

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第9期

Vol.36 No.9

**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

|                                                                                             |                                                             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 长江三角洲 PM <sub>2.5</sub> 质量浓度遥感估算与时空分布特征 .....                                               | 徐建辉, 江洪 (3119)                                              |
| 宁波市 PM <sub>2.5</sub> 中碳组分的时空分布特征和二次有机碳估算 .....                                             | 杜博涵, 黄晓锋, 何凌燕, 胡敏, 王川, 任宇超, 应红梅, 周军, 汪伟峰, 许丹丹 (3128)        |
| 青岛大气中酸碱气体及 PM <sub>2.5</sub> 中水溶性离子的浓度特征和气粒平衡关系 .....                                       | 周佳佳, 石金辉, 李丽平, 姚小红, 高会旺 (3135)                              |
| 北京雾霾天大气颗粒物中微生物气溶胶的浓度及粒谱特征 .....                                                             | 胡凌飞, 张柯, 王洪宝, 李娜, 王洁, 杨文慧, 殷喆, 焦周光, 温占波, 李劲松 (3144)         |
| 2015 年春节北京市空气质量分析 .....                                                                     | 程念亮, 陈添, 张大伟, 李云婷, 孙峰, 魏强, 刘嘉林, 刘保献, 孙瑞雯 (3150)             |
| 上海市大气挥发性有机化学消耗与臭氧生成的关系 .....                                                                | 王红丽 (3159)                                                  |
| 生物滴滤塔净化氯代烃混合废气的研究 .....                                                                     | 陈东之, 缪孝平, 欧阳杜娟, 叶杰旭, 陈建孟 (3168)                             |
| 一种基于 GOCI 数据的叶绿素 a 浓度三波段估算模型 .....                                                          | 郭宇龙, 李云梅, 李渊, 吕恒, 刘阁, 王旭东, 张思敏 (3175)                       |
| 巢湖溶解性有机物时空分布规律及其影响因素 .....                                                                  | 叶琳琳, 吴晓东, 刘波, 闫德智, 张玫琪, 周阳 (3186)                           |
| 河北洺河溶解性有机物光谱学特性 .....                                                                       | 虞敏达, 张慧, 何小松, 檀文炳, 张媛, 马丽娜, 席北斗, 党秋玲, 高如泰 (3194)            |
| 东山岛地下水“三氮”空间分布特征 .....                                                                      | 吴海燕, 傅世锋, 蔡晓琼, 汤坤贤, 曹超, 陈庆辉, 梁修雨 (3203)                     |
| 重庆典型岩溶区地下河中溶解态正构烷烃、脂肪酸来源、迁移及转化 .....                                                        | 梁作兵, 孙玉川, 王尊波, 师阳, 江泽利, 张媚, 谢正兰, 廖昱 (3212)                  |
| 硫酸对乌江中上游段岩溶水化学及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的影响 .....                                | 黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 张连凯, 苏春田 (3220)                              |
| 阆中市思依镇水化学特征及其成因分析 .....                                                                     | 张艳, 吴勇, 杨军, 孙厚云 (3230)                                      |
| 东南沿海河流-水库系统藻类生长营养盐限制季节变动 .....                                                              | 陈聪聪, 饶拉, 黄金良, 白敏冬 (3238)                                    |
| 水体氮磷营养盐水平与氯霉素浓度复合水体对苦草的生理生化影响 .....                                                         | 胡珍珍, 崔益斌, 李梅, 余静 (3248)                                     |
| 溶藻活性物质对棕囊藻溶藻及其脂肪酸影响的模拟 .....                                                                | 杨秋婵, 赵玲, 尹平河, 谭烁, 舒万姣, 侯少玲 (3255)                           |
| 坡岸截留强化处理设施在不同运行条件下对农业面源污染物去除效果 .....                                                        | 李怀正, 陈珂莉, 危忠, 王卫刚 (3262)                                    |
| 典型材料屋面积尘重金属形态分布与风险评估 .....                                                                  | 李敦柱, 管运涛, 刘安, 李思远 (3269)                                    |
| 南水北调丹江口水库水氯(胺)化消毒副产物产生特性与消毒工艺对比 .....                                                       | 张民盛, 徐斌, 张天阳, 程拓, 夏圣骥, 楚文海 (3278)                           |
| 臭氧-混凝交互作用对混凝效果的影响 .....                                                                     | 刘海龙, 郭雪峰, 王敏慧, 焦茹媛, 石健 (3285)                               |
| 含溴水臭氧化过程阴离子对溴酸盐生成的影响 .....                                                                  | 吴悦, 吴纯德, 刘吕刚, 袁博杰 (3292)                                    |
| 厌氧环境雌黄溶解产物形态的 XAS 研究 .....                                                                  | 王莹, 许丽英, 王少锋, 肖翻, 贾永峰 (3298)                                |
| 印染及染料行业废水生物处理系统中的 AOX 污染研究 .....                                                            | 申洋洋, 刘锐, 徐灿灿, 舒小铭, 许江军, 兰亚琼, 陈吕军 (3304)                     |
| 螺旋霉素制药废水处理过程中耐药菌和抗性基因的转归特征 .....                                                            | 覃彩霞, 佟娟, 申佩弘, 魏源送 (3311)                                    |
| 两种膜生物反应器处理养猪沼液的比较研究 .....                                                                   | 税勇, 川岸朋树, 宋小燕, 刘锐, 陈吕军 (3319)                               |
| 农村污水膜生物反应器系统中微生物群落解析 .....                                                                  | 孔晓, 崔丙健, 金德才, 吴尚华, 杨波, 邓晔, 庄国强, 庄绪亮 (3329)                  |
| 四区一体反应器冬季启动脱氮特性及硝化菌群结构分析 .....                                                              | 张岩, 孙凤侠, 谢杭冀, 陈敬, 睦稀, 甘志明, 王修平, 史扬 (3339)                   |
| 从亚硝酸还原厌氧氨氧化转变为硫酸盐型厌氧氨氧化 .....                                                               | 刘正川, 袁林江, 周国标, 李晶 (3345)                                    |
| 提高有机负荷对好氧颗粒污泥形成与稳定过程的影响 .....                                                               | 刘小鹏, 王建芳, 钱飞跃, 王琰, 陈重军, 沈耀良 (3352)                          |
| 常规施肥条件下农田不同途径氮素损失的原位研究: 以长江中下游地区夏玉米季为例 .....                                                | 桑蒙蒙, 范会, 姜珊珊, 蒋静艳 (3358)                                    |
| 水氮组合模式对双季稻甲烷和氧化亚氮排放的影响 .....                                                                | 傅志强, 龙攀, 刘依依, 钟娟, 龙文飞 (3365)                                |
| 厌氧条件下砂壤水稻土 N <sub>2</sub> 、N <sub>2</sub> O、NO、CO <sub>2</sub> 和 CH <sub>4</sub> 排放特征 ..... | 曹娜, 王睿, 廖婷婷, 陈诺, 郑循华, 姚志生, 张海, Klaus Butterbach-Bahl (3373) |
| 黄土丘陵区不同有机碳背景下侵蚀坡面土壤呼吸特征 .....                                                               | 陈盖, 许明祥, 张亚锋, 王超华, 樊会敏, 王闪闪 (3383)                          |
| 生物炭添加对半干旱地区土壤温室气体排放的影响 .....                                                                | 郭艳亮, 王丹丹, 郑纪勇, 赵世伟, 张兴昌 (3393)                              |
| 宁南山区林地土壤原位矿化过程中碳氮转化耦合特征 .....                                                               | 倪银霞, 黄懿梅, 牛丹, 赵彤, 闫浩, 蒋跃利 (3401)                            |
| 石漠化山地植被恢复过程土壤团聚体氮分布及与氮素矿化关系研究 .....                                                         | 胡宁, 马志敏, 蓝家程, 伍宇春, 陈高起, 傅瓦利, 文志林, 王文净 (3411)                |
| 江汉平原农田土壤有机碳分布与变化特点: 以潜江市为例 .....                                                            | 王玉竹, 肖和艾, 周萍, 童成立, 葛体达, 曾冠军, 吴金水 (3422)                     |
| 缙云山不同土地利用方式下土壤团聚体中活性有机碳分布特征 .....                                                           | 李睿, 江长胜, 郝庆菊 (3429)                                         |
| 西北典型工矿型城市街道尘埃重金属污染的环境磁学响应 .....                                                             | 聂燕, 王新, 王博, 许淑婧, 高福元, 余晔, 夏敦胜, 夏听鸣 (3438)                   |
| 电镀厂周边环境重金属分布特征及人体健康暴露风险评价 .....                                                             | 郭鹏然, 雷永乾, 周巧丽, 王畅, 潘佳钊 (3447)                               |
| 典型电力电容器污染土壤中多氯联苯水平及特性 .....                                                                 | 刘洁, 李晓东, 赵中华, 祁志福, 陈彤, 严建华 (3457)                           |
| 紫色土对硫丹的吸附与解吸特征 .....                                                                        | 赵炎, 郑国灿, 朱恒, 张进忠, 朱秀英, 胡淑春, 吴娅林 (3464)                      |
| 紫茉莉对石油污染盐碱土壤微生物群落与石油烃降解的影响 .....                                                            | 焦海华, 崔丙健, 吴尚华, 白志辉, 黄占斌 (3471)                              |
| 4 株外生菌根真菌对 Al <sup>3+</sup> 吸收与吸附的研究 .....                                                  | 王明霞, 袁玲, 黄建国, 周志峰 (3479)                                    |
| 长春市郊区蔬菜有机磷农药残留与健康风险评价 .....                                                                 | 于锐, 刘景双, 王其存, 刘强, 王洋 (3486)                                 |
| 北京市北神树生活垃圾填埋场产甲烷菌的群落结构和演替规律 .....                                                           | 宋立娜, 王磊, 夏孟婧, 苏月, 李振山 (3493)                                |
| 城市分散式粪便颗粒化有机肥用作叶菜肥的肥力及环境影响 .....                                                            | 吕文洲, 乔宇祥, 余宁, 史荣华, 王光明 (3501)                               |
| V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -WO <sub>3</sub> /TiO <sub>2</sub> 催化剂与活性炭混合降解气相二噁英 .....     | 任咏, 纪莎莎, 俞明峰, 李晓东, 严建华 (3508)                               |
| 基于出行服务的纯电动公交车节能减排效益分析 .....                                                                 | 林晓丹, 田良, 吕彬, 杨建新 (3515)                                     |
| 我国挥发性有机物定义和控制指标的探讨 .....                                                                    | 江梅, 邹兰, 李晓倩, 车飞, 赵国华, 李刚, 张国宁 (3522)                        |
| 异化铁还原对土壤中重金属形态转化及其有效性影响 .....                                                               | 司友斌, 王娟 (3533)                                              |
| 《环境科学》征订启事 (3297) 《环境科学》征稿简则 (3303) 信息 (3127, 3202, 3277, 3318)                             |                                                             |

