

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第4期

Vol.39 No.4

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

京津冀地区钢铁行业污染物排放清单及对 PM _{2.5} 影响	段文娇, 郎建全, 程水源, 贾佳, 王晓琦 (1445)
京津冀内陆平原区 PM _{2.5} 浓度时空变化定量模拟	郝静, 孙成, 郭兴宇, 王卫, 刘方田, 党海燕 (1455)
成都市冬季相对湿度对颗粒物浓度和大气能见度的影响	刘凡, 谭钦文, 江霞, 蒋文举, 宋丹林 (1466)
华山地区 PM _{2.5} 中无机离子垂直分布特征	曹聪, 王格慧, 吴灿, 李建军, 刘浪, 李瑾, 余兴 (1473)
烟花爆竹集中燃放的大气细颗粒物 (PM _{2.5}) 成分图谱	谢瑞加, 侯红霞, 陈永山 (1484)
长三角地区中小燃煤锅炉 PM _{2.5} 成分谱特征	徐健, 黄成, 李莉, 陈勇航, 楼晟荣, 乔利平, 王鸿宇 (1493)
民用燃煤排放分级颗粒物中重金属排放因子	严沁, 孔少飞, 刘海彪, 王伟, 吴剑, 郑明明, 郑淑容, 杨国威, 吴方琪 (1502)
冬、春季青岛大气气溶胶中乙二酸的分布特征及影响因素	张帅, 石金辉, 姚小红, 高会旺 (1512)
青岛大气降水中微量元素的浓度及溶解度	李茜, 石金辉, 李鹏志, 姚小红, 高会旺 (1520)
辽东湾大气中多环芳烃的含量组成及气粒分配	张玉凤, 宋永刚, 田金, 赵海勃, 杨爽, 吴金浩 (1527)
典型地区大气新型卤代阻燃剂污染特征、来源分析及人体暴露	李琦路, 杨孔, 李军, 张干 (1537)
苏州工业园区室内外颗粒物中多溴联苯醚污染特征及人体暴露水平	王俊霞, 顾海东, 张占恩, 钱飞跃 (1544)
上海市大气污染对感冒疾病相对危险度的影响	杨丝絮, 马玉霞, 周建丁, 周骥 (1552)
城镇化河流溶解性有机质的荧光特性与水质相关性: 以宁波市北仑区芦江为例	曹昌丽, 梁梦琦, 何桂英, 纵亚男, 唐剑锋 (1560)
艾比湖区域景观格局与河流水质关系探讨	曹灿, 张飞, 阿依尼格·亚力坤, 朱世丹, 郭苗, 阿丽米热·塔力甫江, Kung Hsiangte (1568)
三峡澎溪河水华期间水体 CH ₄ 浓度及其通量变化特征初探	秦宇, 张渝阳, 李哲, 马健荣 (1578)
漓江段地表水体旱季硝酸盐动态变化特征及其来源	苗迎, 章程, 肖琼, 赵海娟, 李成习 (1589)
柳江流域饮用水源地重金属污染与健康风险评价	张清华, 韦永著, 曹建华, 于爽 (1598)
黄柏河流域梯级水库沉积物磷形态特征及磷释放通量分析	刘佳, 雷丹, 李琼, 王亮, 张平, 肖尚斌 (1608)
白洋淀典型持久性有机污染物污染特征与风险评估	高秋生, 焦立新, 杨柳, 田自强, 杨苏文, 安月霞, 贾海斌, 崔志丹 (1616)
典型有机氯农药在珠三角地区多介质环境中的归趋模拟	高梓闻, 徐月, 亦如瀚 (1628)
河道水旁路处理中试工艺中 PPCPs 的去除效果及机制	李力, 朱楦, 白瑶, 赵健, 曹之淇, 郭泓利, 李凌云, 左剑思 (1637)
蔡普生在氯消毒过程中的去除、转化与风险评价	樊鑫鑫, 杜尔登, 李佳琦, 赵丽丽, 王聿琳, 彭明国 (1645)
真空紫外/氯处理饮用水典型致嗅物质	孙昕, 张焱, 史路肖, 陈笑涵, 唐晓 (1654)
热活化过硫酸盐降解三氯生	蒋梦迪, 张清越, 季跃飞, 陆鸢鹤 (1661)
水体模拟颗粒物对四环素的吸附特性及基本规律	徐龙凤, 魏群山, 吕强, 唐立朋, 刘亚男, 柳建设 (1668)
海水优化 ANAMMOX 包埋固定化及其处理含海水污水的脱氮性能	单晓静, 于德爽, 李津, 陈光辉, 冯莉, 吕廷廷, 邵青 (1677)
外源甜菜碱投加增强高盐废水厌氧氨氧化脱氮性能	于德爽, 吴国栋, 李津, 周同, 王晓静 (1688)
硝化污泥富集及其强化高氨氮冲击的中试研究	盛晓琳, 崔灿灿, 王家德, 刘锐, 徐峰, 陈吕军 (1697)
分段进水对改良 A ² /O-BAF 双污泥系统反硝化除磷脱氮的影响	南彦斌, 彭永臻, 曾立云, 赵智超, 刘宏, 李慧, 陈永志 (1704)
不同温度下应用比值控制实现连续流好氧颗粒污泥短程硝化	梁东博, 卞伟, 阚睿哲, 王文啸, 赵青, 孙艺齐, 李军 (1713)
智能化曝气控制 A/O 工艺活性污泥特性演化对内源反硝化脱氮的作用机制	徐旻昶, 胡湛波, 张穗生, 李昊航 (1720)
温度对一体式厌氧流化床膜生物反应器运行效能及微生物群落结构的影响	李玥, 胡奇, 高文 (1731)
污泥臭原位置量工艺中抗生素的去除	汪鲁, 黄伟伟, 李彦刚, 强志民 (1739)
零价铁对污泥厌氧消化过程中四环素抗性基因水平转移的作用影响	杨帆, 徐雯丽, 钱雅洁, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (1748)
环境因子对全自养脱氮颗粒污泥功能菌协同效应的影响	陈希, 钱飞跃, 王建芳, 高军军, 沈耀良, 贾珣 (1756)
后置固相反硝化滤池工艺沿程微生物特性	张千, 吉芳英, 徐璇 (1763)
复合菌株 YH01 + YH02 强化 SBR 好氧反硝化脱氮及菌群结构分析	陈海升, 曹刚, 张迪, 黄郑郑, 莫测辉 (1773)
氮磷失衡下膨胀污泥性能及膨胀菌群落结构变化	贺雪濛, 丁丽丽, 张璐璐, 顾卓江, 任洪强 (1782)
1 株铜绿假单胞菌对砷的降解特性及代谢途径	李想, 张雪英, 周俊, 宋军, 王建刚, 雍晓雨, 贾红华 (1794)
铜尾矿库坝面土壤微生物群落动态的驱动因子	李磊, 景炬辉, 刘晋仙, 柴宝峰 (1804)
垦殖对桂林会仙喀斯特湿地土壤养分与微生物活性的影响	黄科朝, 沈育伊, 徐广平, 黄玉清, 张德楠, 孙英杰, 李艳琼, 何文, 周龙武 (1813)
黄土丘陵区退耕还林还草对土壤细菌群落结构的影响	陈孟立, 曾全超, 黄懿梅, 倪银霞 (1824)
河岸带表层土壤的铁氨氧化 (Feammox) 脱氮机制的探究	丁帮琛, 李正魁, 朱鸿杰, 陈湜, 覃云斌, 杨建华, 胡优优 (1833)
藏猪扰动作用下的高寒草甸土壤退化特征及微生物群落结构变化	展鹏飞, 肖德荣, 闫鹏飞, 刘振亚, 马金成, 陈志明, 格茸, 田伟, 王行 (1840)
深圳湾典型红树植物根表铁膜及其重金属富集特征	沈小雪, 李瑞利, 柴民伟, 邱国玉 (1851)
香港周边海域野生鱼体内 DDTs 和 PCBs 的含量分布和食用风险评估	苏杨, 鲍恋君, 曾永平 (1861)
偏远高山湿地土壤中 PAHs 污染特征: 以神农架大九湖为例	胡天鹏, 邢新丽, 柯艳萍, 毛瑶, 黎荧, 郑煌, 喻月, 张家泉, 祁士华 (1872)
西南地区典型森林水库土壤和沉积物汞的迁移转化特征	孙涛, 马明, 王永敏, 安思危, 王定勇 (1880)
广西西江流域土壤镉含量特征及风险评估	宋波, 杨子杰, 张云霞, 王佛鹏, 周浪, 李黎, 钟雪梅 (1888)
长期施肥对旱地红壤及作物中砷累积的影响	张蓉, 余光辉, 李亚青 (1901)
三元土壤调理剂对田间水稻镉累积转运的影响	辜娇峰, 周航, 贾润语, 王倩倩, 李虹呈, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (1910)
稻田土壤性质与水稻镉含量的定量关系	王梦梦, 何梦媛, 苏德纯 (1918)
钙基膨润土辅助对堆肥及土壤 Cu、Zn 形态转化和白菜吸收的影响	赵军超, 王权, 任秀娜, 李荣华, Mukesh Kumar Awasthi, Altaf Hussain Lahori, 张增强 (1926)
外源碳和氮输入对降水变化下土壤呼吸的短期影响	贺云龙, 齐玉春, 彭琴, 董云社, 郭树芳, 闫钟清, 李兆林, 王丽芹 (1934)
模拟降水量减少对大豆-冬小麦轮作农田土壤呼吸的影响	王朝辉, 陈书涛, 孙鹭, 胡正华 (1943)
紫色土丘陵区农田源头沟渠一氧化氮排放的季节差异及影响因素	田琳琳, 任光前, 朱波 (1952)
季节非对称升温对喀斯特土壤 CO ₂ 释放的影响	唐国勇, 张春华, 刘方炎, 李昆, 马艳 (1962)
《环境科学》征订启事 (1472) 《环境科学》征稿简则 (1511) 信息 (1755, 1839, 1925)	

