

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	杨阳, 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)	

2014 年春季山东省 PM_{2.5} 跨界输送研究

贾海鹰¹, 程念亮², 何友江³, 陈云波³, 杜晓惠³, 单晓丽³

(1. 湖南省气象服务中心, 长沙 410118; 2. 北京市环境保护监测中心, 北京 100048; 3. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012)

摘要: 利用 CAMx 模式模拟了 2014 年春季(3~5 月)山东省 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 浓度空间分布、输送、沉降特征并建立了各市 PM_{2.5} 跨界输送矩阵. 结果表明, 山东省 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 分布呈现明显的空间差异特征, 鲁西地区浓度较高, 半岛地区浓度较低; 垂直方向上 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 主要集中在 2 000 m 以下. 全省 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 水平输送通量平均达 $110 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 全省总沉降量为 $23.05 \times 10^4 \text{ t}$. 全省近地面 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 外来输送贡献率为 $21.08\% \pm 3.83\%$, 各市外来输送贡献率平均为 $40.45\% \pm 5.96\%$; 随着高度的升高, 京津冀、背景及边界等条件对山东省 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的贡献率明显上升, 分别上升了 7.56%、6.18%.

关键词: CAMx 模式; PM_{2.5}; 传输矩阵; 山东省

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)07-2353-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.07.004

Numerical Study on the Characteristics of Regional Transport of PM_{2.5} in Shandong Province During Spring in 2014

JIA Hai-ying¹, CHENG Nian-liang², HE You-jiang³, CHEN Yun-bo³, DU Xiao-hui³, SHAN Xiao-li³

(1. Hunan Meteorological Service Center, Changsha 410118, China; 2. Beijing Municipal Environmental Monitoring Center, Beijing 100048, China; 3. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: In this paper, spatial and temporal distribution, transportation and deposition of PM_{2.5} in Shandong Province in Spring, 2014 were all analyzed by applying PSAT of CAMx model and we also developed a transport matrix of PM_{2.5} between different cities in Shandong. The results showed that $\rho(\text{PM}_{2.5})$ presented obvious spatial distribution characteristics; $\rho(\text{PM}_{2.5})$ was higher in the western part compared to that in peninsula and $\rho(\text{PM}_{2.5})$ was mainly concentrated below 2 000 m in vertical direction. Simulated horizontal transport flux of PM_{2.5} was up to $110 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ and the total deposition amount of PM_{2.5} was $23.05 \times 10^4 \text{ t}$ in Shandong during Spring, 2014. Analysis of regional contribution found that the pollutants mainly came from local districts and the average external transport contribution to the whole Shandong province was about $21.08\% \pm 3.83\%$ while it was $40.45\% \pm 5.96\%$ between different cities; the contribution rates of Jinjinji district, background and boundary conditions gradually increased by 7.56% and 6.18% respectively as the altitude increased.

Key words: CAMx model; PM_{2.5}; transport matrix; Shandong Province

近年来,我国中东部地区空气重污染现象频发,并呈现复合性、区域性、周期性特征^[1],引起了政府和公众的广泛关注^[2].有研究表明^[3,4],PM_{2.5}是造成空气重污染的主因,且在研究 PM_{2.5}浓度水平、组分特征、时空分布规律的基础上,明确各行政主体、各省市跨界输送率及相应的治理责任,是区域联防联控解决大气污染的有效途径.

随着计算机及综合空气质量模式迅猛发展,PM_{2.5}跨界输送定量计算成为可能. Streets 等^[5]用 CMAQ 模型模拟 2008 年奥运期间在稳定南风作用下河北省对北京 PM_{2.5}浓度的贡献可达 50%~70%; Wang 等^[6]用 CAMx 模型计算了重污染过程中外来源对上海市 PM_{2.5}浓度的贡献,结果接近 50%; Wu 等^[7]利用 CAMx 模型计算了珠江三角洲

广州市春季 PM_{2.5}来源发现有 31.7% 来自区域输送; 赵秀娟^[8]等应用 CMAQ 模型解析了石家庄市霾污染来源,结果显示石家庄市 PM_{2.5}的来源为河北南部 65.3%、山西 13.8%、河北北部 7.3%、山东 1.6%、河南 1.1%、京津 0.9%; 王自发等^[9]用 NAQPMS 模型模拟研究了 2013 年 1 月我国中东部强霾污染过程,结果表明静稳天气下区域外 PM_{2.5}跨界输送对京津冀地区贡献为 20%~35%; 安俊岭等^[10]利用 CAMx 模型模拟计算了河北省对北京市 PM_{2.5}跨界输送通量,结果为 $816 \sim 2\,152 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$; 薛文

收稿日期: 2015-01-31; 修订日期: 2015-03-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41401222); 环境保护公益性行业科研专项(201309071); 国家科技支撑计划项目(2006001001002008)

作者简介: 贾海鹰(1983~),男,硕士,工程师,主要研究方向为应用气象学及大气环境, E-mail: 2106658210@qq.com

博等^[11]用 CAM_x 模型模拟计算的京津冀、长三角、珠三角城市群 PM_{2.5} 年均浓度受外省市的贡献分别达到 22%、37%、18%，山东省 PM_{2.5} 外来源输送贡献率达 41%。这些研究多基于单个案例、大区域的定量计算，对长时间、多省市、不同高度污染物跨界输送研究较少。