# 长江三角洲 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度遥感估算与时空分布特征

徐建辉<sup>1,2</sup>, 江洪<sup>1\*</sup>

(1. 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210093; 2. 滁州学院地理信息与旅游学院, 滁州 239000)

**摘要:** 卫星遥感反演气溶胶光学厚度(AOT)已被广泛地应用于地面 PM<sub>2.5</sub> 遥感监测. 为遥感监测长江三角洲地区 PM<sub>2.5</sub>, 利用2013年的MODIS/Terra AOT产品, 考虑研究区36个空气质量监测站点的风速、温度、湿度和边界层高度等气象条件, 构建了基于MODIS AOT产品估算PM<sub>2.5</sub>的模型. 利用17个空气质量监测站点数据对模型进行散点拟合验证, 结果表明模型估算精度较高, 春夏秋冬4个季节PM<sub>2.5</sub>质量浓度的模型估算值与地面监测值的相关系数 $R^2$ 值分别为0.45、0.50、0.58和0.52. 利用模型估算的长时间序列PM<sub>2.5</sub>时空分布数据进行时空变化特征分析, 结果表明: ①2000~2013年研究区PM<sub>2.5</sub>质量浓度呈增长趋势, 月均增长量为 $0.047 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 最大值出现在2月, 为 $(66.2 \pm 19.3) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 最小值出现在8月, 为 $(22.6 \pm 5.9) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . ②研究区PM<sub>2.5</sub>质量浓度空间分布差异显著, 南部低, 北部高, 高值主要出现在由上海、杭州和南京构成的三角形区域的城市群中, 而低值主要出现在南部远离城市的森林区域. 结果表明基于MODIS/Terra AOT产品和地面观测气象数据估算PM<sub>2.5</sub>的多元线性回归模型能较好地应用于区域PM<sub>2.5</sub>监测.

**关键词:** PM<sub>2.5</sub>; MODIS AOT; 遥感; 估算; 时空分布; 长江三角洲

中图分类号: X513; X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)09-3119-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.09.001

## Estimation of PM<sub>2.5</sub> Concentration over the Yangtze Delta Using Remote Sensing: Analysis of Spatial and Temporal Variations

XU Jian-hui<sup>1,2</sup>, JIANG Hong<sup>1\*</sup>

(1. International Institute of Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. School of Geographic Information and Tourism, Chuzhou University, Chuzhou 239000, China)

**Abstract:** Satellite remote sensing retrieved aerosol optical thickness is widely used to monitor surface PM<sub>2.5</sub> concentration. In order to monitor PM<sub>2.5</sub> by remote sensing in the Yangtze delta, estimate model of PM<sub>2.5</sub> concentration was constructed based on MODIS AOT, PM<sub>2.5</sub> concentration data of the 36 ground air quality observation sites and meteorological data in 2013. Afterwards, the model estimated PM<sub>2.5</sub> was validated by PM<sub>2.5</sub> concentration data from the 17 ground air quality observation sites, and the results showed that the model estimation was higher. The correlation coefficient value of  $R^2$  between model estimation of PM<sub>2.5</sub> concentration and the value of the ground monitoring of spring, summer, autumn and winter were 0.45, 0.50, 0.58 and 0.52, respectively. The variation characteristics of temporal and spatial was analyzed based on the long time PM<sub>2.5</sub> data together with model estimated, and an increase trend of PM<sub>2.5</sub> concentration was observed from 2000 to 2013, with the maximum concentration of PM<sub>2.5</sub> ( $66.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3} \pm 19.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) in February and minimum in December ( $22.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3} \pm 5.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ). In addition, it was found that the distribution of PM<sub>2.5</sub> concentration was of obvious features, displaying high value in south and low in north. Mass concentration of PM<sub>2.5</sub> was peaked in the zone of urban agglomeration which was grouped to a delta-shaped region by Shanghai, Hangzhou and Nanjing, while the low value areas were in the forest away from city. The result suggested that MODIS AOT and meteorological data can be used to monitor regional PM<sub>2.5</sub> by the established multi-linear regression model.

**Key words:** PM<sub>2.5</sub>; MODIS AOT; remote sensing; evaluation; spatial and temporal variation; Yangtze Delta

大气气溶胶因为其全球气候效应和环境效应近年来已成为科学家们广泛关注的一个重要研究领域<sup>[1-4]</sup>. 大气气溶胶中的PM<sub>2.5</sub> (particle matter, PM) 和PM<sub>10</sub>, 特别是PM<sub>2.5</sub>, 因会对人类健康<sup>[5-7]</sup>和大气能见度产生严重的负面影响, 已受到各国政府及有关研究部门的高度重视<sup>[8]</sup>. 20世纪80年代以来, 中国经济规模的快速发展, 城市扩张和人口集聚, 对能源的需求量越来越大, 使得人为污染问题更为突出, 从而导致中国部分地区, 尤其是东部经济较为发达地区的空气污染问题日益严重<sup>[9,10]</sup>. 目前,

长江三角洲地区已成为雾霾的高发区域.

已有的研究表明, 气溶胶光学厚度 (aerosol optical thickness, AOT) 与近地面颗粒物质量浓度有很强相关性, 在对气溶胶标高垂直订正及PM<sub>2.5</sub>湿度订正后, 两者相关性得到明显的提高<sup>[9,11-14]</sup>. 而

收稿日期: 2015-02-26; 修订日期: 2015-04-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61190114, 41171324); 高等学校博士学科点专项科研基金项目 (20110091110028); 科技部国家科技基础条件平台项目 (2005DKA32300)

作者简介: 徐建辉 (1976~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为大气环境遥感, E-mail: jianhuixu2003@126.com

\* 通讯联系人, E-mail: jianghong\_china@hotmail.com

且有学者研究发现云盖比例、混合层高度、风速、地表温度和相对湿度等气象要素对气溶胶光学厚度和  $PM_{2.5}$  两者的相关性有着较大的影响,并建立了估算模型对  $PM_{2.5}$  进行了预测<sup>[15~17]</sup>. 本研究基于 MODIS/Terra AOT 产品、地面观测的  $PM_{2.5}$  和气象数据,分季节构建了估算  $PM_{2.5}$  的多元线性回归模型,并利用模型估算的  $PM_{2.5}$  时空分布数据分析了长江三角洲地区  $PM_{2.5}$  的时空分布特征,以期为区域大气  $PM_{2.5}$  污染监测与治理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

长江三角洲是长江和钱塘江在入海处冲积形成的三角洲,位于中国东部沿海开放城市带和沿江长江产业密集城市带的结合部,北起通扬运河,南抵杭州湾,西至镇江,东到东海,其中心地理经纬度分别为  $120.5^{\circ}E$  和  $30.5^{\circ}N$ . 长江三角洲是世界经济增长最迅速、城市化进程最快的地区之一,是中国最大的经济核心区之一,区域内共有 1 个直辖市:上海,3 个副省级城市:南京、杭州、宁波,11 个地级城市,即江苏省的苏州、无锡、常州、镇江、南通、扬州、泰州和浙江省的湖州、嘉兴、绍兴、舟山和台州,共计 16 个城市,土地面积约为  $99\,700\text{ km}^2$ ,人口为  $10\,763.31$  万 (2010 人口普查数据). 地理位置如图 1 所示.

