

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第7期

Vol.36 No.7

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

2013年12月中国中东部地区严重灰霾期间上海市颗粒物的输送途径及潜在源区贡献分析	李莉, 蔡蓓琳, 周敏 (2327)
长三角冬季一次霾过程气溶胶及其水溶性离子的区域分布特征	王曼婷, 朱彬, 王红磊, 薛国强, 何俊, 徐宏辉, 曹锦飞 (2337)
北京城区大气 PM _{2.5} 主要化学组分构成研究	刘保献, 杨懂艳, 张大伟, 陈添, 赵红帅, 陈圆圆, 陆皓昀 (2346)
2014年春季山东省 PM _{2.5} 跨界输送研究	贾海鹰, 程念亮, 何友江, 陈云波, 杜晓惠, 单晓丽 (2353)
燃煤电厂产生和排放的 PM _{2.5} 中水溶性离子特征	马子珍, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥, 邓建国, 段雷 (2361)
南京夏季城市冠层大气 CO ₂ 浓度时空分布规律的观测	高韵秋, 刘寿东, 胡凝, 王淑敏, 邓力琛, 于洲, 张圳, 李旭辉 (2367)
北京市机动车尾气排放因子研究	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 曲松 (2374)
北京不同污染地区园林植物对空气颗粒物的滞纳能力	张维康, 王兵, 牛香 (2381)
长三角地区火电行业主要大气污染物排放估算	丁青青, 魏伟, 沈群, 孙予罕 (2389)
基于区域循环模型 IAP-N 的安徽省农用地 N ₂ O 排放量估算	韩云芳, 韩圣慧, 严平 (2395)
不同源汇信息提取方法对区域 CO ₂ 源汇估算及其季节变化的影响评估	张芳, 周凌晔, 王玉诏 (2405)
实测/预测辽河铬(VI)水生生物基准与风险评估	王晓南, 闫振广, 刘征涛, 张聪, 王伟莉 (2414)
博尔塔拉河河水、表层底泥及河岸土壤重金属的污染和潜在危害评价	张兆永, 吉力力·阿不都外力, 姜逢清 (2422)
岩溶泉水化学性质及 δ ¹³ C _{DIC} 影响因素	赵瑞一, 吕现福, 刘子琦, 吕春艳 (2430)
柳江流域柳州断面水化学特征及无机碳汇通量分析	原雅琼, 何师意, 于爽, 孙平安, 王艳雪, 武招云, 李新桂, 谢明鲜, 刘文, 李瑞, 张华生 (2437)
重庆市主城区次级河流总氮总磷污染特征分析及富营养化评价	庆旭瑶, 任玉芬, 吕志强, 王效科, 庞容, 邓睿, 孟龄, 马慧雅 (2446)
三峡库区消落带土壤邻苯二甲酸二丁酯静态释放特征	王法, 王强, 木志坚, 杨志丹, 宋娇艳 (2453)
干湿循环对三峡支流消落带沉积物中可转化态氮及其形态分布的影响	林俊杰, 张帅, 杨振宇, 何立平, 周依, 张倩茹 (2459)
天山天池夏季叶绿素 a 的分布及富营养化特征研究	王斌, 马健, 王银亚, 尹湘江 (2465)
西大海湖沉积物营养盐垂直分布特征变化分析	段木春, 肖海丰, 臧淑英 (2472)
草街水库蓄水后嘉陵江浮游植物群落特征及水质评价	杨敏, 张晟, 刘朔孺 (2480)
宁波三江口水域原核生物群落结构分析	胡安谊, 李姜维, 杨晓永, 王弘杰, 于昌平 (2487)
全氟化合物对表层沉积物中细菌群落结构的影响	孙雅君, 王铁宇, 彭霞薇, 王佩 (2496)
菹草腐解-金鱼藻生长耦合作用对水质及植物生长的影响	马月, 王国祥, 曹勤, 王小云, 马杰 (2504)
生物滞留设施对城市地表径流低浓度磷吸附基质研究	李立青, 龚燕芳, 颜子钦, 单保庆 (2511)
复合填料生物渗滤系统处理城市雨水径流的研究	王晓璐, 左剑恶, 千里里, 邢薇, 缪恒峰, 阮文权 (2518)
3种典型消毒副产物对细菌抗生素抗性的影响	吕露, 张梦露, 王春明, 林惠荣, 于鑫 (2525)
基于透射光法探讨水流流速对 DNAPL 运移分布的影响	高燕维, 郑菲, 施小清, 孙媛媛, 徐红霞, 吴吉春 (2532)
BDD 和 PbO ₂ 电极电化学氧化苯并三氮唑的对比研究	伍娟丽, 张佳维, 王婷, 倪晋仁 (2540)
开放系统下方解石对邻苯二甲酸的吸附	李振炫, 黄利东, 陈艳芳, 缪晔, 刘大刚, 许正文 (2547)
碳纳米管-羟磷灰石对铅的吸附特性研究	张金利, 李宇 (2554)
刚果红分子印迹聚合物纳米微球的合成及吸附性能	常自强, 陈复彬, 张玉, 时作龙, 杨春艳, 章竹君 (2564)
碱热-酸热法合成二氧化钛-钛酸纳米管复合纳米材料对 Cd(II) 和苯酚的同步去除	雷立, 晋银佳, 王婷, 赵泉, 晏友, 刘文 (2573)
固定化菌剂对污水和牛粪中雌二醇和己烯雌酚的去除作用	李欣, 凌婉婷, 刘静娴, 孙敏霞, 高彦征, 刘娟 (2581)
PN-ANAMMOX 一体化反应器处理电子行业 PCB 废水	袁琬, 李祥, 周呈, 陈宗姮 (2591)
Fenton 氧化深度处理石化废水厂二级出水研究	王翼, 吴昌永, 周岳溪, 张雪, 董波, 陈学民 (2597)
制革废水和印染废水的综合毒性评估及鉴别	黄利, 陈文艳, 万玉山, 郑国娟, 赵远, 蔡强 (2604)
不同溶解氧条件下 A/O 系统的除碳脱氮效果和细菌群落结构变化	陈燕, 刘国华, 范强, 汪俊妍, 齐鲁, 王洪臣 (2610)
利用主要缺氧段 ORP 作为连续流单污泥污水脱氮除磷系统调控参数	王晓玲, 宋铁红, 殷宝勇, 李静文, 李紫棋, 余勇 (2617)
连续流态下以实际低基质生活污水培养好氧颗粒污泥及其脱氮性能	姚力, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建 (2626)
广东清远电子垃圾拆解区农田土壤重金属污染评价	张金莲, 丁疆峰, 卢桂宇, 党志, 易筱筠 (2633)
山东省临沂市土壤有机氯农药滴滴涕残留量与空间分布特征	喻超, 王增辉, 王红晋, 代杰瑞, 庞绪贵, 赵西强, 刘华峰 (2641)
金华市萤石矿区土壤氟污染评价	叶群峰, 周小玲 (2648)
土壤碳收支对秸秆与秸秆生物炭还田的响应及其机制	侯亚红, 王磊, 付小花, 乐毅全 (2655)
黄土区果园和刺槐林生态系统土壤有机碳变化及影响因素	李如剑, 王蕊, 李娜娜, 姜继韶, 张彦军, 王志齐, 刘庆芳, 吴得峰, 郭胜利 (2662)
缙云山土地利用方式对土壤轻组及颗粒态有机碳氮的影响	雷利国, 江长胜, 郝庆菊 (2669)
塔里木河上游典型绿洲土壤酶活性与环境因子相关分析	朱美玲, 贡璐, 张龙龙 (2678)
不同部位玉米秸秆对两种质地黑土 CO ₂ 排放和微生物量的影响	刘四义, 梁爱珍, 杨学明, 张晓平, 贾淑霞, 陈学文, 张士秀, 孙冰洁, 陈升龙 (2686)
1株对叔丁基邻苯二酚降解菌的筛选鉴定及响应面法优化其降解	贺强礼, 刘文斌, 杨海君, 彭晓霞, 关向杰, 黄水娥 (2695)
耐高浓度沼液产油小球藻的分离鉴定与特征分析	杨圆, 王文国, 马丹炜, 汤晓玉, 胡启春 (2707)
水介质中 C ₆₀ 纳米晶体颗粒与 Cu ²⁺ 对小鼠腹腔巨噬细胞的复合毒性研究	于叶, 卞为林, 张慧敏, 张波, 何义亮 (2713)
地表水体中同时分析 18 种糖皮质激素方法的建立	郭文景, 常红, 孙德智, 吴丰昌, 杨浩 (2719)
《环境科学》征订启事 (2553) 《环境科学》征稿简则 (2640) 信息 (2546, 2609, 2616, 2647)	

2013 年 12 月中国中东部地区严重灰霾期间上海市颗粒物的输送途径及潜在源区贡献分析

李莉^{1,2}, 蔡鋈琳^{1,2,3}, 周敏^{1,2}

(1. 上海市环境科学研究院, 上海 200233; 2. 国家环境保护城市大气复合污染成因与防治重点实验室, 上海 200233; 3. 华东理工大学中德工学院, 上海 200237)

