

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第2期

Vol.36 No.2

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

霾与非霾期间汞在不同粒径颗粒物上的分布特征	朱琮宇,程金平,魏雨晴,薄丹丹,陈筱佳,江璇,王文华(373)
大气传输路径对上甸子本底站气溶胶光学特性的影响	蒲维维,石雪峰,马志强,赵秀娟,张小玲,徐晓峰(379)
近3年太原市夏季降水的化学特征研究	郭晓方,崔阳,王开扬,何秋生,王新明(388)
太原市PM _{2.5} 中有机碳和元素碳的污染特征	刘珊,彭林,温彦平,白慧玲,刘凤娟,史美鲜,李丽娟(396)
青海省西宁市和天峻县大气颗粒物中有机氯农药和类二噁英多氯联苯的水平与分布	李秋旭,何畅,马召辉,马丽花,扎西卓玛,王英,金军(402)
北京10个常绿树种颗粒物吸附能力研究	王兵,张维康,牛香,王晓燕(408)
人工湿地空气微生物群落碳源代谢特征	宋志文,王琳,徐爱玲,吴等等,夏岩(415)
春季融雪补给后巩乃斯河水物理化学性质空间分布特征研究	刘翔,郭玲鹏,张飞云,马杰,牟书勇,赵鑫,李兰海(421)
青藏高原湖泊小流域水体离子组成特征及来源分析	李鹤,李军,刘小龙,杨曦,张伟,王洁,牛颖权(430)
亚热带深水水库——龙滩水库季节性分层与富营养化特征分析	张垒,李秋华,黄国佳,欧腾,李钊,吴迪,周黔兰,高廷进(438)
长江河口水库沉积物磷形态、吸附和释放特性	金晓丹,吴昊,陈志明,宋红军,何义亮(448)
黄河口溶解无机碳时空分布特征及影响因素研究	郭兴森,吕迎春,孙志高,王传远,赵全升(457)
苕溪干流悬浮物和沉积物的磷形态分布及成因分析	陈海龙,袁旭音,王欢,李正阳,许海燕(464)
滇池表层沉积物氮污染特征及其潜在矿化能力	孟亚媛,王圣瑞,焦立新,刘文斌,肖焱波,祖维美,徐天敏,丁帅,周童(471)
城郊排水沟渠溶质传输的暂态存储影响及参数灵敏性	李如忠,钱靖,董玉红,唐文坤,杨继伟(481)
艾比湖表层沉积物重金属的来源、污染和潜在生态风险研究	张兆永,吉力力·阿不都外力,姜逢清(490)
工矿业绿洲城郊排污渠沉积物重金属的形态分布规律及风险评价	臧飞,王胜利,南忠仁,王兆炜,任业萌,王德鹏,廖琴,周婷(497)
山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价	戴彬,吕建树,战金成,张祖陆,刘洋,周汝佳(507)
UV协同ClO ₂ 去除三氯生及其降解产物的研究	李玉瑛,何文龙,李青松,金伟伟,陈国元,李国新(516)
氯化铁絮凝-直接过滤工艺对地下水中As(V)的去除机制研究	康英,段晋明,景传勇(523)
负载纳米零价铁铜藻基活性炭的制备及其去除水中Cr(VI)的研究	曾淦宁,武晓,郑林,伍希,屠美玲,王铁杆,艾宁(530)
磁性石墨烯吸附水中Cr(VI)研究	刘伟,杨琦,李博,陈海,聂兰玉(537)
TiO ₂ @酵母复合微球固定床吸附荧光增白剂-VBL的研究	王菲,张凯强,白波,王洪伦,索有瑞(545)
MnO ₂ /CFP复合电极的制备及电吸附Pb ²⁺ 特性的研究	刘方园,胡承志,李永峰,梁乾伟(552)
吸附相反应技术制备微弱光响应的多组分掺杂TiO ₂ 催化剂	王挺,祝轶琛,孙志轩,吴礼光(559)
掺铁TiO ₂ 纳米管阵列模拟太阳光光电催化降解双酚A的研究	项国梁,喻泽斌,陈颖,徐天佐,彭振波,刘钰鑫(568)
天然矿物负载Fe/Co催化H ₂ O ₂ 氧化降解阳离子红3R	马楠,刘华波,谢鑫源(576)
臭氧微气泡处理酸性大红3R废水特性研究	张静,杜亚威,刘晓静,周玉文,刘春,杨景亮,张磊(584)
碳源类型、温度及电子受体对生物除磷的影响	韩芸,许松,董涛,王斌帆,王显耀,彭党聪(590)
低温低溶解氧EBPR系统的启动、稳定运行及工艺失效问题研究	马娟,李璐,俞小军,魏雪芬,刘娟丽(597)
O池溶解氧水平对石化废水A/O工艺污染物去除效果和污泥微生物群落的影响	丁鹏元,初里冰,张楠,王星,王建龙(604)
改善污泥脱水性能的丝状真菌的分离及其促进污泥脱水的机制初探	周雨璐,付豪逸,范先锋,王振宇,郑冠宇(612)
热碱处理对污水处理厂污泥特性的影响研究	杨世东,陈霞,刘操,肖本益(619)
不同退化程度羊草草原碳收支对模拟氮沉降变化的响应	齐玉春,彭琴,董云社,肖胜生,贾军强,郭树芳,贺云龙,闫钟清,王丽芹(625)
地表臭氧浓度升高对旱作农田N ₂ O排放的影响	吴杨周,胡正华,李岑子,陈书涛,谢燕,肖启涛(636)
亚热带次生林不同土壤呼吸组分的多年观测研究	刘义凡,陈书涛,胡正华,沈小帅,张旭(644)
川中丘陵县域土壤氮素空间分布特征及其影响因素	罗由林,李启权,王昌全,李冰,张新,冯文颖,翁倩,吴冕(652)
黄土丘陵区土地利用变化对深层土壤活性碳组分的影响	张帅,许明祥,张亚锋,王超华,陈盖(661)
汶川地震灾区不同气候区土壤微生物群落碳源代谢多样性	张广帅,林勇明,马瑞丰,邓浩俊,杜锟,吴承祯,洪伟(669)
土壤电动修复的电极空间构型优化研究	刘芳,付融冰,徐珍(678)
有机氯农药污染场地挖掘过程中污染物的分布及健康风险	张石磊,薛南冬,杨兵,李发生,陈宣宇,刘博,孟磊(686)
水稻不同生育期根际及非根际土壤砷形态迁移转化规律	杨文骏,王英杰,周航,易开心,曾敏,彭佩钦,廖柏寒(694)
植物根系体外溶液提取方法研究:以多环芳烃为例	朱满党,都江雪,乐乐,李金凤,杨青青,陆守昆,占新华(700)
垂序商陆叶细胞壁结合锰机制研究	徐向华,刘翠英,李平,郎漫,赵小艳,杨建军,官敏(706)
1株筛自柴油污染土壤的铜绿假单胞菌对萘的降解特性研究	刘文超,吴彬彬,李晓森,卢滇楠,刘永民(712)
CdSe/ZnS量子点对斑马鱼胚胎发育的毒性效应	陈慕飞,黄承志,蒲德永,郑朝依,袁开米,金星星,张耀光,金丽(719)
锯齿新米虾对Cu ²⁺ 和毒死蜱毒性的生理响应	李典宝,张玮,王丽卿,张瑞雷,季高华(727)
同步衍生超声乳化微萃取气相色谱法测定环境水样中的苯胺类化合物	田立勋,戴之希,王国栋,翁焕新(736)
热水环境中Na ⁺ 活化斜发沸石吸附钙离子除硬过程研究	张硕,王栋,陈远超,张兴文,陈贵军(744)
区域经济-污染-环境三维评价模型的构建与应用	樊新刚,米文宝,马振宁(751)
《环境科学》征订启事(401)	
《环境科学》征稿简则(437)	
信息(489,522,726,735)	

大气传输路径对上甸子本底站气溶胶光学特性的影响

蒲维维^{1,2}, 石雪峰³, 马志强^{1,2}, 赵秀娟^{1,2*}, 张小玲^{1,2}, 徐晓峰⁴

(1. 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089; 2. 京津冀环境气象预报预警中心, 北京 100089; 3. 中国气象局, 北京 100081; 4. 石景山区气象局, 北京 100043)