1.2 资料

1.2.1 地基监测空气质量数据

空气质量数据来源于中国环境监测总站. 获取了 2013 年 1 月 18 日至 2014 年 1 月 18 日长江三角洲区域 53 个空气质量监测站点的每日分时的空气

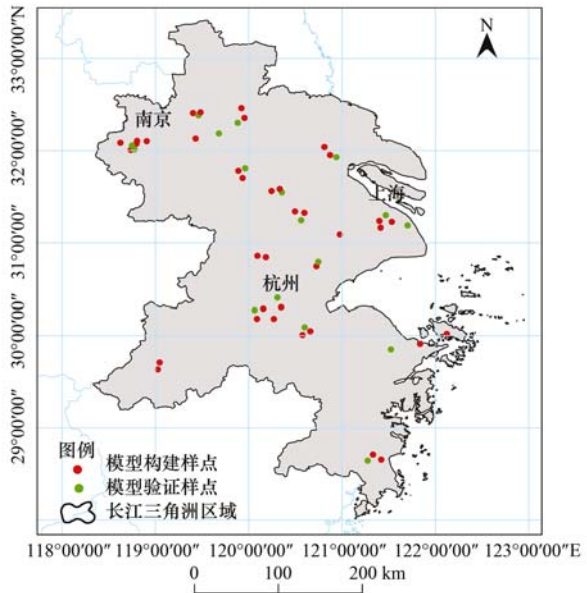


图 1 长江三角洲地理位置及空气质量监测站空间分布  
Fig. 1 Location of the Yangtze River Delta and Spatial distribution of air quality monitoring stations

质量数据.

1.2.2 地基监测气溶胶光学厚度数据

本研究在长江三角洲地区共布设了 6 台法国 CIMEL 电子公司生产的自动跟踪扫描的太阳光度计,组成了长江三角洲区域地基遥感气溶胶观测网络,开始进行长时间连续气溶胶光学特性观测,仪器设置每 3 min 记录一次数据. 研究中采用 CE-318 地面观测的较高精度的气溶胶数据来验证卫星遥感反演气溶胶数据的精度,论证利用 MODIS AOT 产品在本研究区进行  $PM_{2.5}$  质量浓度估算的适用性. 长江三角洲布置的 6 台 CE-318 监测仪器的详细站点信息见表 1.

表 1 长江三角洲 6 台太阳光度计 (CE-318) 观测站点信息

Table 1 Monitoring site information of six sets of sun photometer (CE-318) in the Yangtze River Delta

| 监测站名称 | 经度/( $^{\circ}$ ) | 纬度/( $^{\circ}$ ) | 高程/m | 建站日期(年-月) |
|-------|-------------------|-------------------|------|-----------|
| 杭州    | 120.083           | 30.263            | 24   | 2008-04   |
| 建德    | 119.508           | 29.567            | 89   | 2009-10   |
| 临安    | 119.745           | 30.416            | 89   | 2007-10   |
| 宁波    | 121.583           | 29.867            | 24   | 2007-08   |
| 千岛湖   | 119.012           | 29.55             | 125  | 2008-03   |
| 天目山   | 119.442           | 30.317            | 439  | 2007-10   |

1.2.3 MODIS AOT 产品

美国 NASA (National Aeronautics and Space Administration) 的 MODIS 具有多光谱、宽覆盖和时间分辨率高等特点,搭载在 TERRA 和 AQUA 两颗卫星上,广泛用于大气气溶胶监测. 目前,NASA 每

日发布基于 MODIS 数据的陆地气溶胶光学厚度产品,该产品的空间分辨率为  $10\text{ km}$ ,波长为  $0.55\text{ }\mu\text{m}$ ,采用暗像元法反演. 本研究选取在长江三角洲区域每日上午过境 1 次的 Terra 卫星上的 MODIS AOT 结果. 由于卫星的 AOT 结果受云影响很大,使数据存

在大量无效值, 因此对 AOT 数据进行删选, 尽量挑选晴天、少云数据. 研究中获取了 2000 年 1 月 1 日至 2014 年 1 月 18 日的 MODIS AOT 产品数据.

#### 1.2.4 气象资料

气象资料来源于中国气象数据共享服务网 (China Meteorological Data Sharing Service System, CMDSS). 本次研究获取的是该平台中覆盖长江三角洲区域的中国地面气候资料日值数据集和全球地面天气资料定时值数据集, 时间尺度为 2000 年 1 月 1 日至 2014 年 1 月 18 日. 研究中需对站点数据进行空间插值处理. 为提高气象数据空间插值处理的精度, 采用气象数据插值处理中常用的方法 (薄盘样条函数) 进行空间插值处理<sup>[18]</sup>, 格网大小为 10 km.

### 1.3 方法

#### 1.3.1 近地面气溶胶消光系数计算

太阳的直射辐射经过大气消弱到达地面的能量  $E$  可以表示为:

$$E = E_s \exp(-m\tau) \quad (1)$$

式中,  $E_s$  为大气层顶的太阳辐照度;  $m$  为大气质量, 近似有  $m = \frac{1}{\cos\theta_s}$ ,  $\theta_s$  为太阳天顶角;  $\tau$  为大气总光学厚度, 是分子光学厚度  $\tau_m$  和气溶胶光学厚度  $\tau_a$  之和. 其中  $\tau_m$  通常仅与辐射波长、海拔和气压有关. 从  $\tau$  中去除  $\tau_m$  的贡献, 就得到气溶胶光学厚度  $\tau_a$  (AOT). 根据平行平面大气假设, 垂直方向的整层 AOT 是各高度处气溶胶消光系数的积分, 即:

$$\tau_a(\lambda) = \int_0^\infty k_a(\lambda, z) dz \quad (2)$$

式中,  $k_a(\lambda, z)$  即高度为  $z$  处的气溶胶消光系数. 假设  $k_a(\lambda, z)$  垂直方向的变化为负指数形式, 有:

$$k_a(\lambda, z) \approx k_{a,0}(\lambda) \exp\left(-\frac{z}{H_A}\right) \quad (3)$$

式中,  $k_{a,0}(\lambda)$  为地面处的消光系数;  $H_A$  为气溶胶标高, 是表征气溶胶垂直分布状况的关键参数. 基于式(2)和式(3)可得:

$$\tau_a(\lambda) = k_{a,0}(\lambda) \int_0^\infty \exp\left(-\frac{z}{H_A}\right) dz = k_{a,0}(\lambda) H_A \quad (4)$$

式(4)表明, 由 AOT 和  $H_A$  可计算出近地面的气溶胶消光系数, AOT 通过遥感数据反演可以得到,  $H_A$  可以用大气混合层高度或大气边界层高度来近似代替, 大气混合层高度或大气边界层高度可以由地面的激光雷达测得, 也可以根据地面气象数据利用大气计算方法计算得到<sup>[19]</sup>, 还可以通过采用大

气气候模式模拟获取. 由此可知, 近地面气溶胶消光系数可由气溶胶光学厚度与大气标高求得:

$$k_{a,0}(\lambda) \approx \frac{\tau_a(\lambda)}{H_A} \quad (5)$$

本研究中由于没有获得长江三角洲地区地面雷达同步观测的气溶胶标高数据, 拟采用大气混合层高度数据来替代<sup>[20,21]</sup>. 在有地面同步监测气象数据的前提下, 大气混合层高度拟采用罗氏法计算获取.

#### 1.3.2 近地面气溶胶消光系数湿度订正

在一定的高度和颗粒物粒谱分布下, 颗粒物质量浓度与大气气溶胶消光系数存在正相关关系<sup>[22,23]</sup>, 但由于水汽等对气溶胶粒子的复折射指数和消光截面等物理、光学性质具有较大影响<sup>[24,25]</sup>, 需要对“湿”气溶胶消光系数进行适当的订正, 使得订正后的“干”消光系数与颗粒物质量浓度具有更高的相关性. 将相对湿度对气溶胶消光系数的影响设为相对湿度因子  $f(\text{RH})$ , 其值等于同等条件下“湿”气溶胶消光系数与“干”气溶胶消光系数之比. 本研究中的吸湿增长因子采用 White 等<sup>[26]</sup>的经验公式:

$$f(\text{RH}) = \frac{1}{1 - \text{RH}} \quad (6)$$

基于式(6), 近地面气溶胶“干”消光系数  $k_{a,0,\text{dry}}(\lambda)$  可表示为:

$$k_{a,0,\text{dry}}(\lambda) \approx \frac{\tau_a(\lambda)}{H_A f(\text{RH})} = \frac{\tau_a(\lambda)(1 - \text{RH})}{H_A} \quad (7)$$

#### 1.3.3 统计模型

一些研究学者认为, 气溶胶消光系数与颗粒物质量浓度除受气溶胶标高和水汽的影响外, 还受到其他气象要素的影响, 例如温度、压力、风速和湿度等<sup>[15~17]</sup>. 本次研究认为颗粒物质量浓度可以看作是近地面气溶胶“干”消光系数和气象要素的函数, 可以用公式(8)表示:

$$\text{PM} = F[k_{a,\text{dry}}(0, \lambda), t, p, w] \quad (8)$$

式中,  $k_{a,\text{dry}}(0, \lambda)$  是近地面气溶胶“干”消光系数,  $t$  是大气温度,  $p$  是大气压力,  $w$  是风速. 本研究采用多元线性方程来表达他们间的关系.

$$\text{PM} = a_0 + a_1 k_{a,\text{dry}}(0, \lambda) + a_2 t + a_3 p + a_4 w \quad (9)$$

式中,  $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$  是多元线性回归的系数.