春季华北地区冷锋多发^[12]，受锋后较大偏北风影响污染物长距离输送现象显著；山东省位于下风向东部沿海，是重要的能源基地，且近年来大气污染形势较为严峻。本研究利用空气质量数值模型 CAM_x 重点模拟分析了 2014 年春季（3~5 月）山东省 PM_{2.5} 的空间分布、输送沉降规律，以期为大气污染控制、决策及防治提供科学依据。

1 模式设置及验证

1.1 CAM_x 设置

综合空气质量模式 CAM_x^[13] 中心网格点坐标为 35°N、110°E，采用单向嵌套技术，水平分辨率为 36 km，总网格数为 200×160 个，模拟区域覆盖整个东亚地区（包括了中国大陆、日本、韩国、朝鲜等国）；使用兰博托地图投影，标准纬线为 24°N 和 46°N。在垂直方向上设置为 20 层粗网格，其中 8 层分布于 1 km 以下，其中近地面层高度约 35 m，以便更好地分析大气边界层结构。模式第一次运行时模拟预测 5 d 的初始场，模式的后续初始场采用前一时次的预测输出结果，以保证污染源排放的累积效果及消除初始条件的影响。

CAM_x 模式水平平流方案采用 PPM 数值计算方法，垂直对流计算采用隐式欧拉方案，运用 K 理论计算水平扩散，气相化学机制为 SAPRC99 机制，采用 EBI 计算方法。CAM_x 模式在模拟 PM_{2.5} 时物理、化学机制较为复杂，主要涉及粒子干沉降清除、气溶胶-云滴相互作用和降水清除、硫酸/水汽系统中的二元匀质核化过程、气相前体物产生的有机气溶胶组分、粒子凝结和凝固增长等过程^[8]，粒子被分为两部分细粒子和粗粒子，基于热力学平衡原理计算无机气溶胶的化学成分在气相、气溶胶相内的组成及各组分的平衡浓度，二次无机气溶胶主要考虑 NH₃-H₂SO₄-HNO₃-H₂O 的混合体系，二次有机气

溶胶（SOA）采用 Pandis 等产出率的估算方法^[14]。

运用 CAM_x 中的 PSAT 技术对 PM_{2.5} 各项污染物进行源-受体关系分析，PSAT 可以进行示踪的颗粒物成分包括：SO₂、SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺、SOA、Hg、EC、沙尘粒子和其它一次排放的粗细粒子等，PSAT 示踪技术避免了源关闭法忽略非线性化学过程所造成的浓度偏差，已经在很多研究结果中得到应用^[15]。为建立污染源与环境受体间空间传输矩阵，依据省级行政区划将区域网格划分为 31 个分区，每一个分区代表一个省级单元，将国界外所有网格划分为 2 类，一类是海洋，一类是除海洋外其它区域；根据山东省市级规划，对山东省分区进一步划分为 17 个分区，每一个分区代表一个市级单元；三者之和共计 49 个分区，以此计算不同省市及区域外来源贡献，对于背景及边界条件则单独计算。

1.2 WRF 设置

采用 ARW-WRF3.2^[16] 模拟 2014 年春季山东省及周边地区气象场，WRF 模式的中心点坐标设为 35°N、110°E，水平网格距为 36 km，与 CAM_x 模式对应；垂直层次均为 35 层，外层嵌套为内层提供边界条件；气象背景场和边界资料为 NCAR（National Center for Atmospheric Research）和 NCEP（National Centers for Environmental Prediction）的再分析逐日资料 FNL，分辨率为 1°×1°，时间分辨率是 6 h；地形和下垫面输入资料分别来自 USGS 30 s 全球地形和 MODIS 下垫面分类资料；使用气象前处理模块 WRF2CAM_x 将 WRF 的输出结果插值到 CAM_x 模型区域和网格上并转为 CAM_x 可识别接收的格式。

1.3 排放源处理

运用陆地生态系统估算模型 MEGAN^[17] 处理天然源，人为源（含 PM_{2.5}、BC、OC）等排放数据则采用 2010 年清华大学 MEIC^[18] 排放清单，而 SO₂、NO_x、PM₁₀ 排放数据则为 2010 年污染源普查数据，NH₃ 排放数据取自 2010 年日本国立环境研究所开发的亚洲地区 REAS 排放清单，表 1 显示了污染源清单来源的明细，整合、处理后的天然源、人为源排放清单共同输入到排放源处理模型 SMOKE，形成系统的排放源文件。

表 1 污染源清单数据
Table 1 Pollution source list data

污染物	SO ₂	NO _x	PM ₁₀	NH ₃	人为 VOCs	自然 VOCs	PM _{2.5} 、BC、OC 等
数据来源	污染源普查	污染源普查	污染源普查	TRACE-P	MEIC	MEGAN	MEIC
数据特征	点源:经纬度 面源:行政区	点源:经纬度 面源:行政区	点源:经纬度 面源:行政区	1°×1°	0.5°×0.5°	对应的网格数据	0.5°×0.5°

SMOKE 在物种分配时,将 PM_{2.5}分为较为详细的 5 个物种,包括初始硝酸盐 PNO₃(1%)、初始硫酸盐 PSO₄(9%),初始有机物 POA(30%)、初始元素碳 PEC(24%)和更细颗粒物 PMFINE(36%),将计算网格内 PM_{2.5}采用统一的分配方案^[19]. SMOKE 水平分辨率、网格数与 CAM_x 设置一致. 图 1 显示了我国东部地区 SMOKE 输出结果中 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的排放源空间分布情况.