京津冀内陆平原区 PM_{2.5} 浓度时空变化定量模拟

郝静^{1,2}, 孙成^{1,2}, 郭兴宇^{1,2}, 王卫^{1,2*}, 刘方田^{1,2}, 党海燕¹

(1. 河北师范大学资源与环境科学学院, 石家庄 050024; 2. 河北省环境演变与生态建设实验室, 石家庄 050024)

摘要: 近年来我国京津冀地区霾污染日趋严重, 为揭示该地区 PM_{2.5} 时空变化特征, 以京津冀内陆平原为研究区, 以 MODIS AOD 数据作为主要预测因子, 采用混合效应模型建立研究区 2013~2014 年 AOD-PM_{2.5} 逐日变化的关系模型. 利用十折交叉验证法对模型拟合进行验证. 结果表明, 采用混合效应模型对 AOD-PM_{2.5} 进行时间上的校准能够提高二者间的相关性, 模型拟合的 PM_{2.5} 质量浓度与地面实测值间的 R^2 为 0.78, 经过交叉验证后 R^2 为 0.70, RMSE、RPE 分别为 20.80 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、28.76%. 针对研究区冬季 AOD 有效值非随机性缺失带来的采样偏差, 用校正因子对模型预测的 2013~2014 年间 PM_{2.5} 平均浓度进行校正, 结果表明研究区内 PM_{2.5} 平均浓度均高于 75 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 南部和西部地区的 PM_{2.5} 浓度相对较高, 北部和东部地区 PM_{2.5} 浓度相对较低, 呈现出“南高北低、西高东低”的分布趋势. 研究结果表明混合效应模型能够适用于近地面 PM_{2.5} 监测, 也为该区域大气颗粒物污染治理提供了科学依据.

关键词: PM_{2.5}; 气溶胶光学厚度; 混合效应模型; 十折交叉验证; 京津冀内陆平原区

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)04-1455-11 DOI: 10.13227/j.hjks.201706278

Simulation of the Spatio-temporally Resolved PM_{2.5} Aerosol Mass Concentration over the Inland Plain of the Beijing-Tianjin-Hebei Region

HAO Jing^{1,2}, SUN Cheng^{1,2}, GUO Xing-yu^{1,2}, WANG Wei^{1,2*}, LIU Fang-tian^{1,2}, DANG Hai-yan¹

(1. College of Resources and Environment Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China; 2. Key Laboratory of Environmental Evolution and Ecological Construction of Hebei Province, Shijiazhuang 050024, China)

Abstract: In recent years, haze pollution in China is becoming increasingly serious, especially in the Beijing-Tianjin-Hebei region. In order to identify the temporal and spatial distributional characteristics of PM_{2.5} aerosol mass concentration in the region, this study selected the inland plain of the Beijing-Tianjin-Hebei region as the research area, and used MODIS AOD as the main predictor in a mixed effects model to establish the daily relationship of AOD-PM_{2.5} in the study area, from 2013 to 2014. The model was validated by a ten-fold cross validation method. The results showed that the correlation between AOD-PM_{2.5} can be improved by daily calibration of the mixed effects model ($R^2 = 0.78$); the cross-validated R^2 was 0.70, and RMSE and RPE were 20.80 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ and 28.76%, respectively. Considering the importance of unbiased PM_{2.5} predictions, the correction factors calculated from the surface PM_{2.5} measurements were applied to correct the biases in the predicted annual average PM_{2.5} concentrations introduced by non-stochastic missing AOD measurements. The results showed that the annual average concentration of PM_{2.5} in the study area was higher than 75 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, and the spatial distribution of PM_{2.5} concentration was higher in the southern and western regions, and lower in the northern and eastern regions. These results suggest that the mixed effects model can be used to monitor ground PM_{2.5}, and also provide a scientific basis for the control of atmospheric particulate pollution in the region.

Key words: PM_{2.5}; aerosol optical depth (AOD); mixed effects model; ten-fold cross validation method; the inland plain of the Beijing-Tianjin-Hebei region

近年来, 伴随经济快速发展和城市化进程逐步加快, 我国空气污染问题日益严重, 尤其是人口众多经济发达的京津冀地区已经成为我国霾污染最严重区域之一^[1]. 有研究表明, 大气颗粒物污染严重影响人类健康^[2,3], 并通过吸收和散射可见光, 降低大气能见度, 影响人们的生产生活^[4~6]. 目前, 细颗粒物 (PM_{2.5}) 已成为包括京津冀地区在内的我国大多数区域的首要大气污染物^[1], 因此, 认识区域 PM_{2.5} 浓度的时空分布特征, 可以为进一步识别区域大气污染源时空分布规律、大气扩散条件时空变化规律提供科学基础, 也为区域大气污染的治理

提供科学依据.

对区域尺度大气颗粒物浓度时空变化的研究一直遵循由点及面的研究模式, 即由有限地面监测站点的数据推及区域尺度数据. 早期对于区域大气颗粒物浓度的研究主要是建立监测站点数据与其他相关面状参数如土地利用、气象、地形、人口密度、

收稿日期: 2017-06-29; 修订日期: 2017-09-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471091); 河北省自然地理学重点学科项目

作者简介: 郝静(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土地利用/覆被变化生态环境效应, E-mail: haojing_2015@163.com

* 通信作者, E-mail: wangwei@hebtu.edu.cn

交通状况等因子间的回归模型来反演区域尺度大气颗粒物的分布状况^[7,8]。这种研究方法的可接受性依赖于地面监测点的分布密度,在站点分布稀疏或无站点分布的地区难以应用。而卫星遥感提供的面状数据具有地面监测站点无可比拟的优势,其反演的气溶胶光学厚度(aerosol optical depth, AOD)即气溶胶消光系数在整层大气柱中的积分,能够表征大气层中气溶胶颗粒数量状况,已经被许多学者用于对近地面气溶胶即大气颗粒物浓度的研究当中^[9~15]。目前,基于遥感反演的 AOD 数据开展不同空间尺度大气颗粒物浓度时空变化定量研究的主流方法为统计模型法,该方法又分为两类,一类是确定性统计模型,另一类是随机性统计模型。

确定性统计模型应用相对较早,有研究发现,应用该模型建立 AOD-PM_{2.5} 相关关系,需要对 AOD 进行垂直订正即将 AOD 转换为近地面层消光系数、对大气进行湿度订正等^[16~21]。在国外, Van Donkelaar 等^[22]应用大气输送模式(CTMs)对每日的 AOD 数据进行垂直和湿度订正,以此来估算全球 PM_{2.5} 浓度分布状况,并在北美地区验证了其预测结果与实测值间的相关性($r = 0.77$)。在国内,陶金花等^[23]利用区域大气模式系统(RAMS)模拟的大气边界层高度和相对湿度对 AOD 进行订正,最终模型拟合的决定系数 R^2 为 0.61。上述研究已使确定性统计模型的模拟精度达到了可应用水平,但是由于气溶胶标高、大气相对湿度等因子的变化具有随机性特征,使得确定性统计模型模拟精度的提高受到限制^[24~27]。