摘要: 利用 2005 ~ 2010 年北京上甸子本底站的 $PM_{2.5}$ 浓度、气溶胶散射系数(σ_{sp})的连续观测资料, 结合后向轨迹分析方法, 探讨了不同季节、不同气团传输路径对本底地区气溶胶光学特性的影响。结果表明, 污染物水平不仅与气团来向有关, 也与气团的运动状态有关。偏南气团路径下的 $PM_{2.5}$ 浓度和 σ_{sp} 整体高于偏北气团路径, 同时运动速度较慢、高度较低的气团路径多对应较高的 $PM_{2.5}$ 浓度和 σ_{sp} 。春、夏、秋季来自华北平原地区以及冬季来自华北区域北部的慢速、低气团对上甸子的污染水平有重要贡献。沙尘气溶胶多出现在春季, 平均气溶胶质量散射效率(α_{sp})为 $0.78 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。四季平均人为污染气溶胶的 α_{sp} 为 $4.00 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, 其中冬季最高, 春季最低。对于人为污染气溶胶来说, 春、夏、秋三季的西北偏西路径、偏南路径以及偏北路径中速度较慢的轨迹组均具有较高的 α_{sp} ($> 4.0 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$), 表明这些气团路径受人为排放活动影响较大, 而冬季各路径的 α_{sp} 均较高, 说明冬季区域内人为排放的影响比较一致。春、夏、秋三季中其他偏北的气团路径主要受到人为污染与沙尘气溶胶的共同影响。

关键词: 传输路径; $PM_{2.5}$; 散射系数; 散射效率; 上甸子本底站

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)02-0379-09 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.02.002

Impact of Atmospheric Pollutants Transport Pathways on Aerosol Optical Properties at Shangdianzi Background Station

PU Wei-wei^{1,2}, SHI Xue-feng³, MA Zhi-qiang^{1,2}, ZHAO Xiu-juan^{1,2*}, ZHANG Xiao-ling^{1,2}, XU Xiao-feng⁴

(1. Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089, China; 2. Environmental Meteorology Forecast Center of Beijing-Tianjin-Hebei, Beijing 100089, China; 3. China Meteorological Administration, Beijing 100081, China; 4. Shijingshan District Meteorological Administration, Beijing 100043, China)

Abstract: The impact of transport pathways on aerosol properties at Shangdianzi (SDZ) background station was analyzed using the back trajectory analysis method with the observation of $PM_{2.5}$ concentration and aerosol scattering coefficients (σ_{sp}) during 2005-2010. The results showed that the pollutant level at SDZ was influenced by both the direction and motion state of air masses. The southerly transport pathways of air masses had higher $PM_{2.5}$ concentration and σ_{sp} than those of northerly pathways. The air masses with lower moving speed and altitude generally corresponded to higher $PM_{2.5}$ concentration and σ_{sp} . Air masses originated from the North China Plain in spring, summer and autumn, and air masses from the north of North China region in winter had a significant contribution to $PM_{2.5}$ concentration and σ_{sp} at SDZ. Dust aerosol appeared frequently in spring, and the mean scattering efficiency (α_{sp}) was $0.78 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$. The mean α_{sp} of anthropogenic aerosol of four seasons was $4.00 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ with the highest value in winter and the lowest in spring. The west-northwest, southerly pathways, and the northerly pathways with low moving speed in spring, summer and autumn correspond to higher α_{sp} ($> 4.0 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$). This indicated that these pathways were affected by the emissions from human activities. However, the α_{sp} in winter kept at a high level among all pathways, which suggested that the emission effect was relatively uniform in surrounding regions in winter. The other northerly pathways in spring, summer and autumn were affected by anthropogenic pollutants mixed with dust.

Key words: transport pathway; $PM_{2.5}$; scattering coefficients; scattering efficiency; Shangdianzi background station

北京地区自 20 世纪 90 年代以来,随着能源结构调整以及机动车保有量的迅速增长,导致二次气溶胶污染特征逐渐突出, $PM_{2.5}$ 已成为北京最主要的大气污染物。环境保护局监测数据显示,2013 年北京市 $PM_{2.5}$ 年均浓度达到 $89.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 远远超出《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)中规定的二级浓度限值,说明北京地区大气细颗粒物污染较为严重。近十年来,我国学者针对大气气溶胶开展了

多方面研究,包括气溶胶化学组成^[1~5]、来源解析^[6~9]、气溶胶光学特性^[10~15]、气溶胶质量浓度特征及其与气象条件的关系^[16~18]等。在气溶胶光学

收稿日期: 2014-06-13; 修订日期: 2014-09-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(41305130, 41175014); 城市气象科学研究基金项目(UMRF201206); 北京市科委绿色通道项目(Z131100005613024); 北京市自然科学基金项目(8122022)

作者简介: 蒲维维(1981~),女,硕士研究生,工程师,主要研究方向为大气环境, E-mail: wwp@ium.cn

* 通讯联系人, E-mail: xjzhao@ium.cn

特性的研究方面,目前已有较多关于北京地区的研究结果,这对于了解北京地区大气气溶胶的基本光学特性起到了非常重要的作用.然而这些研究多集中于对北京某些站点(城区、本底站点)或某些天气过程(如雾霾天气、沙尘天气等)的气溶胶光学厚度、散射系数、吸收系数等观测结果的变化特征分析,针对区域输送对北京地区气溶胶光学特性的影响分析还很少.由于不同污染物输送路径下的气团途经区域不同,各路径气团中气溶胶的质量浓度、理化特性存在差别,而这一差别将可能对各路径下的气溶胶光学特性产生影响. Xia 等^[19]针对北京城区的研究表明,来自于北京南部及东部区域的慢速气团往往对应较高的气溶胶光学厚度,而来自于北京西北区域的快速气团则与之相反.这一研究结果能够帮助人们了解不同污染物传输路径对北京城区气溶胶光学特性的影响,但该工作主要是基于遥感探测数据开展的,缺乏对地面观测资料的研究.另一方面,目前国内针对大气传输路径对北京地区的区域本底站点气溶胶光学特性影响的研究还较少,而这对于全面了解大气输送对北京地区气溶胶光学特性的影响是非常必要的,同时对进一步认识本底地区气溶胶光学特性及其环境、气候相应具有重要意义.

本研究利用 2005 ~ 2010 年北京上甸子区域大气本底站的 $PM_{2.5}$ 、散射系数的连续观测资料,结合后向轨迹分析方法,初步揭示不同季节大气传输路径对本底地区气溶胶光学特性的影响.

1 材料与方法

1.1 站点简介

北京上甸子区域大气本底站($40^{\circ}39'N$, $117^{\circ}07'E$, 海拔高度 293.9 m)是世界气象组织区域大气本底观测站之一,也是代表京津冀经济圈区域的大气成分本底国家野外站,该站位于北京市东北部的密云县高岭镇上甸子村,距北京市区直线距离约 100 km. 在上甸子大气本底站方圆 30 km 内无明显人为排放,其污染物变化特征能够反映京津冀区域乃至更大范围区域内大气传输对上甸子的影响.

本研究采用的 $PM_{2.5}$ 浓度数据来自于美国 R&P 公司生产的 1400a TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance) 仪器的观测数据. 该仪器每周检查一次流量和滤膜负载率,当滤膜负载率超过 30% 时则进行更换. 管路、切割头和泵进行定期检查和清洗,同时根据仪器的显示状态,更换气水分离器芯或过滤器. 气溶胶散射系数(σ_{sp})采用澳大

利亚 EcoTech 公司生产的 M9003 浊度计的连续观测数据. 仪器进气口安装 PM_{10} 切割头. 仪器测量波长为 525 nm,测量范围为 $0 \sim 2\,000\,Mm^{-1}$,积分角度为 $0^{\circ} \sim 170^{\circ}$,测量时相对湿度保持在 60% 以下,由仪器自带加热系统对进气管相对湿度进行控制. 该仪器每日自动进行定时零点检查,每周采用厂家推荐的 R134a 标气进行人工跨点检查. 颜鹏等^[20]的研究表明,当湿度超过 60% 以后,气溶胶散射系数亲水增长因子 $f(u)$ 开始增加,而当湿度增加到约 90% 以上时, $f(u)$ 才会出现快速增长. 由于本研究所采用的 M9003 浊度计在测量 σ_{sp} 时,相对湿度保持在 60% 以下,因此可以排除因气溶胶吸湿增长而导致的观测误差.