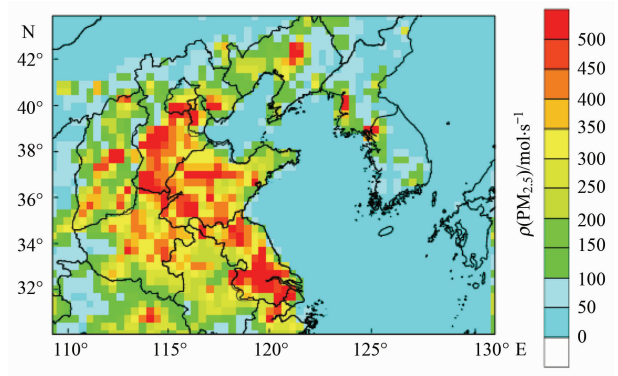


图 1 中国东部 PM_{2.5} 的排放源的空间分布
Fig. 1 Spatial distribution of PM_{2.5} emission sources in Eastern China

1.4 模拟验证

新环境空气质量标准出台后,环境保护重点城市才统一监测 PM_{2.5},2010 年 PM_{2.5}逐时监测数据比较缺乏. 为了验证 CAM_x 模拟大气污染物浓度变化情况,使用 2010 年源排放清单和气象数据,调取 CAM_x 模拟结果与 2010 年春季山东省各市 PM₁₀平

均浓度数据^[18]折算成 PM_{2.5}浓度后的结果作比较,结果见图 2. 从中可知 PM_{2.5}的模拟结果与观测值较为吻合,两者相关系数达 0.90 左右.

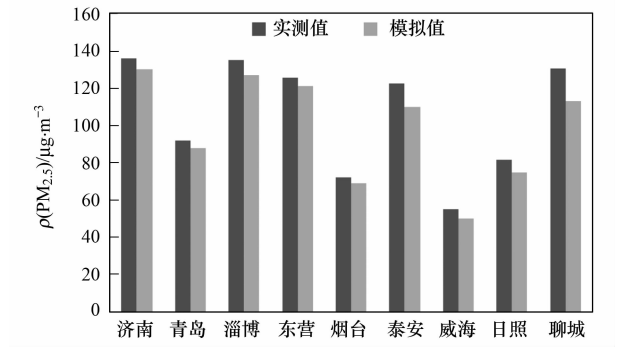


图 2 2010 年春季模拟值与实测值对比
Fig. 2 Comparison between the measured and simulated data during Spring in 2010

为进一步验证 CAM_x 的模拟效果,使用 2014 年气象模拟结果输入到 CAM_x 模型中,选取济南、淄博、烟台、威海站点 2014 年 1 ~ 11 月 SO₂、NO₂、PM_{2.5}观测数据(实时发布数据来自中国环境监测总站 <http://113.108.142.147:20035/emcpublish/>),与 CAM_x 输出结果进行比对,图 3 为模拟值与观测值的时间序列,可以看出 PM_{2.5}的模拟值与观测值的时间序列变化较为一致, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 模拟值均在观测值的 0.5 ~ 2 倍的范围内,模拟结果略微低估,这可能与排放源的不确定性、模型在多相氧化过程和湿清除过程的不确定性有关^[20].