长江三角洲地区不同季节气溶胶的来源差异较大. 冬季受大陆季风的影响, 气流远程传输过来大量的沙尘粒子. 而夏季受东南风的影响, 从海洋传输过来大量的海盐粒子. 不同来源的气溶胶的物理、化学和光学性质都不同, 因而气溶胶垂直订正

和湿度订正的效果,以及与其他气象要素的关系也存在差异. 综合以上因素,研究分季节进行了模型的建立.

2 结果与分析

2.1 MODIS AOT 产品验证

尽管卫星遥感有很多优点,由于复杂的气溶胶特性,存在着很大的不确定性,需要地面观测数据进行研究区适用性验证. 本研究利用布置在杭州、建德、临安、宁波、千岛湖和天目山这 6 个地基观测站点的太阳光度计 (CE-318) 获取的较高精度的 AOT 对 Terra-MODIS AOT 产品 (MOD04) 进行比较

验证. 线性回归分析结果 (见图 2 和表 2) 显示,6 个站点的 MODIS AOT 产品与地基监测的 AOT 相关性系数  $R > 0.67$ , 显著性水平  $P < 0.01$ , 二者相关性显著,除宁波站之外,其他站点的  $R$  值较高且 RMSE 较低. 这表明利用卫星遥感反演的 MODIS AOT 产品在长江三角洲进行气溶胶光学特性研究和大气颗粒物质量浓度的估算具有适用性. 除杭州站点外,MODIS 气溶胶产品在本研究区的 AOT 普遍低估,这与其他学者在其它区域的研究结果有些不同,其他学者的研究显示了在气溶胶较小时,MODIS 气溶胶产品高估了 AOT,反之亦然<sup>[27~29]</sup>.

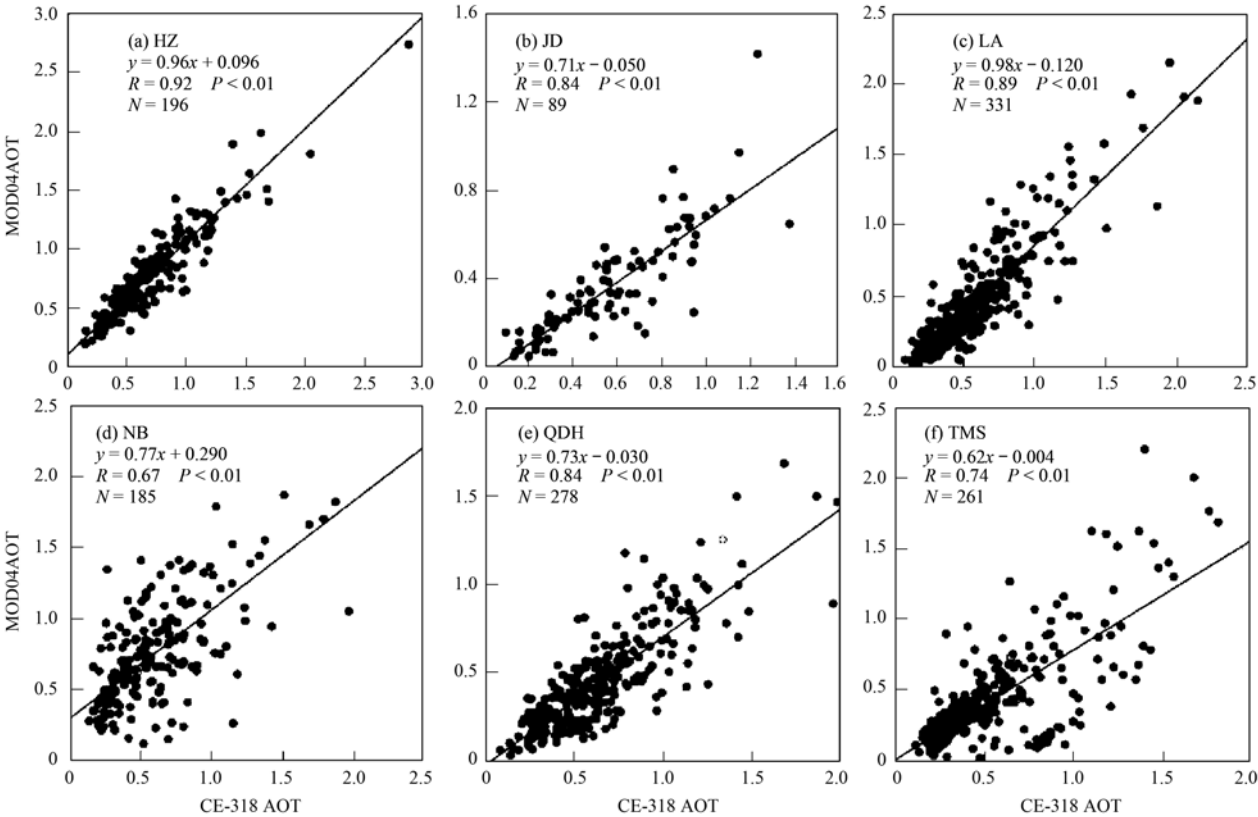


图 2 CE-318 AOT 与 MODIS AOT 线性回归分析

Fig. 2 Line regress analysis between CE-318 AOT and MODIS AOT

表 2 CE-318 AOT 与 Terra-MODIS AOT 线性回归分析

Table 2 Correlationship between CE-318 AOT and Terra-MODIS AOT

| 地基监测<br>站点 | CE-318/Terra-MODIS |        |      |       |      |     |
|------------|--------------------|--------|------|-------|------|-----|
|            | 斜率                 | 截距     | R    | P     | RMSE | N   |
| 杭州         | 0.96               | 0.096  | 0.92 | <0.01 | 0.15 | 196 |
| 建德         | 0.71               | -0.050 | 0.84 | <0.01 | 0.13 | 89  |
| 临安         | 0.98               | -0.120 | 0.89 | <0.01 | 0.17 | 331 |
| 宁波         | 0.77               | 0.290  | 0.67 | <0.01 | 0.30 | 185 |
| 千岛湖        | 0.73               | -0.030 | 0.84 | <0.01 | 0.16 | 278 |
| 天目山        | 0.62               | 0.004  | 0.74 | <0.01 | 0.19 | 261 |

2.2 PM<sub>2.5</sub>质量浓度估算模型及验证

在长江三角洲地区, 本次研究共获取了 53 个空气质量监测站点 2013 年 1 月 18 日至 2014 年 1 月 18 日分时的空气质量浓度数据. 从站点的代表性和空间分布的均匀性出发, 在 53 个站点数据中筛选了 36 个站点(见图 1 中红色点)进行估算模型的建立, 剩余的 17 个站点(见图 1 中绿色点)数据进行模型精度的检验. 数据的匹配是保证模型精度的关键. 研究中 AOT 数据采用的是 MOD04 产品, 其每日的过境时间是上午 10:30, 为了与其匹配, PM<sub>2.5</sub> 质量浓度采用每日

10:00 ~ 12:00 时的均值, 温度、风速、压力和湿度采用日均值, 大气混合层高度采用每日 12:00 时的计算值. 模型建立过程中, 首先对气溶胶光学厚度进行垂直订正和湿度订正, 得到大气近地面“干”消光系数, 再综合考虑温度、风速、压力等气象因子, 建立分季节估算 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的多元线性回归模型.

分季节所构建的估算 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度多元线性回归模型如表 3 所示. 结果显示, 在  $P < 0.01$  的显著性水平下, PM<sub>2.5</sub> 质量浓度分季节估算模型的  $R^2$  值分别为 0.48、0.62、0.61、0.52.