仪器观测所得的 $PM_{2.5}$ 浓度和 σ_{sp} 均为 5 min 平均值,该值经过质量控制后计算得到小时平均值,本研究中用于计算小时平均值的有效数据样本量不低于 75%.

1.2 后向轨迹计算及聚类分析

采用美国 NOAA 开发的混合单粒子拉格朗日积分传输、扩散模式 HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 模式进行气团后向轨迹计算. 模式计算所用气象资料为美国国家环境预报中心 2005 ~ 2010 年全球再分析气象数据. 计算后向轨迹的起始时间为每日 02:00、08:00、14:00 和 20:00 (北京时),起始高度为 100 m,计算时间为 72 h.

轨迹聚类分析是根据气团水平移动速度和方向对大量轨迹进行分组,分组原则是组间各轨迹间的差异极大,而组内的差异极小. 利用 HYSPLIT 提供的聚类分析工具,将计算得到的轨迹,按照空间总方差(TSV)的大小,确定具有代表性的轨迹组.

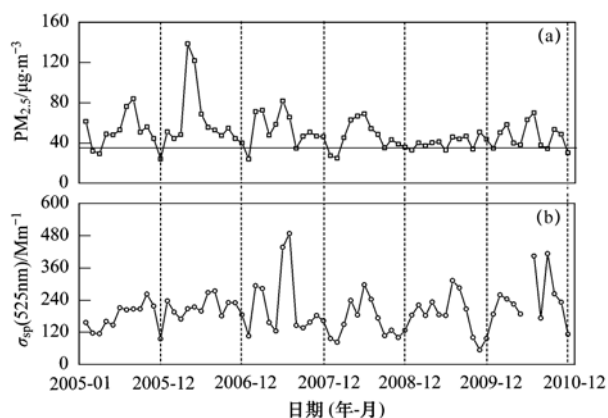
2 结果与讨论

2.1 上甸子本底站气溶胶光学特性的季节变化特征

图 1 给出了上甸子本底站月平均 $PM_{2.5}$ 浓度及 σ_{sp} 变化. 从中可以看出,上甸子本底站大多数月份的 $PM_{2.5}$ 浓度值均高于 $35\,\mu g \cdot m^{-3}$ (GB 3095-2012 中年平均二级浓度限值). 通过统计,2005 ~ 2010 年上甸子 $PM_{2.5}$ 年均值分布在 $39.8 \sim 62.4\,\mu g \cdot m^{-3}$ 范围内,说明上甸子地区已受到细颗粒物污染的影响. 从近 6 年 $PM_{2.5}$ 浓度及 σ_{sp} 的年变化来看, $PM_{2.5}$ 浓度呈现下降的趋势,而 σ_{sp} 则与之相反,呈现略微上升的趋势,这可能与北京及周边地区所排放的细颗粒物中,含有较多具有高散射效率的成分有关.

总体来看, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度春夏两季较高, 冬季最低。从图 1 中可以看出, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最高值出现在 2006 年 4、5 月, 这主要是受春季沙尘天气影响造成的。从天气现象观测资料来看, 2006 年春季, 北京地区共发生 11 次沙尘天气过程, 其中 4 月沙尘天气过程有 5 次。沙尘天气不仅会导致粗颗粒物浓度升高, 同时也会导致大气中细颗粒物浓度增加。在 2006 年 4 月 9 日的沙尘过程中, 上甸子本底站 $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度达到 $393.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 在同年 5 月 17 日的沙尘过程中, $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度达到 $662.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 其值也为近年来 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最高日均值。

上甸子本底站的 σ_{sp} 除 2010 年 6 月因仪器故障导致数据剔除外, 总体季节变化规律与 $\text{PM}_{2.5}$ 相似, 但在某些年份会在秋季出现高值, 如 2005 年的 10、11 月及 2010 年的 9 月。从图 1 中可以看出 2007 年 6、7 月出现较高 σ_{sp} 值, 分别为 436.6 Mm^{-1} 和 487.7 Mm^{-1} , 这可能与该时段频发的雾霾天气有关。2007 年 6、7 月共出现 8 次雾霾天气过程, 而雾霾天气通常伴随着小风、逆温等稳定性气象条件, 易造成污染物的累积。另一方面, 由于夏季雾霾天气的高温、高湿的特点, 有利于加快二次气溶胶的生成, 而二次气溶胶中主要含有硫酸盐、硝酸盐等高散射效率的成分, 从而导致该时期的 σ_{sp} 升高。



图(a)中横线为 GB 3095-2012 中, 2012 年 $\text{PM}_{2.5}$ 的年平均二级浓度限值 $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

图 1 2005 ~ 2010 年上甸子本底站 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度及 σ_{sp} 月变化

Fig. 1 Monthly variation of $\text{PM}_{2.5}$ concentrations and σ_{sp} at Shangdianzi background station during 2005-2010

2.2 影响上甸子的主要气团路径

通过对上甸子本底站的气团进行后向轨迹计算和聚类分析, 得到在不同季节的主要气流路径。各季节各组平均轨迹的分布如图 2 所示。从中可看出, 春(3 ~ 5 月)、夏(6 ~ 8 月)、秋(9 ~ 11 月)、冬(12 月

~ 次年 1 月) 四季分别得到 5、7、6、4 组不同的后向轨迹。从各季节各组后向轨迹的比例来看, 春季约有 70% 的气团来自西北方向, 30% 的气团来自东南方向。北京夏季盛行偏南风, 来自北京东南方向的气流比例较春季明显增多, 约占 60%; 来自西北和东北方向的气流大约 40% 左右。秋季, 气流的主要传输路径从东南方向又转变为西北方向, 来自西北及西南方向的气团所占比例分别为 70%、30% 左右。冬季, 由于受到蒙古冷高压的控制, 北京地区盛行北风气团, 气团路径基本为西北方向。

轨迹的长短可以判断气团的移动速度, 长的轨迹表示气团的移动速度较快, 短的轨迹则表示气团移动速度缓慢。从图 2 中还可看出, 在同一季节同一方向可能因为气团移动速度的快慢存在多个轨迹组。总体而言, 4 个季节的西北方向轨迹较偏南方向的气团轨迹长, 表明来自西北方向的气团移动速度比较快。