在时间序列图分析的基础上,进一步统计了

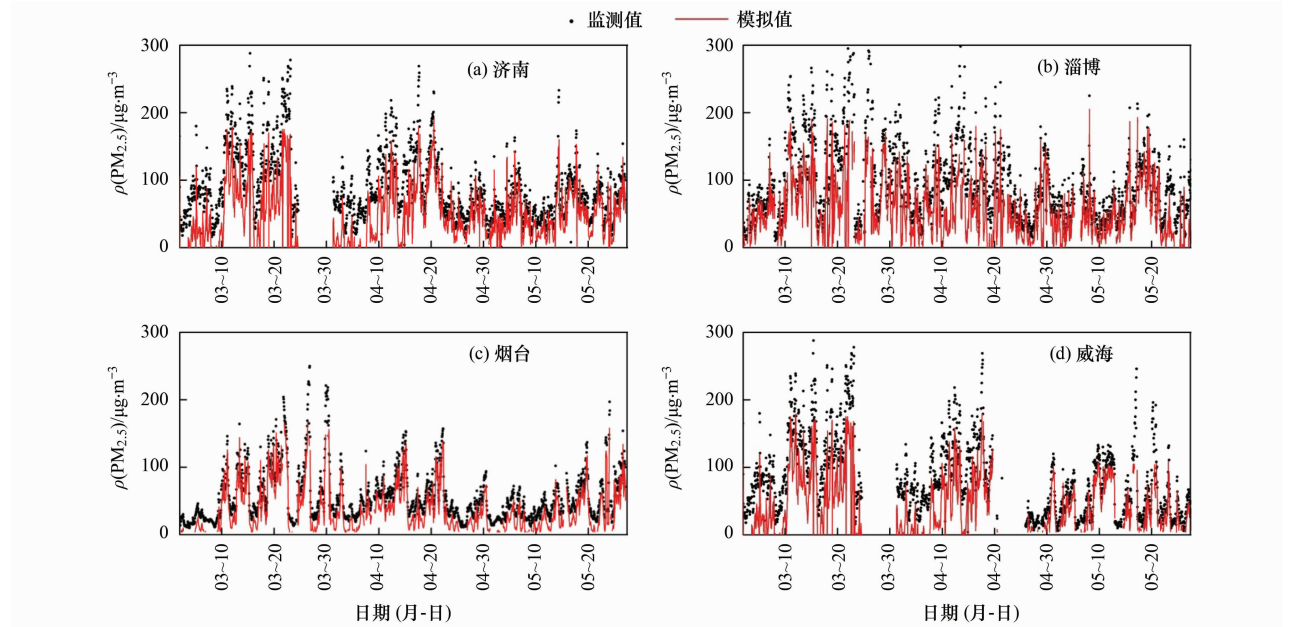


图 3 2014 年春季模拟值与实测值对比
Fig. 3 Comparison between the measured and simulated data during Spring in 2014

观测值与模拟值的标准平均偏差(NMB)、标准平均误差(NME)、平均相对偏差(MFB)、平均相对误差(MFE)和相关系数 R ,结果见表2.经计算 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 模拟值与监测值的相关系数在0.59~0.74之间,NMB在-31%~-18%之间,NME在23%~32%之间,MFB在-24%~-16%之间,MFE在19%~25%之间.Lu等^[21]应用CMAQ对中国地区的模拟结果显示 SO_2 的NMB和NME分别为-51.85%~-12.7%和68.1%~77.3%;李莉等^[22]用CMAQ模拟了长三角近地面二次污染物 O_3 及 PM_{10} 的浓度,验证结果显示 O_3 及 PM_{10}

的模拟结果与监测值的相关系数分别为0.77和0.52,模型对 PM_{10} 小时平均浓度的估算偏低10%,标准偏差为46%;王茜^[23]用CMAQ对上海市秋季典型 $\text{PM}_{2.5}$ 污染过程数值预报验证分析表明 $\text{PM}_{2.5}$ 的NMB在-45.9%~10%之间,NME在20%~65.5%之间;本研究验证结果与Boylan等^[24]设定的模拟颗粒物结果较好的标准($\text{MFB} \leq \pm 60\%$ 和 $\text{MFE} \leq 75\%$)较一致,同时与EPA推荐的评价标准^[25]较一致,模拟结果误差在可接受范围内,保证了 $\text{PM}_{2.5}$ 污染特征与形成过程分析结果的可靠性.

表 2 $\text{PM}_{2.5}$ 观测值与模拟值的统计参数							
Table 2 Performance statistical parameters for the measured and predicted values of $\text{PM}_{2.5}$							
项目	监测值/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	模拟值/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	R	NMB/%	NME/%	MFB/%	MFE/%
济南市	92.56	70.07	0.64	-20	23	-22	19
淄博市	100.74	76.97	0.59	-31	32	-21	22
烟台市	47.14	34.16	0.75	-19	27	-16	29
威海市	55.05	39.60	0.71	-18	30	-24	25

2 结果与分析

2.1 $\text{PM}_{2.5}$ 空间分布

山东省位于我国东部沿海,总面积 $15.79 \times 10^4 \text{ km}^2$,属暖温带季风气候,年平均气温 $11 \sim 14^\circ\text{C}$,降水季节分布很不均衡,全年降水量60%~70%集中于夏季;2014年春季受亚洲中高纬度地区维持一槽一脊的环流形势影响,副热带高压偏北强度偏弱^[26],WRF模拟结果显示山东省大部分地区则处于弱高压(海平面平均气压1 019 hPa)后部控制之下,高压中心位于山东半岛以东的南黄海地区,冷空气范围影响到山东省北部部分地区,全省降水较少.监测结果(图4)显示,春季山东省各市 $\text{PM}_{2.5}$ 平

均浓度最高为淄博市(约 $98 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),最低为威海市(约 $49 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),9市 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度高于国家二级标准限值 $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,而全省 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度为 $(73.57 \pm 15.81) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.空间分布上 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最低为半岛地区(青岛、烟台、威海),最高为鲁西(菏泽、聊城、济南等市)及鲁中地区(淄博等市).