表 3 估算 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的多元线性回归模型系数值

| Table 3 Coefficient value of multiple linear regression model of PM <sub>2.5</sub> concentrations |        |        |       |       |        |       |       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|
| 季节                                                                                                | $a_0$  | $a_1$  | $a_2$ | $a_3$ | $a_4$  | $R^2$ | $P$   |
| 春季                                                                                                | 366.69 | 179.55 | -0.51 | -0.28 | -19.72 | 0.48  | <0.01 |
| 夏季                                                                                                | 0.00   | 106.4  | -4.73 | 1.23  | -15.83 | 0.62  | <0.01 |
| 秋季                                                                                                | 0.00   | 258.74 | 3.03  | 3.73  | -50.27 | 0.61  | <0.01 |
| 冬季                                                                                                | 0.00   | 356.42 | 8.6   | 6.98  | -86.07 | 0.52  | <0.01 |

本研究利用预留的 17 个地面监测站观测的 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度数据对已构建的分季节估算 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度多元线性回归模型进行比较验证. 图 3 是模型估算的 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度与地面观测的 PM<sub>2.5</sub> 质量浓

度线性回归分析. 结果显示, 模型估算的 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度和地面观测值有较好的一致性, 估算精度较高. 模型估算 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度与地面观测质量浓度在  $P < 0.01$  的显著性水平下, 春、夏、秋、冬这 4

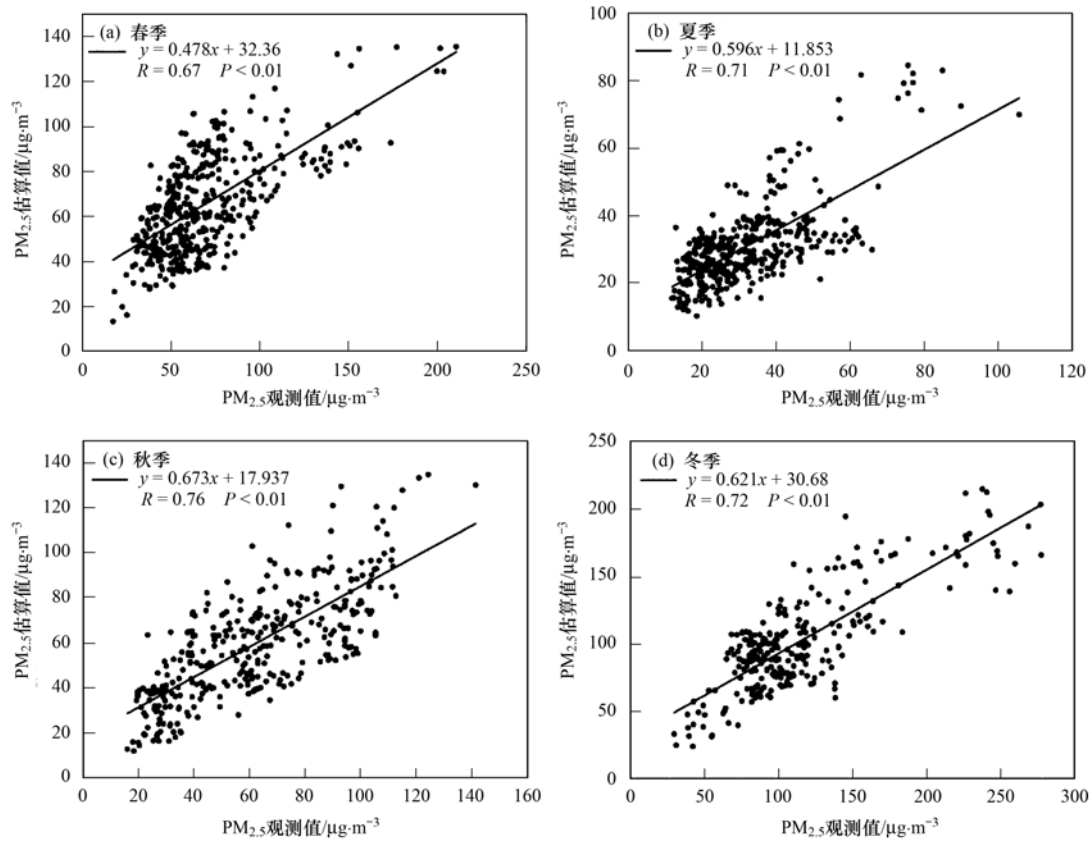


图 3 模型估算的 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度与地面观测 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的线性回归分析

Fig. 3 Linear regression analysis between PM<sub>2.5</sub> mass concentrations by estimated and PM<sub>2.5</sub> mass concentrations by ground observation

个季节的  $R^2$  值分别是 0.45、0.50、0.58 和 0.52。结果表明,分季节构建的估算  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度的多元线性回归模型在长江三角洲地区具有较好的适用性。

2.3 长江三角洲  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度时空分布特征

2.3.1 长江三角洲  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度时间变化特征

图 4 是 2000 ~ 2013 年长江三角洲地区  $\text{PM}_{2.5}$  质

量浓度月平均值的时间变化。研究中利用正弦函数对研究区 2000 ~ 2013 年  $\text{PM}_{2.5}$  的质量浓度月平均值进行曲线拟合,发现其具有很好的周期性(见图 4 中蓝色曲线),并以 12 个月为周期进行变化。对研究区 2000 ~ 2013 年  $\text{PM}_{2.5}$  的质量浓度月平均值进行线性趋势拟合,发现月增长趋势明显(见图 4 中红色直线),其月均增长量为  $0.047 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

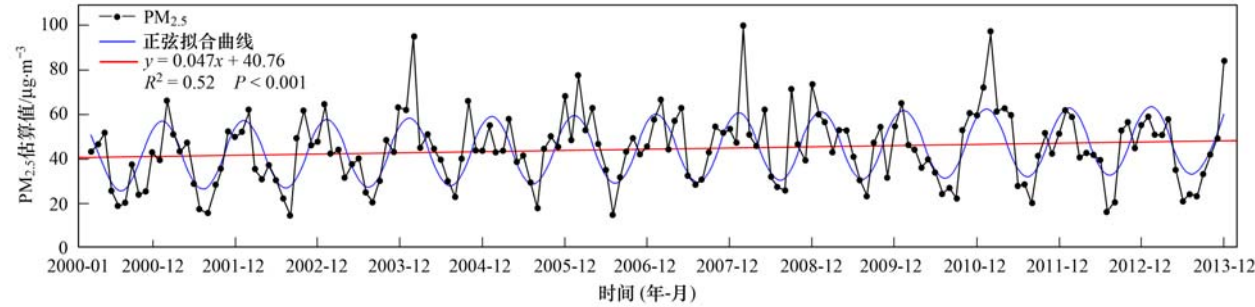


图 4 2000 年 3 月 ~ 2013 年 12 月长江三角洲地区  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度月平均值的时间变化

Fig. 4 Temporal variation of monthly mean  $\text{PM}_{2.5}$  mass concentration over the Yangtze River Delta from March 2000 to December 2013

表 4 为 2000 ~ 2013 年多年月平均  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度统计结果。标准差根据多年月平均数据中的每个像元计算得出,它可以用来表示颗粒物的空间分布差异。最大  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度月平均值出现在 2 月,为  $(66.2 \pm 19.3) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。2 月的标准差最大,说明 2 月的空间差异最大,也就是说,城市和郊区的差值在 2 月达到最大,而且在空间分布上,整个区域的  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度普遍大于其他月份。最小  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度月平均值出现在 8 月,为  $(22.6 \pm 5.9) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。8 月的标准差最小,说明 8 月的空间差异最小,也就是说,城市和郊区的差值在 8 月达到最小,而且在空间分布上,整个区域的  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度普遍小于其他月份。

表 4 多年月平均  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度的统计结果/ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$

Table 4 Statistics of multi-year monthly mean  $\text{PM}_{2.5}$

| 月份 | mass concentration/ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ |      |
|----|-------------------------------------------------------|------|
|    | $\text{PM}_{2.5}$                                     |      |
|    | 平均值                                                   | 标准差  |
| 1  | 57.3                                                  | 11.9 |
| 2  | 66.2                                                  | 19.3 |
| 3  | 46.5                                                  | 11.0 |
| 4  | 48.6                                                  | 13.0 |
| 5  | 47.0                                                  | 13.4 |
| 6  | 33.5                                                  | 12.2 |
| 7  | 24.1                                                  | 6.9  |
| 8  | 22.6                                                  | 5.9  |
| 9  | 41.8                                                  | 11.4 |
| 10 | 49.6                                                  | 14.2 |
| 11 | 44.2                                                  | 14.1 |
| 12 | 56.7                                                  | 14.3 |

图 5 为 2000 ~ 2013 年长江三角洲地区  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度多年季节平均值变化。图 5 显示,2000 ~ 2013 年长江三角洲地区  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度多年季节(春季:3、4、5 月;夏季:6、7、8 月;秋季:9、10、11 月;冬季:12、1、2 月)平均值大小依次为冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季。 $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度多年季节平均值春季略大于秋季,差异并不明显。主要原因是长江三角洲地区春季盛行东亚季风,以偏西北风为主,季风从北方远距离传输带来的主要是较大粒径的沙尘型气溶胶粒子,而粒径较小的  $\text{PM}_{2.5}$  主要是局地排放产生,春季和秋季局地大气污染物排放差异并不明显。

