

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第3期

Vol.36 No.3

**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

重庆市 PM<sub>2.5</sub> 浓度空间分异模拟及影响因子 ..... 吴健生, 廖星, 彭建, 黄秀兰 (759)

2012 ~ 2013 年间北京市 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子时空分布规律及相关性分析 ..... 杨懂艳, 刘保献, 张大伟, 陈圆圆, 周健楠, 梁云平 (768)

南京地区大气 PM<sub>1.1</sub> 中 OC、EC 特征及来源解析 ..... 姜文娟, 郭照冰, 刘凤玲, 芮茂凌, 石磊, 曾钢, 郭子研 (774)

太原市大气 PM<sub>2.5</sub> 中碳质组成及变化特征 ..... 张桂香, 闫雨龙, 郭利利, 何秋生, 陈来国 (780)

朔州市市区 PM<sub>2.5</sub> 中元素碳、有机碳的分布特征 ..... 刘凤娟, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 刘效峰, 李丽娟, 刘欣 (787)

中国 2013 年 1 月 PM<sub>2.5</sub> 重污染过程卫星反演研究 ..... 薛文博, 武卫玲, 付飞, 王金南, 韩宝平, 雷宇 (794)

高空偏北风背景下北京地区高污染形成的环境气象机制研究 ..... 廖晓农, 孙兆彬, 唐宜西, 蒲维维, 李梓铭, 卢冰 (801)

重庆缙云山降水中不同形态汞的含量及其沉降量 ..... 覃蔡清, 王永敏, 彭玉龙, 王定勇 (809)

海南五指山大气气态总汞含量变化特征 ..... 雷育涛, 刘明, 陈来国, 谢东海, 林道征, 赵明江, 张毅强, 孙家仁 (817)

树叶烟尘中的有机碳和元素碳 ..... 陈惠雨, 刘刚, 徐慧, 李久海, 吴丹 (824)

介质阻挡放电对氯苯的降解特性及其产物分析 ..... 姜理英, 曹书岭, 朱润晔, 陈建孟, 苏飞 (831)

长江口及浙江近岸海域表层沉积物中多环芳烃分布、来源与风险评价 ..... 母清林, 方杰, 邵君波, 张庆红, 王晓华, 黄备 (839)

河流沉积物对典型 PPCPs 的吸附特性及其影响因素 ..... 王凯, 李侃竹, 周亦圆, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (847)

岩溶地下河表层沉积物多环芳烃的污染及生态风险研究 ..... 蓝家程, 孙玉川, 师阳, 梁作兵 (855)

岩溶地下河系统多介质中多环芳烃污染特征及来源解析 ..... 卢丽, 王喆, 裴建国 (862)

两江交汇处水体溶解性有机质的吸收和荧光光谱特征: 以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江为例 ..... 闫金龙, 江韬, 高洁, 魏世强, 卢松, 刘江 (869)

三峡库区典型农业小流域土壤溶解性有机质的紫外-可见及荧光特征 ..... 王齐磊, 江韬, 赵铮, 木志坚, 魏世强, 闫金龙, 梁俭 (879)

夏、冬季降水中溶解性有机质 (DOM) 光谱特征及来源辨析 ..... 梁俭, 江韬, 魏世强, 卢松, 闫金龙, 王齐磊, 高洁 (888)

南水北调丹江口水库原水有机物分子组成规律及其强化混凝处理的效能对比 ..... 程拓, 徐斌, 朱贺振, 夏圣骥, 楚文海, 胡广新 (898)

夏季大辽河河口区水体反硝化及其影响因素 ..... 杨丽标, 雷坤, 孟伟 (905)

太湖入湖河流溶解性有机碳来源及碳水化合物生物可利用性 ..... 叶琳琳, 吴晓东, 孔繁翔, 刘波, 闫德智 (914)

汉丰湖夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析 ..... 王宇飞, 赵秀兰, 何丙辉, 黄琪 (922)

三峡蓄水期间汉丰湖消落区营养状态时间变化 ..... 黄祺, 何丙辉, 赵秀兰, 王宇飞 (928)

太湖水华期营养盐空间分异特征与赋存量估算 ..... 金颖薇, 朱广伟, 许海, 朱梦圆 (936)

贝江浮游藻类群落特征及富营养化风险分析 ..... 苟婷, 马千里, 许振成, 王丽, 李杰, 赵学敏 (946)

物理和摇蚊幼虫组合扰动对内源磷再生和形态转化的协同作用 ..... 史晓丹, 李大鹏, 王忍, 黄勇 (955)

磷限制下光照和温度对水华鱼腥藻生长动力学的影响 ..... 殷志坤, 李哲, 王胜, 郭劲松, 肖艳, 刘静, 张萍 (963)

矿物基多孔颗粒材料净化石英纯化废水研究 ..... 王恩文, 雷绍民, 张世春, 黄腾 (969)

PAA 改性纳米铁强化还原降解水中亚甲基蓝 ..... 和婧, 王向宇, 王培, 刘坤乾 (980)

微球负载双核锰配合物作为新型非均相 CWPO 催化剂对活性蓝 P-3R 的脱色应用 ..... 宋敏, 张琳萍, 钟毅, 徐红, 毛志平 (989)

生物合成施氏矿物作为类芬顿反应催化剂降解甲基橙的研究 ..... 汪快兵, 方迪, 徐峙晖, 施瑛, 郑冠宇, 周立祥 (995)

污泥厌氧产酸发酵液作碳源强化污水脱氮除磷中试研究 ..... 罗哲, 周光杰, 刘宏波, 聂新宇, 陈宇, 翟丽琴, 刘和 (1000)

高含固污泥水热预处理中碳、氮、磷、硫转化规律 ..... 卓杨, 韩芸, 程瑶, 彭党聪, 李玉友 (1006)

MBR 与 SMBR 脱氮除磷特性及膜污染控制 ..... 郭小马, 赵焱, 王开演, 赵阳国 (1013)

基质 COD 浓度对单室微生物电解池产甲烷的影响 ..... 滕文凯, 刘广立, 骆海萍, 张仁铎, 符诗雨 (1021)

天然沸石中离子交换平衡的离子特异性研究 ..... 何云华, 李航, 刘新敏, 熊海灵 (1027)

开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价 ..... 李一蒙, 马建华, 刘德新, 孙艳丽, 陈彦芳 (1037)

不同种植模式对土壤团聚体及有机碳组分的影响 ..... 邱晓蕾, 宗良纲, 刘一凡, 杜霞飞, 罗敏, 汪润池 (1045)

种植花椒对喀斯特石漠化地区土壤有机碳矿化及活性有机碳的影响 ..... 张文娟, 廖洪凯, 龙健, 李娟, 刘云飞 (1053)

江西铜矿及冶炼厂周边土壤和农作物稀土元素含量与评价 ..... 金姝兰, 黄益宗, 王斐, 徐峰, 王小玲, 高柱, 胡莹, 乔敏, 李季, 向猛 (1060)