摘要: 2013 年 12 月初中国中东部地区发生了入冬以来最为严重的一次长时间、大范围的高浓度颗粒物污染过程, 期间上海市 PM_{10} 小时浓度最大值超过 $700 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\text{PM}_{2.5}$ 最大小时浓度超过 $600 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 为研究此次严重灰霾污染期间影响上海的污染气团的主要传输途径, 采用 HYSPLIT 后向轨迹结合聚类分析方法, 探讨了本次污染事件中到达上海的主要气团轨迹, 结合上海城区在线观测的 PM_{10} 小时浓度资料, 通过计算潜在源贡献因子 PSCF 和浓度权重轨迹 CWT, 分析了影响上海 2013 年 12 月 PM_{10} 质量浓度的潜在源区, 并探讨了不同源区对上海市 PM_{10} 质量浓度贡献的差异. 结果表明, 西北路径和北路径是污染事件中的主要输送通道, 在到达上海的气团轨迹中, 大陆气团和海洋气团分别占总轨迹的 79.6% 和 20.4%, 影响上海的潜在源区除长三角一带的江苏、浙江和安徽等人口密集, 工业、重工业和交通污染严重的地区以外, 山东、河北、河南等地对于上海城区颗粒物污染亦有一定贡献. 研究表明, 区域大气污染联防联控乃至跨区域联动对于应对当前频发的重污染态势具有极为重要的意义.

关键词: 潜在源贡献因子法; 权重分析法; 输送途径; 潜在源区; 上海

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)07-2327-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.07.001

Potential Source Contribution Analysis of the Particulate Matters in Shanghai During the Heavy Haze Episode in Eastern and Middle China in December, 2013

LI Li^{1,2}, CAI Jun-lin^{1,2,3}, ZHOU Min^{1,2}

(1. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of the Cause and Prevention of Urban Air Pollution Complex, Shanghai 200233, China; 3. Sino-German College of Technology, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: A heavy haze pollution episode occurred in early December, 2013 in middle and eastern China, which lasted for a long period, and covered a large area. During this episode, the hourly maximum concentrations of PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ in Shanghai exceeded $700 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ and $600 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, respectively. To obtain the major air mass transportation path, trajectories reaching urban Shanghai area were analyzed using HYSPLIT model and cluster analysis. Potential Source Contribution Function (PSCF) and Concentration-Weighted Trajectory (CWT) methods were applied to study the potential source regions and the individual contributions to PM_{10} in Shanghai in December, 2013. The results showed that the northwest and the north paths were the major air mass transport paths in December, among which 79.6% of the total trajectories came from mainland, while 20.4% reached Shanghai through the ocean. These were the main transportation paths causing high PM_{10} mass concentration in December in Shanghai. The potential regions affecting the heavy haze episode in early December in Shanghai were distributed in the Yangtze River Delta including Jiangsu, Zhejiang and Anhui. Besides, air mass from Shandong, Hebei and Henan also had certain impact. The results showed that regional and even super-regional pollution joint control was of significant importance to reduce the frequent heavy air pollution episodes.

Key words: potential source contribution function analysis; concentration-weighted trajectory; transportation path; potential source region; Shanghai

随着我国东部地区城市化进程的加快, 社会经济活动水平和能源消费总量快速上升, 大气污染物排放高度集中, 在冬季不利气象条件作用下, 使得我国东部城市群呈现严重的灰霾污染态势^[1-3]. 继 2013 年 1 月我国中东部地区出现一次连续强霾污染过程之后, 2013 年 12 月初, 我国中东部地区再次

出现了极为严重的灰霾事件, 且持续时间和污染程度较前一次更强. 根据环境保护部发布的 12 月重

收稿日期: 2014-12-10; 修订日期: 2015-03-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41205122); 国家科技支撑计划项目(2014BAC22B03); 上海市科委科技攻关项目(14DZ1202905)

作者简介: 李莉(1979~), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为大气污染来源与控制, E-mail: lili@saes.sh.cn

点区域空气质量状况 (<http://datacenter.mep.gov.cn/>), 京津冀和长三角地区重度污染和严重污染天数持续 10 d 之多. 天津、山东、江苏、安徽、浙江、上海等地 $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度超过 $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 部分地区达到 $300 \sim 500 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 上海市 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 小时浓度分别高达 $700 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $600 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上.

国内已有研究均表明^[4-9], 大气颗粒物的污染水平和时空分布与其输送途径密切相关. 因此, 许多学者通过分析气团轨迹来定性或定量研究一个地区大气颗粒物的区域传输特征. 潜在源贡献因子法 (potential source contribution function, PSCF) 和权重分析法 (concentration-weighted trajectory, CWT) 便是用来分析气团输送轨迹的重要研究方法. 王爱平等^[10]利用潜在源贡献因子法 (PSCF) 和权重分析法 (CWT) 研究了不同气团背景下黄山顶积聚模态颗粒物数浓度的潜在源区和不同潜在源区对颗粒物数浓度的贡献. 王茜^[11]利用后向轨迹 (HYSPLIT) 模式和全球资料同化系统 (global data assimilation system, GDAS) 气象数据, 计算了 2010 年 12 月至 2011 年 11 月期间抵达上海的气流后向轨迹, 并结合聚类方法和上海 SO_2 、 NO_2 和 PM_{10} 数据, 分析了各季节不同类型气流轨迹对污染物浓度的影响. 赵恒等^[12]利用 HYSPLIT 轨迹模式和 NCEP 气象再分析资料, 计算了 2001 年 3 月 TRACE-P 期间抵达香港地区的后向气流轨迹, 并分析了香港地区的大气污染输送特征. 刘娜等^[13]通过计算潜在源贡献因子和浓度权重轨迹, 研究了影响兰州市春季 PM_{10} 质量浓度的潜在源区以及不同源区对兰州市春季 PM_{10} 质量浓度贡献的差异. Karaca 等^[14]利用 PSCF 方法计算了伊斯坦布尔、土耳其地区 PM_{10} 潜在长距离源贡献. 这些研究对于基于气流轨迹分析大气污染的传输通道, 了解本地污染和区域传输特征具有重要意义. 然而针对冬季东部地区频发的重度污染事件, 期间对上海市颗粒物浓度具有贡献的潜在影响区域研究仍然较少.

2013 年 12 月我国中东部地区严重灰霾过程涉及到京津冀、长三角、珠三角等中国东部区域, 为探讨长三角区域及跨区域输送对上海地区高浓度颗粒物的影响, 本研究利用 HYSPLIT 轨迹模式^[15], 结合聚类分析 (cluster analysis, CA)、潜在源贡献因子分析 (PSCF) 和浓度权重轨迹 (CWT) 分析方法, 探讨了重度污染期间影响上海的主要气团轨迹, 分析了上海市 PM_{10} 的潜在源区和污染输送特征, 以期为我国区域大气污染联防联控和跨区大气污染联防联

控提供重要科学依据.

1 材料与方法

1.1 轨迹聚类分析

利用美国大气海洋局开发的 HYSPLIT 轨迹模式^[16], 结合美国环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 和国家大气研究中心 (National Center for Atmospheric Research, NCAR) 联合发布的全球再分析资料 (Final Operational Global Analysis, FNL), 计算到达上海城区 (31.15°N , 121.43°E) 的 96 h 后向轨迹, 每天计算 24 个时次 (00:00 ~ 23:00). 轨迹计算起始点高度为 500 m. 该方法根据气团的移动速度和移动方向对大量轨迹进行聚类, 获得不同轨迹类型来分析污染物的潜在源区.

1.2 潜在源贡献因子法

潜在源贡献因子 (PSCF) 算法, 也称为滞留时间分析法, 是一种根据气流轨迹分析辨别源区的方法^[17]. 该方法利用 HYSPLIT 模型所计算的后向轨迹在空间中的停留时间, 通过污染过程与所有轨迹在途经区域所停留时间的比值, 来解析每个区域对受点地区的污染贡献. 该方法需要对污染因子设定阈值, 当后向轨迹上的点所对应的要素值高于这个阈值时, 则认为该轨迹点为污染轨迹. PSCF 值是所选研究区域内经过网格 (i, j) 的污染轨迹上的点数 (m_{ij}) 与经过该受点的所有轨迹上的点数 (n_{ij}) 的比值^[18], 即:

$$\text{PSCF}_{ij} = m_{ij}/n_{ij} \quad (1)$$

PSCF 的值越大, 表明该地区对于上海市 PM_{10} 的质量浓度贡献也越大.

由于 PSCF 是一种条件概率, 当 n_{ij} 较小时, PSCF 计算结果的不确定性较大. 为降低计算的不确定性, 一些学者引入了权重函数 W_{ij} ^[19-23], 即:

$$\text{WPSCF} = W_{ij} \times \text{PSCF} \quad (2)$$

当某一网格中的所有轨迹点数 (n_{ij}) 小于研究区域每个网格内平均轨迹端点数的 3 倍时^[21], 需要引入 W_{ij} 来降低 PSCF 的不确定性.