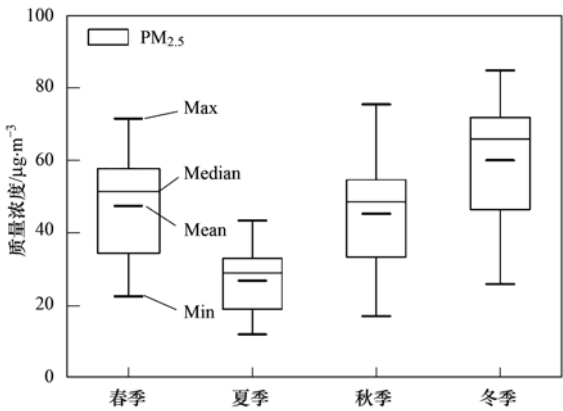


图 5 2000 ~ 2013 年长江三角洲地区  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度多年季节平均值变化

Fig. 5 Seasonal variation of multi-year seasonal mean  $\text{PM}_{2.5}$  mass concentration over the Yangtze River Delta from 2000 to 2013

2.3.2 长江三角洲  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度空间分布特征

图 6 为 2000 ~ 2013 年长江三角洲地区  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度年平均值空间分布. 从中可见, 2000 ~ 2013 年, 长江三角洲地区  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度呈较明显的年增长趋势, 北部重点城市 (上海、南京和杭州) 增速最明显. 区域  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度空间分布差异显著, 南部低, 北部高, 高值主要出现在由上海、杭州和南京构成的三角形区域的城市群中, 而低值主要出现在北部远离城市的森林区域. 主要原因是长江三角洲地区南部森林覆盖较好, 人类活动较少, 大气颗粒物的排放较少, 而且较好的植被覆盖可以减少地面气溶胶粒子进入大气, 并且可以吸附空气中的颗粒物. 而北部为城市区域, 人为活动比较强烈, 工业、机动车尾气、人类生活排放以及交通和建筑扬尘导致北部城市群大气颗粒物浓度较高. 2000 ~ 2013 年,

表 5 2000 ~ 2013 年长江三角洲地区年均降水量数据统计/ $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$   
Table 5 Data statistical of average annual precipitation over the Yangtze River Delta from 2000 to 2013/ $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$

| 年份   | 降水量   |     |       |     |
|------|-------|-----|-------|-----|
|      | 最大值   | 最小值 | 平均值   | 标准差 |
| 2000 | 1 723 | 476 | 1 143 | 219 |
| 2001 | 1 967 | 820 | 1 266 | 202 |
| 2002 | 2 052 | 562 | 1 223 | 277 |
| 2003 | 1 692 | 846 | 1 091 | 145 |
| 2004 | 1 523 | 501 | 1 031 | 163 |
| 2005 | 2 220 | 528 | 1 104 | 321 |
| 2006 | 1 712 | 834 | 1 188 | 244 |
| 2007 | 1 412 | 584 | 1 058 | 180 |
| 2008 | 1 613 | 771 | 1 138 | 107 |
| 2009 | 1 702 | 632 | 1 286 | 179 |
| 2010 | 2 648 | 718 | 1 416 | 360 |
| 2011 | 1 712 | 294 | 831   | 244 |
| 2012 | 2 339 | 535 | 1 369 | 490 |
| 2013 | 2 646 | 396 | 1 156 | 307 |

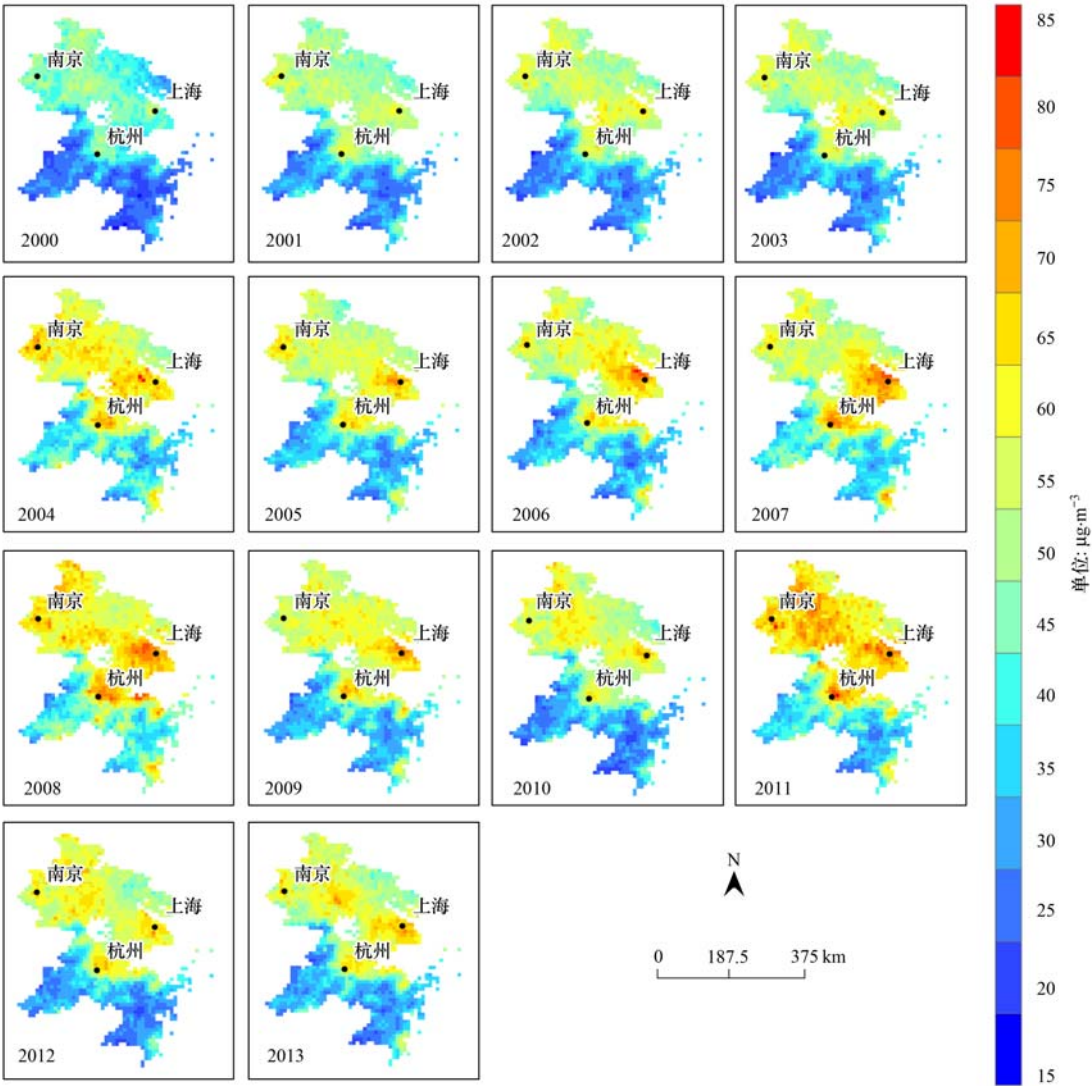


图 6 2000 ~ 2013 年长江三角洲地区  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度年均值空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of multi-year monthly mean  $\text{PM}_{2.5}$  mass concentration over the Yangtze River Delta from 2000 to 2013

PM<sub>2.5</sub>质量浓度的年均最大值出现在2011年,2010年的PM<sub>2.5</sub>质量浓度对比2009年有明显的下降,主要原因是2011年年降水量明显减少,而2010年年降水量明显增多,其他PM<sub>2.5</sub>质量浓度较高的年份(如2004、2007和2008年),降水量与其他年份相比明显要少(见表5)。降水对大气的颗粒物有很强的冲刷作用,能大量减少大气中颗粒物的含量<sup>[30]</sup>。

### 3 结论

(1)利用地基监测的AOT数据对MODIS AOT产品进行了检验,结果表明利用卫星遥感反演的MODIS AOT产品在长江三角洲进行气溶胶光学特性研究和大气颗粒物质量浓度的估算具有适用性。

(2)基于卫星遥感数据建立了分季节估算PM<sub>2.5</sub>质量浓度的精度较高,这表明能够利用卫星遥感监测区域PM<sub>2.5</sub>。

(3)人类活动影响区域PM<sub>2.5</sub>质量浓度的变化及其空间分布。从长时间尺度来看,长江三角洲地区PM<sub>2.5</sub>质量浓度呈增长趋势,月均增长量为0.047 μg·m<sup>-3</sup>;研究区PM<sub>2.5</sub>空间分布差异显著,高值主要出现在北部城市群,低值主要出现在南部森林覆盖区域。