镉与 S-异丙甲草胺对斜生栅藻的联合毒性作用 ..... 章小强, 胡晓娜, 陈彩东, 刘惠君 (1069)

高寒灌丛退化演替过程对生态系统呼吸温度敏感性的影响 ..... 李东, 罗旭鹏, 曹广民, 吴琴, 胡启武, 卓玛措, 李惠梅 (1075)

黄土高原纸坊沟流域不同植物叶片及枯落物的生态化学计量学特征研究 ..... 李鑫, 曾全超, 安韶山, 董扬红, 李娅芸 (1084)

单斜相纳米氧化钴基低温 SCR 催化剂脱硝机制研究 ..... 叶飞, 刘荣, 管昊, 贡湘君, 季凌晨 (1092)

不同有机物料中的磷形态特征研究 ..... 邓佳, 胡梦坤, 赵秀兰, 倪九派, 谢德体 (1098)

北京电动出租车与燃油出租车生命周期环境影响比较研究 ..... 施晓清, 孙赵鑫, 李笑诺, 李金香, 杨建新 (1105)

燃煤电厂排放细颗粒物的水溶性无机离子特征综述 ..... 段雷, 马子轸, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥 (1117)

菌根真菌金属耐性机制研究进展 ..... 陈保冬, 孙玉青, 张莘, 伍松林 (1123)

亚硝酸盐型甲烷厌氧氧化微生物特性研究进展 ..... 沈李东 (1133)

《环境科学》征订启事 (830) 《环境科学》征稿简则 (846) 信息 (838, 861, 913, 935)

# 中国 2013 年 1 月 PM<sub>2.5</sub> 重污染过程卫星反演研究

薛文博<sup>1,2</sup>, 武卫玲<sup>2</sup>, 付飞<sup>2</sup>, 王金南<sup>2</sup>, 韩宝平<sup>1\*</sup>, 雷宇<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学环境与测绘学院, 徐州 221008; 2. 环境保护部环境规划院, 北京 100012)

**摘要:** 利用第三代空气质量模型 CMAQ (community multiscale air quality modelling system) 模拟的 PM<sub>2.5</sub> 垂直分层数据和中尺度气象模型 WRF (weather research and forecasting model) 模拟的高分辨率湿度数据, 分别对 MODIS AOD (aerosol optical depth) 资料进行垂直与湿度订正, 建立了订正后的 AOD 数据与 PM<sub>2.5</sub> 地面监测数据之间的线性拟合模型, 其线性相关系数  $r = 0.77$  ( $n = 57, P < 0.01$ )。基于此线性拟合模型, 首次反演了 2013 年 1 月全国 10 km 分辨率 PM<sub>2.5</sub> 月均浓度的空间分布特征, 并分析了人口暴露水平。结果表明, 2013 年 1 月我国 PM<sub>2.5</sub> 月均浓度大于  $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  的面积占国土面积的比例分别高达 10.99%、1.34%, 暴露人口占全国总人口的比例分别高达 45.01%、6.31%。

**关键词:** 卫星反演; PM<sub>2.5</sub>; AOD; CMAQ; WRF

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)03-0794-07 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2015.03.006

## Satellite Retrieval of a Heavy Pollution Process in January 2013 in China

XUE Wen-bo<sup>1,2</sup>, WU Wei-ling<sup>2</sup>, FU Fei<sup>2</sup>, WANG Jin-nan<sup>2</sup>, HAN Bao-ping<sup>1\*</sup>, LEI Yu<sup>2</sup>

(1. School of Environmental Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 2. Chinese Academy for Environmental Planning, Beijing 100012, China)

**Abstract:** By simulating vertical stratification data of PM<sub>2.5</sub> with the third-generation air quality model CMAQ and high resolution relative humidity data with mesoscale meteorological model WRF, MODIS AOD data were revised by vertical and humidity correcting method, respectively. A linear regression model between revised AOD and PM<sub>2.5</sub> was built, and the linear correlation coefficient was  $r = 0.77$  ( $n = 57, P < 0.01$ ). Based on this model, the average monthly concentrations of PM<sub>2.5</sub> in 10 km resolution in January 2013 were firstly retrieved in the country, and the population exposure level was analyzed. The results showed that the areas where average monthly concentrations of PM<sub>2.5</sub> was greater than  $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  and  $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  in January 2013 were 10.99% and 1.34% of the national terrestrial area, respectively, and the ratios of exposed population were as high as 45.01% and 6.31%, respectively.

**Key words:** satellite retrieval; PM<sub>2.5</sub>; AOD; CMAQ; WRF

为掌握全国 PM<sub>2.5</sub> 污染状况, 我国于 2013 年开始在 74 个城市开展了 PM<sub>2.5</sub> 的监测与数据实时发布工作, 但目前我国开展 PM<sub>2.5</sub> 监测的城市较少, 尚难以反映全国 PM<sub>2.5</sub> 污染的总体状况。此外, PM<sub>2.5</sub> 污染具有较高时空变异性, 尽管 PM<sub>2.5</sub> 地面监测手段能够提供时间连续的监测数据, 但不能得到连续的空间覆盖信息, 难以有效反映 PM<sub>2.5</sub> 污染的时空演变趋势。研究表明, 利用卫星遥测的气溶胶光学厚度 (AOD) 表征 PM<sub>2.5</sub> 污染状况, 是弥补地面监测手段不足的有效技术手段<sup>[1-8]</sup>。

由于 AOD 受大气湿度与 PM<sub>2.5</sub> 浓度及其垂直分布特征的多重影响, 因此通过 AOD 反演近地面 PM<sub>2.5</sub> 浓度的关键在于对 AOD 进行湿度与垂直订正。国内外学者在 AOD 反演近地面 PM<sub>2.5</sub> 浓度领域做了大量的研究, Engel-Cox 等<sup>[9]</sup> 和 Hutchison 等<sup>[10]</sup> 分别利用机载、地基激光雷达测量的气溶胶垂直分布数据对 MODIS AOD 进行垂直订正, 显著提高了 AOD 与近地面 PM<sub>2.5</sub> 浓度的相关性; van Donkelaar

等<sup>[11]</sup> 利用大气化学传输模型 GEOS-Chem 模拟了 PM<sub>2.5</sub> 与 AOD 之间的转换因子, 建立了近地面 PM<sub>2.5</sub> 浓度和 AOD 的线性拟合模型 ( $r = 0.77$ ), 反演了 2001 ~ 2006 年全球近地面 PM<sub>2.5</sub> 平均浓度; Wang 等<sup>[12]</sup> 利用气象站点实测的湿度数据和激光雷达探测的混合层高度对北京地区 MODIS AOD 进行湿度和垂直订正后, 建立了近地面 PM<sub>2.5</sub> 浓度和 MODIS AOD 的线性拟合模型 ( $R^2 = 0.47$ )。虽然已有研究大多对 AOD 进行了湿度或垂直订正, 但是仍存在一定不足。湿度订正方面, 由于地面气象站点有限, 利用地面气象站点实测的湿度数据订正 AOD, 存在“以点代面”的缺陷, 在区域尺度上存在较大不确定性; 垂直订正方面, 通过地基、机载雷达测定的气