1.3 浓度权重轨迹分析法

潜在源贡献因子法 (PSCF) 反映的是某网格中污染轨迹所占的比例, 无法区分相同 PSCF 值的网格对受点 PM_{10} 质量浓度贡献的大小. 为此, 本研究进一步采用浓度权重轨迹分析法 (CWT) 计算气流轨迹的污染权重浓度, 用于反映不同轨迹的污染程度. 在浓度权重轨迹分析法中, 每个网格都有一个

权重浓度,通过计算经过该网格的轨迹对应的观测点的 PM_{10} 质量浓度的平均值来实现,计算公式见式(3):

$$c_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^M c_l \times \tau_{ijl}}{\sum_{i=1}^M \tau_{ijl}} \times W(n_{ij}) \quad (3)$$

式中, c_{ij} 为网格(i, j)的平均污染权重浓度;1代表气流轨迹; c_l 是轨迹1经过网格(i, j)时对应的上海市 PM_{10} 质量浓度; τ_{ijl} 是轨迹1在网格(i, j)停留的时间,计算过程中,使用落在网格内的轨迹端点数来代替停留时间,采用与 PSCF 分析法相同的权重函数 $W(n_{ij})$ 。

本研究综合利用轨迹聚类分析法、潜在源贡献因子法和浓度权重轨迹分析法,分析了 2013 年 12 月严重污染期间影响上海城区高浓度 PM_{10} 的潜在源区。观测资料利用上海市环境科学研究院基于大气污染在线观测站记录的 2013 年 12 月可吸入颗粒物 PM_{10} 的小时质量浓度资料进行分析,气象资料取自美国环境预报中心(NCEP)和美国国家大气研究中心(NCAR)的全球再分析资料。研究区域包含主要污染轨迹所覆盖的地理区域,范围为($110^{\circ} \sim 124^{\circ}E$, $28^{\circ} \sim 43^{\circ}N$),网格精度为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 。在 PSCF 分析中,选取 PM_{10} 浓度 $150 \mu g \cdot m^{-3}$ (日均浓度二级标准限值)作为阈值,探讨了不同地区对于上海城区 PM_{10} 浓度贡献的大小。当 n_{ij} 小于 3 倍轨迹点数时,使用权重函数降低 PSCF 的不确定性。本研究参考 Wang 等^[18]的研究成果,使用式(4)所列权重函数:

$$W_{ij} = \begin{cases} 1 & 3n_{ave} < n_{ij} \\ 0.7 & 1.5n_{ave} < n_{ij} \leq 3n_{ave} \\ 0.42 & n_{ave} < n_{ij} \leq 1.5n_{ave} \\ 0.17 & n_{ij} \leq n_{ave} \end{cases} \quad (4)$$

2 结果与讨论

2.1 污染过程分析

自 2013 年 11 月 28 日起,我国华北、华东地区主要受大陆高压控制,且天气系统稳定,移动速度缓慢,地面风速较小。在此不利气象条件影响下,我国华北、黄淮流域、长三角地区自北向南多省市陆续出现严重空气污染。自 11 月 30 日起,河南、山东地区开始出现 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 浓度上升现象,12 月 1 日起,污染范围逐渐扩大至江苏和上海北部,12 月 2 日污染范围进一步扩大至华北和华东大部分地区,包括河北、山东、安徽、江苏、上海等地;12 月 3

日以来,东部多数地区持续维持大范围和高浓度细颗粒物的污染形势。期间,多个城市空气质量指数 AQI (air quality index) 超过 200,最高达到 400 以上。图 1 所示为韩国气象局记录的 2013 年 12 月污染期间(12 月 2~3 日,12 月 7~8 日)地面天气形势图 (<http://web.kma.go.kr/chn/weather/images/analysischart.jsp>)。

地面观测资料清晰地记录了区域污染过程。12 月 1 日,长三角地区 12 个城市空气质量均出现重度污染。12 月 2 日,污染持续加重,盐城、淮安、泰州和南通 4 个城市空气严重污染,上海、连云港、常州等 12 个城市空气质量达到重度污染。12 月 3~4 日,地面风场转为东南风和东北风,大气扩散条件有所改善,但长三角地区持续维持大范围 and 较高浓度的污染形势,多个城市 $PM_{2.5}$ 小时最大浓度达到 $200 \sim 700 \mu g \cdot m^{-3}$ 。12 月 5 日,西南地区的大雾和华北地区的霾有所减缓,华东地区高空受西风影响,地面受大陆高压控制。12 月 6 日,受高空气旋影响,相对湿度较大,低空温度有所降低,逆温层消散,气流形成回旋,污染气团积聚。江苏、上海、浙江、安徽等东部地区的颗粒物持续累积,大多数城市空气质量等级均为严重污染。其中,嘉兴、南通、淮安、上海等地均出现了 $PM_{2.5}$ 浓度超 $500 \mu g \cdot m^{-3}$ 的情况,最高浓度为 $635 \mu g \cdot m^{-3}$ 。图 2 所示为 2013 年 12 月污染期间 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布 (<http://datacenter.mep.gov.cn>)。

上海市地面观测资料显示,11 月 25~26 日上海市出现一次浮尘污染。12 月 1 日 08:00 出现近地逆温,逆温层高度低至 200 m 以下,地面风速约 $2 m \cdot s^{-1}$,主导风向为偏西偏北风, $PM_{2.5}$ 日均浓度为 $220.8 \mu g \cdot m^{-3}$ (<http://www.semc.gov.cn/aqi/home/Index.aspx>),是国家二级标准($75 \mu g \cdot m^{-3}$)的 2.9 倍。12 月 2 日早上,上海市仍然出现近地逆温,天气静稳,风速下降至 $1 m \cdot s^{-1}$,达到重度污染水平, $PM_{2.5}$ 日均浓度为 $243.5 \mu g \cdot m^{-3}$ 。12 月 3 日上海地区北部为低压控制,地面主导风向转为东南风,空气污染得到一定稀释, $PM_{2.5}$ 日均浓度降至 $143.3 \mu g \cdot m^{-3}$ 。12 月 4 日全市 $PM_{2.5}$ 日均浓度下降至 $123.8 \mu g \cdot m^{-3}$ 。12 月 5 日上午,上海地区出现大雾,08:00 在 190~800 m 高度上出现等温,地面风速极小,不利于污染物扩散,颗粒物和气态污染物浓度显著上升。之后随着气温升高,相对湿度有所降低,但 $PM_{2.5}$ 浓度不减反增。20:00 上海地区再次出现接地逆温,夜间多出现静风,相对湿度一直处于较高水