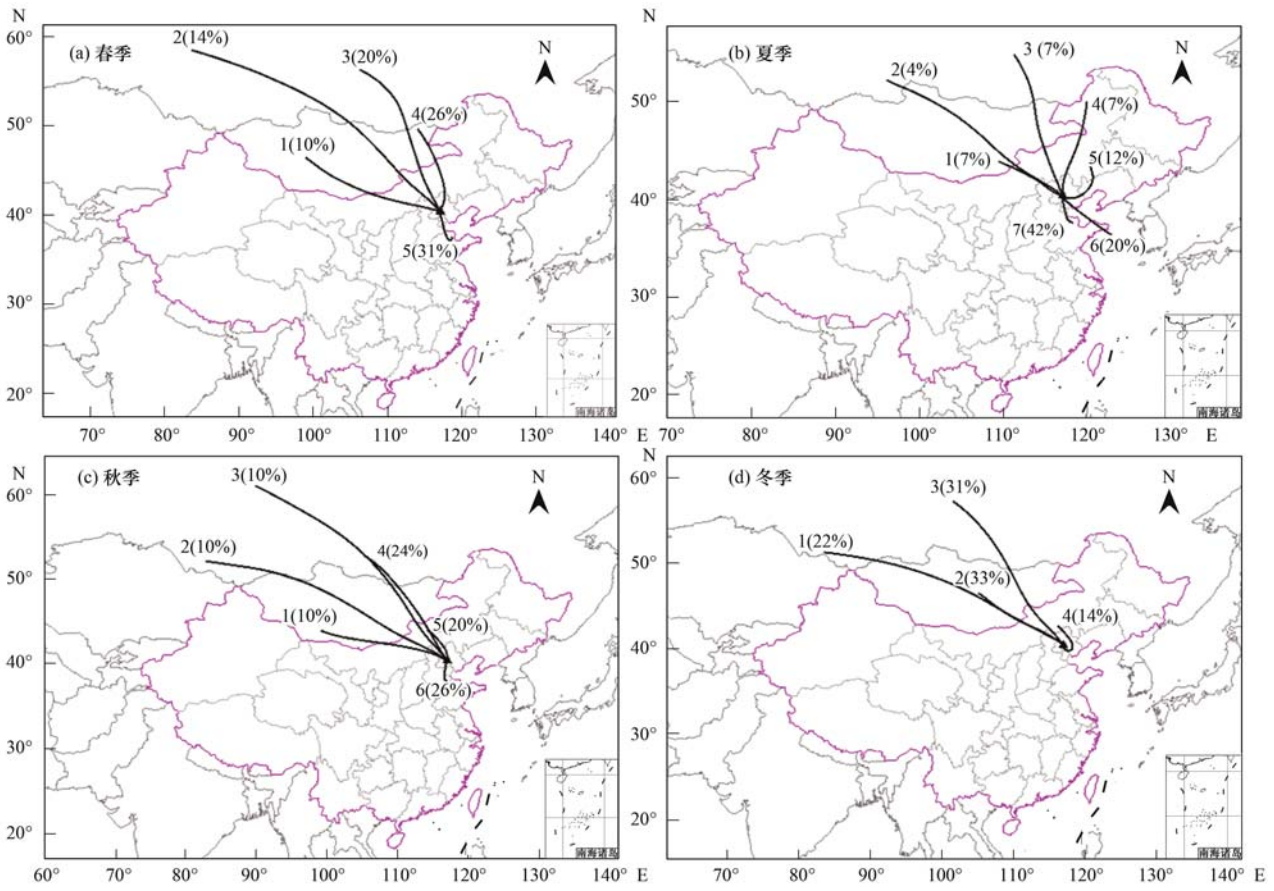
2.3 各季节不同传输路径对气溶胶光学特性的影响

由于影响上甸子的气团路径主要为偏南和偏北路径, 因此下文分别分析两类路径下各季节的气溶胶光学特征, 并探讨不同传输路径对光学特性的影响。

2.3.1 偏南气团传输路径

图 3 给出了 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度及 σ_{sp} 在不同季节、不同气团路径下的分布。结合图 1 中的气团路径可以看出, 除冬季外, 其他季节来自偏北气团路径(春季轨迹组 1 ~ 4; 夏、秋季轨迹组 1 ~ 5)的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度及 σ_{sp} 较偏南路径(春季轨迹组 5; 夏季轨迹组 6 ~ 7; 秋季轨迹组 6)的污染物浓度明显偏低, 这说明在春、夏、秋季节, 来自北京偏南方向的气团对上甸子的空气污染有重要贡献。从偏南气团的路径来看, 气团大多途径山东、河北南部、天津、北京, 最终到达上甸子本底站, 运动轨迹集中在华北平原范围内。已有研究表明, 华北平原为我国最主要的 $\text{PM}_{2.5}$ 排放源区之一^[21], 因此途经该区域的气团在受到地面人为排放污染物的影响下, 导致 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和 σ_{sp} 升高。

从气团的水平运动速度来看, 春、夏、秋季节偏南气团路径的运动速度较慢(图 2), 基本处于停滞状态。Wehner 等^[22]认为, 气团运动速度越慢, 意味着气团有更多的时间聚集地面污染物, 因此, 移动速度较慢的气团往往对应较高的污染物浓度。此外, 从气团的垂直运动来看(图 4), 上述 3 个季节偏南方向的气团运动高度较偏北气团路径偏低, 基本



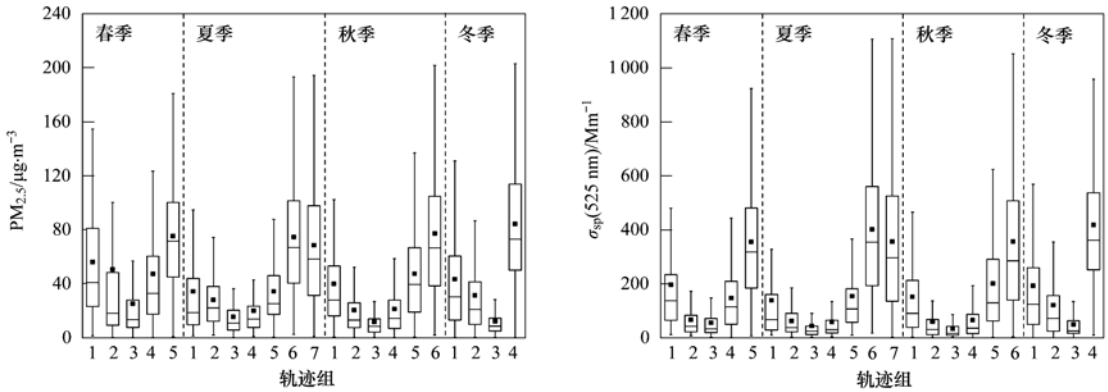
图中数字为分组序号

图2 四季各组平均后向轨迹分布

Fig. 2 Distributions of cluster mean back-trajectories of four seasons

在离地面 150 m 左右的高度运动. 由于气团的运动轨迹贴近地面,更容易受到地面排放源的影响,造成气团中的污染物浓度水平的增加. 通过对比各季节的偏南路径(图 2、4),可以看出春季轨迹组 5、夏季轨迹 7 及秋季轨迹组 6 的气团路径无论在气团运动范围、气团运动速度或是气团运动高度方面,都

非常相似. 从污染物的浓度水平来看,以上 3 个轨迹组的 $PM_{2.5}$ 浓度及 σ_{sp} 的平均值非常接近,分别分布在 $68.6 \sim 77.3 \mu g \cdot m^{-3}$ 、 $356.1 \sim 357.8 Mm^{-1}$ 范围内,可以从一定程度上反映出,来自华北平原地区的偏南气团,其细颗粒物含量和气溶胶光学性质的季节变化并不是很明显.



箱式图中黑色方块表示平均值,水平横线表示中值,矩形表示 25% ~ 75% 数据的分布范围,垂直线表示 5% ~ 95% 数据的分布范围

图3 $PM_{2.5}$ 浓度及 σ_{sp} 在四季各轨迹组中的分布

Fig. 3 Seasonal variation of $PM_{2.5}$ concentration and σ_{sp} in each cluster

2.3.2 偏北气团传输路径

与偏南气团路径不同,各季节偏北气团路径下的污染物浓度差异较大.从图3中可看出,在四季的偏北气团路径中,冬季轨迹组4的 $PM_{2.5}$ 浓度及 σ_{sp} 最高,分别为 $84.3 \mu g \cdot m^{-3}$ 、 $417.7 Mm^{-1}$.与大多数偏北气团路径不同,该气团起源于内蒙古中部地区,逐渐向南运动并围绕北京打转、拐弯,途经河北、天津后到达上甸子本底站.气团运动速度慢,基本处于停滞状态.从气团运动高度来看(图4),轨迹组4运动高度低,在到达上甸子本底站的前30 h运动高度不超过100 m(图4).从轨迹组4与偏南路径下污染物浓度的对比来看,其污染物浓度均高于春、夏、秋季的偏南气团轨迹组,说明来自于华北区域北部的慢速气团对上甸子冬季的污染物水平有重要贡献,会加剧上甸子的空气污染程度.冬季为北方地区的采暖季节,目前内蒙古、河北、天津等地大多仍然采用燃煤的方式进行取暖,因此由采暖导致的污染物浓度升高的现象较为常见.轨迹组4由于其运动速度较慢、运动高度低,更容易在运动的过程中将途经地区的污染物输送至上甸子,造成上甸子出现污染物浓度增加的现象.从气团运动轨迹来看,冬季轨迹组1、3起源于俄罗斯,轨迹组2起源于蒙古,3组气团均以较快的速度及较高的高度向上甸子本底站运动.从图3可看出,冬季轨迹组1~3的 $PM_{2.5}$ 浓度及 σ_{sp} 较轨迹组4明显偏低, $PM_{2.5}$ 浓度及 σ_{sp} 约为轨迹组4的1/10~1/2.说明来自于西北的快速气团虽然途经污染地区,但由于其运动速度较快、运动高度较高,受地面排放的污染物影响较小,因此对上甸子的污染贡献也小.