收稿日期: 2014-08-22; 修订日期: 2014-10-27

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项 (201209001); 国家自然科学基金项目 (713401154)

作者简介: 薛文博 (1981 ~), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为空气质量模型、排放清单、环境卫星遥感及大气污染控制对策等, E-mail: xuewb@caep.org.cn

\* 通讯联系人, E-mail: bphan@cumt.edu.cn

溶胶标高或气象模型模拟的混合层高度订正 AOD, 均未考虑气溶胶在垂直层分布的不均匀性特征。

本研究首次采用第三代空气质量模型 CMAQ<sup>[13]</sup>模拟的高空间分辨率 PM<sub>2.5</sub>垂直分层数据和中尺度气象模型 WRF<sup>[14]</sup>模拟的高空间分辨率湿度数据, 对 AOD 资料分别进行垂直与湿度订正, 建立订正后的 AOD 数据和近地面 PM<sub>2.5</sub>监测浓度之间的线性拟合模型。基于拟合模型, 反演了我国 2013 年 1 月 PM<sub>2.5</sub>重污染过程, 并分析了人口暴露水平。

## 1 材料与方法

### 1.1 方法设计

本研究方法设计为: ①直接相关。对 AOD 不进行任何订正, 直接建立 AOD 与近地面 PM<sub>2.5</sub>监测浓度之间的拟合模型; ②垂直订正。利用第三代空气质量模型 CMAQ 模拟的高分辨率 PM<sub>2.5</sub>垂直分布数据对 AOD 进行垂直订正, 建立订正后的 AOD 与近地面 PM<sub>2.5</sub>监测浓度之间的拟合模型; ③湿度订正。利用中尺度气象模型 WRF 模拟的高分辨率相对湿度数据对 AOD 进行湿度订正, 建立订正后的 AOD 与近地面 PM<sub>2.5</sub>监测浓度之间的拟合模型; ④垂直-湿度订正。同时对 AOD 进行垂直与湿度订正, 建立经垂直-湿度订正后的 AOD 与近地面 PM<sub>2.5</sub>监测浓度之间的拟合模型; ⑤拟合模型优选。对比分析直接相关得到的拟合模型, 经垂直订正、湿度订正、垂直-湿度订正后的 AOD 与近地面 PM<sub>2.5</sub>监测浓度之间的拟合模型, 依据相关性强弱, 选取最优拟合模型; ⑥PM<sub>2.5</sub>浓度反演。利用选取的最优拟合模型, 反演 2013 年 1 月全国 10 km 分辨率 PM<sub>2.5</sub>月均浓度空间分布特征, 并分析人口暴露水平。

### 1.2 模型设置

(1) 模拟时段选取发生 PM<sub>2.5</sub>重污染事件的 2013 年 1 月模拟, 模拟时间间隔为 1 h。

(2) CMAQ 模型 CMAQ 模拟区域采用 Lambert 投影坐标系, 中心经度为 103°E, 中心纬度为 37°N, 2 条平行标准纬度为 25°N 和 40°N。水平模拟范围为 X 方向(-2 682 ~ 2 682 km)、Y 方向(-2 142 ~ 2 142 km), 网格间距 36 km, 共将模拟区域划分为 150 × 120 个网格, 研究区域包括中国全部陆域范围。模拟区域垂直方向共设置 9 个气压层, 层间距自下而上逐渐增大。通过 CMAQ 模型模拟每个网格 PM<sub>2.5</sub>浓度在 9 个气压层的分布特征。排放清单及模型具体参数设置见已有研究成果<sup>[15]</sup>。

(3) WRF 模型 WRF 模型与 CMAQ 模型采用相

同的空间投影坐标系, 但模拟范围大于 CMAQ 模拟范围, 其水平模拟范围为 X 方向(-3 582 ~ 3 582 km)、Y 方向(-2 502 ~ 2 502 km), 网格间距 36 km, 共将研究区域划分为 200 × 140 个网格。垂直方向共设置 28 个气压层, 层间距自下而上逐渐增大。WRF 模型的初始输入数据采用美国国家环境预报中心(NCEP)提供的 6 h 1 次、1°分辨率的 FNL 全球分析资料。通过 WRF 模型模拟每个网格对应 28 个气压层的相对湿度。

### 1.3 AOD 数据

AOD 数据来自搭载在美国航空航天局(NASA) AQUA 卫星上的中分辨率成像光谱仪 MODIS 遥感影像<sup>[16]</sup>。对 2013 年 1 月 MODIS MYD04 数据进行预处理, 获取 550 nm 光谱处的暗像元和深蓝算法两种 AOD 产品, 对两种 AOD 产品进行投影转换、拼接、融合, 获得两种算法融合后的 10 km 分辨率 AOD 产品, 并提取出 74 个城市 AOD 月均值。

## 2 PM<sub>2.5</sub>拟合模型

### 2.1 直接相关

由于卫星遥测的 AOD 受到云量等多种因素的影响, 2013 年 74 个开展 PM<sub>2.5</sub>监测的城市中 AOD 月均值有效样本数仅为 57 个。采用最小二乘法对 57 个城市 AOD 月均值与地面监测的 PM<sub>2.5</sub>月均浓度进行线性拟合, 建立线性拟合模型, 见公式(1)及图 1(a)所示。AOD 与地面监测 PM<sub>2.5</sub>浓度之间的相关系数  $r$  达到 0.62, 表明 AOD 与 PM<sub>2.5</sub>监测浓度呈较为明显的线性相关性, 但由于 AOD 受到大气湿度和 PM<sub>2.5</sub>浓度垂直分布特征的影响, AOD 大小并不能很好地表征近地面层 PM<sub>2.5</sub>浓度高低, 因此有必要对 AOD 进行垂直、湿度订正。

$$y = 95.29x + 53.35 \quad (1)$$

式中,  $y$  为 2013 年 1 月 PM<sub>2.5</sub>月均浓度( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ );  $x$  为未经订正的 AOD, 见图 2(a)。

### 2.2 垂直订正

AOD 表征的是大气垂直柱内所有气溶胶的消光能力, 要获取近地面气溶胶消光能力应该对 AOD 进行垂直订正, 假设气溶胶消光能力与气溶胶浓度呈正比, 利用 CMAQ 模型模拟的 36 km 分辨率 PM<sub>2.5</sub>浓度垂直分层数据对原始 AOD 进行订正, 订正方法见公式(2)所示。

$$\text{AOD}_v = \text{AOD} \times \eta \quad (2)$$

式中,  $\text{AOD}_v$  为经垂直订正的气溶胶光学厚度, 订正结果见图 2(a);  $\eta$  为 CMAQ 模型模拟的近地面层

PM<sub>2.5</sub>浓度占有垂直层总浓度的比例(%), $\eta$ 模拟结果见图3(a).