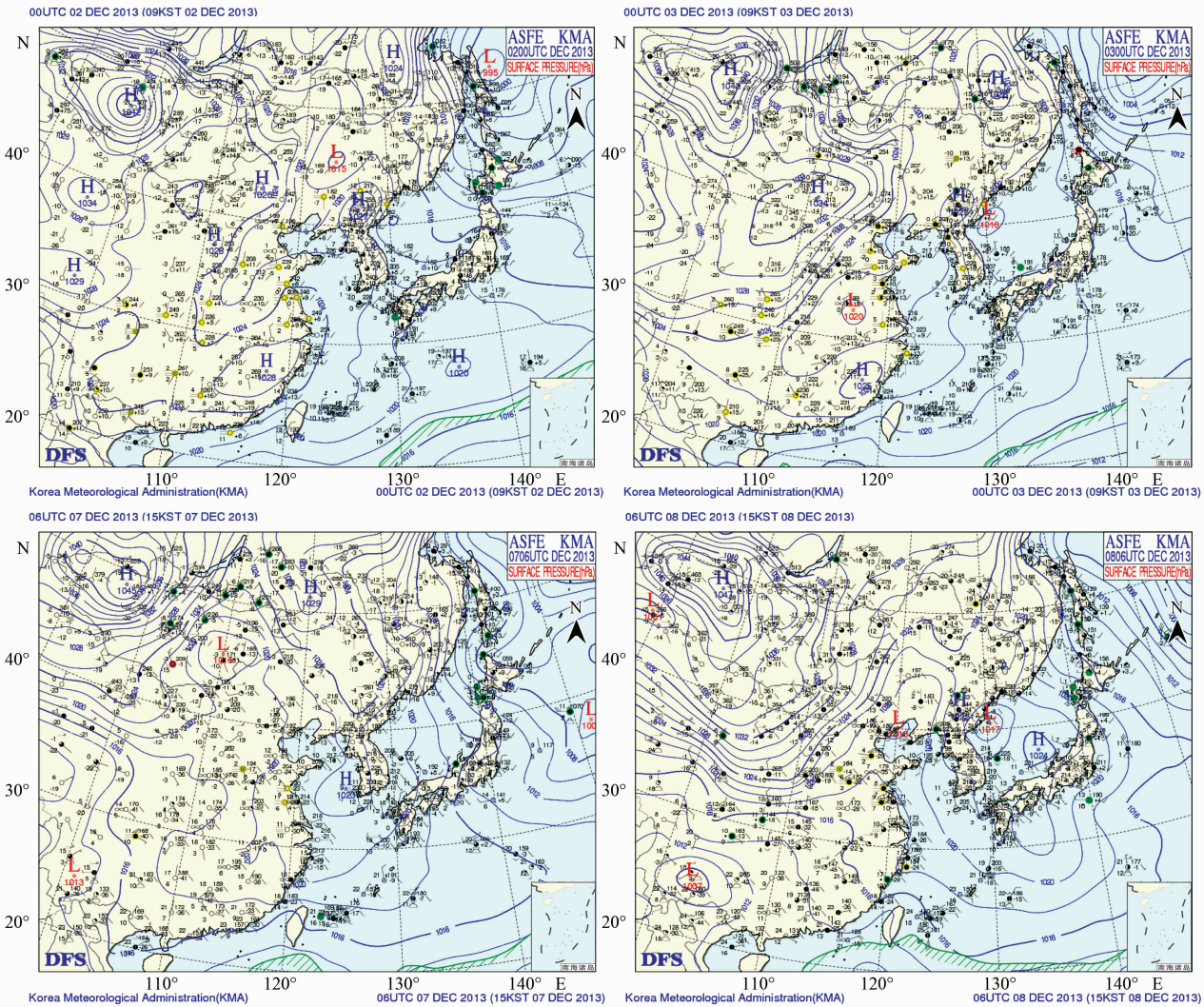


图 1 2013 年 12 月污染期间东亚地面天气形势

Fig. 1 Surface weather patterns over the eastern Asia during December, 2013

平,接近 90%。在此极端不利气象条件影响下,上海市颗粒物浓度不断攀升,PM_{2.5}日均浓度为 254.7 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。期间,PM_{2.5}小时浓度持续累积上升,在 12 月 6 日凌晨 02:00,超过 500 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,13:00 冲高到 602 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,PM_{2.5}在 PM₁₀中的比重上升至 80% 以上,细粒子污染非常严重。12 月 7~8 日上海市污染水平较之前有大幅度改善,但是从 12 月 9 日凌晨开始,受北方冷空气影响,上海地面主导风向由南风转为西北风,温度下降,风速增大,小时最高风速达到 9 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,颗粒物浓度迅速上升,PM₁₀浓度从 104 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 升高到 478 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,PM_{2.5}达到 300 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,PM_{2.5}/PM₁₀从 12 月 6 日的 80% 下降到 62.7%。图 3 所示为美国怀俄明州大学站点探空数据所记录的污染期间近地层逆温情况 (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>),从中可见,污染期间早

08:00前后上海地区逆温层高度均在 200 m 以下,扩散条件较差。

图 4 所示为上海市环境科学研究院大气复合污染地面观测站所记录的整个污染过程,给出了主要颗粒态污染物 PM₁₀、PM_{2.5}、黑碳(BC);气态污染物二氧化氮(NO₂)、一氧化氮(NO)、一氧化碳(CO)、二氧化硫(SO₂)、臭氧(O₃);能见度(Vis)以及气象参数相对湿度(RH)、温度(AT)和风速风向(WS、WD)的小时变化。从中可见,整个污染过程可以为 4 个阶段。Case I:11 月 26 日,浮尘污染。期间 PM_{2.5}浓度小于 150 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,PM_{2.5}在 PM₁₀中的比重约为 30%,污染以粗颗粒为主,相对湿度为 50%。Case II:12 月 1~3 日,灰霾污染。期间 PM_{2.5}最大小时浓度为 300 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,PM_{2.5}在 PM₁₀中的比重约为 70%,高污染持续时间 96h。Case III:12 月 5~6 日,雾霾污染,频繁大雾。期间 PM_{2.5}最大小

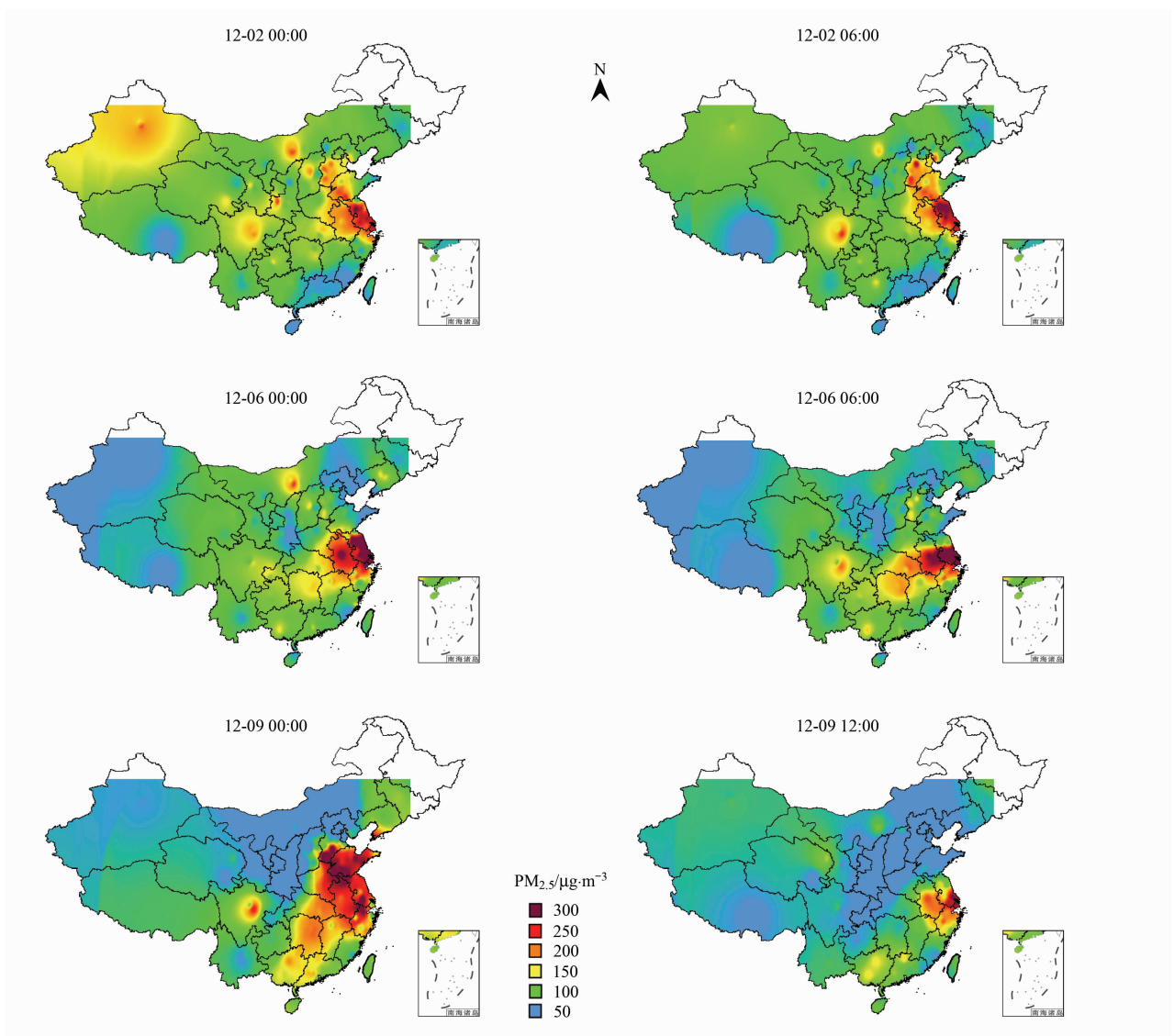


图 2 2013 年 12 月污染期间地面细颗粒物浓度空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of surface $\text{PM}_{2.5}$ during the haze episode in December, 2013

时浓度 $635.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ， $\text{PM}_{2.5}$ 在 PM_{10} 中的比重约为 80%。Case IV：12 月 9 日，过境污染，北方强冷空气到达后，对雾霾的清扫作用强烈。

2.2 后向轨迹分析

利用美国国家大气研究中心 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 的 HYSPLIT 模式，结合美国环境预报中心 (NCEP) 和 NOAA 联合发布的全球再分析资料 (FNL)，对 12 月上海城区的后向轨迹进行聚类^[24]，计算 2013 年 12 月全月到达上海城区的 742 条 96 h 后向轨迹，轨迹计算的起始点高度为 500 m，这主要是因为 500 m 高度的风场既能减少地面摩擦对于气流轨迹的影响，又能较准确地反映近地层的气团输送特征^[25]。分析得到的聚类轨迹如图 5 所示。聚类分析结果表明，来自