#### 参考文献:

- [1] Lohmann U, Lesins G. Stronger constraints on the anthropogenic indirect aerosol effect[J]. *Science*, 2002, **298** (5595): 1012-1015.
- [2] Menon S, Hansen J, Nazarenko L, *et al.* Climate effects of black carbon aerosols in China and India[J]. *Science*, 2002, **297** (5590): 2250-2253.
- [3] Penner J E, Dong X Q, Chen Y. Observational evidence of a change in radiative forcing due to the indirect aerosol effect[J]. *Nature*, 2004, **427** (6971): 231-234.
- [4] Nishizawa T, Asano S, Uchiyama A, *et al.* Seasonal variation of aerosol direct radiative forcing and optical properties estimated from ground-based solar radiation measurements[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2004, **61** (1): 57-72.
- [5] 殷永文,程金平,段玉森,等.上海市霾期间PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>污染与呼吸科、儿呼吸科门诊人数的相关分析[J]. *环境科学*, 2011, **32** (7): 1894-1898.
- [6] 杨维,赵文吉,宫兆宁,等.北京城区可吸入颗粒物分布与呼吸系统疾病相关性分析[J]. *环境科学*, 2013, **34** (1): 237-243.
- [7] 谢元博,陈娟,李巍.雾霾重污染期间北京居民对高浓度PM<sub>2.5</sub>持续暴露的健康风险及其损害价值评估[J]. *环境科学*, 2014, **35** (1): 1-8.
- [8] 邵龙义,时宗波,黄勤.都市大气环境中可吸入颗粒物的研究[J]. *环境保护*, 2000, (1): 24-26, 29.
- [9] 郭建平,吴业荣,张小曳,等. BP网络框架下MODIS气溶胶光学厚度产品估算中国东部PM<sub>2.5</sub>[J]. *环境科学*, 2013, **34** (3): 817-825.
- [10] Shen G F, Yuan S Y, Xie Y N, *et al.* Ambient levels and temporal variations of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> at a residential site in the mega-city, Nanjing, in the western Yangtze River delta, China [J]. *Journal of Environmental Science and Health*, 2004, **49** (2): 171-178.
- [11] Wang J, Christopher S A. Intercomparison between satellite-derived aerosol optical thickness and PM<sub>2.5</sub> mass; Implications for air quality studies[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, **30** (21): 2095.
- [12] Liu Y, Sarnat 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.
- [13] 林海峰,辛金元,张文煜,等.北京市近地层颗粒物浓度与气溶胶光学厚度相关性分析研究[J]. *环境科学*, 2013, **34** (3): 826-834.
- [14] 郑卓云,陈良富,郑君瑜,等.高分辨率气溶胶光学厚度在珠三角及香港地区区域颗粒物监测中的应用研究[J]. *环境科学学报*, 2011, **31** (6): 1154-1161.
- [15] Gupta P, Christopher S A, Wang J, *et al.* Satellite remote sensing of particulate matter and air quality assessment over global cities[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40** (30): 5880-5892.
- [16] Tian J, Chen D M. A semi-empirical model for predicting hourly ground-level fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) concentration in southern Ontario from satellite remote sensing and ground-based meteorological measurements [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, **114** (2): 221-229.
- [17] Yap X Q, Hashim M. A robust calibration approach for PM<sub>10</sub> prediction from MODIS aerosol optical depth[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13** (6): 3517-3526.
- [18] 刘志红, Li L T, McVicar T R, 等. 专用气候数据空间插值软件ANUSPLIN 及其应用[J]. *气象学报*, 2008, **34** (2): 92-100.
- [19] 程水源,张宝宁,白天雄,等.北京地区大气混合层高度的研究及气象特征[J]. *环境科学丛刊*, 1992, **13** (4): 46-52.
- [20] 贺千山,毛节泰.北京城市大气混合层与气溶胶垂直分布观测研究[J]. *气象学报*, 2005, **63** (3): 374-384.
- [21] 王桥,厉青,陈良富,等.大气环境卫星遥感技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011. 131-136.
- [22] 孙景群,张海福.激光遥测大气尘埃质量浓度的理论分析[J]. *环境科学学报*, 1982, **2** (1): 36-43.
- [23] 韩道文,刘文清,刘建国,等.气溶胶质量浓度空间垂直分布的反演方法[J]. *中国激光*, 2006, **33** (11): 1567-1573.
- [24] Malm W C, Day D E, Kreidenweis S M. Light scattering characteristics of aerosol 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.
- [25] 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.

- [26] White W H, Roberts P T. On the nature and origins of visibility-reducing aerosols in the Los Angeles air basin[J]. *Atmospheric Environment*, 1977, **11**(9): 803-812.
- [27] Remer L A, Kaufman Y J, Tanré D, *et al.* The MODIS aerosol algorithm, products, and validation [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2005, **62**(4): 947-973.
- [28] Ichoku C, Kaufman Y J, Remer L A, *et al.* Global aerosol remote sensing from MODIS[J]. *Advances in Space Research*, 2004, **34**(4): 820-827.
- [29] Levy R C, Remer L A, Martins J V, *et al.* Evaluation of the MODIS aerosol retrievals over ocean and land during CLAMS [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2005, **62**(4): 974-992.
- [30] 韩燕, 徐虹, 毕晓辉, 等. 降水对颗粒物的冲刷作用及其对雨水化学的影响[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(2): 193-200.

---

## 《环境科学》编辑部关于启用编辑信息管理系统公告

《环境科学》编辑部已经开通本刊网站并启用编辑信息管理系统(网站地址:<http://www.hjkx.ac.cn>)。该系统能实现在线投稿、在线审稿、期刊浏览检索等功能,欢迎广大作者、读者和审稿专家使用。目前我刊所有来稿都通过网站编辑信息管理系统进行。作者使用编辑信息管理系统投稿时请先进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面上给出的提示投稿即可。如果您在使用过程中有问题,请及时与我刊编辑部联系。

邮政地址:北京市海淀区双清路18号《环境科学》编辑部

邮 编:100085

电 话:010-62941102, 010-62849343

传 真:010-62849343

E-mail:[hjkx@rcees.ac.cn](mailto:hjkx@rcees.ac.cn)

网 址:[www.hjkx.ac.cn](http://www.hjkx.ac.cn)