随机性统计模型应用相对较晚,以线性混合效应模型为代表,这类模型针对影响 AOD-PM_{2.5} 相关关系的主要因子如相对湿度、气溶胶标高等具有随时间随机变化的特性设计^[28,29],能够表征 AOD-PM_{2.5} 随时间变化的情况,大大提高了模型拟合的精度。Lee 等^[28]于 2011 年首次使用混合效应模型,对美国东北部地区 AOD-PM_{2.5} 进行时间上的校准,模型拟合的 R^2 达到 0.97。这项研究表明混合效应模型比确定性统计模型模拟的预期效果好,为遥感反演近地面 PM_{2.5} 浓度提供了新的研究方法。近年, Zheng 等^[30]和 Xie 等^[31]也采用该模型方法模拟了我国主要城市群及北京地区的近地面 PM_{2.5} 浓度,模型预测的 PM_{2.5} 浓度与实地监测值间的吻合度较高。该模型由于应用时间较短并且在重污染区域的应用效果偏差,因此,该模型在我国重污染区域的应用尚需进一步完善。

本文以京津冀内陆平原区为研究区域,选用 Terra 卫星获取的 MOD04_L2 C6 的 AOD 产品和地面监测网络的 PM_{2.5} 监测数据,采用混合效应模型构建时间分辨率为每日、空间分辨率为 10 km × 10 km 的 AOD-PM_{2.5} 统计模型,预测京津冀内陆平原区 2013 ~ 2014 年 PM_{2.5} 浓度值,通过分析京津冀内陆平原区 PM_{2.5} 的时空分布特征,以期为该地区的大气污染治理提供科学支撑,也说明卫星遥感数据可以弥补地面 PM_{2.5} 监测在空间上的不足,可用于颗粒物浓度的时空变化研究。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

京津冀内陆平原区属于华北平原的一部分,区域范围为 36°05'N ~ 41°36'N, 114°19'E ~ 117°22'E, 大致位于太行山山麓以东、运河以西,燕山山麓以南、冀鲁豫省界以北。包括北京、石家庄、保定、廊坊、衡水、邯郸、邢台、沧州西部等地区(图 1)。该区域的气候属于暖温带大陆性季风气候,有明显的四季之分,冬冷夏热,降水集中于夏季且年际变化大。区内地势低平,为典型的洪冲积平原,利于人类居住,再加上首都及京畿特殊的地理位置,成

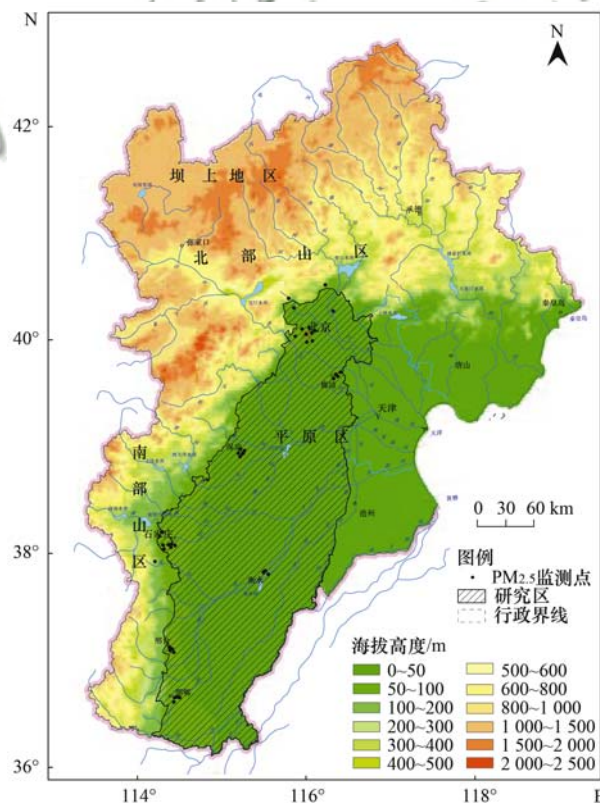


图 1 研究区位置及 PM_{2.5} 监测站点空间分布示意

Fig. 1 Location of the study area and spatial distribution of the PM_{2.5} monitoring stations

为我国北方最具活力、经济发达的地区之一。同时由于西、北两面环山的地形结构,不利于大气污染物扩散,近年来也成为京津冀地区大气污染最严重的区域。

1.2 材料获取

1.2.1 MODIS AOD 采集与处理

搭载在美国国家航空航天局(NASA)地球观测系统(EOS)中 Terra 和 Aqua 卫星上的中分辨率成像光谱仪(MODIS),被广泛应用于监测大气气溶胶。传感器的扫描宽度是2 330 km,总共有 36 个波段(0.4~15 μm),最高分辨率可达 250 m,能够提供丰富的气溶胶和地表特征等信息^[32]。本文主要采用的是 NASA 发布的 2013 年 1 月~2014 年 12 月的 MOD04_L2 C6 产品,时间分辨率为每日、空间分辨率为 10 km×10 km。

首先利用 ENVI4.8 平台对原始数据进行几何校正、拼接裁剪等预处理,之后在 ArcGIS10.2 软件中,利用监测站点的经纬度提取 AOD 的日值。由于云层、雾、冰雪等的覆盖,会造成 AOD 值的缺失^[33,34]。因此,在去除缺失值后总共获得了研究区内 251 d 有效 AOD 值,其中冬半年有 81 d,夏半年有 170 d。

1.2.2 地面 PM_{2.5} 监测数据

本文使用的 PM_{2.5} 浓度数据主要来源于全国城市空气质量实时发布平台,从中获取研究区内 2013 年 1 月~2014 年 12 月国家空气质量监测点监测的 PM_{2.5} 小时数据,其中北京市范围内有 12 个监测点位,河北省范围内包括石家庄、保定、廊坊、衡水、邢台、邯郸这 6 个市区共 29 个监测点位(图 1)。

在数据匹配过程中,当栅格中有 2 个以上监测点时,将这几个监测点同一天内的 PM_{2.5} 浓度的平均值匹配到该栅格中。最终,经过栅格匹配后总共得到 29 个监测栅格,其中北京市范围内共 9 个监测栅格,河北省范围内共 20 个监测栅格。

1.3 研究方法

1.3.1 混合效应模型

混合效应模型中既有固定效应又有随机效应,其中随机效应即为 AOD-PM_{2.5} 随时间变化的效应。近年来,许多研究都已证明在预测 PM_{2.5} 浓度时混合效应模型的可靠性更高^[35,36]。为认识研究区内 AOD-PM_{2.5} 随时间变化的特性,笔者采用混合效应模型来模拟京津冀内陆平原区 PM_{2.5} 浓度分布,混合效应模型具体表述如下:

$$PM_{2.5ij} = (\alpha + \mu_j) + (\beta + \nu_j) \times AOD_{ij} + S_i + \varepsilon_{ij}$$

$$(\mu_j, \nu_j) \sim N[(0,0), \Sigma] \quad (1)$$

式中, PM_{2.5ij} 表示第 i 个监测站点在第 j d 的 PM_{2.5} 浓度; AOD_{ij} 代表相应的监测站点 i 在第 j d 的 AOD 值; α 和 μ_j 分别是固定截距和随机截距; β 和 ν_j 分别为固定斜率和随机斜率; $S_i \sim N(0, \delta_s^2)$ 为站点 i 的随机效应; ε_{ij} 是站点 i 在第 j d 的随机误差项; Σ 为随机效应的方差-协方差矩阵。模型中的固定效应 α 代表建模数据中 PM_{2.5} 的平均估计值,固定效应 β 表明整个研究期间 AOD 对 PM_{2.5} 的固定影响,它们并不随时间及站点的变化而变化;随机效应 μ_j 和 ν_j 随着时间的变化而改变但并不随站点变化,体现出 AOD-PM_{2.5} 随时间变化的关系;随机效应 S_i 随着站点的改变而改变但不随时间变化,反映了 AOD-PM_{2.5} 在空间上的差异。

事实上, AOD 值代表着整个 10 km×10 km 栅格单元中气溶胶光学厚度的平均状况,而地面监测站点的 PM_{2.5} 浓度是特定点的测量值,它并不一定能代表整个栅格单元的平均状况,这样在模型模拟时就会产生一定的偏差,因此在模型中用站点的随机效应 S_i 来调控这种潜在偏差。但当用模型参数预测没有监测站点栅格的 PM_{2.5} 浓度时则不需要考虑站点偏差的影响^[28],因为每个站点的偏差只适用于其所在栅格单元并不能适用于研究区内所有的栅格单元,而此时预测的是整个栅格的 PM_{2.5} 浓度,因此,在预测研究区内非监测站点所在栅格的 PM_{2.5} 浓度时所用的模型简化如下:

$$\text{Pred } PM_{2.5ij} = (\alpha + \mu_j) + (\beta + \nu_j) \times AOD_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (2)$$