北部和西北部的长距离输送^[26]轨迹 (4、5、6 类) 占总轨迹的 23.1%，其中以第 5 类为主，占 12.1%；第 3 类轨迹在抵达上海前会有一部分途径海洋，占总轨迹的 20.4%；第 1 类城市间输送^[26]轨迹最短，来自上海的西北部地区，占总轨迹的 19.0%；第 2 类轨迹来自西北部，所占比例高达 37.5%。

为探讨区域输送乃至跨区域传输对本次上海市严重污染的影响，本研究以上海市环境科学研究院 ($31.15^{\circ}\text{N}, 121.43^{\circ}\text{E}$) 为受点，以 2013 年 11 ~ 12 月为模拟时段，以每日 00:00 (UTC) 为后推起始时间，利用 HYSPLIT 模式模拟每次气流移动的 96 h 后向轨迹，模拟高度为 500 m，将时间段分为 11 月 26 日、12 月 1 ~ 3 日、12 月 5 ~ 6 日、12 月 9 日这 4 个污染过程绘制气流轨迹，如图 6 所示。从中可见，期

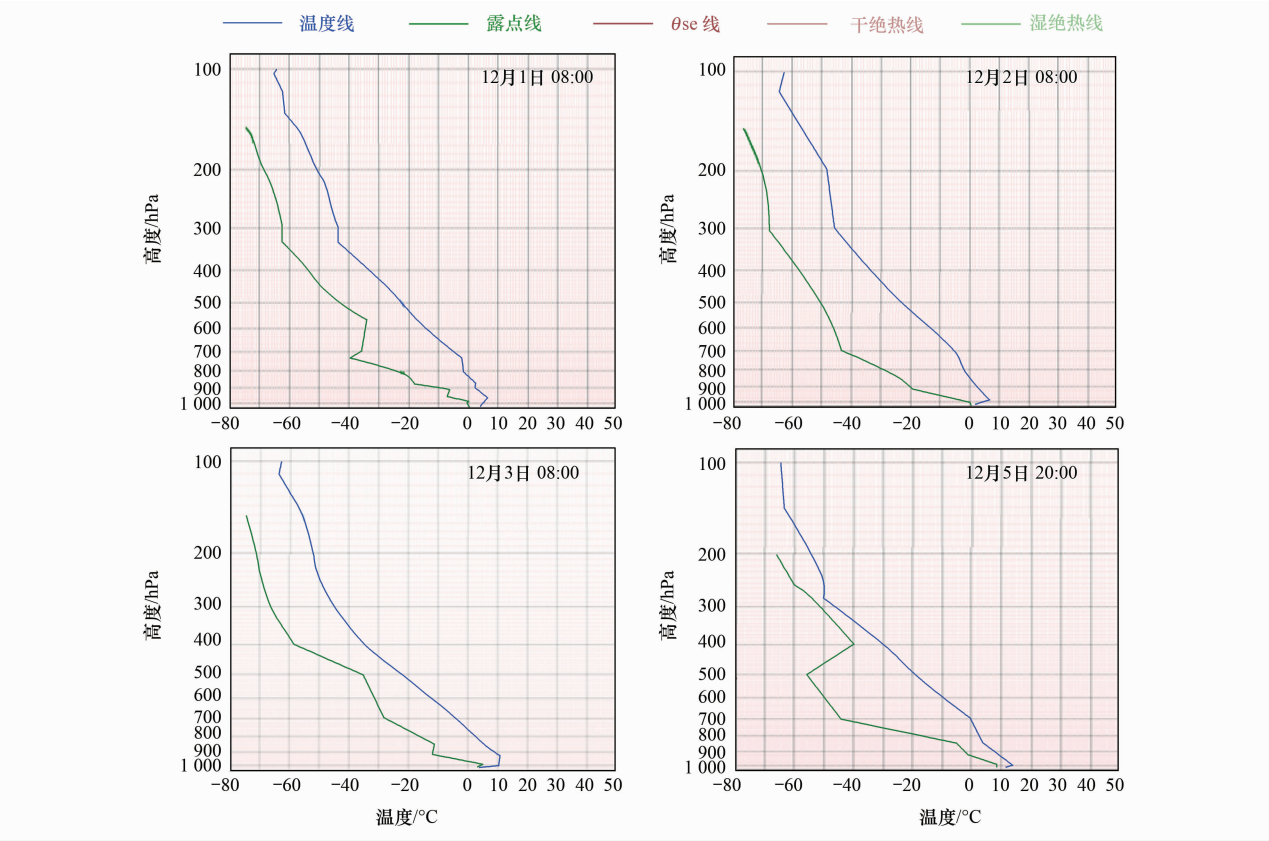


图 3 2013 年 12 月污染期间上海市近地层逆温情况

Fig. 3 Temperature inversion over Shanghai during the haze episode in December, 2013

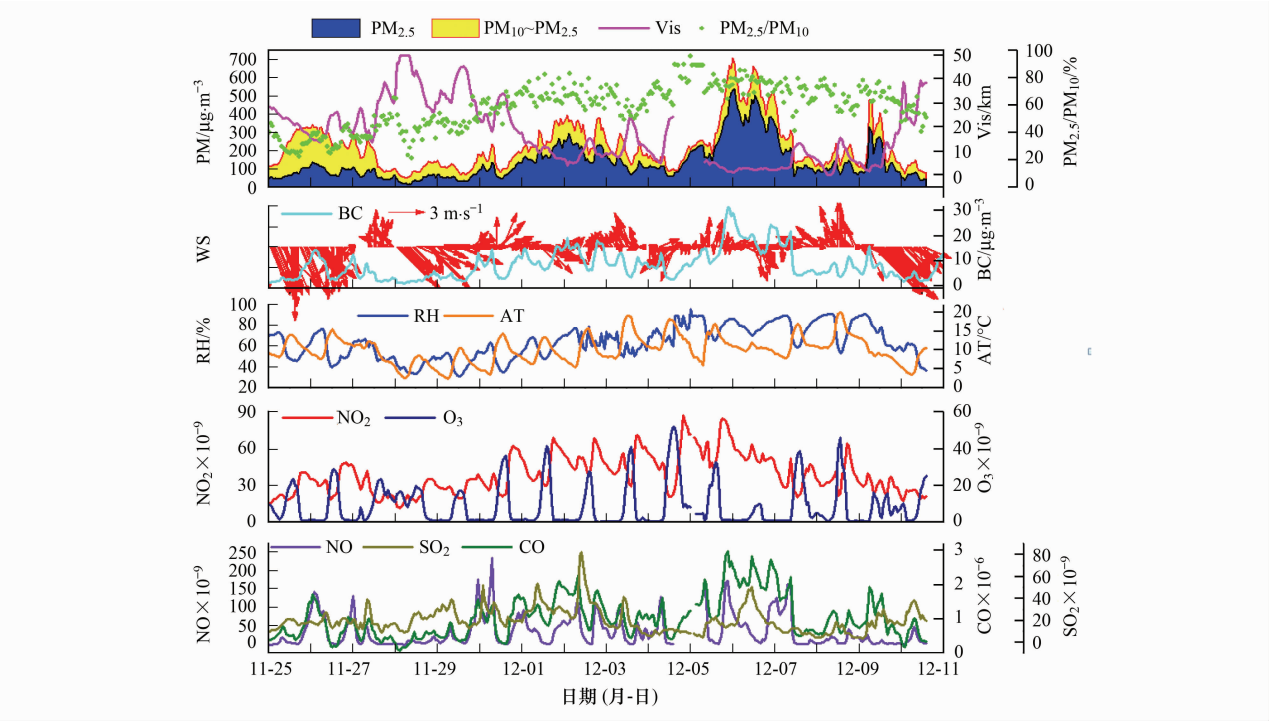


图 4 2013 年 12 月上海市严重污染过程中地面观测资料时间序列

Fig. 4 Time series of the observational data during the pollution episode in Shanghai in December, 2013

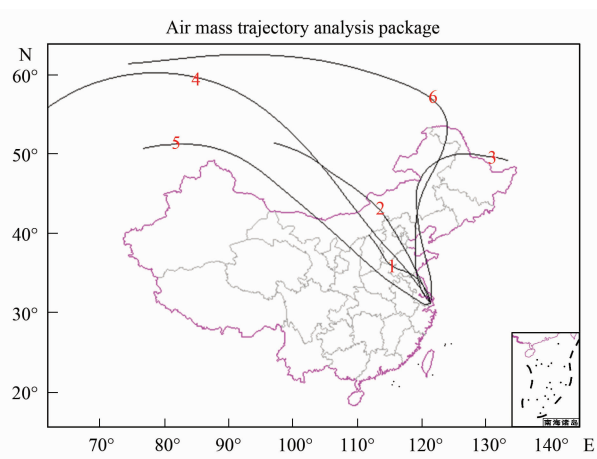


图 5 2013 年 12 月上海城区 500 m 高度 6 种基本路径来源

Fig. 5 The 6 basic transport paths to Shanghai at 500 m height in December, 2013

间上海城区的气流轨迹均来自西北方向,但途径地域有显著区别。11 月 26 日的轨迹来自于长距离输送的西北方向通道;12 月 1~3 日气团轨迹来自于西北方和北方通道;12 月 5~6 日的轨迹主要集中于长三角地区;12 月 9 日的轨迹来自于西北方向和北方通道。