与其他城市相比,春季山东省 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 处于中等水平(表3),哈尔滨最高,浓度高达 $130 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,上海最低,浓度近 $47.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.各省市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 差别的主要原因可能为:①颗粒物排放源强不同,各省市产业结构及经济发展程度不同,造成污染物排放量差异较大;②气象条件差异较大,春季是天气系统转换的季节,不同地区气象要素(风速、小尺度环

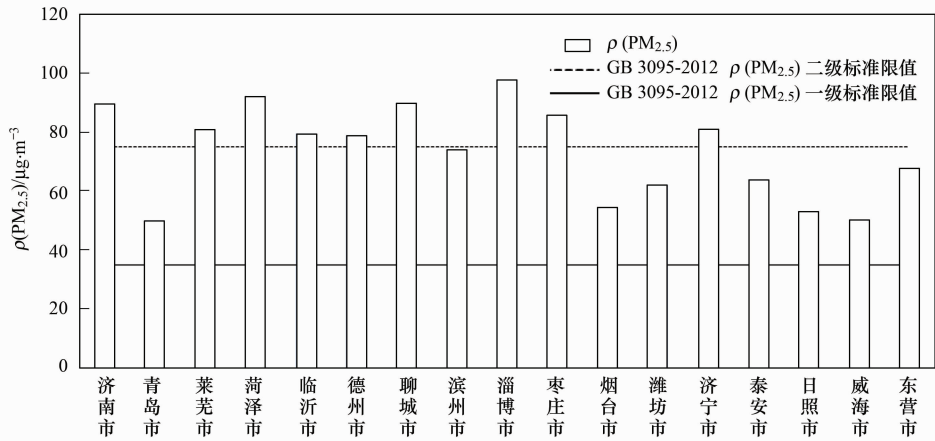


图 4 春季山东省各市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度

Fig. 4 Averaged mass concentrations of $\text{PM}_{2.5}$ in key cities of Shandong in Spring

表 3 不同城市春季 PM_{2.5} 浓度
Table 3 PM_{2.5} concentrations in different cities in Spring

项目	北京	南京	上海	广州	天津	重庆	哈尔滨	山东省
监测年份	2013	2007	2011 ~ 2012	2002	2009 ~ 2010	2004 ~ 2005	2008 ~ 2009	2014
$\rho(\text{PM}_{2.5})/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	83	95.5	47.8	68.96	71.88	104.8	130	73.57 ± 15.81
文献	[29]	[30]	[31]	[32]	[33]	[34]	[35]	本研究

流、逆温、降水等)差异较大;③地形影响,地形引起的山谷风、海陆风、热岛效应等对 PM_{2.5} 浓度造成很大影响;④ PM_{2.5} 监测方法不同^[27,28].

图 5 为模拟的春季山东省及周边地区 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 水平和垂直分布,垂直分布为沿 36°N 所做的垂直剖面(青岛 120°E 附近为海陆分界),从中可知受陆源气溶胶区和春季天气形势的综合影响^[36],山东省 PM_{2.5} 呈现明显的地理分布特

征. $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 最低为半岛地区,最高为鲁西地区,呈现出由城市边缘向城市中心推移递增的趋势,远离海岸 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 逐渐增大. 济南-菏泽一带污染较重,中部地区的淄博污染次之,半岛及沿海地区污染最轻. 模拟的全省 PM_{2.5} 平均浓度均达到 $70\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右. 垂直方向上 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 集中在 2 000 m 以下,近地面出现了较高的浓度值,边界层之上浓度迅速降低.

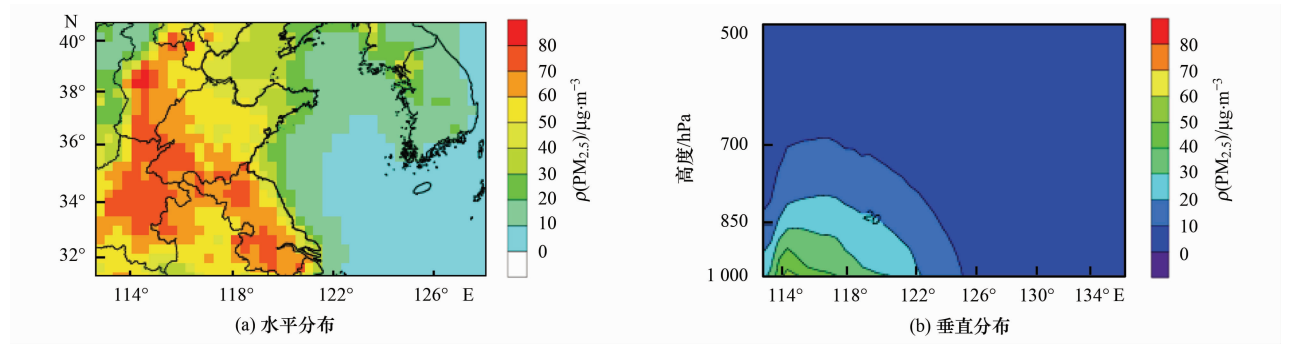


图 5 春季 PM_{2.5} 浓度空间分布
Fig. 5 Horizontal and vertical distribution of average PM_{2.5} concentrations in Spring

2.2 PM_{2.5} 输送通量

图 6 为春季 PM_{2.5} 平均输送通量分布,输送通量的定义为风矢量与污染物浓度的乘积,即 $F = U \times C$. 从中可知,水平方向上河北中南部、河南、江苏等地高浓度 PM_{2.5} 输送到山东,经计算全省 PM_{2.5} 输送通量平均达 $110\ \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$. 垂直方向上,山东半岛沿海上空(36°N、122°E)1 000 m 高度存在输送中心,输送通量达 $200\ \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 以上. 山东省地面 PM_{2.5} 输送路径主要为两条,一条为偏西路径,污

染物经河北中南部、河南、山东西部影响全省,另一条为偏南路径,来自长三角城市、江苏省的污染物长距离输送到山东.