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                     |                                                                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Estimation of PM <sub>2.5</sub> Concentration over the Yangtze Delta Using Remote Sensing: Analysis of Spatial and Temporal Variations .....                                                        | XU Jian-hui, JIANG Hong (3119)                                       |
| Seasonal and Spatial Variations of Carbon Fractions in PM <sub>2.5</sub> in Ningbo and the Estimation of Secondary Organic Carbon .....                                                             | DU Bo-han, HUANG Xiao-feng, HE Ling-yan, <i>et al.</i> (3128)        |
| Concentrations of Acidic Gases, Ammonia and Related Water-Soluble Ions in PM <sub>2.5</sub> and Gas-Particle Partitioning in Qingdao .....                                                          | ZHOU Jia-jia, SHI Jin-hui, LI Li-ping, <i>et al.</i> (3135)          |
| Concentration and Particle Size Distribution of Microbiological Aerosol During Haze Days in Beijing .....                                                                                           | HU Ling-fei, ZHANG Ke, WANG Hong-bao, <i>et al.</i> (3144)           |
| Air Quality Characteristics in Beijing During Spring Festival in 2015 .....                                                                                                                         | CHENG Nian-liang, CHEN Tian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (3150)      |
| Chemical Loss of Volatile Organic Compounds and Its Impact on the Formation of Ozone in Shanghai .....                                                                                              | WANG Hong-li (3159)                                                  |
| Removal of Waste Gas Containing Mixed Chlorinated Hydrocarbons by the Biotrickling Filter .....                                                                                                     | CHEN Dong-zhi, MIAO Xiao-ping, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3168)  |
| A Three Band Chlorophyll-a Concentration Estimation Model Based on GOCI Imagery .....                                                                                                               | GUO Yu-long, LI Yun-mei, LI Yuan, <i>et al.</i> (3175)               |
| Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter and Influencing Factors in Lake Chaohu .....                                                                          | YE Lin-lin, WU Xiao-dong, LIU Bo, <i>et al.</i> (3186)               |
| Spectral Characteristic of Dissolved Organic Matter in Xiaohe River, Hebei .....                                                                                                                    | YU Min-da, ZHANG Hui, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (3194)             |
| Spatial Variation of Ammonia-N, Nitrate-N and Nitrite-N in Groundwater of Dongshan Island .....                                                                                                     | WU Hai-yan, FU Shi-feng, CAI Xiao-qiong, <i>et al.</i> (3203)        |
| Sources, Migration and Conversion of Dissolved Alkanes, Dissolved Fatty Acids in a Karst Underground River Water, in Chongqing Area .....                                                           | LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3212)      |
| Influence of Sulfuric Acid to Karst Hydrochemical and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in the Upper and Middle Reaches of the Wujiang River .....                                                 | HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (3220)         |
| Hydrochemical Characteristic and Reasoning Analysis in Siyi Town, Langzhong City .....                                                                                                              | ZHANG Yan, WU Yong, YANG Jun, <i>et al.</i> (3230)                   |
| Seasonal Variation on Nutrient Limitation for Phytoplankton Growth in a Coastal River-Reservoir System, Southeast China .....                                                                       | CHEN Cong-cong, RAO La, HUANG Jin-liang, <i>et al.</i> (3238)        |
| Physiological Effect of <i>Vallisneria natans</i> Under Different Concentrations of Nitrogen, Phosphorus and Chloramphenicol .....                                                                  | HU Zhen-zhen, CUI Yi-bin, LI Mei, <i>et al.</i> (3248)               |
| Effects of Algicidal Substance on <i>Phaeocystis globosa</i> and Its Fatty Acids by the Simulation Experiment .....                                                                                 | YANG Qiu-chan, ZHAO Ling, YIN Ping-he, <i>et al.</i> (3255)          |
| Agricultural Non-Point Source Pollutants Removal by Enhanced Riverbank Interception Facilities Under Different Operating Conditions .....                                                           | LI Huai-zheng, CHEN Ke-li, WEI Zhong, <i>et al.</i> (3262)           |
| Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Material Roof Dusts .....                                                                                                    | LI Dun-zhu, GUAN Yun-tao, LIU An, <i>et al.</i> (3269)               |
| Formation of Disinfection By-Products During Chlor(am)ination of Danjiangkou Reservoir Water and Comparison of Disinfection Processes .....                                                         | ZHANG Min-sheng, XU Bin, ZHANG Tian-yang, <i>et al.</i> (3278)       |
| Effects of Interaction of Ozonation and Coagulation on Coagulation Results .....                                                                                                                    | LIU Hai-long, GUO Xue-feng, WANG Min-hui, <i>et al.</i> (3285)       |
| Effects of Anions on Bromate Formation During Ozonation of Bromide-Containing Water .....                                                                                                           | WU Yue, WU Chun-de, LIU Li-gang, <i>et al.</i> (3292)                |
| XAS Analysis upon Dissolved Species of Orpiment in Anoxic Environment .....                                                                                                                         | WANG Ying, XU Li-ying, WANG Shao-feng, <i>et al.</i> (3298)          |
| AOX Pollution in Wastewater Treatment Process of Dyeing and Dyestuff Chemical Industries .....                                                                                                      | SHEN Yang-yang, LIU Rui, XU Can-can, <i>et al.</i> (3304)            |
| Fate of ARB and ARGs During Wastewater Treatment Process of Spiramycin Production .....                                                                                                             | QIN Cai-xia, TONG Juan, SHEN Pei-hong, <i>et al.</i> (3311)          |
| A Comparative Study on Two Membrane Bioreactors for the Treatment of Digested Piggery Wastewater .....                                                                                              | SHUI Yong, Kawagishi Tomoki, SONG Xiao-yan, <i>et al.</i> (3319)     |
| Analysis of Microbial Community in the Membrane Bio-Reactor (MBR) Rural Sewage Treatment System .....                                                                                               | KONG Xiao, CUI Bing-jian, JIN De-cai, <i>et al.</i> (3329)           |
| Start-up Characteristics of Four-zone Integrated Reactor for Nitrogen Removal in Winter and Analysis of Nitrobacteria Community .....                                                               | ZHANG Yan, SUN Feng-xia, XIE Hang-ji, <i>et al.</i> (3339)           |
| Achievement of Sulfate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation Reactor Started with Nitrate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation .....                                                               | LIU Zheng-chuan, YUAN Lin-jiang, ZHOU Guo-biao, <i>et al.</i> (3345) |
| Effect of Increasing Organic Loading Rate on the Formation and Stabilization Process of Aerobic Granular Sludge .....                                                                               | LIU Xiao-peng, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (3352)    |
| Nitrogen Loss Through Different Ways in Cropland Under Conventional Fertilization: An <i>In-situ</i> Study of Summer Maize Season in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River .....        | SANG Meng-meng, FAN Hui, JIANG Shan-shan, <i>et al.</i> (3358)       |
| Effects of Water and Nitrogenous Fertilizer Coupling on CH <sub>4</sub> and N <sub>2</sub> O Emission from Double-Season Rice Paddy Field .....                                                     | FU Zhi-qiang, LONG Pan, LIU Yi-yi, <i>et al.</i> (3365)              |
| Characteristics of N <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O, NO, CO <sub>2</sub> and CH <sub>4</sub> Emissions in Anaerobic Condition from Sandy Loam Paddy Soil .....                                     | CAO Na, WANG Rui, LIAO Ting-ting, <i>et al.</i> (3373)               |
| Characteristics of Soil Respiration along Eroded Sloping Land with Different SOC Background on the Hilly Loess Plateau .....                                                                        | CHEN Gai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i> (3383)         |
| Effect of Biochar on Soil Greenhouse Gas Emissions in Semi-arid Region .....                                                                                                                        | GUO Yan-liang, WANG Dan-dan, ZHENG Ji-yong, <i>et al.</i> (3393)     |
| Characteristics and Coupling Relationship of Soil Carbon and Nitrogen Transformation During <i>In-situ</i> Mineralization Cultivation in Forestlands in the Mountain Area of Southern Ningxia ..... | NI Yin-xia, HUANG Yi-mei, NIU Dan, <i>et al.</i> (3401)              |
| Nitrogen Fraction Distributions and Impacts on Soil Nitrogen Mineralization in Different Vegetation Restorations of Karst Rocky Desertification .....                                               | HU Ning, MA Zhi-min, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (3411)             |
| Distribution and Dynamics of Cropland Soil Organic Carbon in Jiangnan Plain: A Case Study of Qianjiang City .....                                                                                   | WANG Yu-zhu, XIAO He-ai, ZHOU Ping, <i>et al.</i> (3422)             |
| Impact of Land Utilization Pattern on Distributing Characters of Labile Organic Carbon in Soil Aggregates in Jinyun Mountain .....                                                                  | LI Rui, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (3429)                        |
| Magnetic Responses of Heavy Metals in Street Dust of Typical Mine-Based City, Northwest China .....                                                                                                 | NIE Yan, WANG Xin, WANG Bo, <i>et al.</i> (3438)                     |
| Distribution Characteristics of Heavy Metals in Environmental Samples Around Electroplating Factories and the Health Risk Assessment .....                                                          | GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, ZHOU Qiao-li, <i>et al.</i> (3447)      |
| Homologues Levels and Distribution Pattern of Polychlorinated Biphenyls in Typical Capacitor Contaminated Soil .....                                                                                | LIU Jie, LI Xiao-dong, ZHAO Zhong-hua, <i>et al.</i> (3457)          |
| Adsorption and Desorption Characteristics of Endosulfan in Purple Soil .....                                                                                                                        | ZHAO Yan, ZHENG Guo-can, ZHU Heng, <i>et al.</i> (3464)              |
| Influence of <i>Mirabilis jalapa</i> Linn. Growth on the Microbial Community and Petroleum Hydrocarbon Degradation in Petroleum Contaminated Saline-alkali Soil .....                               | JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, WU Shang-hua, <i>et al.</i> (3471)      |
| Al <sup>3+</sup> Absorption and Assimilation by Four Ectomycorrhizal Fungi .....                                                                                                                    | WANG Ming-xia, YUAN Ling, HUANG Jian-guo, <i>et al.</i> (3479)       |
| Contamination of Organophosphorus Pesticides Residue in Fresh Vegetables and Related Health Risk Assessment in Changchun, China .....                                                               | YU Rui, LIU Jing-shuang, WANG Qi-cun, <i>et al.</i> (3486)           |
| Community Structure and Succession of Methanogens in Beishenshu Landfill, Beijing .....                                                                                                             | SONG Li-na, WANG Lei, XIA Meng-jing, <i>et al.</i> (3493)            |
| Fertility and Environmental Impacts of Urban Scattered Human Feces Used as Organic Granular Fertilizer for Leaf Vegetables .....                                                                    | LÜ Wen-zhou, QIAO Yu-xiang, YU Ning, <i>et al.</i> (3501)            |
| Degradation of PCDD/Fs by the Mixture of V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -WO <sub>3</sub> /TiO <sub>2</sub> Catalyst and Activated Carbon .....                                                       | REN Yong, JI Sha-sha, YU Ming-feng, <i>et al.</i> (3508)             |
| Energy Conservation and Emissions Reduction Benefits Analysis for Battery Electric Buses Based on Travel Services .....                                                                             | LIN Xiao-dan, TIAN Liang, LÜ Bin, <i>et al.</i> (3515)               |
| Definition and Control Indicators of Volatile Organic Compounds in China .....                                                                                                                      | JIANG Mei, ZOU Lan, LI Xiao-qian, <i>et al.</i> (3522)               |
| Influence of Dissimilatory Iron Reduction on the Speciation and Bioavailability of Heavy Metals in Soil .....                                                                                       | SI You-bin, WANG Juan (3533)                                         |

# 《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9月15日 第36卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 9 Sep. 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)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院                                                                                                                               | Co-Sponsored     | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>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<br>北京市2871信箱(海淀区双清路<br>18号, 邮政编码:100085)<br>电话:010-62941102, 010-62849343<br>传真:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | Edited           | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE )<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版     | 科 学 出 版 社<br>北京东黄城根北街16号<br>邮政编码:100717                                                                                                                             | Published        | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>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<br>电话:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                                | Distributed      | by | Science Press<br>Tel:010-64017032<br>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<br>(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