式中, Pred PM_{2.5ij} 代表第 i 个栅格在第 j d 预测的 PM_{2.5} 浓度, AOD_{ij} 为第 i 个栅格第 j d 的 AOD 值, α 、 β 分别为公式(1)中的固定截距和固定斜率, μ_j 、 ν_j 分别为公式(1)中的随机截距和随机斜率, ε_{ij} 为误差项。

1.3.2 模型验证方法

为了评估预测模型的准确性,采用十折交叉验证法来验证混合效应模型。此方法是将数据集随机分成 10 等份,轮流将其中的 9 份用于确定模型的参数,而剩余的一份则作为测试集来评估模型,这样重复进行 10 次,直至所有的数据都被预测出来,之后用 10 次验证结果的均值作为对预测模型精度的估计。本文中模型的构建和验证都在 SAS 9.3 软件中进行处理。

本研究用模型预测值与实测值间的决定系数

R^2 , 均方根误差 (RMSE) 及相对预测误差 (RPE) 等统计指标来评估模型的精确度. 其中, RMSE、RPE 的计算公式如下:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{\text{obs},i} - y_{\text{model},i})^2}{n}} \quad (3)$$

$$\text{RPE} = \frac{\text{RMSE}}{\bar{y}} \times 100\% \quad (4)$$

式中, $y_{\text{obs},i}$ 为地面监测点 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的观测值; $y_{\text{model},i}$ 为模型中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的预测值; n 为建模数据集中样本总数, $\bar{y}$ 为 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的监测均值.

1.3.3 模型预测结果校正方法

在模型预测的 $\text{PM}_{2.5}$ 日值数据基础上, 计算研究区内 2013 ~ 2014 年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的平均值. 然而由于建模数据中 AOD 值的非随机性缺失可能会使模拟的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度存在偏差, 因此, 使用每个监测站点实测的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值与模型中实测的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值的比值作为校正因子来校正预测的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值. 校正因子的计算公式如下:

$$r_i = \frac{\text{Avg PM}_{2.5, \text{all}_i}}{\text{Avg PM}_{2.5, \text{model}_i}} \quad (5)$$

式中, r_i 为第 i 个监测站点的校正因子, $\text{Avg PM}_{2.5, \text{all}_i}$ 是研究期内第 i 个监测站点所有实测的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值, $\text{Avg PM}_{2.5, \text{model}_i}$ 是研究期内第 i 个监测站点参与建模的所有实测的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值. 使用反距离加权法 (IDW) 将校正因子扩展到整个研究区, 得到每个栅格单元的校正因子, 最后校正模型预测的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值, 以减小 AOD 值非随机性缺失对预测 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值的影响.

表 1 2013 ~ 2014 年建模数据中 $\text{PM}_{2.5}$ 、AOD 的描述性统计量

Table 1 Descriptive statistics of $\text{PM}_{2.5}$ concentrations and AOD in modeling data from 2013 to 2014

城市	样本量	$\text{PM}_{2.5}/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$				AOD			
		均值	标准差	最小值	最大值	均值	标准差	最小值	最大值
北京	532	57.74	34.18	3.21	180.06	0.56	0.50	0.01	2.84
廊坊	165	66.27	35.66	9.42	188.25	0.50	0.49	0.01	3.60
保定	367	74.37	34.64	8.83	183.71	0.66	0.58	0.01	2.93
石家庄	542	78.73	41.66	6.24	255.58	0.74	0.63	0.02	3.28
衡水	110	70.02	29.10	24.22	168.93	0.53	0.41	0.03	1.95
邢台	287	88.37	41.60	3.00	214.42	0.73	0.67	0.07	3.82
邯郸	221	72.41	29.29	4.88	180.13	0.69	0.66	0.08	3.84
汇总	2224	72.30	37.89	3.00	255.58	0.65	0.59	0.01	3.84

2.2 模型拟合及交叉验证结果

混合效应模型中固定效应的截距和斜率分别是 57.48、27.68, 标准误差分别为 3.07、3.32, 二者的 P 值均小于 0.000 1, 具有统计学意义. 决定系数 R^2 达到 0.78, RMSE 和 RPE 分别为 $17.80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、

2 结果与分析

2.1 描述性统计分析

京津冀内陆平原区 2013 ~ 2014 年 $\text{PM}_{2.5}$ 地面监测站点的有效观测量为 27 121 个, AOD 的有效观测量为 3 394 个. 根据建模要求, 在栅格匹配过程中排除了一天中少于两对有效数据的天, 共排除了 41 d, 最后总共得到了 210 d 2224 对 AOD- $\text{PM}_{2.5}$ 有效建模数据. 建模数据中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度及 AOD 的描述性统计分析结果如表 1 所示.

研究期间建模数据的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值为 $72.30 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 是我国最新颁布的环境空气质量标准中规定的二级空气质量标准 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度年均值 ($35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 的 2 倍多, 表明京津冀内陆平原区 $\text{PM}_{2.5}$ 污染很严重. 各城市 $\text{PM}_{2.5}$ 的日变化范围为 $3 \sim 255.58 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 标准差的变化范围是 $29.10 \sim 41.66 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 表明不同城市间 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的波动较大. 邢台的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值最高 ($88.37 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 石家庄次之, 北京最低, 可能是因为北京的监测点包括了位于郊区的定陵、昌平、怀柔等站点, 从而使得整体 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度水平较低. 整体上看, 邢台、石家庄总体浓度水平较高, 北京、廊坊浓度较低, 地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈现出由南向北递减的趋势.

AOD 的均值为 0.65, 日值变化范围是 $0.01 \sim 3.84$, 标准差为 0.59, 变化幅度不大. 邢台、邯郸、石家庄的 AOD 均值较大, 衡水的 AOD 均值最小 (0.41), 廊坊、北京次之. 从整体空间分布上看, AOD 的分布规律与 $\text{PM}_{2.5}$ 的空间分布大体一致.

24.62% [图 2(a)]. 与确定性统计模型在本研究区的拟合结果相比精度有明显提高, 表明混合效应模型加入时间、站点的随机效应后既能反映 AOD- $\text{PM}_{2.5}$ 时间上的变异又能在一定程度上反映空间上的变异.

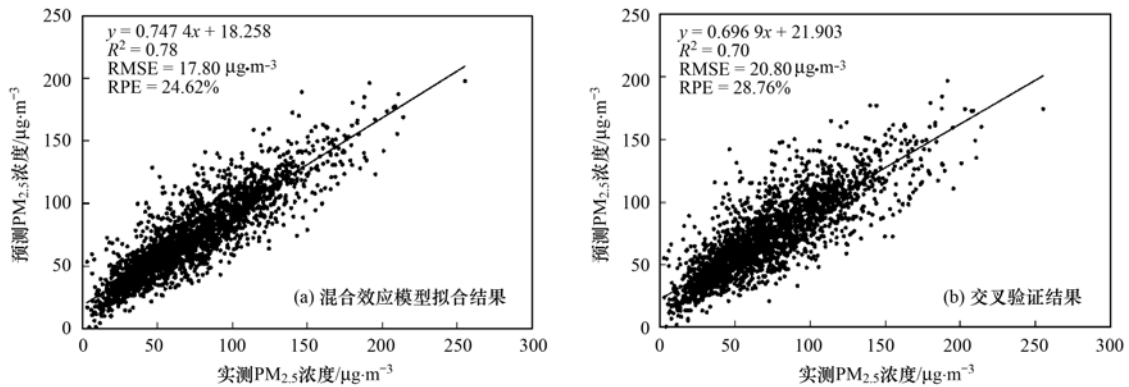


图2 模型预测的 PM_{2.5} 浓度值与实测值间的相关关系

Fig. 2 Relationship between the measured and predicted PM_{2.5} concentrations

各监测站点的随机偏差值变化范围为 $-19.67 \sim 14.35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (表2), 邢台、石家庄一些站点的正偏差值较大, 表明这些栅格的本地污染较为严重; 而北京怀柔、定陵、昌平等站点和石家庄封龙山站点的偏差值为明显的负值, 说明这些栅格的

PM_{2.5} 浓度受到周边城市地区污染物扩散的影响较大, 因为这些站点附近人口较少, 人为污染排放量也相对较少. 这意味着研究区内各监测站点间存在着较大的差异, 也说明在模型模拟时确实有必要考虑站点的随机效应.