2.3 PM_{2.5} 沉降

干湿沉降是细颗粒物最主要沉降、去除途径,颗粒物干沉降主要靠吸附或重力沉降,湿沉降主要是云雨、雪对颗粒物的吸收及冲刷. 由于干沉降速率相差不是很大,因此总沉降的空间分布主要由污染物浓度和降雨量决定. 经计算山东省 PM_{2.5} 沉降通量约为

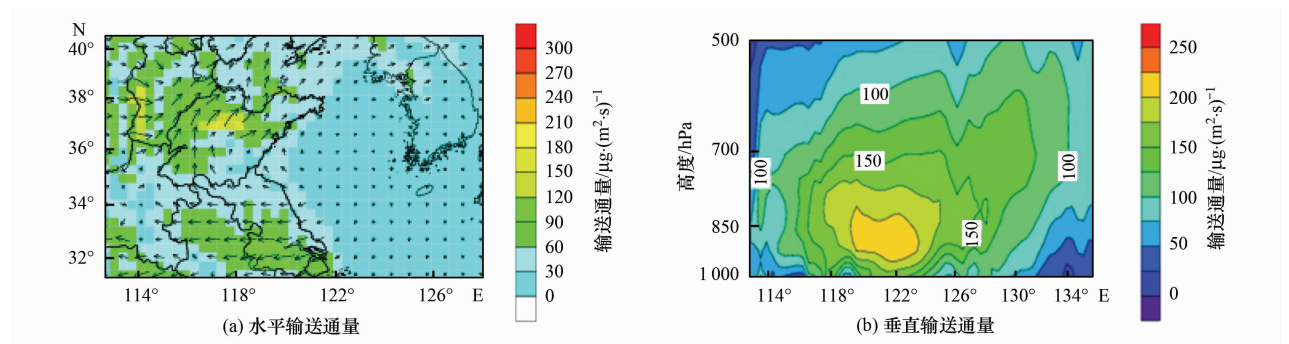


图 6 春季 PM_{2.5} 平均输送通量
Fig. 6 Vertical average transport flux of PM_{2.5} in Spring

20 mg·(m²·d)⁻¹以上(图7),区域性高值中心在30 mg·(m²·d)⁻¹以上,与其它相关研究成果^[37,39]比较分析发现模拟结果基本可靠.从干湿沉降比值来看,PM_{2.5}以湿沉降为主,PM_{2.5}干湿沉降比例随着离岸距离没有明显的梯度变化,且PM_{2.5}沉降通量高值区与源排放的高值区并不吻合,这主要与PM_{2.5}在大气中的传输与扩散、化学转化过程有关^[40,41].模拟的全省整个春季PM_{2.5}湿沉降总量为20.88×10⁴ t,干沉降总量为2.17×10⁴ t,全省PM_{2.5}沉降总量为23.05×10⁴

t,湿沉降总量约为干沉降总量的9.6倍.图7为春季山东省各市PM_{2.5}沉降量分布,各市PM_{2.5}干沉降总量在54.51~5 192 t之间,PM_{2.5}湿沉降总量在3 116.91~26 331.80 t之间.事实上总沉降量并不能完全反映该区域的沉降强度,主要原因为:①模拟计算的各省市以外地区PM_{2.5}及其组分在本地区沉降;②沉降量也与省市区域面积有关;③源分布的影响,源强越大,沉降量越大;④气象条件也起着一定的作用,特别是降水对沉降量影响很大^[42,43].