秋季的气团运动特征与冬季有相似之处.秋季轨迹组5的气团路径也起源于内蒙古中部,并以较低的速度及高度运动至上甸子本底站,其气团运动特征与冬季轨迹组4类似.秋季其他气团轨迹组起源于俄罗斯或蒙古,气团运动速度较快且高度较高.对比秋季各轨迹组的污染物浓度,轨迹组5的 $PM_{2.5}$ 浓度($47.5 \mu g \cdot m^{-3}$)及 σ_{sp} ($201.1 Mm^{-1}$)明显高于轨迹组1~4,但远低于冬季轨迹组4,其原因可能是秋季还不是北方主要的采暖季节,人为污染物的排放量仍较低.

对比四季偏北气团路径下的污染物浓度水平,夏季的气团轨迹组污染物平均浓度最低($PM_{2.5}$ 为 $27.4 \mu g \cdot m^{-3}$, σ_{sp} 为 $103.2 Mm^{-1}$),说明夏季上甸子北部区域的污染物排放量处于较低水平.与其他3个季节相比,春季各偏北气团轨迹组的污染物浓度

平均水平整体较高($PM_{2.5}$ 为 $42.9 \mu g \cdot m^{-3}$, σ_{sp} 为 $110.6 Mm^{-1}$).春季是我国沙尘暴的易发季节,尤其是强沙尘暴,82.5%都发生在春季^[23].从图3中可看出,轨迹组1、2及4的 $PM_{2.5}$ 浓度水平较高,轨迹组3则略低,但 σ_{sp} 的分布与 $PM_{2.5}$ 并不完全一致.轨迹组2有较高的 $PM_{2.5}$ 浓度水平($50.7 \mu g \cdot m^{-3}$),但其 σ_{sp} 却较低($67.6 Mm^{-1}$).从图3中可看出,轨迹组2的平均 $PM_{2.5}$ 浓度超过箱式图的75%分位线.通过统计该路径在2005~2010年发生沙尘过程的次数,发现该路径的沙尘过程发生次数多于其他西北路径,共达17次;且在2006年5月17日的沙尘过程中,轨迹组2的 $PM_{2.5}$ 最高值小时浓度达到 $1120.3 \mu g \cdot m^{-3}$,远远高于其他路径在此过程中的小时平均值.由此可见,轨迹组2是影响北京地区春季沙尘天气的主要路径之一.由于沙尘气溶胶多由粒径较大的矿物质粒子组成,而通常矿物质具有较低的散射效率,从而导致轨迹2虽然具有较高的 $PM_{2.5}$ 浓度,但其 σ_{sp} 却较低的现象.相对于轨迹组2的 $PM_{2.5}$ 平均值,其中值偏低,这主要是由于该组气团轨迹多起源于俄罗斯或蒙古,途经区域人为污染物排放较少,当沙源地无沙尘暴发生时,西北方向的快速移动气团对上甸子的污染物起到扩散和稀释作用,使得上甸子的 $PM_{2.5}$ 浓度维持在较低水平.

2.4 各季节不同输送路径下的质量散射效率特征

在全球大气环流及化学传输模式中,气溶胶质量散射效率是计算气溶胶辐射强迫的重要参数.气溶胶的质量散射效率 α_{sp} 可以通过散射系数与气溶胶质量浓度的比值进行计算,也可两者线性回归方程的斜率^[24].在本研究中,将采用文献[24]的方法,利用2005~2010年各轨迹组的小时平均 σ_{sp} 与小时平均 $PM_{2.5}$ 浓度进行最小二乘法线性回归,计算各季节不同轨迹组的质量散射效率.由于观测所使用的浊度计安装的是 PM_{10} 切割头,所以本研究中的 α_{sp} 不是真实的 $PM_{2.5}$ 质量散射效率.通过对上甸子本底站2013年6月至2014年7月1年的GRIMM颗粒物监测资料分析表明, $PM_{2.5}$ 约占 PM_{10} 的70%以上,加之 $2.5 \mu m$ 以上的粗颗粒对可见光的散射能力相比细颗粒物显著降低,因此本研究求得的 α_{sp} 可近似作为 $PM_{2.5}$ 质量散射效率.

2.4.1 沙尘气溶胶质量散射效率

从2.3节的分析中可以看出,上甸子主要受到沙尘气溶胶和人为污染气溶胶等两类气溶胶的影响,沙尘气溶胶的影响主要在春季,人为污染气溶胶的影响则在各个季节均有出现.表1给出了四季不

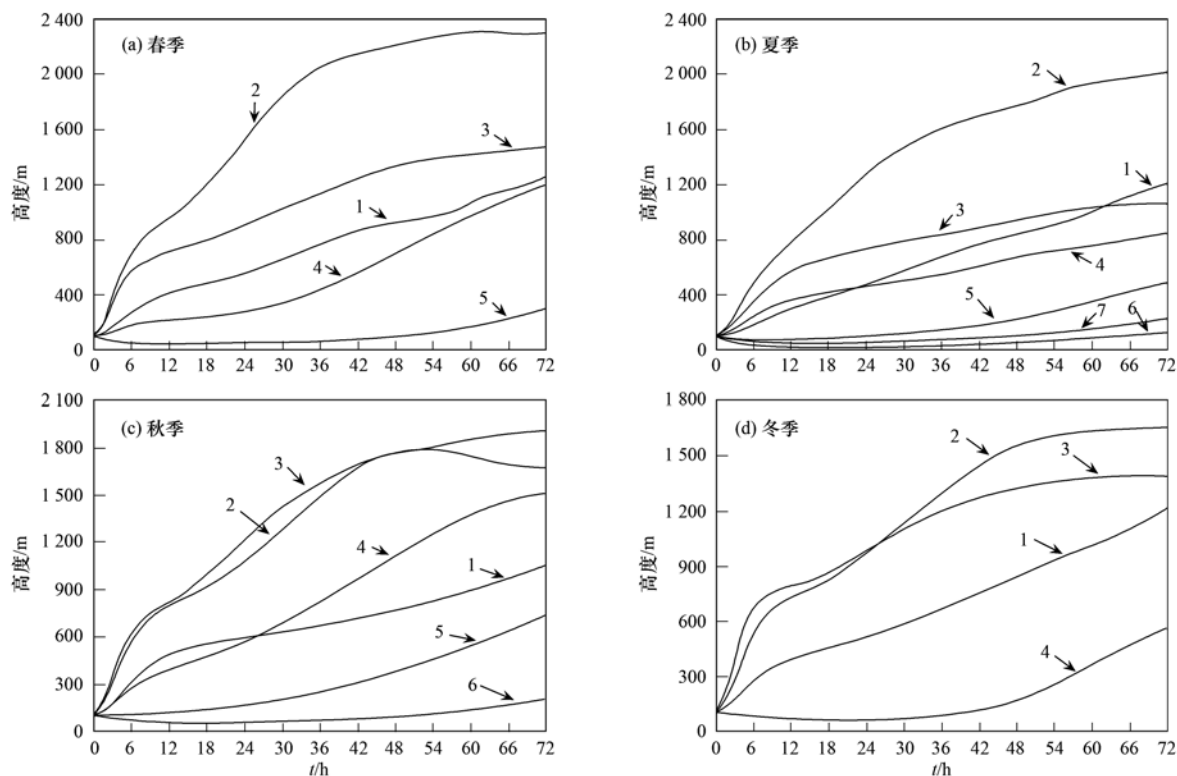


图4 四季各组后向轨迹的平均运动高度

Fig. 4 Average altitudes of each cluster in all seasons

同气团输送路径的气溶胶 α_{sp} . 由于春季轨迹组 5 为东南路径,不是沙尘的主要传输路径,受沙尘影响小,因此在计算沙尘气溶胶的 α_{sp} 时只考虑春季轨迹组 1~4. 从表 1 可以看出,轨迹组 1~4 的 α_{sp} 分布范围在 $0.42 \sim 1.49 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 之间,平均 α_{sp} 为 $0.78 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,与 Xu 等^[25]报道的中国西北戈壁地区的沙尘气溶胶 α_{sp} ($\sim 1.0 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) 接近. 已有研究表明^[26],由于沙尘气溶胶多由矿物质组成,其对太阳光波长的散射效率一般较人为污染物,如硫酸盐等低. 轨迹组 2~4 的 α_{sp} 分别为 0.42 、 0.55 及 $0.65 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,低于前人报道^[27]的矿物尘的 α_{sp} ($0.83 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$),说明轨迹组 2~4 的气团的气溶胶主要为矿物质成分;而轨迹组 1 的 α_{sp} 近乎为矿物尘气溶胶 α_{sp} 的两倍,说明轨迹组 1 的气团中不仅含有矿物质成分,可能还含有少量随沙尘暴带来的当地污染物.