表2 各监测站点的偏差估计/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 2 Site bias estimates for each monitoring site/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

站点编号	城市	经度/(°)	纬度/(°)	估计值	站点编号	城市	经度/(°)	纬度/(°)	估计值
1	北京	116.64	40.39	-15.44	16	石家庄	114.44	38.17	9.97
2	北京	116.17	40.29	-19.67	17	石家庄	114.44	38.04	3.62
3	北京	116.23	40.20	-14.33	18	石家庄	114.51	38.05	4.86
4	北京	116.72	40.14	-10.86	19	石家庄	114.59	38.03	1.63
5	北京	116.32	39.99	-3.55	20	石家庄	114.54	38.02	5.60
6	北京	116.41	40.00	-3.72	21	石家庄	114.46	38.01	8.33
7	北京	116.36	39.94	-9.35	22	石家庄	114.34	37.89	-1.58
8	北京	116.43	39.95	-8.09	23	衡水	115.68	37.75	0.79
9	北京	116.23	39.93	-6.75	24	邢台	114.47	37.08	12.03
10	廊坊	116.76	39.57	0.75	25	邢台	114.50	37.07	14.35
11	廊坊	116.67	39.51	-2.68	26	邢台	114.52	37.03	10.47
12	保定	115.46	38.91	5.58	27	邯郸	114.50	36.61	3.25
13	保定	115.51	38.89	5.46	28	邯郸	114.53	36.61	0.62
14	保定	115.51	38.86	4.38	29	邯郸	114.49	36.57	0.59
15	保定	115.48	38.86	3.77					

经过十折交叉验证后[图2(b)], R^2 为 0.70, 斜率近为 0.70, 虽然比验证前模型拟合的效果略有降低, 但也呈现出显著相关性. 经过交叉验证后, 预测值与实测值间的 RMSE 为 $20.80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, RPE 为 28.76%, 比验证前的误差有所增大, R^2 也降低了 0.08, 说明混合模型存在着一定的过拟合现象, 而交叉验证有效地解决了过拟合问题. 此结果与马宗伟^[37]研究的 2013 年我国分省份一级 LME 模型中河北地区的拟合结果 ($\text{CV } R^2 = 0.75$) 比较接近. 与美国东北部地区^[28,35]的研究结果相比, 本研究中模型拟合的 R^2 略低, RMSE 统计指标较高, 这可能是因为本研究区内 PM_{2.5} 污染浓度比美国地区高,

并且研究区内冬季霾污染严重, 而此时卫星反演的 AOD 数据却大量缺失, 从而导致模型拟合精度偏低.

通过比较各站点的模型拟合及交叉验证结果 (表3), 可以看出各站点混合模型拟合的 R^2 的变化范围是 0.59 ~ 0.91, 石家庄的整体拟合效果最好, 各站点的 R^2 均在 0.80 以上; 邯郸矿院的拟合优度最低 R^2 仅为 0.59, 衡水的拟合效果稍差. 交叉验证后 R^2 的变化范围是 0.53 ~ 0.90, 最小值仍在邯郸, 最大值仍是石家庄人民会堂监测点. 各站点的模型拟合与交叉验证的 R^2 差值在 0.01 ~ 0.12 之间, 再次说明了各地区的模型拟合有一定的过拟

合现象. 石家庄封龙山监测点(编号:21)作为郊区点位,其拟合效果与城区监测点相比稍差,北京的怀柔、定陵、昌平、顺义郊区点位(编号:1~4)的 R^2 也略比城区站点低,这可能是因为郊区与城区的局地环境不同,污染源也不同,从而会影响到AOD-PM_{2.5}的相关性. 整个研究区中邯郸的整体 R^2 最小,这可能是因为邯郸的建模数据中有些天的AOD值较高而PM_{2.5}浓度却较低或AOD值较低反

而PM_{2.5}浓度较高,从而导致了模型拟合的结果偏低.

从模型的评价标准来看,各站点的RPE介于15.33%~35.62%之间,均值为24.30%,交叉验证后均值为28.00%,模型拟合的各站点RMAE的变化范围是10.22~23.20 μg·m⁻³,交叉验证后RMSE的变化范围为11.92~25.56 μg·m⁻³,与国内的相关研究水平相近^[30,31,36].

表3 各站点模型拟合结果与交叉验证结果的对比

Table 3 Comparison of the results of the mixed effects model and the CV mixed effects model for each site																	
站点 编号	城市	样本 量	模型拟合			交叉验证			站点 编号	城市	样本 量	模型拟合			交叉验证		
			R^2	RMSE / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	RPE /%	R^2	RMSE / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	RPE /%				R^2	RMSE / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	RPE /%	R^2	RMSE / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	RPE /%
1	北京	76	0.68	18.20	35.62	0.58	21.85	42.77	16	石家庄	87	0.80	23.20	26.48	0.76	25.56	29.18
2	北京	79	0.76	16.18	35.00	0.64	19.82	42.88	17	石家庄	77	0.82	17.49	21.63	0.77	19.70	24.36
3	北京	58	0.79	16.46	32.00	0.70	19.45	37.82	18	石家庄	74	0.91	14.17	16.78	0.90	15.10	17.88
4	北京	61	0.72	21.10	31.42	0.64	23.95	35.67	19	石家庄	73	0.85	15.98	19.89	0.80	18.16	22.60
5	北京	53	0.87	12.22	18.82	0.80	14.80	22.80	20	石家庄	70	0.89	13.13	15.45	0.85	14.54	17.11
6	北京	44	0.85	13.55	20.17	0.81	14.88	22.15	21	石家庄	76	0.86	16.88	20.11	0.81	19.14	22.81
7	北京	54	0.85	11.47	18.01	0.81	13.14	20.63	22	石家庄	85	0.80	19.36	29.58	0.72	21.50	32.85
8	北京	49	0.90	10.22	15.33	0.86	11.92	17.88	23	衡水	110	0.63	18.43	26.79	0.54	21.56	31.34
9	北京	58	0.81	14.29	22.63	0.76	16.16	25.59	24	邢台	98	0.78	18.98	21.38	0.69	22.38	25.21
10	廊坊	80	0.76	17.58	26.42	0.67	20.66	31.05	25	邢台	100	0.82	19.91	21.45	0.72	24.49	26.39
11	廊坊	84	0.80	15.27	24.17	0.74	17.66	27.95	26	邢台	89	0.73	20.91	23.71	0.63	24.38	27.64
12	保定	95	0.76	18.67	25.54	0.66	21.68	29.66	27	邯郸	80	0.65	19.31	25.58	0.56	22.22	29.43
13	保定	87	0.73	19.26	25.34	0.61	23.11	30.40	28	邯郸	75	0.61	17.90	29.23	0.55	23.61	32.52
14	保定	93	0.74	16.68	23.33	0.72	17.21	24.07	29	邯郸	67	0.59	15.52	30.15	0.53	23.64	34.93
15	保定	92	0.72	16.52	22.59	0.64	19.31	26.40									

2.3 校正因子

研究区各监测站点的校正因子 r 的变化范围是1.18~1.92,平均值为1.60(表4),意味着AOD值的缺失导致模型预测的结果偏低. 而AOD的缺失除了受自身的反演条件限制外还与当地的大气污染

有关,自2013年以来京津冀地区霾污染日趋严重,尤其在气象条件不利于污染物扩散的冬季PM_{2.5}浓度较高而AOD数据基本缺失^[38],这也正是校正因子都大于1的原因. 经过校正后各站点预测误差的范围均在5.5 μg·m⁻³以内(表4),模型预测的各站

表4 各监测点的校正因子及校正效果¹⁾

Table 4 Correction factors and corrected results for each monitoring site											
站点 编号	城市	校正 因子 r	实测 PM _{2.5} 浓度 均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	校正后 PM _{2.5} 浓度 预测均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	预测误差 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	站点 编号	城市	校正 因子 r	实测 PM _{2.5} 浓度 均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	校正后 PM _{2.5} 浓度 预测均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	预测误差 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
1	北京	1.38	70.61	75.36	4.75	16	石家庄	1.71	149.47	145.63	-3.84
2	北京	1.48	68.26	72.40	4.14	17	石家庄	1.75	141.66	137.45	-4.21
3	北京	1.43	73.69	78.93	5.24	18	石家庄	1.60	134.95	133.35	-1.60
4	北京	1.18	79.14	83.40	4.26	19	石家庄	1.74	139.41	137.78	-1.63
5	北京	1.41	91.83	94.14	2.31	20	石家庄	1.72	145.94	143.29	-2.65
6	北京	1.25	84.23	85.79	1.56	21	石家庄	1.92	160.79	157.34	-3.45
7	北京	1.31	83.5	84.75	1.25	22	石家庄	1.77	115.57	117.49	1.92
8	北京	1.29	86.05	85.76	-0.29	23	衡水	1.65	113.56	112.11	-1.45
9	北京	1.35	85.27	85.70	0.43	24	邢台	1.65	146.15	143.85	-2.30
10	廊坊	1.60	106.48	108.53	2.05	25	邢台	1.61	149.52	147.00	-2.52
11	廊坊	1.60	101.13	103.29	2.16	26	邢台	1.73	152.38	148.83	-3.55
12	保定	1.77	129.05	128.78	-0.27	27	邯郸	1.67	126.11	123.71	-2.39
13	保定	1.77	134.87	135.55	0.68	28	邯郸	1.72	124.65	128.19	3.54
14	保定	1.79	128.23	126.18	-2.05	29	邯郸	1.83	123.86	125.83	1.97
15	保定	1.65	120.91	120.63	-0.28						

1) 预测误差 = 校正后 PM_{2.5} 浓度预测均值-实测 PM_{2.5} 浓度均值

点 PM_{2.5} 浓度均值与实测值间的决定系数 R^2 接近于 1, 斜率近为 0.92(图 3), 表明在预测长期的 PM_{2.5} 浓度时对模型预测结果进行订正能够有效地解决因 AOD 非随机性缺失而引起的采样偏差.