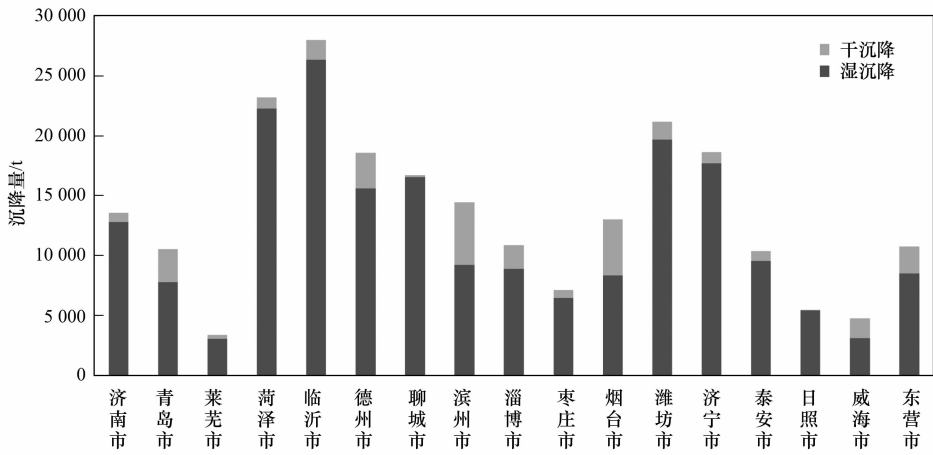


图7 春季各市 PM_{2.5} 沉降量

Fig. 7 Averaged depositions of PM_{2.5} in different cities in Spring

2.4 跨界输送

图8为春季地面和2 000 m高度山东省各市PM_{2.5}跨界输送贡献率分布,从中可知近地面PM_{2.5}主要受本地源排放影响,本地排放对其各省市PM_{2.5}浓度贡献率基本在50.33%~71.18%左右,外来源输送主要来自临近省市,各市外来源输送率平均为40.45%±5.96%.对于全省而言,外来源输送对全省PM_{2.5}浓度贡献率为21.08%±3.83%,其中京津冀地区对各市PM_{2.5}浓度贡献率在4.66%~

11.87%之间,河南、江苏等地对各市PM_{2.5}浓度贡献率在1.39%~7.92%之间,辽宁省对各市PM_{2.5}浓度贡献率在1.03%~7.90%之间,其它(背景、边界条件等)对各市PM_{2.5}浓度贡献率在2.39%~9.73%之间.整体而言各省市外来贡献高于全省平均,一方面是由于网格计算差异造成的,全省外来贡献计算方法基于全省网格平均,而非全省各市平均;另一方面,各省市外来源贡献中包括了省内其他各市对其贡献.

表4 外来输送对不同地区贡献率比较

Table 4 Contributions of external transmission to different districts

模拟时间	模型	地区	高度	贡献率/%	文献
2008 年 8 月	CMAQ	北京	地面	50 ~ 70	[5]
2010 年 11 月	CAMx	上海	地面	50	[6]
2012 年 12 月	CAMx	广州市	地面	69	[7]
2007 年 12 月	CMAQ	石家庄	地面	40	[8]
2013 年 1 月	NAQPMS	京津冀	地面	20 ~ 35	[9]
2013 年全年	CAMx	山东省	地面	41	[11]
2014 年 3 ~ 5 月	CAMx	山东省平均	地面	21.08 ± 3.83	本研究
2014 年 3 ~ 5 月	CAMx	山东省内各市	地面	40.45 ± 5.96	
2014 年 3 ~ 5 月	CAMx	山东省平均	2 000 m	39.48 ± 3.21	
2014 年 3 ~ 5 月	CAMx	山东省内各市	2 000 m	54.37 ± 5.18	



- [1] 任阵海, 万本太, 苏福庆, 等. 当前我国大气环境质量的几个特征[J]. 环境科学研究, 2004, **17**(1): 1-6.
- [2] 李令军, 王英, 李金香, 等. 2000~2010 北京大气重污染研究[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(1): 23-30.
- [3] 于兴娜, 李新妹, 登增然登, 等. 北京雾霾天气期间气溶胶光学特性[J]. 环境科学, 2012, **33**(4): 1057-1062.
- [4] Sun Y L, Zhuang G S, Tang A A, *et al.* Chemical characteristics of PM_{2.5} and PM₁₀ in haze-fog episodes in Beijing [J]. Environment Science Technology, 2006, **40**(10): 3148-3155.
- [5] Streets D G, Fu J S, Jang C J, *et al.* Air quality during the 2008 Beijing Olympic Games [J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(3): 480-492.
- [6] Wang Y J, Li L, Chen C H, *et al.* Source appointment of fine