2.4.2 人为污染气溶胶质量散射效率

四季各气团传输路径的人为污染气溶胶 α_{sp} 分布范围在 $1.70 \sim 5.38 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 之间,平均 α_{sp} 为 $4.00 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,约为春季沙尘气溶胶的 5 倍,其值与 Xu 等^[28]报道的长三角城市地区气溶胶的质量散射效率 ($4.00 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) 相当. 从各季节的平均人为污染气溶胶的 α_{sp} 来看,冬季最高,平均 α_{sp} 为 4.55

$\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$;夏季次之,为 $4.23 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$;春季最低,为 $3.35 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,说明冬、夏季输送至上甸子的气溶胶中含有更多的能够导致 σ_{sp} 增加的化学成分.

从表 1 中还可以看出,与其他季节某些气团轨迹组的 α_{sp} 偏低而某些轨迹组 α_{sp} 偏高不同,冬季各路径的 α_{sp} 均较高,说明冬季各来向的气团在传输过程中受人为排放污染物影响较大. 杨复沫等^[29]通过对北京 $\text{PM}_{2.5}$ 的化学组成进行分析指出, SO_4^{2-} 与 NO_3^- 的质量浓度在冬季最高. 一般认为,北京的冬季气温低,太阳辐射弱,光化学反应不强,不利于气溶胶的二次生成反应,但冬季特别是在雾霾天气条件下, SO_2 主要是在金属催化剂作用下通过液相氧化反应转化为硫酸盐^[30,31]. 北方地区冬季干燥,大气中水汽密度较低,但当夜晚辐射降温后,低温度下一定体积里的空气含水量增多,相对湿度升高,有利于 SO_2 液相氧化反应的发生. 杨复沫等^[29]还指出,冬季的低温、一定的湿度及其他因素也可导致大量的二次 NO_3^- 粒子生成并稳定存在. 冬季上甸子周边的北方地区主要以燃煤取暖为主,大气中来源于取暖排放的 SO_2 及 NO_2 总量增加,为硫酸盐及硝酸盐等气溶胶的生成提供了大量的前体物,导致冬季各气团轨迹组的气溶胶 α_{sp} 升高.

表 1 四季不同气团传输路径的气溶胶质量散射效率
Table 1 Mass scattering efficiency of each cluster in four seasons

气溶胶类型	季节	轨迹编号	斜率	截距	R^2	样本数
沙尘气溶胶	春	1	1.49	97.51	0.56	28
		2	0.42	47.26	0.84	55
		3	0.55	51.67	0.61	45
		4	0.65	59.90	0.78	31
	春	1	4.11	-4.49	0.72	151
		2	1.70	20.29	0.55	173
		3	2.45	10.88	0.53	303
		4	3.98	6.86	0.70	444
		5	4.53	24.25	0.63	540
人为污染气溶胶	夏	1	4.49	3.05	0.65	129
		2	2.46	2.86	0.69	64
		3	3.77	-8.33	0.76	117
		4	3.80	-5.71	0.62	129
		5	5.38	-17.50	0.63	215
		6	4.83	49.43	0.70	331
		7	4.89	33.73	0.68	820
	秋	1	4.21	-10.93	0.83	191
		2	3.72	-6.17	0.88	140
		3	3.39	-4.29	0.80	160
		4	3.25	3.14	0.82	420
		5	4.25	-3.17	0.83	370
		6	4.67	-8.87	0.81	519
	冬	1	4.73	-3.26	0.92	634
		2	4.35	-7.55	0.85	413
		3	4.41	-2.18	0.81	569
		4	4.72	24.07	0.90	278

通过对比春、夏、秋季节各气团轨迹组的 α_{sp} 可看出,这3个季节的 α_{sp} 分布有一定的相似性, α_{sp} 高值($>4.0\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$)出现在西北偏西路径轨迹组(春、夏、秋季轨迹组1)、偏南路径轨迹组(春季轨迹组5,夏季轨迹组6、7,秋季轨迹组6)及偏北路径速度较慢轨迹组(夏、秋季轨迹组5)中。轨迹组1在各季中均具有较高的 α_{sp} ,说明该路径在四季都有较强的排放源。Meng等^[33]对2004~2006年影响上甸子的气团进行后向轨迹研究,结果表明来自西北偏西路径的轨迹组有较高的 NO_x 、 SO_2 浓度,其原因可能与该路径途经一些煤矿开采区、发电基地有关。偏南气团路径轨迹组的 α_{sp} 均在 $4.50\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ 以上,由于这些气团主要经过山东、河北南部、天津等地,受到途经地区所排放的人为污染物的影响,导致 α_{sp} 增大。从表1中可以看出,夏季轨迹组5达到 $5.38\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$,为四季各轨迹组 α_{sp} 最高值。夏季轨迹组5的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度低于该季节轨迹组6、7(图3),但 α_{sp} 却高于两者,说明该轨迹组气团受人为排放影响的强度较偏南方向的气团大,其原因可能与轨迹组5的气团路径有关。轨迹组5大多起源于内蒙与辽

宁的边界,途径辽宁、河北东北部、天津等地而后到达上甸子本底站。辽宁为我国最大的重工业基地,有成规模的冶金、化工、石油、煤炭、电力等基地;河北、天津的产业结构也以重工业为主,这些工业活动排放大量的 SO_2 、 NO_x 污染物,在夏季高温、高湿环境影响下,通过氧化剂的作用反应生成了具有较高散射效率的硫酸盐及硝酸盐,从而导致轨迹组5的气溶胶 α_{sp} 较高。

春、夏、秋季节的其他偏北气团轨迹组(轨迹组2~4) α_{sp} 较低,分布在 $1.70\sim3.98\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ 之间,平均值为 $3.16\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$,与Bergin等^[32]报道的本地污染物与沙尘混合气溶胶($\text{PM}_{1.8}$)的 α_{sp} 接近,说明在没有沙尘天气影响的时期,西北方向的气团主要受到人为污染气溶胶的影响,但随着气团从沙源地向北京移动,气团也会将沙尘气溶胶输送至北京,导致该路径的气团受到人为污染与沙尘气溶胶的共同影响。从表1中还可看出,春季轨迹组2的 α_{sp} 最低($1.7\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$),与沙尘气溶胶 α_{sp} 接近,说明在该路径下的气溶胶成分以 α_{sp} 较低的矿物质为主,受人为排放的影响小。

3 结论

(1)影响上甸子的气团传输路径整体分为偏南和偏北两种. 冬季气团基本为偏北路径,春、夏、秋季节则偏南、偏北路径均有出现. 偏南传输路径对应的 $PM_{2.5}$ 浓度与 σ_{sp} 的整体水平较高. 从偏南气团的运动特征来看,气团大多途经华北平原主要的 $PM_{2.5}$ 排放区,同时偏南气团运动速度慢、高度低,因此在运动过程中易将山东、河北、天津等地的污染物输送至上甸子.

(2)冬季来自华北区域北部的慢速、低气团对上甸子冬季的污染水平有重要贡献,这是由于该路径的气团途经冬季华北地区主要燃煤采暖区造成的. 春季各偏北气团轨迹组的污染物浓度平均水平整体较高,但无沙尘过程时,污染物浓度较低,这是由于来自西北方向的气团途径区域人为污染物排放较少,当沙源地无沙尘天气发生时,西北方向的快速移动气团对上甸子的污染物主要起到扩散和稀释作用.

(3)沙尘气溶胶与人为污染气溶胶的 α_{sp} 有明显差别,总体来看,沙尘气溶胶 α_{sp} 低于人为污染气溶胶. 沙尘气溶胶主要出现在春季,主要沙尘路径的平均 α_{sp} 为 $0.78 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$. 四季各气团路径的平均人为污染气溶胶 α_{sp} 为 $4.00 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,其中冬季最高,夏季次之,春季最低. 说明冬、夏季输送至上甸子的气溶胶中含有更多的能够导致 σ_{sp} 增加的化学成分.