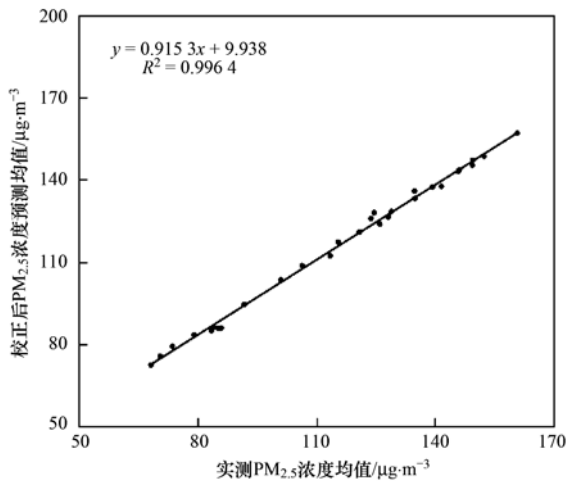


图 3 各监测站点 PM_{2.5} 实测均值与基于模型预测结果偏差校正后的预测均值的相关关系

Fig. 3 Correlation between the measured and the bias-corrected annual mean PM_{2.5} concentrations predicted based on the model for each site

2.4 京津冀内陆平原区 PM_{2.5} 浓度的时空分布

基于上述混合模型及其校正因子预测出京津冀内陆平原区 2013 ~ 2014 年近地面 PM_{2.5} 浓度平均分布状况(图 4). 从中可以看出, 模型预测(校正前结果)的 PM_{2.5} 浓度均值介于 55.01 ~ 81.13 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间. 经过校正因子校正后研究区内 PM_{2.5} 浓度均值介于 75.47 ~ 134.70 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间, 整个研究区内 PM_{2.5} 平均浓度均大大高于我国环境空气质量二级标准(35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 尤其是石家庄、邢台、邯郸、保定等各城市中心, PM_{2.5} 浓度高于 125 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 是国家二级空气质量标准的 3 倍多, 污染十分严重, 京广铁路沿线 PM_{2.5} 浓度也相对较高. 因为这些地区人口密集, 交通流量大, 燃煤为主的能源结构及重化工产业结构使得污染物排放量大, 再加上西部有太行山脉的阻挡使污染物不易扩散. 北京、廊坊等地区相比于其他地区 PM_{2.5} 浓度较低, 但也明显高于国家二级空气质量标准. 从整体空间分布上来看, 南部地区的 PM_{2.5} 浓度相对较高, 北部地区 PM_{2.5} 浓度相对较低, 西部地区的 PM_{2.5} 浓度相对较高, 东部地区 PM_{2.5} 浓度相对较低, 整体上呈现出“南高北低、西高东低”的分布大势, 这与表 1 中统计结果的变化趋势一致.

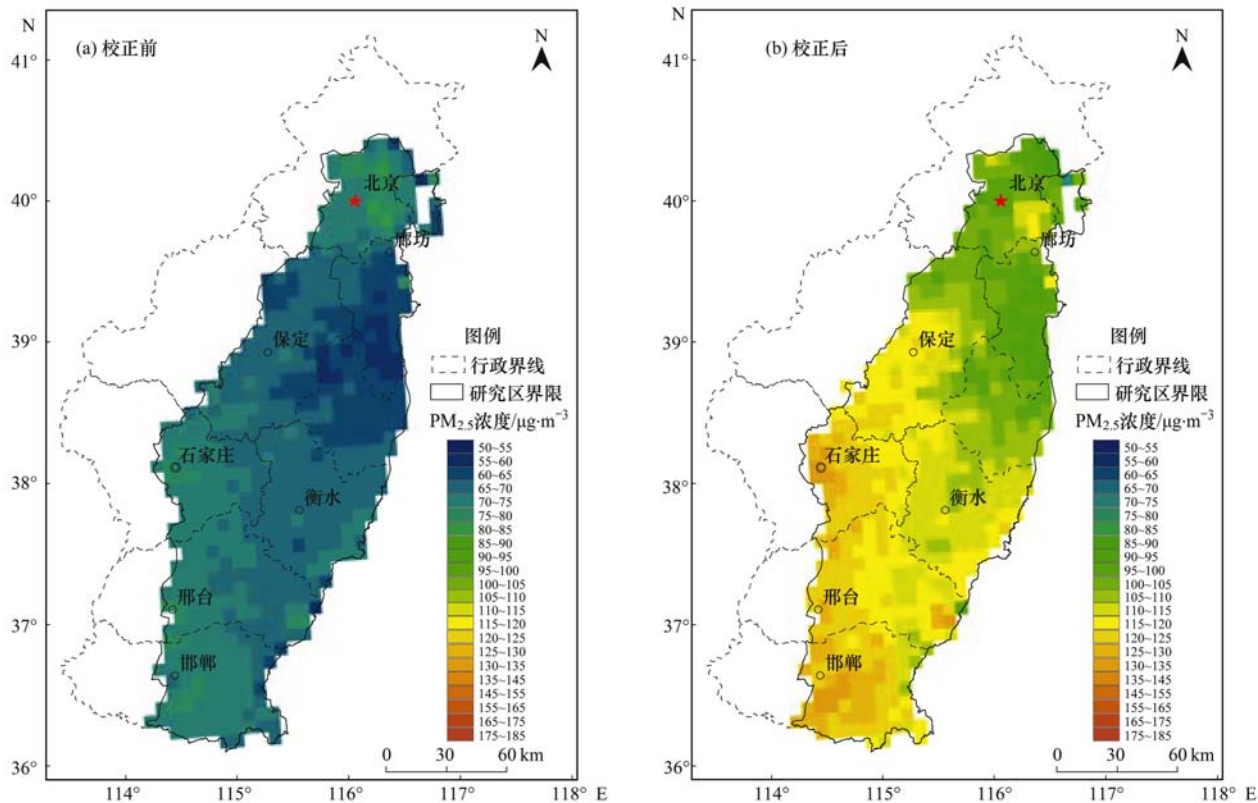


图 4 研究区内 2013 ~ 2014 年偏差校正前后 PM_{2.5} 浓度均值的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of the mean PM_{2.5} concentrations before and after bias-correction over the study area from 2013 to 2014

校正后结果表明,研究区夏半年(4~9月)和冬半年(10月~次年3月)PM_{2.5}浓度的季节差别明显(图5). 区内PM_{2.5}浓度夏半年最高为136.37 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,最低为54.76 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,冬半年最高为181.38 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,最低为72.85 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,冬半年PM_{2.5}浓度明显高于夏半年,这是因为该地区冬季主要通过燃煤取暖,污染物排放量大,同时污染物扩散条件明显弱于夏半年,从而造成冬季大气污染更加严重.

校正后结果还表明,研究区内2013年PM_{2.5}浓度年均值为120.67 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,变化范围为54.76~149.52 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,2014年PM_{2.5}浓度年均值为104.78 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,变化范围为67.36~181.38 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (图6). 整体上看,研究区2014年PM_{2.5}年均浓度比2013年有所降低,尤其是北京、廊坊等地,石家庄、邢台、邯郸地区虽有所降低但由于西侧太行山脉的阻挡,从而使这些地区的PM_{2.5}浓度仍较高.