对57个城市的AOD<sub>v</sub>与地面监测PM<sub>2.5</sub>浓度进行线性拟合,建立两者之间的线性拟合模型,见公式(3)及图1(b)所示.线性相关系数 $r$ 由直接相关时的0.62提高到0.66,相关性有所增强.主要原因是:AOD反映了整个对流层气溶胶消光能力的总和,而PM<sub>2.5</sub>监测数据仅代表近地面层浓度水平,因此通过模型模拟的PM<sub>2.5</sub>浓度垂直分层数据对AOD进行订正后可以减少非近地面层PM<sub>2.5</sub>对AOD的影响,提高AOD表征近地面层PM<sub>2.5</sub>浓度的准确性.

$$y = 3\,377.08x + 57.52 \quad (3)$$

式中, $y$ 为2013年1月PM<sub>2.5</sub>月均浓度( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), $x$ 为AOD<sub>v</sub>.

### 2.3 湿度订正

利用WRF模型模拟的36 km分辨率相对湿度对原始AOD进行订正,订正方法见公式(4)所示.

$$\text{AOD}_{\text{rh}} = \text{AOD}/f(\text{rh}) \quad (4)$$

式中,AOD<sub>rh</sub>为经湿度订正的气溶胶光学厚度,订正结果见图2(c); $f(\text{rh})$ 为颗粒物散射吸湿增长因子,表征空气湿度对AOD的影响大小,通过经验公式(5)计算<sup>[17-23]</sup>:

$$f(\text{rh}) = (1 - \text{rh}/100)^{-1} \quad (5)$$

式中, $\text{rh}$ 为WRF模型模拟的大气相对湿度(%), $\text{rh}$ 模拟结果见图3(b).

对57个城市的AOD<sub>rh</sub>与地面监测PM<sub>2.5</sub>浓度进行线性拟合,建立AOD<sub>rh</sub>与PM<sub>2.5</sub>之间的线性拟合模型,见公式(6)及图1(c)所示.相关系数 $r$ 由直接关联时的0.62提高到0.75,相关性显著增强.其原因在于:大气颗粒物中的硫酸盐、硝酸盐、铵盐等粒子具有较强的吸湿性,粒子吸湿后其粒径、质量、密度、折射指数等微物理参数均会发生变化,消光能力有所增强,而采用WRF模型模拟的相对湿度对AOD进行订正可以大幅降低空气湿度对AOD的影响.

$$y = 244.61x + 52.30 \quad (6)$$

式中, $y$ 为2013年1月PM<sub>2.5</sub>月均浓度( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ); $x$ 为AOD<sub>rh</sub>.

### 2.4 垂直-湿度订正

首先对AOD进行垂直订正得到AOD<sub>v</sub>,然后对AOD<sub>v</sub>进行湿度订正得到AOD<sub>v-rh</sub>,订正方法见公式(7).

$$\text{AOD}_{\text{v-rh}} = \text{AOD} \times \eta/f(\text{rh}) \quad (7)$$

式中,AOD<sub>v-rh</sub>为经垂直-湿度同时订正的气溶胶光学厚度,订正结果见图2(d).