(4)对于人为污染气溶胶的 α_{sp} 来说,冬季各路径的 α_{sp} 均较高,说明冬季上甸子受周边地区的燃煤采暖等人为排放的影响较大. 春、夏、秋季节的西北偏西路径、偏南路径以及偏北路径中速度较慢的轨迹组均具有较高的 α_{sp} ,可能与这些气团路径受工业生产等人为活动影响较大有关. 春、夏、秋季节的其他偏北气团轨迹组(轨迹组 2~4)的气团在没有沙尘天气影响的时期,西北方向的气团主要受到人为污染气溶胶的影响,但随着气团从沙源地向北京移动,气团也会将沙尘气溶胶输送至北京,导致该路径的气团受到人为污染与沙尘气溶胶的共同影响.

致谢:感谢上甸子站的周怀刚、王振发、王文彦、董璠、何迪、周礼岩、石庆峰等在仪器维护及巡视方面所做的大量工作.

参考文献:

[1] 云慧,何凌燕,黄晓锋,等. 深圳市 $PM_{2.5}$ 化学组成与时空分

布特征[J]. 环境科学, 2013, **34**(4): 1245-1251.

- [2] Zhao P S, Dong F, He D, *et al.* Characteristics of concentrations and chemical compositions for $PM_{2.5}$ in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(9): 4631-4644.
- [3] 张小曳,张养梅,曹国良. 北京 PM_1 中的化学组成及其控制对策思考[J]. *应用气象学报*, 2012, **23**(3): 257-264.
- [4] 张养梅,孙俊英,张小曳,等. 北京亚微米气溶胶化学组分及粒径分布季节变化特征[J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, **43**(4): 606-617.
- [5] 赵普生,张小玲,孟伟,等. 京津冀区域气溶胶中无机水溶性离子污染特征分析[J]. *环境科学*, 2011, **32**(6): 1546-1549.
- [6] 薛国强,朱彬,王红磊. 南京市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布和来源解析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(5): 1633-1643.
- [7] 张智胜,陶俊,谢绍东,等. 成都城区 $PM_{2.5}$ 季节污染特征及来源解析[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(11): 2947-2952.
- [8] 肖致美,毕晓辉,冯银厂,等. 宁波市环境空气中 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 来源解析[J]. *环境科学研究*, 2012, **25**(5): 549-555.
- [9] 于娜,魏永杰,胡敏,等. 北京城区和郊区大气细粒子有机物污染特征及来源解析[J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(2): 243-251.
- [10] 车慧正,石广玉,张小曳. 北京地区大气气溶胶光学特性及其直接辐射强迫的研究[J]. *中国科学院研究生院学报*, 2007, **24**(5): 699-704.
- [11] 杨溯,石广玉,段云霞,等. 天空辐射计观测 2006 年春季北京地区气溶胶光学特性的研究[J]. *气候与环境研究*, 2012, **17**(1): 20-28.
- [12] 董自鹏,李星敏,杜川利,等. 西安地区气溶胶光学特性研究[J]. *高原气象*, 2013, **32**(3): 856-864.
- [13] 赵秀娟,蒲维维,孟伟,等. 北京地区秋季雾霾天 $PM_{2.5}$ 污染与气溶胶光学特征分析[J]. *环境科学*, 2013, **34**(2): 416-423.
- [14] 颜鹏,刘桂清,周秀骥,等. 上甸子秋冬季雾霾期间气溶胶光学特性[J]. *应用气象学报*, 2010, **21**(3): 257-265.
- [15] 袁亮,银燕,于兴娜,等. 黄山夏季气溶胶光学特性观测分析[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(12): 2131-2139.
- [16] 蒲维维,赵秀娟,张小玲. 北京地区夏末秋初气象要素对 $PM_{2.5}$ 污染的影响[J]. *应用气象学报*, 2011, **22**(6): 716-723.
- [17] Zhao X J, Zhang X L, Xu X F, *et al.* Seasonal and diurnal variations of ambient $PM_{2.5}$ concentration in urban and rural environments in Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(18): 2893-2900.
- [18] 赵晨曦,王云琦,王玉杰,等. 北京地区冬春 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 污染水平时空分布及其与气象条件的关系[J]. *环境科学*, 2014, **35**(2): 418-427.
- [19] Xia X A, Chen H, Zhang W. Analysis of the dependence of column-integrated aerosol properties on long-range transport of air masses in Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(36): 7739-7750.

- [20] 颜鹏, 潘小乐, 汤洁, 等. 北京市区大气气溶胶散射系数亲水增长的观测研究[J]. 气象学报, 2008, **66**(1): 111-119.
- [21] Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, *et al.* Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2009, **9**(14): 5131-5153.
- [22] Wehner B, Birmili W, Ditas F, *et al.* Relationships between submicrometer particulate air pollution and air mass history in Beijing, China, 2004-2006 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2008, **8**(20): 6155-6168.
- [23] 周自江, 章国材. 中国北方的典型强沙尘暴事件(1954 ~ 2002 年) [J]. 科学通报, 2003, **48**(11): 1224-1228.
- [24] Hand J L, Malm W C. Review of aerosol mass scattering efficiencies from ground-based measurements since 1990 [J]. Journal of Geophysical Research, 2007, **112**(D16), D16203, doi: 10.1029/2007JD008484.
- [25] Xu J, Bergin M H, Greenwald R, *et al.* Aerosol chemical, physical, and radiative characteristics near a desert source region of northwest China during ACE-Asia[J]. Journal of Geophysical Research, 2004, **109** (D19), D19S03. doi: 10.1029/2003JD004239.
- [26] Seinfeld J H, Pandis S N. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change[M]. New York: Wiley-Interscience, 1998.
- [27] Li X, Maring H, Savoie D, *et al.* Dominance of mineral dust in aerosol light-scattering in the North Atlantic trade winds [J]. Nature, 1996, **380**(6573): 416-419.
- [28] Xu J, Bergin M H, Yu X, *et al.* Measurement of aerosol chemical, physical and radiative properties in the Yangtze delta region of China [J]. Atmospheric Environment, 2002, **36**(2): 161-173.
- [29] 杨复沫, 贺克斌, 马永亮, 等. 北京大气细粒子 PM_{2.5} 的化学组成[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, **42**(12): 1605-1608.
- [30] Li W J, Zhou S Z, Wang X F, *et al.* Integrated evaluation of aerosols from regional brown hazes over northern China in winter: Concentrations, sources, transformation, and mixing states [J]. Journal of Geophysical Research, 2011, **116**(D19), D09301, doi: 10.1029/2010JD015099.
- [31] Sun Y L, Wang Z F, Fu P Q, *et al.* Aerosol composition, sources and processes during wintertime in Beijing, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, **13**(9): 4577-4592.
- [32] Bergin M H, Cass G, Xu J, *et al.* Aerosol radiative, physical, and chemical properties in Beijing during June 1999[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, **106**(D16): 17969-17980.
- [33] Meng Z Y, Xu X B, Yan P, *et al.* Characteristics of trace gaseous pollutants at a regional background station in Northern China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2009, **9**(3): 927-936.