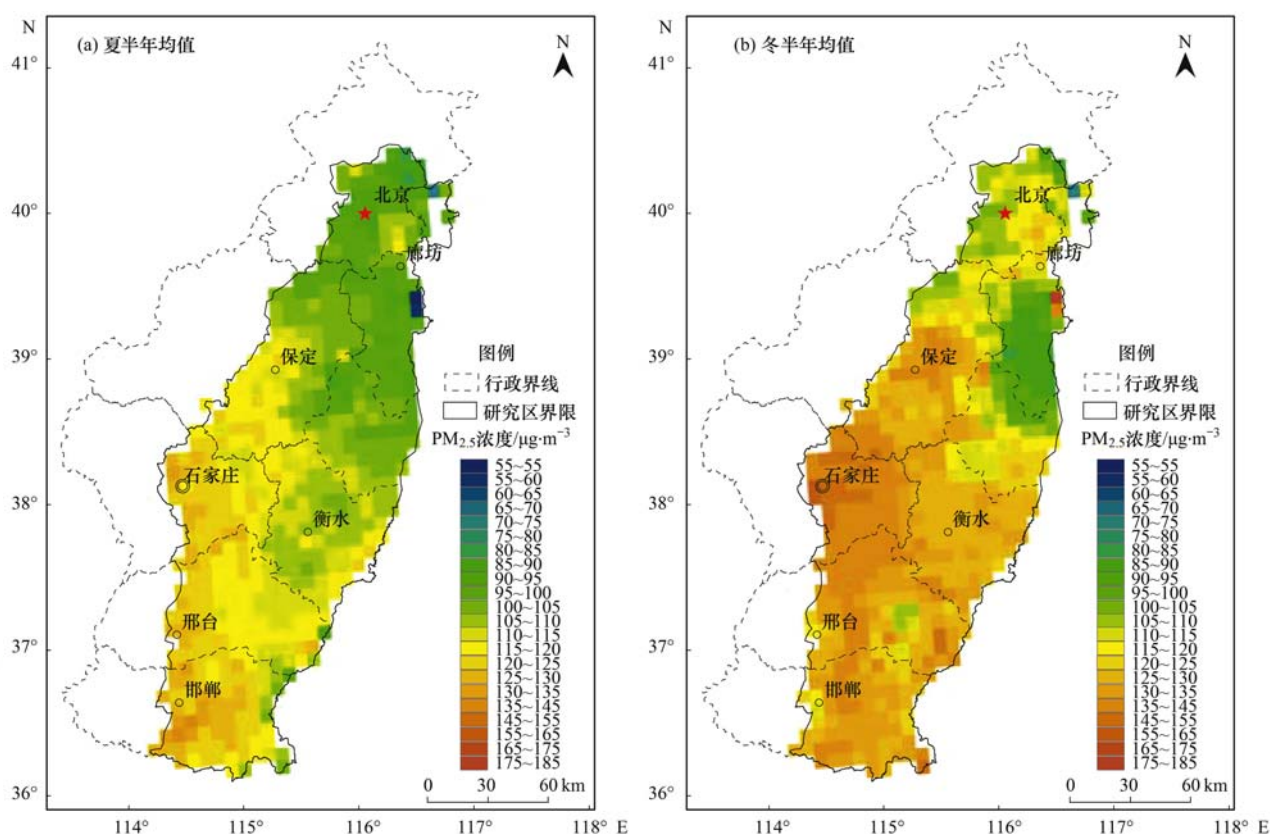


图5 研究区2013~2014年偏差校正后PM_{2.5}浓度的季节分布

Fig. 5 Seasonal distribution of PM_{2.5} concentration after bias-correction, from 2013 to 2014

3 讨论

AOD值非随机性缺失是所有建立AOD-PM_{2.5}关系模型的障碍,混合效应模型亦是如此. 如何通过有限的AOD值,采取补值/插值方法,获得高精度的研究区AOD补值/插值,将是消除AOD值缺失障碍的重要途径. 因此,将在上述领域开展研究,以期进一步提高混合效应模型的预测能力.

混合效应模型擅长AOD-PM_{2.5}关系的时间序列校准,研究实践证明AOD-PM_{2.5}关系的时间变化效应大于空间变化效应,但并不是否定空间变化效应. 从本文的模型构建看,监测站点随机效应(S_i)

的设计是为了消除站点所在栅格内部由于监测的PM_{2.5}数据与AOD数据的空间尺度差异导致的预测偏差. 这一参数的设计并不能校准更大尺度上的空间差异,而从本文的研究结果看(表2),北京与其他区域间的AOD-PM_{2.5}关系确实存在空间差异,即北京各站点的所有偏差均为负值. 如果在模型的AOD斜率项增设反映空间差异的随机项,可能会提高模型的预测精度,这也是下一步要研究的内容.

本文采用的AOD数据产品的空间分辨率是10 km × 10 km,分辨率较粗,反映空间差异性的精度略低,因此,在今后的研究中可采用精度更高AOD产品来提高模型的精度.

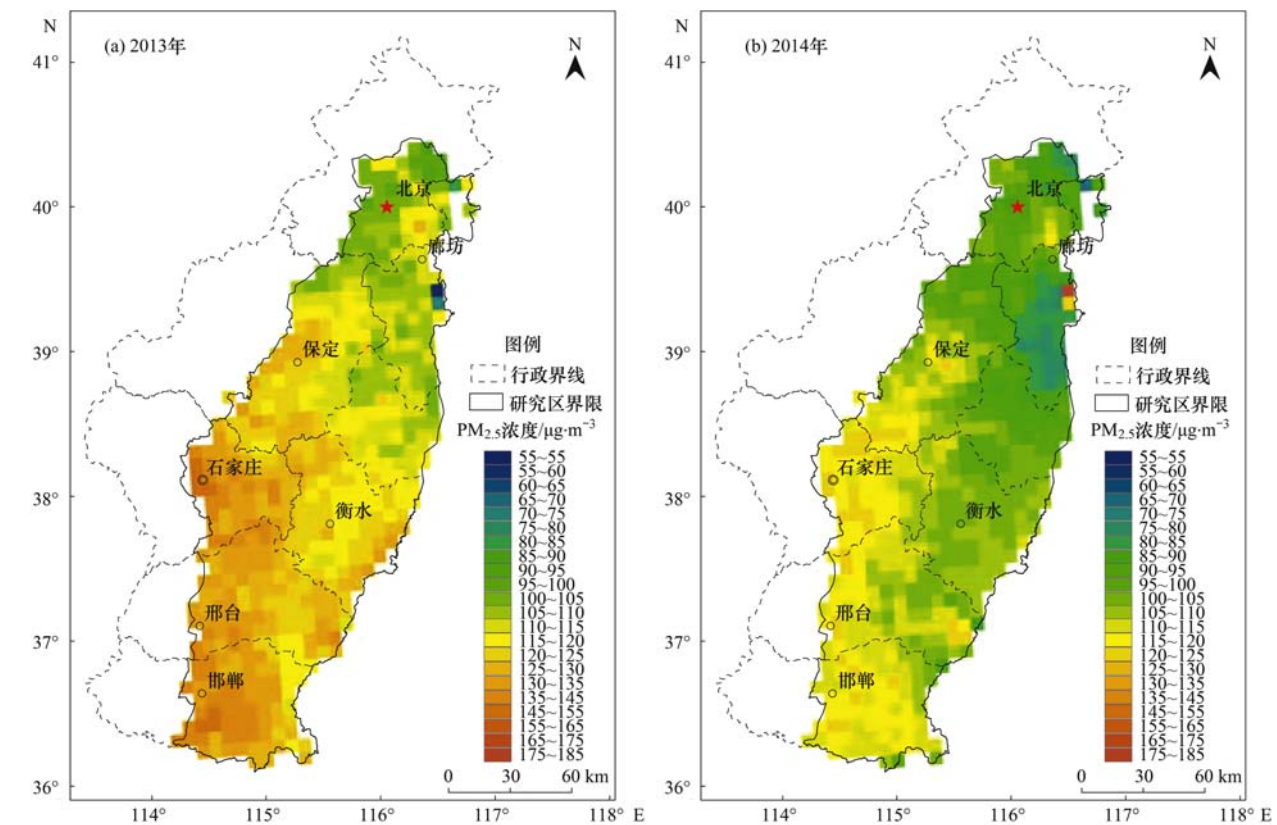


图 6 研究区 2013 ~ 2014 年偏差校正后 PM_{2.5} 浓度年均值的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of the annual mean PM_{2.5} concentrations after bias-correction, from 2013 to 2014

本文采用的 PM_{2.5} 监测站点大多是在城区的国控站点，分布较为密集，样本的区域代表性较差，今后的研究可以随着国家空气质量监测网络的逐步完善，加入更多的监测站点诸如省级监测站点等，以提高监测样本的区域代表性。

