1998. An overview of the HYSPLIT-4 modeling system for trajectories, dispersion, and deposition [J]. Aust Meteor Mag,47:295-308.
- Duce R A, Unni C K, Ray B J, et al. 1980. Long-range atmospheric transport of soil dust from Asia to the tropical North Pacific: Temporal variability [J]. Science,209:1522-1524.
- Gao N, Cheng M D, Hopke P K. 1993. Potential source contribution function analysis and source apportionment of sulfur species measured at Rubidoux, CA during the Southern California air quality study, 1987 [J]. Analytica Chimica Acta,227:369-380.
- Gong D Y, Mao R, Shi P J, et al. 2007. Correlation between East Asian dust storm frequency and PNA [J]. Geophysical Research Letters, 34, L14710. doi:10.1029/2007GL029944.
- Hope P K, Barrie L A, Li S M, et al. 1995. Possible sources and preferred pathways for biogenic and non-sea-salt sulfur for the high Arctic [J]. J Geophys Res,100(D8):16595-16603.
- Hsu Y K, Holsen T M, Hopke P K. 2003. Comparison of hybrid receptor models to locate PCB sources in Chicago [J]. Atmos Environ,37:545-562.
- Husur R B, Tratt D M, Schichtel B A, et al. 2001. Asian dust events of April 1998 [J]. J Geophys Res,106:18317-18330.
- Polissar A V, Hopke P K, Paatero P, et al. 1999. The aerosol at Barrow, Alaska: Long-term trends and source locations [J]. Atmos Environ, 33:2441-2458.
- Polissar A V, Hopke P K, Harris J M. 2001. Source regions for atmospheric aerosol measured at Barrow, Alaska [J]. Environ Sci Technol,35:4214-4226.
- Salvador P, Artinano B, Alonso D G, et al. 2004. Identification and characterisation of sources of PM₁₀ in Madrid (Spain) by statistical methods [J]. Atmos Environ,38:435-447.
- Seibert P, Kromp-Kolb H, Baltensperger U, et al. 1994. Trajectory analysis of aerosol measurements at high alpine sites [C]//Borrell P M, Borrell P, Cvitas T, et al. Transport and transformation of pollutants in the troposphere. Den Haag: Academic Publishing:689-693.
- Sirois A, Bottenheim J W. 1995. Use of backward trajectories to interpret the 5-year record of PAN and O₃ ambient air concentrations at Kejimikujik National Park, Nova Scotia [J]. J Geophys Res, 100: 2867-2881
- Stohl A. 1996. Trajectory statistics—a new method to establish source-receptor relationships of air pollutants and its application to the transport of particulate sulfate in Europe [J]. Atmos Environ,30:579-587.
- Stohl A, Kromp-Kolb H. 1994. Origin of ozone in Vienna and surroundings, Austria [J]. Atmos Environ,28:1255-1266.
- Sun J M, Zhang M Y, Liu T S. 2001. Spatial and temporal characteristics of dust storms in China and its surrounding regions, 1960—1999: Relations to source area and climate [J]. J Geophys Res, 106: 10325-10334.
- Tratt D M, Frouin R J, Westphal D L. 2001. April 1998 Asia dust event: A southern California perspective [J]. J Geophys Res, 106: 18731-18739.

- Uematsu M, Duce R A, Prospero J M, et al. 1983. Transport of mineral aerosol from Asia over the North Pacific Ocean [J]. *J Geophys Res*, 88:5342-5352.
- Wang S G, Wang J Y, Zhou Z J, et al. 2005. Regional characteristics of three kinds of dust storm events in China [J]. *Atmos Environ*, 39(3):509-520.
- Wang S G, Yuan W, Shang K Z. 2006. The impacts of different kinds of dust events on PM₁₀ pollution in northern China [J]. *Atmos Environ*, 40(40):7975-7982.
- Wang Y Q, Zhang X Y, Arimoto R. 2006. The contribution from distant dust sources to the atmospheric particulate matter loading at Xi'an, China during spring [J]. *Science of the Total Environment*, 368:875-883.
- Xu X, Akhtar U S. 2010. Identification of potential regional sources of atmospheric total gaseous mercury in Windsor, Ontario, Canada using hybrid receptor modeling [J]. *Atmos Chem Phys*, 10:7073-7083.
- Yu J Y, Wang Y W, Chang C W. 2010. Asian dust storm activity and its association with atmospheric circulation from 1995 to 2006 [J]. *TAO*, 21(2):375-391.
- Zeng Y, Hopke P K. 1989. A study of the sources of acid precipitation in Ontario, Canada [J]. *Atmos Environ*, 23:1499-1509.
- Zhang X Y, Gong S L, Shen Z X, et al. 2003. Characterization of soil dust aerosol in China and its transport/distribution during 2001 ACE-Asia, 1. Network observations [J]. *J Geophys Res*, 108(D9), 4261. doi:10.1029/2002JD002632.

(责任编辑:刘菲)