- particulate matter during autumn haze episodes in Shanghai, China[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2014, **4**(119): 1903-1914.
- [7] Wu D W, Fung J C H, Yao T, *et al.* A study of control policy in the Pearl River Delta region by using the particulate matter source apportionment method[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **76**(9): 147-161.
- [8] 赵秀娟, 姜华, 王丽涛, 等. 应用 CMAQ 模型解析河北南部城市的霾污染来源[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(10): 2559-2567.
- [9] Wang Z F, Li J, Wang Z, *et al.* Modeling study of regional severe hazes over Mid-Eastern China in January 2013 and its implications on pollution prevention and control[J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, **57**(1): 3-13.
- [10] 安俊岭, 李健, 张伟, 等. 京津冀污染物跨界输送通量模拟[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(11): 2684-2692.
- [11] 薛文博, 付飞, 王金南, 等. 中国 PM_{2.5}跨区域传输特征数值模拟研究[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(6): 1361-1368.
- [12] 蒋维楣, 曹文俊, 蒋瑞宾. 空气污染气象学教程[M]. 北京: 气象出版社, 1993. 395-423.
- [13] Wagstrom K M, Pandis S N. Contribution of long range transport to local fine particulate matter concerns[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(16): 2730-2735.
- [14] Pandis S N, Harley R A, Cass G R, *et al.* Secondary organic aerosol formation and transport[J]. *Atmospheric Environment*, 1992, **26**(13): 2269-2282.
- [15] Kajino M, Deushi M, Maki T, *et al.* Modeling wet deposition and concentration of inorganics over Northeast Asia with MRI-PM/c[J]. *Geoscientific Model Development*, 2012, **5**(2): 1341-1379.
- [16] MMMD, NCAR. Weather Research and Forecast ARW Version 3 Modeling Systems User's Guide[EB/OL]. Colorado: NCAR, 2010[2012-09-01]. http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/contents.html.
- [17] Guenther A, Karl T, Harley P, *et al.* Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (model of emissions of gases and aerosols from nature)[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2006, **6**: 3181-3210.
- [18] Multi-resolution emission inventory for China[EB/OL], 2013. Beijing: Tsinghua University, 2013[2013-01-02]. <http://www.meicmodel.org>.
- [19] 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**: 5131-5153.
- [20] Xing J, Zhang Y, Wang S X, *et al.* Modeling study on the air quality impacts from emission reductions and a typical meteorological conditions during the 2008 Beijing Olympics[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(10): 1786-1798.
- [21] Lu Z, Streets D G, Zhang Q, *et al.* Sulfur dioxide emissions in China and sulfur trends in East Asia since 2000[J]. *Atmospheric Chemistry and physics*, 2010, **10**(13): 6311-6331.
- [22] 李莉, 陈长虹, 黄成, 等. 长江三角洲地区大气 O₃ 和 PM₁₀ 的区域污染特征模拟[J]. *环境科学*, 2008, **29**(1): 237-245.
- [23] 王茜. 上海市秋季典型 PM_{2.5}污染过程数值预报分析[J]. *中国环境监测*, 2014, **30**(2): 7-15.
- [24] Boylan J W, Russell A G. PM and light extinction model performance metrics, goals, and criteria for three-dimensional air quality models[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(26): 4946-4959.
- [25] U. S. EPA. Guidance on the use of models and other analyses in attainment demonstrations for the 8-hour ozone NAAQS[R]. North Carolina: U. S Environmental Protection Agency, 2005, <http://www.epa.gov/scram001/guidance/guide/8-hour-o3-guidance-final-version.pdf>, 2014-09-01.
- [26] 樊利强, 张涛, 孙瑾. 2014 年 4 月大气环流和天气分析[J]. *气象*, 2014, **40**(7): 898-904.
- [27] 贺克斌, 杨复沫, 段凤魁, 等. 大气颗粒物与区域复合污染[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [28] 胡敏. 北京大气细粒子和超细粒子理化特征、来源及形成机制[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [29] 北京市环保局. 北京市正式发布 PM_{2.5}来源解析研究成果[EB/OL]. (2014-04-16)[2014-04-19]. <http://www.bjepb.gov.cn/bjepb/323265/340674/396253/index.html>.
- [30] 魏玉香, 银燕, 杨卫芬, 等. 南京地区 PM_{2.5}污染特征及其影响因素分析[J]. *环境科学与管理*, 2009, **34**(9): 29-34.
- [31] 焦艳. 上海城区大气 PM_{2.5}浓度及气溶胶光学特性的观测研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [32] 赖森潮. 广州城市大气气溶胶 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 污染特征研究[D]. 广州: 中山大学, 2002.
- [33] 姬洪亮. 天津市 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 污染特征及来源解析[D]. 天津: 南开大学, 2011.
- [34] 王同桂. 重庆市大气 PM_{2.5} 污染特征及来源解析[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- [35] 王文帅. 哈尔滨市采暖期大气颗粒物组分源解析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [36] 韩美, 张苏平, 尹跃进, 等. 黄东海大气边界层高度季节变化特征及其成因[J]. *中国海洋大学学报*, 2012, **42**(增刊): 34-44.
- [37] 王跃思. 京津冀空气污染堪忧——每年硫沉降量每公顷 80 公斤[EB/OL]. 北京: 腾讯网, 2012[2012-01-02]. http://news.qq.com/a/20120101/000788.htm?pgv_ref=aio2012&ptlang=2052.
- [38] 王自发, 黄美元, 高会旺, 等. 关于我国和东亚酸性物质的输送研究: II. 硫化物浓度空间分布特征及季节变化[J]. *大气科学*, 1998, **22**(5): 693-700.
- [39] Kajino M, Ueda H, Sato K, *et al.* Spatial distribution of the source-receptor relationship of sulfur in Northeast Asia[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**: 6475-6491.
- [40] 张珏. 长江三角洲二噁英类物质大气输送、沉降数值模拟研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2011, 50.
- [41] 刘煜, 李维亮, 周秀骥. 夏季华北地区二次气溶胶的模拟研究[J]. *中国环境科学*, 2005, **35**(增刊 I): 156-166.
- [42] 程念亮, 孟凡, 徐俊, 等. 中国东部春季一次强冷锋活动空气污染输送的数值模拟研究[J]. *环境科学研究*, 2013, **26**(1): 34-42.
- [43] Zhao P S, Zhang X L, Xu X F, *et al.* Long-term visibility trends and characteristics in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China[J]. *Atmospheric Research*, 2011, **101**(3): 711-718.

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 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 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 17 β -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