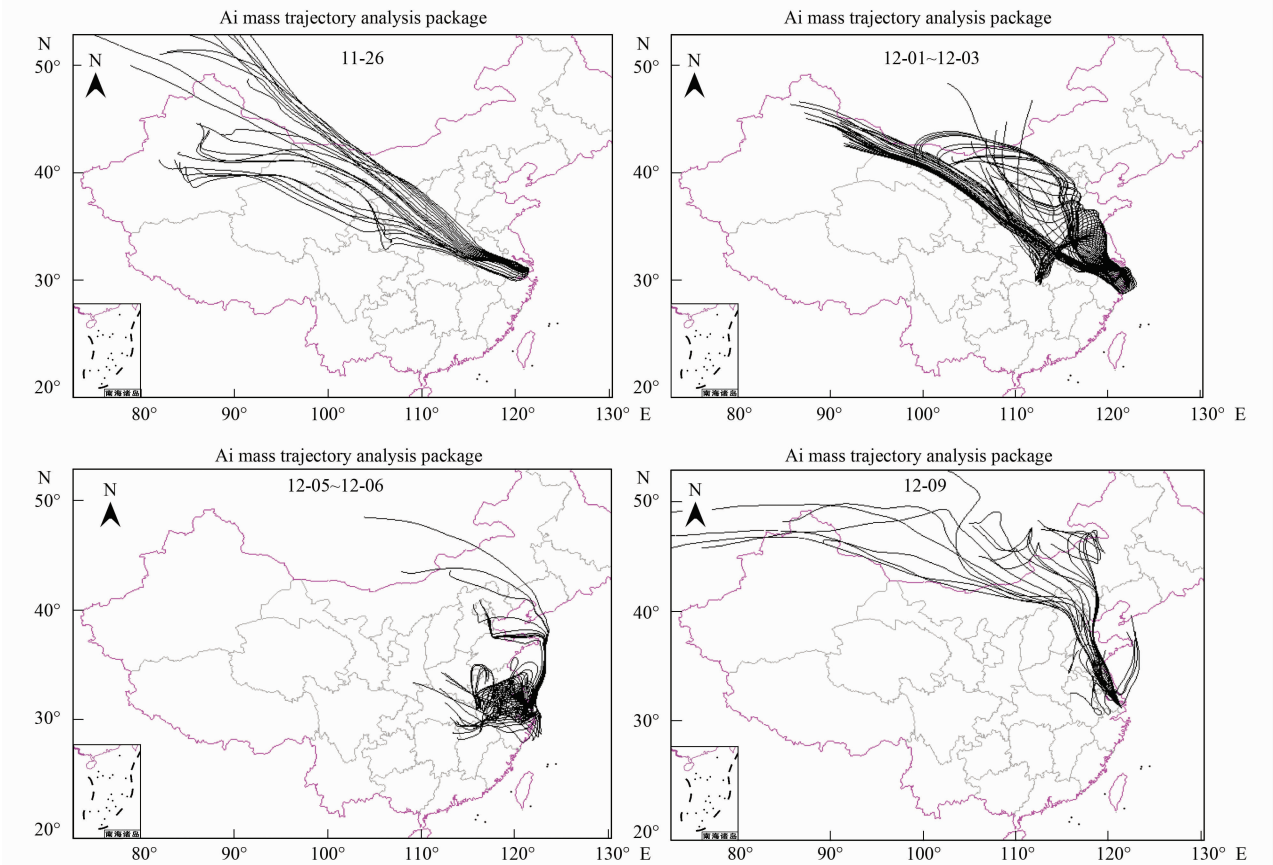


图 6 2013 年 12 月 4 次污染事件中上海城区后向轨迹

Fig. 6 Backward trajectories of the transport paths to Shanghai during the 4 pollution events in December, 2013

2.3 潜在源贡献因子分析

图 7 给出了 4 次污染过程中潜在源贡献因子分析 (WPSCF) 的计算结果,网格颜色越深表示 WPSCF 的值越大,表征该网格区域对于上海颗粒物质量浓度的影响也越大。从中可见,11 月 26 日浮尘污染过程中,对上海市贡献较大的深色区域主要集中江苏、安徽、河南、陕西等地区,这些潜在源区的气团沿着西北-东南气流轨迹通过长距离传输到达上海。

12 月 1~3 日期间,对上海市 PM₁₀ 质量浓度贡献较大的区域主要集中于江苏、浙江、安徽、河南和河北地区,表明西北气流将我国内陆地区的污染经长距离输送到达下风向的上海区域。

12 月 5~6 日严重雾霾期间,对上海市污染贡献较大的区域为长三角的安徽、江苏和浙江北部地区,除此之外,山东北部、河北、天津等地也有一些气团轨迹经海上输送到上海。

12 月 9 日,沙尘过境的 WPSCF 计算结果表明,我国北部、西北部区域对上海市的污染均有一定程度的影响,但由于本次污染持续时间较短,污染贡献较大区域主要集中于长三角以北地区。

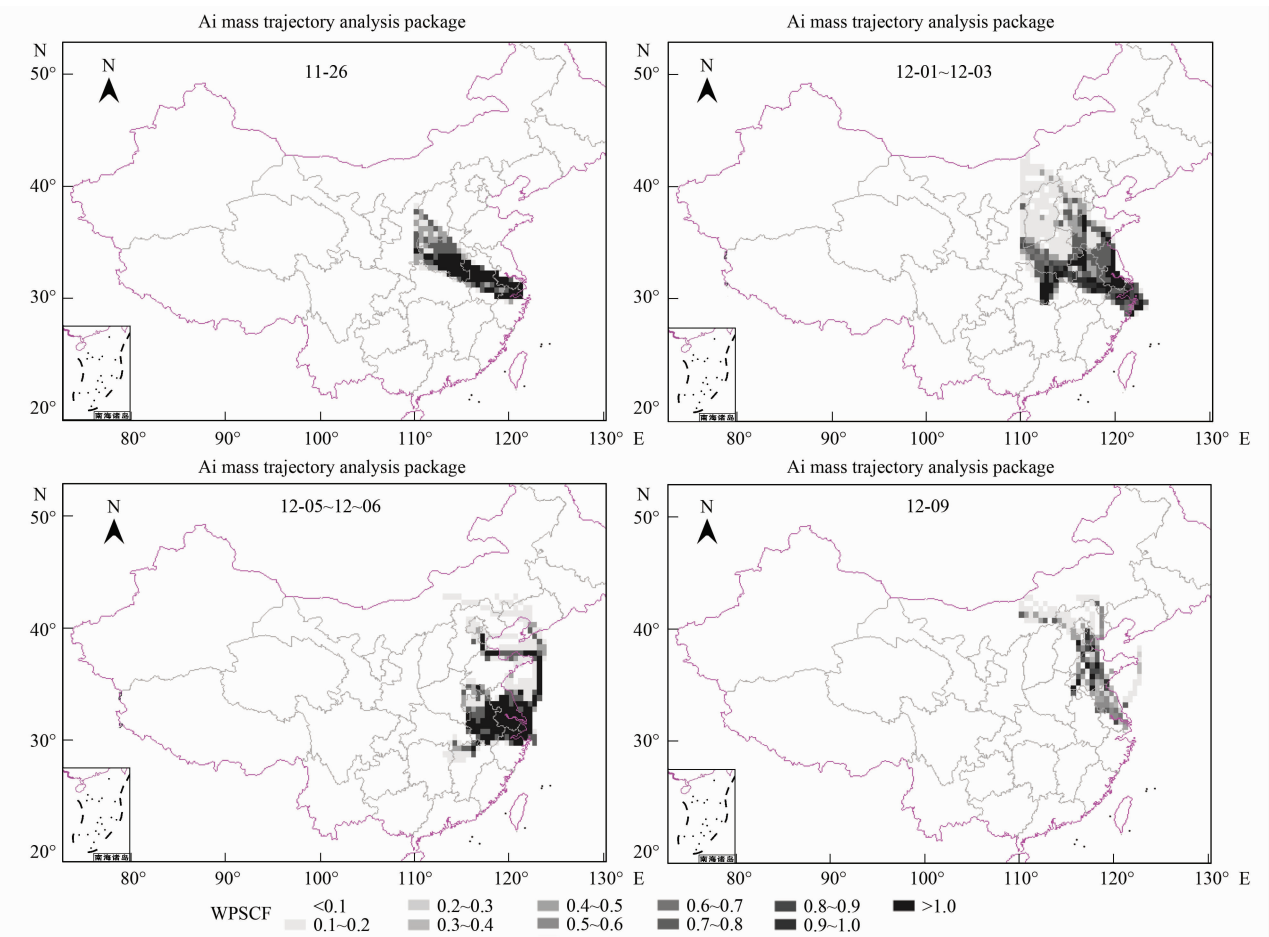


图 7 2013 年 12 月 4 次污染过程中上海城区潜在源贡献因子分析

Fig. 7 PSCF analysis during the four pollution events in Shanghai in December, 2013

2.4 浓度权重轨迹分析

图 8 所示为 4 次污染过程中上海城区 PM_{10} 浓度权重轨迹分析(WCWT)的计算结果,给出了潜在源区对上海市 PM_{10} 质量浓度相对贡献的大小. 从 Case I ~ IV 可见,本次污染过程中对上海市贡献较大的区域为长三角地区. Case II 污染过程中,对上海城区 PM_{10} 贡献显著的区域由长三角地区向北部区域扩大至山东西部、河北、河南一带. 2013 年 12 月 5 ~ 6 日 Case III 污染过程分析可见,由于天气极为静稳,北部地区的污染贡献降低,对上海城区贡献较大的区域集中于长三角地区. Case IV 过境污染过程的浓度权重轨迹 CWT 分布给出了潜在源区对上海市 PM_{10} 质量浓度贡献的相对大小,对上海城区 PM_{10} 贡献显著的区域由长三角地区向山东,河北东部,天津迁移,但总体浓度贡献下降.