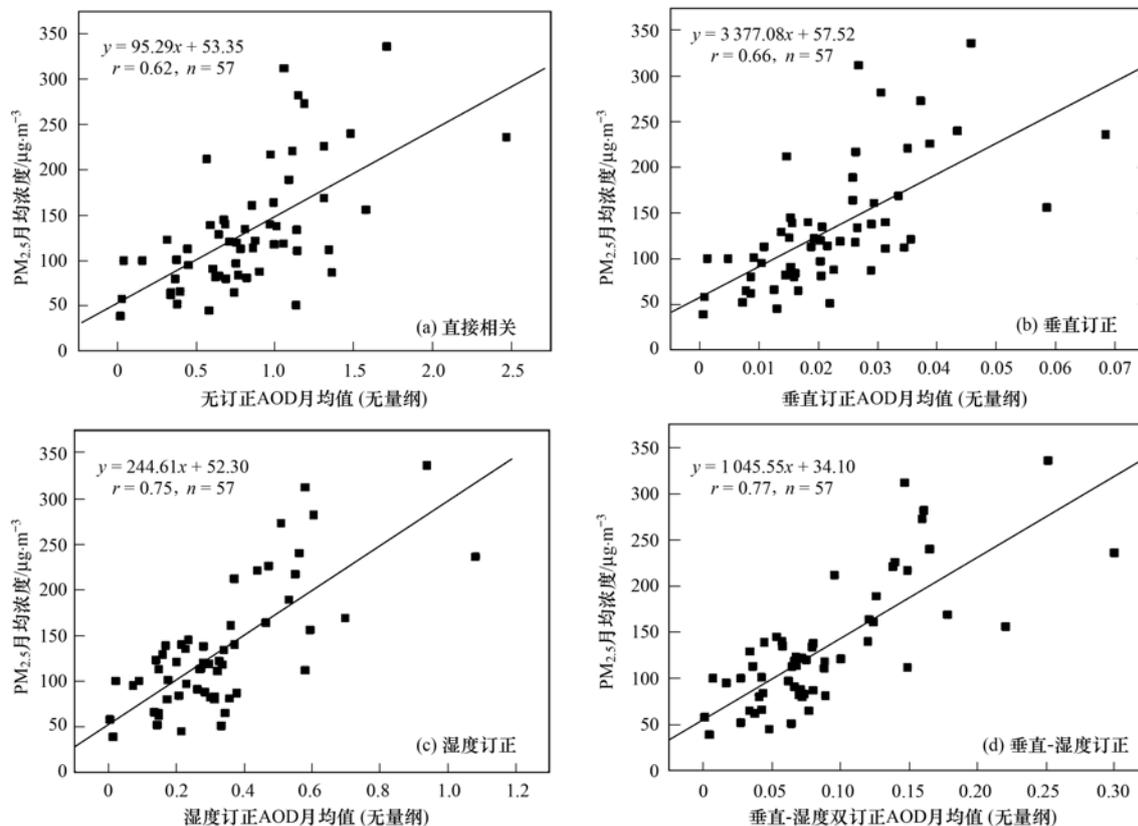


图1 AOD与近地面PM<sub>2.5</sub>浓度相关性

Fig. 1 Correlation between AOD and surface-level PM<sub>2.5</sub> concentration

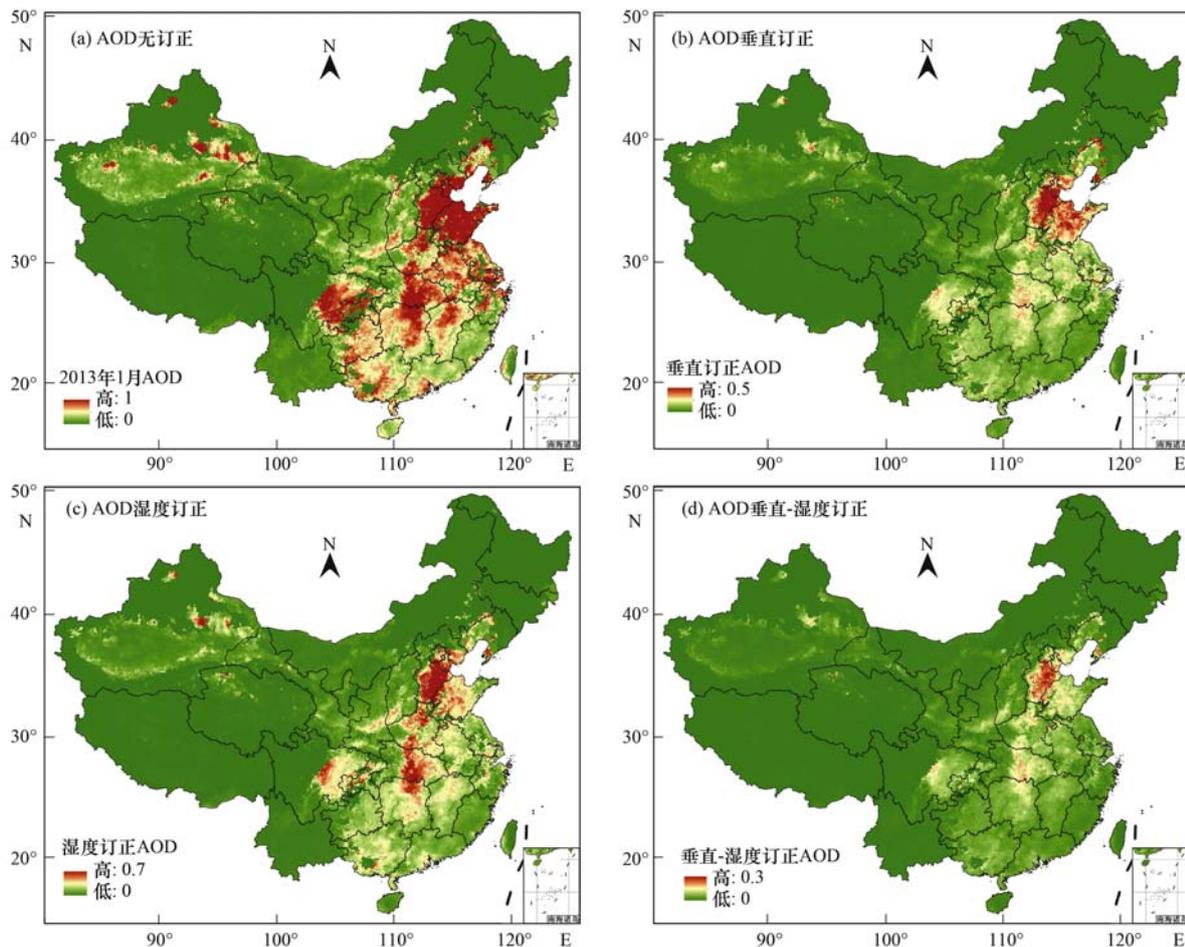


图 2 2013 年 1 月全国 AOD

Fig. 2 National AOD in January 2013

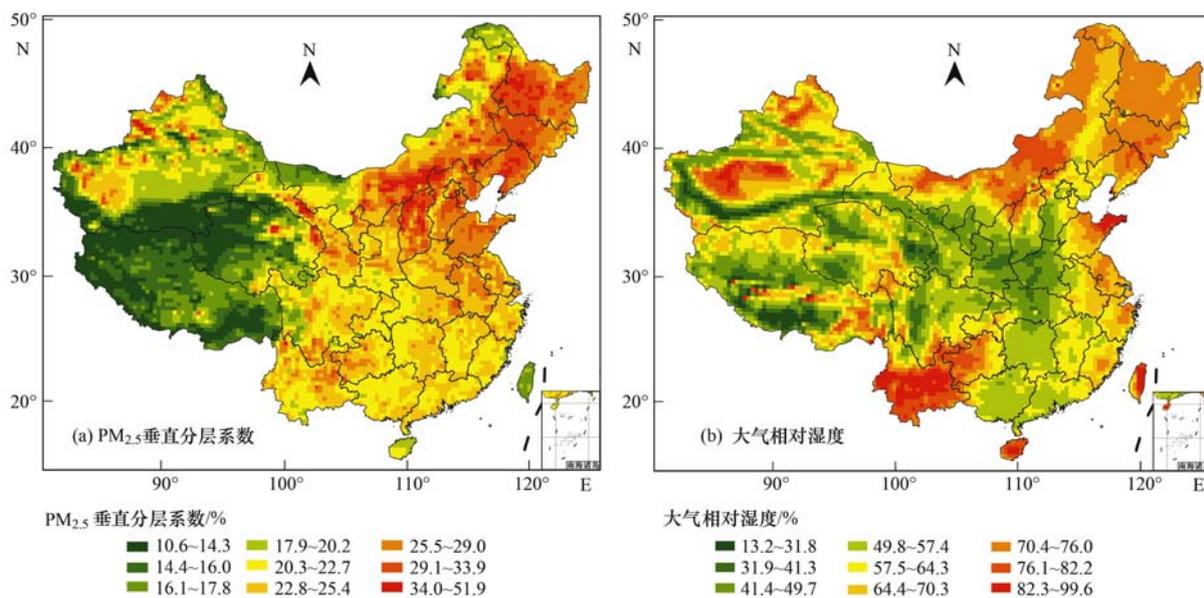


图 3 2013 年 1 月 AOD 垂直与湿度订正系数

Fig. 3 Vertical and relative humidity revise factors of AOD in January 2013

对 57 个城市的  $AOD_{v-th}$  与地面监测  $PM_{2.5}$  浓度进行线性拟合, 建立  $AOD_{v-th}$  与地面监测  $PM_{2.5}$  浓度之间的线性拟合模型, 见公式 (8) 及图 1 (d) 所示. 相关系数  $r$  达到 0.77, 明显高于直接相关、垂直订正、湿度订正后的相关系数, 这证实了本研究所采用垂直-湿度订正方法的有效性.

$$y = 1\,045.55x + 34.10 \quad (8)$$

式中,  $y$  为 2013 年 1 月  $PM_{2.5}$  月均浓度 ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ );  $x$  为  $AOD_{v-th}$ .