CONTENTS

Size Distribution Characteristics of Particulate Mercury on Haze and Non-haze Days	ZHU Qiong-yu, CHENG Jin-ping, WEI Yu-qing, <i>et al.</i> (373)
Impact of Atmospheric Pollutants Transport Pathways on Aerosol Optical Properties at Shangdianzi Background Station	PU Wei-wei, SHI Xue-feng, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (379)
Chemical Characteristics of 3-year Atmospheric Precipitation in Summer, Taiyuan	GUO Xiao-fang, CUI Yang, WANG Kai-yang, <i>et al.</i> (388)
Pollution Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Taiyuan	LIU Shan, PENG Lin, WEN Yan-ping, <i>et al.</i> (396)
Levels and Distribution of Organochlorine Pesticides and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Atmospheric Particulates in Xining and Tianjun, Qinghai Province, China	LI Qiu-xu, HE Chang, MA Zhao-hui, <i>et al.</i> (402)
Particulate Matter Adsorption Capacity of 10 Evergreen Species in Beijing	WANG Bing, ZHANG Wei-kang, NIU Xiang, <i>et al.</i> (408)
Carbon Sources Metabolic Characteristics of Airborne Microbial Communities in Constructed Wetlands	SONG Zhi-wen, WANG Lin, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (415)
Spatial Distribution Characteristics of the Physical and Chemical Properties of Water in the Kunes River After the Supply of Snowmelt During Spring	LIU Xiang, GUO Ling-peng, ZHANG Fei-yun, <i>et al.</i> (421)
Composition Characteristics and Source Analysis of Major Ions in Four Small Lake-watersheds on the Tibetan Plateau, China	LI He, LI Jun, LIU Xiao-long, <i>et al.</i> (430)
Seasonal Stratification and Eutrophication Characteristics of a Deep Reservoir, Longtan Reservoir in Subtropical Area of China	ZHANG Lei, LI Qiu-hua, HUANG Guo-jia, <i>et al.</i> (438)
Phosphorus Fractions, Sorption Characteristics and Its Release in the Sediments of Yangtze Estuary Reservoir, China	JIN Xiao-dan, WU Hao, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> (448)
Spatial-Temporal Distributions of Dissolved Inorganic Carbon and Its Affecting Factors in the Yellow River Estuary	GUO Xing-sen, LÜ Ying-chun, SUN Zhi-gao, <i>et al.</i> (457)
Distributions of Phosphorus Fractions in Suspended Sediments and Surface Sediments of Tiaoxi Mainstreams and Cause Analysis	CHEN Hai-long, YUAN Xu-yin, WANG Huan, <i>et al.</i> (464)
Characteristics of Nitrogen Pollution and the Potential Mineralization in Surface Sediments of Dianchi Lake	MENG Ya-yuan, WANG Sheng-rui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (471)
Influence of Transient Storage on Solute Transport and the Parameter Sensitivity Analysis in a Suburban Drainage Ditch	LI Ru-zhong, QIAN Jing, DONG Yu-hong, <i>et al.</i> (481)
Sources, Pollution Statue and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Aibi Lake, Northwest China	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwaili, JIANG Feng-qing (490)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments in Suburban Outfall of Industrial Oasis Region	ZANG Fei, WANG Sheng-li, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (497)
Assessment of Sources, Spatial Distribution and Ecological Risk of Heavy Metals in Soils in a Typical Industry-based City of Shandong Province, Eastern China	DAI Bin, LÜ Jian-shu, ZHAN Jin-cheng, <i>et al.</i> (507)
Removal of Triclosan with the Method of UV/ClO ₂ and Its Degradation Products	LI Yu-ying, HE Wen-long, LI Qing-song, <i>et al.</i> (516)
Mechanism of Groundwater As(V) Removal with Ferric Flocculation and Direct Filtration	KANG Ying, DUAN Jin-ming, JING Chuan-yong (523)
Preparation of Nano Zero-valent Iron/ <i>Sargassum horneri</i> Based Activated Carbon for Removal of Cr(VI) from Aqueous Solution	ZENG Gan-ming, WU Xiao, ZHENG Lin, <i>et al.</i> (530)
Adsorption of Cr(VI) on Magnetic Graphene from Aqueous Solution	LIU Wei, YANG Qi, LI Bo, <i>et al.</i> (537)
Adsorption of the TiO ₂ @Yeast Composite Microspheres for Adsorbing Fluorescent Whitening Agent-VBL in Fixed Bed	WU Fei, ZHANG Kai-qiang, BAI Bo, <i>et al.</i> (545)
Preparation and Pb ²⁺ Electrosorption Characteristics of MnO ₂ /CFP Composite Electrode	LIU Fang-yuan, HU Cheng-zhi, LI Yong-feng, <i>et al.</i> (552)
Preparation of Weak Light Driven TiO ₂ Multi Composite Photocatalysts via Adsorption Phase Synthesis	WANG Ting, ZHU Yi-chen, SUN Zhi-xuan, <i>et al.</i> (559)
Photoelectrocatalytic Degradation of Bisphenol A in Water by Fe Doped-TiO ₂ Nanotube Arrays Under Simulated Solar Light Irradiation	XIANG Guo-liang, YU Ze-bin, CHEN Ying, <i>et al.</i> (568)
Oxidation of Cationic Red 3R in Water with H ₂ O ₂ Catalyzed by Mineral Loaded with Fe/Co	MA Nan, LIU Hua-bo, XIE Xin-yuan (576)
Characteristics of Acid Red 3R Wastewater Treatment by Ozone Microbubbles	ZHANG Jing, DU Ya-wei, LIU Xiao-jing, <i>et al.</i> (584)
Effects of Carbon Sources, Temperature and Electron Acceptors on Biological Phosphorus Removal	HAN Yun, XU Song, DONG Tao, <i>et al.</i> (590)
Startup, Stable Operation and Process Failure of EBPR System Under the Low Temperature and Low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (597)
Effects of Dissolved Oxygen in the Oxidative Parts of A/O Reactor on Degradation of Organic Pollutants and Analysis of Microbial Community for Treating Petrochemical Wastewater	DING Peng-yuan, CHU Li-bing, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (604)
Isolation of Filamentous Fungi Capable of Enhancing Sludge Dewaterability and Study of Mechanisms Responsible for the Sludge Dewaterability Enhancement	ZHOU Yu-jun, FU Hao-yi, FAN Xian-feng, <i>et al.</i> (612)
Impacts of Alkaline Thermal Treatment on Characteristics of Sludge from Sewage Treatment Plant	YANG Shi-dong, CHEN Xia, LIU Cao, <i>et al.</i> (619)
Responses of Ecosystem Carbon Budget to Increasing Nitrogen Deposition in Differently Degraded <i>Leymus chinensis</i> Steppes in Inner Mongolia, China	QI Yu-chun, PENG Qin, DONG Yun-she, <i>et al.</i> (625)
Impacts of Elevated Ozone Concentration on N ₂ O Emission from Arid Farmland	WU Yang-zhou, HU Zheng-hua, LI Cen-zi, <i>et al.</i> (636)
Multi-Year Measurement of Soil Respiration Components in a Subtropical Secondary Forest	LIU Yi-fan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (644)
Spatial Variability of Soil Nitrogen and Related Affecting Factors at a County Scale in Hilly Area of Mid-Sichuan Basin	LUO You-lin, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (652)
Effects of Land Use Change on Soil Active Organic Carbon in Deep Soils in Hilly Loess Plateau Region of Northwest China	ZHANG Shuai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i> (661)
Carbon Source Metabolic Diversity of Soil Microbial Community Under Different Climate Types in the Area Affected by Wenchuan Earthquake	ZHANG Guang-shuai, LIN Yong-ming, MA Rui-feng, <i>et al.</i> (669)
Optimization of Electrode Configuration in Soil Electrokinetic Remediation	LIU Fang, FU Rong-bing, XU Zhen (678)
Distribution and Health Risk of HCHs and DDTs in a Contaminated Site with Excavation	ZHANG Shi-lei, XUE Nan-dong, YANG Bing, <i>et al.</i> (686)
Transformation and Mobility of Arsenic in the Rhizosphere and Non-Rhizosphere Soils at Different Growth Stages of Rice	YANG Wen-tao, WANG Ying-jie, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (694)
Extraction of Plant Root Apoplast Solution; A Case Study with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	ZHU Man-dang, DU Jiang-xue, YUE Le, <i>et al.</i> (700)
Mechanism of Manganese Binding to Leaf Cell Wall of <i>Phytolacca americana</i> L.	XU Xiang-hua, LIU Cui-ying, LI Ping, <i>et al.</i> (706)
Degradation Characteristics of Naphthalene with a <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain Isolated from Soil Contaminated by Diesel	LIU Wen-chao, WU Bin-bin, LI Xiao-sen, <i>et al.</i> (712)
Toxic Effects of CdSe/ZnS QDs to Zebrafish Embryos	CHEN Mu-fei, HUANG Cheng-zhi, PU De-yong, <i>et al.</i> (719)
Physiological Response of <i>Neocaridina denticulata</i> to the Toxicity of Cu ²⁺ and Chlorpyrifos	LI Dian-bao, ZHANG Wei, WANG Li-qing, <i>et al.</i> (727)
Determination of Anilines in Environmental Water Samples by Simultaneous Derivatization and Ultrasound Assisted Emulsification Microextraction Combined with Gas Chromatography-Flame Ionization Detectors	TIAN Li-xun, DAI Zhi-xi, WANG Guo-dong, <i>et al.</i> (736)
Adsorption of Calcium Ion from Aqueous Solution Using Na ⁺ -Conditioned Clinoptilolite for Hot-Water Softening	ZHANG Shuo, WANG Dong, CHEN Yuan-chao, <i>et al.</i> (744)
Construction and Application of Economy-Pollution-Environment Three-Dimensional Evaluation Model for District	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-qing (751)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年2月15日 第36卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 2 Feb. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行