3 结论

(1)对 2013 年 12 月上海城区的后向轨迹聚类分析发现,主要气团轨迹有 6 类,西北路径和北路径

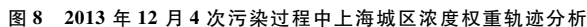
是污染事件中的主要输送通道,影响上海的大陆气团和海洋气团分别占总轨迹的 79.6% 和 20.4%,是造成上海 12 月高浓度 PM_{10} 污染的主要传输途径,冬季影响上海的潜在源区分布在江苏、浙江、安徽、山东、河南和河北.

(2)综合潜在贡献因子法(PSCF)和浓度权重轨迹分析(CWT)的结果可知,影响上海城区 12 月上旬高浓度 PM_{10} 的主要潜在源区分布除长三角一带的江苏、浙江和安徽等一些人口密集,工业、重工业和交通污染严重的地区以外,山东、河北、河南等地对于上海城区颗粒物污染亦有一定贡献.

(3)研究结果表明,受气象条件影响,在不同污染过程中,对上海城区产生污染贡献的区域存在显著差别. 长三角区域大气污染联防联控,乃至跨区域大气污染联防联控对于应对当前频发的重污染态势具有极为重要的意义.

参考文献:

[1] 杨欣,陈义珍,刘厚凤,等. 北京 2013 年 1 月连续强霾过程的污染特征及成因分析[J]. 中国环境科学, 2014, 34(2):



282-288.

- [2] 王跃思,姚利,王莉莉,等. 2013年元月我国中东部地区强霾污染成因分析[J]. 中国科学:地球科学, 2014, **44**(1): 15-26.
- [3] 王自发,李杰,王哲,等. 2013年1月我国中东部强霾污染的数值模拟和防控对策[J]. 中国科学:地球科学, 2014, **44**(1): 3-14.
- [4] 谭吉华,毕新慧,段菁春,等. 广州市大气可吸入颗粒物(PM₁₀)中多环芳烃的季节变化[J]. 环境科学学报, 2005, **25**(7): 855-862.
- [5] 高瑞海. 保定市大气可吸入颗粒物(PM₁₀)的理化特征及源解析研究[D]. 保定:华北电力大学, 2012.
- [6] 岳辉. 武汉市大气PM₁₀浓度空间分布特征及其影响因素研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2012.
- [7] 戚丹青,谭季青,孙长. 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), 2006, **33**(2): 216-222.
- [8] 任永建,周锁铨,石顺吉,等. 2005年南京市PM₁₀浓度时间序列分析[J]. 气象科学, 2009, **29**(3): 375-380.
- [9] 王跃思,姚利,王莉莉,等. 2013年元月我国中东部地区强霾污染成因分析[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(12): 3009-3016.
- [10] 王爱平,朱彬,银燕,等. 黄山顶夏季气溶胶数浓度特征及其输送潜在源区[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(4): 852-861.
- [11] 王茜. 利用轨迹模式研究上海大气污染的输送来源[J]. 环境科学研究, 2013, **26**(4): 357-363.
- [12] 赵恒,王体健,江飞,等. 利用后向轨迹模式研究 TRACE-P 期间香港大气污染物的来源[J]. 热带气象学报, 2009, **25**(2): 181-186.
- [13] 刘娜,余晔,陈晋北,等. 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, 2012, **35**(4): 477-486.
- [14] Karaca F, Anil I, Alagha O. Long-range potential source contributions of episodic aerosol events to PM₁₀ profile of a megacity [J]. Atmospheric Environment, 2009, **43**(36): 5713-5722.
- [15] Draxler R R, Stunder B, Rolph G, et al. HYSPLIT4 USER'S GUIDE [EB/OL]. <http://gus.arl.hq.noaa.gov/~rdraxler/>

cover. htm.

[16] Draxler R R, Hess G D. An overview of HYSPLIT_4 modeling system for trajectories dispersion and deposition [J]. Australian Meteorological Magazine, 1998, **47**: 295-308.

[17] Begum B A, Kim E, Jeong C H, *et al.* Evaluation of the potential source contribution function using the 2002 Quebec forest fire episode [J]. Atmospheric Environment, 2005, **39** (20): 3719-3724.

[18] Wang Y Q, Zhang X Y, Draxler R R. TrajStat: GIS-based software that uses various trajectory statistical analysis methods to identify potential sources from long-term air pollution measurement data [J]. Environmental Modeling and Software, 2009, **24**(8): 938-939.

[19] Cheng M D, Hopke P K, Barrie L, *et al.* Qualitative determination of source regions of aerosol in Canadian high Arctic [J]. Environmental Science and Technology, 1993, **27** (10): 2063-2071.

[20] Hopke P K, Barrie L A, LI S M, *et al.* Possible sources and preferred pathways for biogenic and non-sea-salt sulfur for the high Arctic [J]. Geophysical Research, 1995, **100** (D8): 16595-16603.

[21] Polissar A V, Hopke P K, Paatero P, *et al.* The aerosol at Barrow, Alaska: Long-term trends and source locations [J]. Atmospheric Environment, 1999, **33**(16): 2441-2458.

[22] Polissar A V, Hopke P K, Harris J M. Source regions for atmospheric aerosol measured at Barrow, Alaska [J]. Environmental Science and Technology, 2001, **35**(21): 4214-4226.

[23] Xu X, Akhtar U S. Identification of potential regional sources of atmospheric total gaseous mercury in Windsor, Ontario, Canada using hybrid receptor modeling [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010, **10** (15): 7073-7083.

[24] Rafael B, Julio L, Sotiris V, *et al.* Analysis of long-range transport influences on urban PM₁₀ using two-stage atmospheric trajectory clusters [J]. Atmospheric Environment, 2007, **41** (21): 4434-4450.

[25] 徐丽华. 大气程辐射遥感影像与大气环境质量研究——以上海市为例[D]. 上海: 华东师范大学, 2005.

[26] 王艳, 柴发合, 王永红, 等. 长江三角洲地区大气污染物输送规律研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(5): 1430-1435.