## 2.5 反演模型优选

分别采用 4 个线性拟合模型反演 57 个样本城市近地面  $PM_{2.5}$  月均浓度, 将反演的  $PM_{2.5}$  月均浓度与监测浓度进行统计分析, 从相关系数、一致性指数及标准平均误差各项统计指标来看, 4 个线性拟合模型反演近地面  $PM_{2.5}$  浓度与监测值之间的一致性关系从大到小依次是: 垂直-湿度订正 ( $r = 0.77, I = 0.87, NME = 26\%$ )、湿度订正 ( $r = 0.75, I = 0.82, NME = 27\%$ )、垂直订正 ( $r = 0.66, I = 0.76, NME = 29\%$ ) 和直接相关 ( $r = 0.62, I = 0.73, NME = 31\%$ ), 可以看出近地面  $PM_{2.5}$  浓度拟

合模型公式 (8) 明显优于拟合模型公式 (1)、(3) 和 (6), 因此选取公式 (8) 反演 2013 年 1 月全国 10 km 分辨率近地面  $PM_{2.5}$  浓度, 并分析人口暴露水平. 不同拟合模型统计学参数见表 1 所示. 相关系数、一致性指数、标准平均误差计算见公式 (9)、(10)、(11).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - P_j)(O_i - O_j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (P_i - P_j)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - O_j)^2}} \quad (9)$$

$$I = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - P_j| + |O_i - O_j|)^2} \quad (10)$$

$$NME = \frac{\sum_{i=1}^N |P_i - O_i|}{\sum_{i=1}^N O_i} \times 100 \quad (11)$$

式中,  $r$  (无量纲)、 $I$  (无量纲)、 $NME$  (%) 分别为相关系数、一致性指数、标准平均误差,  $P_i$  ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )、 $P_j$  ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 分别为拟合模型反演的各样本城市  $PM_{2.5}$  浓度及所有样本城市反演浓度的平均值,  $O_i$  ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )、 $O_j$  ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 为各样本城市监测  $PM_{2.5}$  浓度及所有样本城市监测浓度的平均值.

表 1  $PM_{2.5}$  浓度反演模型

Table 1 Retrieval models of  $PM_{2.5}$  concentration

订正方法	拟合模型	相关系数( $r$ )	一致性指数	标准平均误差/%	样本( $n$ )	显著水平( $P$ )
直接相关	$y = 95.29x + 53.35$	0.62	0.73	31	57	<0.01
垂直订正	$y = 337.71x + 57.52$	0.66	0.76	29	57	<0.01
湿度订正	$y = 244.61x + 52.30$	0.75	0.82	27	57	<0.01
垂直-湿度订正	$y = 1\,045.55x + 34.10$	0.77	0.87	26	57	<0.01

## 3 $PM_{2.5}$ 浓度反演

依据公式 (7) 和 (8) 反演 2013 年 1 月近地面  $PM_{2.5}$  月均浓度, 反演结果见图 4 所示. 结果表明, 2013 年 1 月我国  $PM_{2.5}$  月均浓度最大值高达  $518.00 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 最小值为  $34.10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (表 2), 最小值接近国家年均二级标准.  $PM_{2.5}$  重污染地区主要集中在以京津冀为中心的华北平原、山东半岛、两湖平原和成渝盆地等人口密集地区, 重污染地区与人口密集区域高度重合. 统计结果表明, 2013 年 1 月我国  $PM_{2.5}$  月均值小于  $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  的面积约  $648.96 \text{万 km}^2$ , 主要集中在西部和东北地区, 占国土面积 67.60%, 暴露人口约占全国总人口的 20.76% (表 3);  $PM_{2.5}$  月均浓度介于  $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  之间的面积约为  $125.57 \text{万 km}^2$ , 占国土面积 13.08%, 暴露人口约占全国总人口的 15.40%; 浓度在  $75$

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  之间的面积约  $79.97 \text{万 km}^2$ ,

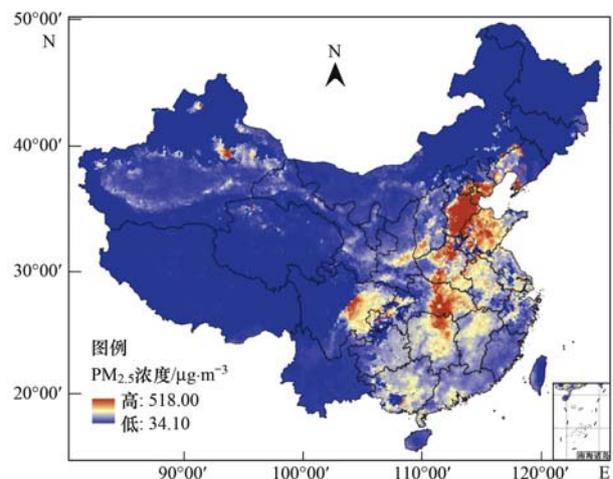


图 4 10 km 分辨率  $PM_{2.5}$  浓度反演结果

Fig. 4 Retrieval results of  $PM_{2.5}$  concentration at the resolution of 10 km

占全国总面积的 8.33%, 暴露人口约占全国总人口的 18.83%; PM<sub>2.5</sub> 月均浓度大于 100  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、200  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  的面积占国土面积的比例分别高达 10.99%、1.34%, 暴露人口占全国总人口的比例分别高达 45.01%、6.31%, 其中大于 100  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  的地区仅占国土面积的 10.99%, 但却集中了全国

45.01% 的人口, PM<sub>2.5</sub> 污染对公众健康造成严重危害<sup>[24~26]</sup>.

表 2 PM<sub>2.5</sub> 反演结果统计/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

统计项	最大值	最小值	平均值	标准差
浓度	518.00	34.10	55.82	38.87

表 3 人口暴露水平

月均浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	< 50	[ 50, 75 )	[ 75, 100 )	[ 100, 200 )	> 200
面积比例/%	67.60	13.08	8.33	9.65	1.34
暴露人口比例/%	20.76	15.40	18.83	38.70	6.31

## 4 结论

(1) 利用第三代空气质量模型 CMAQ 模拟的高分辨率 PM<sub>2.5</sub> 垂直分层数据和中尺度气象模型 WRF 模拟的高分辨率湿度数据, 分别对 MODIS AOD 资料进行垂直与湿度订正, AOD 经垂直订正、湿度订正及湿度-垂直同时订正后与 PM<sub>2.5</sub> 地面监测数据的相关系数由未订正时的  $r = 0.62$  分别提高到 0.66、0.75、0.77, 相关系数逐步提高, 证实了所采用的 AOD 垂直、湿度订正方法的有效性。

(2) 2013 年 1 月重污染事件 PM<sub>2.5</sub> 浓度反演结果表明, PM<sub>2.5</sub> 月均浓度大于 100  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、200  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  的面积占国土面积的比例分别高达 10.99%、1.34%, 暴露人口占全国总人口的比例分别高达 45.01%、6.31%, PM<sub>2.5</sub> 污染有可能对公众健康造成严重危害。

### 参考文献:

[ 1 ] Liu Y, Samat J A, Kilaru V, *et al.* Estimating ground-level PM<sub>2.5</sub> in the eastern United States using satellite remote sensing [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39** (9): 3269-3278.

[ 2 ] van Donkelaar A, Martin R V, Levy R C, *et al.* Satellite-based estimates of ground-level fine particulate matter during extreme events: A case study of the Moscow fires in 2010 [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45** (34): 6225-6232.

[ 3 ] Tao J H, Zhang M G, Chen L F, *et al.* A method to estimate concentrations of surface-level particulate matter using satellite-based aerosol optical thickness [J]. *Science China Earth Sciences*, 2013, **56** (8): 1422-1433.

[ 4 ] 李成才, 毛节泰, 刘启汉, 等. 利用 MODIS 光学厚度遥感产品研究北京及周边地区的大气污染 [J]. *大气科学*, 2003, **27** (5): 869-880.

[ 5 ] 李成才, 毛节泰, 刘启汉, 等. MODIS 卫星遥感气溶胶产品在北京市大气污染研究中的应用 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2005, **35** (增刊 I): 177-186.

[ 6 ] 贾松林, 苏林, 陶金花, 等. 卫星遥感监测近地表细颗粒物

多元回归方法研究 [J]. *中国环境科学*, 2014, **34** (3): 565-573.

[ 7 ] Schaap M, Apituley A, Timmermans R M S, *et al.* Exploring the relation between aerosol optical depth and PM<sub>2.5</sub> at Cabauw, the Netherlands [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2009, **9**: 909-925.

[ 8 ] Engel-Cox J A, Holloman C H, Coutant B W, *et al.* Qualitative and quantitative evaluation of MODIS satellite sensor data for regional and urban scale air quality [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38** (16): 2495-2509.

[ 9 ] Engel-Cox J A, Hoff R M, Rogers R, *et al.* Integrating lidar and satellite optical depth with ambient monitoring for 3-dimensional particulate characterization [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40** (40): 8056-8067.

[ 10 ] Hutchison K D, Faruqi S J, Smith S. Improving correlations between MODIS aerosol optical thickness and ground-based PM<sub>2.5</sub> observations through 3D spatial analyses [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42** (3): 530-543.

[ 11 ] van Donkelaar A, Martin R V, Brauer M, *et al.* Global estimates of ambient fine particulate matter concentrations from satellite-based aerosol optical depth: development and application [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2010, **118** (6): 847-855.

[ 12 ] Wang Z F, Chen L F, Tao J H, *et al.* Satellite-based estimation of regional particulate matter (PM) in Beijing using vertical-and-RH correcting method [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, **114** (1): 50-63.

[ 13 ] 张艳, 余琦, 伏晴艳, 等. 长江三角洲区域输送对上海市空气质量影响的特征分析 [J]. *中国环境科学*, 2010, **30** (7): 914-923.

[ 14 ] 邹德龙, 罗翔羽, 范绍佳, 等. 不同天气系统影响下广东省酸雨特征对比分析——气象场数值模拟 [J]. *中国环境科学*, 2012, **32** (8): 1439-1446.

[ 15 ] Xue W B, Wang J N, Niu H, *et al.* Assessment of air quality improvement effect under the National Total Emission Control Program during the Twelfth National Five-Year Plan in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **68**: 74-81.

[ 16 ] NASA. MODIS Level 1 and atmosphere archive and distribution system [EB/OL]. <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>, 2014-05-05.

- [17] 刘新罡. 大气气溶胶吸湿性质观测、模型研究——以北京、珠江三角洲地区为例[D]. 北京: 北京大学, 2008. 67-121.
- [18] 李倩, 李成才, 王焯芳, 等. 利用激光雷达和卫星遥感获得城市地面大气悬浮颗粒物浓度分布[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2013, **49**(4): 673-682.
- [19] Malm W C, Day D E, Kreidenweis S M. Light scattering characteristics of aerosols as a function of relative humidity: Part I--A comparison of measured scattering and aerosol concentrations using the theoretical models [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2000, **50**(5): 686-700.
- [20] 张立盛, 石广玉. 相对湿度对气溶胶辐射特性和辐射强迫的影响[J]. *气象学报*, 2002, **60**(2): 230-237.
- [21] Kotchenruther R A, Hobbs P V, Hegg D A. Humidification factors for atmospheric aerosols off the mid-Atlantic coast of the United States [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, **104**(D2): 2239-2251.
- [22] Kotchenruther R A, Hobbs P V. Humidification factors of aerosols from biomass burning in Brazil [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, **103**(D24): 32081-32089.
- [23] Im J S, Saxena V K, Wenny B N, *et al.* An assessment of hygroscopic growth factors for aerosols in the surface boundary layer for computing direct radiative forcing [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, **106**(D17): 20213-20224.
- [24] Chen Z, Wang J N, Ma G X, *et al.* China tackles the health effects of air pollution [J]. *The Lancet*, 2013, **382**(9909): 1959-1960.
- [25] 李焯焯, 杜艳君, 莫杨, 等. 我国四城市 2013 年 1 月雾霾天气事件中 PM<sub>2.5</sub> 与人群健康风险评估[J]. *中华医学杂志*, 2013, **93**(34): 2699-2702.
- [26] 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.