CONTENTS

Potential Source Contribution Analysis of the Particulate Matters in Shanghai During the Heavy Haze Episode in Eastern and Middle China in December, 2013	Li Li, CAI Jun-lin, ZHOU Min (2327)
Composition and Regional Characteristics of Atmosphere Aerosol and Its Water Soluble Ions over the Yangtze River Delta Region in a Winter Haze Period	WANG Man-ting, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (2337)
Chemical Species of PM _{2.5} in the Urban Area of Beijing	LIU Bao-xian, YANG Dong-yan, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2346)
Numerical Study on the Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Shandong Province During Spring in 2014	JIA Hai-ying, CHENG Nian-liang, HE You-jiang, <i>et al.</i> (2353)
Characteristics of Water-Soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} Emitted from Coal-Fired Power Plants	MA Zi-zhen, LI Zhen, JIANG Jing-kun, <i>et al.</i> (2361)
Direct Observation on the Temporal and Spatial Patterns of the CO ₂ Concentration in the Atmospheric of Nanjing Urban Canyon in Summer	GAO Yun-qiu, LIU Shou-dong, HU Ning, <i>et al.</i> (2367)
Emission Factors of Vehicle Exhaust in Beijing	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2374)
Adsorption Capacity of the Air Particulate Matter in Urban Landscape Plants in Different Polluted Regions of Beijing	ZHANG Wei-kang, WANG Bing, NIU Xiang (2381)
Major Air Pollutant Emissions of Coal-Fired Power Plant in Yangtze River Delta	DING Qing-qing, WEI Wei, SHEN Qun, <i>et al.</i> (2389)
Estimation of N ₂ O Emission from Anhui Croplands by Using a Regional Nitrogen Cycling Model IAP-N	HAN Yun-fang, HAN Sheng-hui, YAN Ping (2395)
Evaluation on the Impacts of Different Background Determination Methods on CO ₂ Sources and Sinks Estimation and Seasonal Variations	ZHANG Fang, ZHOU Ling-xi, WANG Yu-zhao (2405)
Measured and Predicted Aquatic Life Criteria and Risk Assessment of Chromium (VI) in Liaohe River	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, LIU Zheng-tao, <i>et al.</i> (2414)
Pollution and Potential Ecology Risk Evaluation of Heavy Metals in River Water, Top Sediments on Bed and Soils Along Banks of Bortala River, Northwest China	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwalili, JIANG Feng-qing (2422)
Influencing Factors for Hydrochemistry and δ ¹³ C _{DIC} of Karst Springs	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, LIU Zi-qi, <i>et al.</i> (2430)
Hydrochemical Characteristics and the Dissolved Inorganic Carbon Flux in Liuzhou Section of Liujiang Basin	YUAN Ya-qiong, HE Shi-yi, YU Shi, <i>et al.</i> (2437)
Characteristics of Total Nitrogen and Total Phosphorus Pollution and Eutrophication Assessment of Secondary River in Urban Chongqing	QING Xu-yao, REN Yu-fen, LÜ Zhi-qiang, <i>et al.</i> (2446)
Static Migration and Release of Dibutyl-Phthalate in the Fluctuating Zone of Three Gorges Reservoir	WANG Fa, WANG Qiang, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (2453)
Effect of Drought and Subsequent Re-wetting Cycles on Transferable Nitrogen and Its Form Distribution in the Sediment of Water Level Fluctuating Zone in the Tributary of Three Gorge Reservoir Areas	LIN Jun-jie, ZHANG Shuai, YANG Zhen-yu, <i>et al.</i> (2459)
Distribution of Chlorophyll-a and Eutrophication State in Tianchi Lake of Tianshan Mountains in Summer	WANG Bin, MA Jian, WANG Yin-ya, <i>et al.</i> (2465)
Vertical Distribution Characteristics and Analysis in Sediments of Xidaihai Lake	DUAN Mu-chun, XIAO Hai-feng, ZANG Shu-ying (2472)
Phytoplankton Community Structure and Water Quality Assessment in Jialing River After the Impoundment of Caojie Reservoir	YANG Min, ZHANG Sheng, LIU Shuo-ru (2480)
Analysis of Prokaryotic Community Structure in River Waters of the Ningbo Sanjiang Mouth	HU An-yi, LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, <i>et al.</i> (2487)
Effects of Perfluoroalkyl Substances on the Microbial Community Structure in Surface Sediments of Typical River, China	SUN Ya-jun, WANG Tie-yu, PENG Xia-wei, <i>et al.</i> (2496)
Coupling Effects of Decomposed <i>Potamogeton crispus</i> and Growing <i>Ceratophyllum demersum</i> on Water Quality and Plant Growth	MA Yue, WANG Guo-xiang, CAO Xun, <i>et al.</i> (2504)
Bioretention Media Screening for the Removal of Phosphorus in Urban Stormwater	LI Li-qing, GONG Yan-fang, YAN Zi-qin, <i>et al.</i> (2511)
Treatment of Urban Runoff Pollutants by a Multilayer Biofiltration System	WANG Xiao-lu, ZUO Jian-e, GAN Li-li, <i>et al.</i> (2518)
Effect of Three Typical Disinfection Byproducts on Bacterial Antibiotic Resistance	LÜ Lu, ZHANG Meng-lu, WANG Chun-ming, <i>et al.</i> (2525)
Laboratory Investigation of DNAPL Migration Behavior and Distribution at Varying Flow Velocities Based on Light Transmission Method	GAO Yan-wei, ZHENG Fei, SHI Xiao-qing, <i>et al.</i> (2532)
Comparative Study of Benzotriazole Electrochemical Oxidation at Boron-doped Diamond and PbO ₂ Anodes	WU Juan-li, ZHANG Jia-wei, WANG Ting, <i>et al.</i> (2540)
Sorption of <i>o</i> -Phthalate onto Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, HUANG Li-dong, CHEN Yan-fang, <i>et al.</i> (2547)
Adsorption Behaviors of Lead on Multi-Walled Carbon Nanotube-Hydroxyapatite Composites	ZHANG Jin-li, LI Yu (2554)
Synthesis and Study on Adsorption Property of Congo Red Molecularly Imprinted Polymer Nanospheres	CHANG Zi-qiang, CHEN Fu-bin, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2564)
Simultaneous Removal of Cd(II) and Phenol by Titanium Dioxide-Titanate Nanotubes Composite Nanomaterial Synthesized Through Alkaline-Acid Hydrothermal Method	LEI Li, JIN Yin-jia, WANG Ting, <i>et al.</i> (2573)
Immobilization of Estrogen-degrading Bacteria to Remove the 17β-estradiol and Diethylstilbestrol from Polluted Water and Cow Dung	LI Xin, LING Wan-ting, LIU Jing-xian, <i>et al.</i> (2581)
Optoelectronic PCB Wastewater Treatment by Partial Nitrification-ANAMMOX Integrative Reactor	YUAN Yan, LI Xiang, ZHOU Cheng, <i>et al.</i> (2591)
Treatment of Petrochemical Treatment Plant Secondary Effluent by Fenton Oxidation	WANG Yi, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (2597)
Comprehensive Toxicity Evaluation and Toxicity Identification Used in Tannery and Textile Wastewaters	HUANG Li, CHEN Wen-yan, WAN Yu-shan, <i>et al.</i> (2604)
Carbon/nitrogen Removal and Bacterial Community Structure Change in an A/O Activated Sludge System Under Different Dissolved Oxygen Conditions	CHEN Yan, LIU Guo-hua, FAN Qiang, <i>et al.</i> (2610)
ORP in the Main Anoxic Stage as the Control Parameter for Nitrogen and Phosphorus Removal in the Single Sludge System with a Continuous Flow	WANG Xiao-ling, SONG Tie-hong, YIN Bao-yong, <i>et al.</i> (2617)
Cultivation of Aerobic Granular Sludge with Real Low Concentration Domestic Wastewater and Its Denitrification Performances Under the Continuous Flow	YAO Li, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (2626)
Heavy Metal Contamination in Farmland Soils at an E-waste Disassembling Site in Qingyuan, Guangdong, South China	ZHANG Jin-lian, DING Jiang-feng, LU Gui-ning, <i>et al.</i> (2633)
Residues and Spatial Distribution Characteristics of Organochlorine Pesticides DDTs in Soil of Linyi City, Shandong Province	YU Chao, WANG Zeng-hui, WANG Hong-jin, <i>et al.</i> (2641)
Assessment of Soil Fluorine Pollution in Jinhua Fluorite Ore Areas	YE Qun-feng, ZHOU Xiao-ling (2648)
Response of Straw and Straw Biochar Returning to Soil Carbon Budget and Its Mechanism	HOU Ya-hong, WANG Lei, FU Xiao-hua, <i>et al.</i> (2655)
Changes of Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors of Apple Orchards and Black Locusts in the Small Watershed of Loess Plateau, China	LI Ru-jian, WANG Rui, LI Na-na, <i>et al.</i> (2662)
Impacts of Land Use Changes on Soil Light Fraction and Particulate Organic Carbon and Nitrogen in Jinyun Mountain	LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (2669)
Soil Enzyme Activities and Their Relationships to Environmental Factors in a Typical Oasis in the Upper Reaches of the Tarim River	ZHU Mei-ling, GONG Lu, ZHANG Long-long (2678)
Effects of Different Residue Part Inputs of Corn Straws on CO ₂ Efflux and Microbial Biomass in Clay Loam and Sandy Loam Black Soils	LIU Si-yi, LIANG Ai-zhen, YANG Xue-ming, <i>et al.</i> (2686)
Isolation, Identification of a <i>p</i> - <i>tert</i> -Butylcatechol-Degrading Strains and Optimization for Its Degradation by Response Surface Methodology	HE Qiang-li, LIU Wen-bin, YANG Hai-jun, <i>et al.</i> (2695)
Isolation, Identification and Characteristic Analysis of an Oil-producing <i>Chlorella</i> sp. Tolerant to High-strength Anaerobic Digestion Effluent	YANG Chuang, WANG Wen-guo, MA Dan-wei, <i>et al.</i> (2707)
Coupled Cytotoxicity of C ₆₀ Nano-Crystal Particle with Cu ²⁺ to the Mouse Peritoneal Microphage RAW 264. 7	YU Ye, BIAN Wei-lin, ZHANG Hui-min, <i>et al.</i> (2713)
Simultaneous Analysis of 18 Glucocorticoids in Surface Water	GUO Wen-jing, CHANG Hong, SUN De-zhi, <i>et al.</i> (2719)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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 7 月 15 日 第 36 卷 第 7 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 7 Jul. 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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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 国内邮发代号: 2-821
CN 11-1895/X

国 内 定 价: 120.00 元 国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行