## CONTENTS

Simulation and Influencing Factors of Spatial Distribution of PM <sub>2.5</sub> Concentrations in Chongqing	WU Jian-sheng, LIAO Xing, PENG Jian, <i>et al.</i>	( 759 )
Correlation, Seasonal and Temporal Variation of Water-soluble Ions of PM <sub>2.5</sub> in Beijing During 2012-2013	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i>	( 768 )
Characteristics and Sources Apportionment of OC and EC in PM <sub>1.1</sub> from Nanjing	JIANG Wen-juan, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i>	( 774 )
Composition and Variation Characteristics of Atmospheric Carbonaceous Species in PM <sub>2.5</sub> in Taiyuan, China	ZHANG Gui-xiang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i>	( 780 )
Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM <sub>2.5</sub> in Shouzhou City	LIU Feng-xian, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i>	( 787 )
Satellite Retrieval of a Heavy Pollution Process in January 2013 in China	XUE Wen-bo, WU Wei-ling, FU Fei, <i>et al.</i>	( 794 )
Meteorological Mechanism for the Formation of a Serious Pollution Case in Beijing in the Background of Northerly Flow at Upper Levels	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, TANG Yi-xi, <i>et al.</i>	( 801 )
Concentrations and Deposition Fluxes of Different Mercury Species in Precipitation in Jinyun Mountain, Chongqing	QIN Cai-qing, WANG Yong-min, PENG Yu-long, <i>et al.</i>	( 809 )
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Wuzhi Mountain (Wuzhishan) Background Station in Hainan	LEI Yu-tao, LIU Ming, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i>	( 817 )
Organic and Element Carbon in Foliar Smoke	CHEN Hui-yu, LIU Gang, XU Hui, <i>et al.</i>	( 824 )
Analysis of Characteristics and Products of Chlorobenzene Degradation with Dielectric Barrier Discharge	JIANG Li-ying, CAO Shu-ling, ZHU Run-ye, <i>et al.</i>	( 831 )
Distribution, Sources and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Sediments of Yangtze Estuary and Zhejiang Coastal Areas	MU Qing-lin, FANG Jie, SHAO Jun-bo, <i>et al.</i>	( 839 )
Adsorption Characteristics of Typical PPCPs onto River Sediments and Its Influencing Factors	WANG Kai, LI Kan-zhu, ZHOU Yi-yuan, <i>et al.</i>	( 847 )
Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediment in Karst Underground River	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI Yang, <i>et al.</i>	( 855 )
Contamination Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Multimedium in Karst Underground River	LU Li, WANG Zhe, PEI Jian-guo, <i>et al.</i>	( 862 )
Characteristics of Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter from Confluence of Rivers; Case Study of Qujiang River-Jialing River and Fujiang River-Jialing River	YAN Jin-long, JIANG Tao, GAO Jie, <i>et al.</i>	( 869 )
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter (DOM) in Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Region	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i>	( 879 )
Absorption and Fluorescence Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Rainwater and Sources Analysis in Summer and Winter Season	LIANG Jian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i>	( 888 )
Composition of NOM in Raw Water of Danjiangkou Reservoir of South-to-North Water Diversion Project and Comparison of Efficacy of Enhanced Coagulation	CHENG Tuo, XU Bin, ZHU He-zhen, <i>et al.</i>	( 898 )
Denitrification in Water of Daliao River Estuary in Summer and the Effect of Environmental Factors	YANG Li-biao, LEI Kun, MENG Wei, <i>et al.</i>	( 905 )
Sources of Dissolved Organic Carbon and the Bioavailability of Dissolved Carbohydrates in the Tributaries of Lake Taihu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, KONG Fan-xiang, <i>et al.</i>	( 914 )
Canonical Correspondence Analysis of Summer Phytoplankton Community and Its Environmental Factors in Hanfeng Lake	WANG Yu-fei, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i>	( 922 )
Temporal Variation of Trophic Status in Drawdown Area of Hanfeng Lake in the Storage Period of Three Gorges Reservoir in China	HUANG Qi, HE Bing-hui, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i>	( 928 )
Spatial Distribution Pattern and Stock Estimation of Nutrients During Bloom Season in Lake Taihu	JIN Ying-wei, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i>	( 936 )
Phytoplankton Community Structure and Eutrophication Risk Assessment of Beijing River	GOU Ting, MA Qian-li, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i>	( 946 )
Synergistic Effect of Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combined Disturbance on Regeneration and Transformation of Internal Phosphorus	SHI Xiao-dan, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i>	( 955 )
Effect of Light and Temperature on Growth Kinetics of <i>Anabaena flosaquae</i> Under Phosphorus Limitation	YIN Zhi-kun, LI Zhe, WANG Sheng, <i>et al.</i>	( 963 )
Purification of the Wastewater of Quartz Processing by Mineral-based Porous Granulation Material	WANG En-wen, LEI Shao-min, ZHANG Shi-chun, <i>et al.</i>	( 969 )
Enhanced Reductive Decoloration of Methylene Blue by Polyacrylic Acid Modified Zero-valent Iron Nanoparticles	HE Jing, WANG Xiang-yu, WANG Pei, <i>et al.</i>	( 980 )
Decolorization of Reactive Blue P-3R with Microsphere-supported Binuclear Manganese Complex as a Novel Heterogeneous CWPO Catalyst	SONG Min, ZHANG Lin-ping, ZHONG Yi, <i>et al.</i>	( 989 )
Biosynthetic Schwertmannite as Catalyst in Fenton-like Reactions for Degradation of Methyl Orange	WANG Kuai-bing, FANG Di, XU Zhi-hui, <i>et al.</i>	( 995 )
Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal of Wastewater by Using Sludge Anaerobic Fermentation Liquid as Carbon Source in a Pilot-scale System	LUO Zhe, ZHOU Guang-jie, LIU Hong-bo, <i>et al.</i>	( 1000 )
Transformation Characteristics of Carbon, Nitrogen, Phosphorus and Sulfur During Thermal Hydrolysis Pretreatment of Sludge with High Solid Content	ZHUO Yang, HAN Yun, CHENG Yao, <i>et al.</i>	( 1006 )
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Control of Membrane Fouling in MBR and SMBR	GUO Xiao-ma, ZHAO Yan, WANG Kai-yan, <i>et al.</i>	( 1013 )
Influence of Substrate COD on Methane Production in Single-chambered Microbial Electrolysis Cell	TENG Wen-kai, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i>	( 1021 )
Ion Specificity During Ion Exchange Equilibrium in Natural Clinoptilolite	HE Yun-hua, LI Hang, LIU Xin-min, <i>et al.</i>	( 1027 )
Assessment of Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risks of Urban Soils in Kaifeng City, China	LI Yi-meng, MA Jian-hua, LIU De-xin, <i>et al.</i>	( 1037 )
Effects of Different Cultivation Patterns on Soil Aggregates and Organic Carbon Fractions	QIU Xiao-lei, ZONG Liang-gang, LIU Yi-fan, <i>et al.</i>	( 1045 )
Effects of Chinese Prickly Ash Orchard on Soil Organic Carbon Mineralization and Labile Organic Carbon in Karst Rocky Desertification Region of Guizhou Province	ZHANG Wen-juan, LIAO Hong-kai, LONG Jian, <i>et al.</i>	( 1053 )
Rare Earth Elements Content in Farmland Soils and Crops of the Surrounding Copper Mining and Smelting Plant in Jiangxi Province and Evaluation of Its Ecological Risk	JIN Shu-lan, HUANG Yi-zong, WANG Fei, <i>et al.</i>	( 1060 )
Combined Toxicity of Cadmium and S-metolachlor to <i>Scenedesmus obliquus</i>	ZHANG Xiao-qiang, HU Xiao-na, CHEN Cai-dong, <i>et al.</i>	( 1069 )
Effect of Degradation Succession Process on the Temperature Sensitivity of Ecosystem Respiration in Alpine <i>Potentilla fruticosa</i> Scrub Meadow	LI Dong, LUO Xu-peng, CAO Guang-min, <i>et al.</i>	( 1075 )
Ecological Stoichiometric Characteristics in Leaf and Litter Under Different Vegetation Types of Zhifanggou Watershed on the Loess Plateau, China	LI Xin, ZENG Quan-chao, AN Shao-shan, <i>et al.</i>	( 1084 )
Denitration Mechanism of Monoclinic-phase Nano Zirconium Oxide-based Catalysts	YE Fei, LIU Rong, GUAN Hao, <i>et al.</i>	( 1092 )
Characterization of Phosphorus Forms in Different Organic Materials	DENG Jia, HU Meng-kun, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i>	( 1098 )
Comparative Life Cycle Environmental Assessment Between Electric Taxi and Gasoline Taxi in Beijing	SHI Xiao-qing, SUN Zhao-xin, LI Xiao-nuo, <i>et al.</i>	( 1105 )
Characteristics of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particles Emitted from Coal-Fired Power Plants	DUAN Lei, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i>	( 1117 )
Underlying Mechanisms of the Heavy Metal Tolerance of Mycorrhizal Fungi	CHEN Bao-dong, SUN Yu-qing, ZHANG Xin, <i>et al.</i>	( 1123 )
Research Progress on Microbial Properties of Nitrite-Dependent Anaerobic Methane-Oxidising Bacteria	SHEN Li-dong	( 1133 )

# 《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3月15日 第36卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 3 Mar. 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