4 结论

(1) AOD 与 PM_{2.5} 间的直接相关性较低，而采用混合效应模型拟合的 R^2 达到 0.78，十折交叉验证后 R^2 为 0.70，说明对 AOD-PM_{2.5} 间的关系进行时间上的校准能够极大地提高二者间的相关性，也表明混合效应模型能够较好地适用于预测一定范围内近地面 PM_{2.5} 浓度。

(2) 研究区内 PM_{2.5} 浓度的校正因子均值为 1.60，表明由于建模数据时间上的缺失导致模型预测长期 PM_{2.5} 浓度时产生偏差，而采用校正因子对研究区内模型预测的 PM_{2.5} 浓度均值进行校正，可以减小因 AOD 非随机性缺失而引起的预测偏差。

(3) 从预测的 PM_{2.5} 浓度均值的空间分布状况看，南部地区的 PM_{2.5} 浓度相对较高，北部地区 PM_{2.5} 浓度相对较低，西部地区的 PM_{2.5} 浓度相对较

高，东部地区 PM_{2.5} 浓度相对较低，整体上呈现出“南高北低、西高东低”的分布大势。

参考文献：

[1] 曹军骥. PM_{2.5} 与环境 [M]. 北京：科学出版社，2014. 65-72.
Cao J J. PM_{2.5} and the environment in China [M]. Beijing：Science Press, 2014. 65-72.
[2] 谢鹏，刘晓云，刘兆荣，等. 我国人群大气颗粒物污染暴露-反应关系的研究 [J]. 中国环境科学，2009，29 (10)：1034-1040.
Xie P, Liu X Y, Liu Z R, *et al.* Exposure-response functions for health effects of ambient particulate matter pollution applicable for China [J]. China Environmental Science, 2009, 29 (10)：1034-1040.
[3] Bell M L, Ebisu K, Belanger K. Ambient air pollution and low birth weight in Connecticut and Massachusetts [J]. Environmental Health Perspectives, 2007, 115 (7)：1118-1124.
[4] 宋宇，唐孝炎，方晨，等. 北京市能见度下降与颗粒物污染的关系 [J]. 环境科学学报，2003，23 (4)：468-471.
Song Y, Tang X Y, Fang C, *et al.* Relationship between the visibility degradation and particle pollution in Beijing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2003, 23 (4)：468-471.
[5] 刘爱霞，韩素芹，姚青，等. 2011 年秋冬季天津 PM_{2.5} 组分特征及其对能见度的影响 [J]. 气象与环境学报，2013，29 (2)：42-47.
Liu A X, Han S Q, Yao Q, *et al.* Characteristics of chemical composition of PM_{2.5} and its effect on visibility in autumn and

- winter of 2011 in Tianjin [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2013, **29**(2): 42-47.
- [6] 陈义珍, 赵丹, 柴发合, 等. 广州市与北京市大气能见度与颗粒物质量浓度的关系[J]. *中国环境科学*, 2010, **30**(7): 967-971.
- Chen Y Z, Zhao D, Chai F H, *et al.* Correlation between the atmospheric visibility and aerosol fine particle concentrations in Guangzhou and Beijing [J]. *China Environmental Science*, 2010, **30**(7): 967-971.
- [7] Hoek G, Beelen R, De Hoogh K, *et al.* A review of land-use regression models to assess spatial variation of outdoor air pollution[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(33): 7561-7578.
- [8] 陈莉, 白志鹏, 苏笛, 等. 利用 LUR 模型模拟天津市大气污染物浓度的空间分布[J]. *中国环境科学*, 2009, **29**(7): 685-691.
- Chen L, Bai Z P, Su D, *et al.* Application of land use regression to simulate ambient air PM₁₀ and NO₂ concentration in Tianjin City[J]. *China Environmental Science*, 2009, **29**(7): 685-691.
- [9] 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.
- Lin H F, Xin J Y, Zhang W Y, *et al.* Comparison of atmospheric particulate matter and aerosol optical depth in Beijing city[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(3): 826-834.
- [10] 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.
- Li C C, Mao J T, Lau A K H, *et al.* Research on the air pollution in Beijing and its surroundings with MODIS AOD products[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, **27**(5): 869-880.
- [11] Chu D A, Kaufman Y J, Zibordi G, *et al.* Global monitoring of air pollution over land from the Earth Observing System-Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108**(D21): 4661.
- [12] Wang J, Christopher S A. Intercomparison between satellite-derived aerosol optical thickness and PM_{2.5} mass: Implications for air quality studies[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, **30**(21): 2095.
- [13] 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.
- [14] 何秀, 邓兆泽, 李成才, 等. MODIS 气溶胶光学厚度产品在地面 PM₁₀ 监测方面的应用研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2010, **46**(2): 178-184.
- He X, Deng Z Z, Li C C, *et al.* Application of MODIS AOD in surface PM₁₀ evaluation [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2010, **46**(2): 178-184.
- [15] 陈良富, 陶金花, 王子峰, 等. 空气质量卫星遥感监测技术进展[J]. *大气与环境光学学报*, 2015, **10**(2): 117-125.
- Chen L F, Tao J H, Wang Z F, *et al.* Review of satellite remote sensing of air quality [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2015, **10**(2): 117-125.
- [16] 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**(S1): 177-186.
- Li C C, Mao J T, Lau A K H, *et al.* Application of MODIS satellite products to the air pollution research in Beijing [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2005, **48**(S2): 209-219.
- [17] Liu Y, Sarnat J A, Kilaru V, *et al.* Estimating ground-level PM_{2.5} in the eastern United States using satellite remote sensing [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(9): 3269-3278.
- [18] 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.
- [19] 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.
- Zheng Z Y, Chen L F, Zheng J Y, *et al.* Application of retrieved high-resolution AOD in regional PM monitoring in the Pearl River Delta and Hong Kong region[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(6): 1154-1161.
- [20] 陈辉, 厉青, 王中挺, 等. 利用 MODIS 资料监测京津冀地区近地面 PM_{2.5} 方法研究[J]. *气象与环境学报*, 2014, **30**(5): 27-37.
- Chen H, Li Q, Wang Z T, *et al.* Study on monitoring surface PM_{2.5} concentration in Jing-Jin-Ji regions using MODIS data[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2014, **30**(5): 27-37.
- [21] 徐建辉, 江洪. 长江三角洲 PM_{2.5} 质量浓度遥感估算与时空分布特征[J]. *环境科学*, 2015, **36**(9): 3119-3127.
- Xu J H, Jiang H. Estimation of PM_{2.5} concentration over the Yangtze Delta using remote sensing: analysis of spatial and temporal variations[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(9): 3119-3127.
- [22] 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.
- [23] 陶金花, 张美根, 陈良富, 等. 一种基于卫星遥感 AOT 估算近地面颗粒物的方法[J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, **43**(1): 143-154.
- Tao J H, Zhang M G, Chen L F, *et al.* Method to estimate concentration of surface-level particulate matter from satellite-based aerosol optical thickness [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2013, **43**(1): 143-154.
- [24] Liu Y, Paciorek C J, Koutrakis P. Estimating regional spatial and temporal variability of PM_{2.5} concentrations using satellite data, meteorology, and land use information[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2009, **117**(6): 886-892.
- [25] Hu X F, Waller L A, Al-Hamdan M Z, *et al.* Estimating ground-level PM_{2.5} concentrations in the southeastern U. S. using geographically weighted regression[J]. *Environmental Research*, 2013, **121**: 1-10.
- [26] 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_{2.5} [J]. *环境科学*, 2013, **34**(3): 817-825.
- Guo J P, Wu Y R, Zhang X Y, *et al.* Estimation of PM_{2.5} over

- eastern China from MODIS aerosol optical depth using the back propagation neural network [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(3): 817-825.
- [27] Chang H H, Hu X F, Liu Y. Calibrating MODIS aerosol optical depth for predicting daily $PM_{2.5}$ concentrations via statistical downscaling [J]. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 2014, **24**(4): 398-404.
- [28] Lee H J, Liu Y, Coull B A, *et al.* A novel calibration approach of MODIS AOD data to predict $PM_{2.5}$ concentrations [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11** (15): 7991-8002.
- [29] Yu J, Gong W, Zhu Z M. Optimized transformation model of aerosol optical depth and visibility based on Gaussian curve [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2011, **15**(5): 1008-1023.
- [30] Zheng Y X, Zhang Q, Liu Y, *et al.* Estimating ground-level $PM_{2.5}$ concentrations over three megalopolises in China using satellite derived aerosol optical depth measurements [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **124**: 232-242.
- [31] Xie Y Y, Wang Y X, Zhang K, *et al.* Daily estimation of ground-level $PM_{2.5}$ concentrations over Beijing using 3 km resolution MODIS AOD [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(20): 12280-12288.
- [32] 陈良富, 李莘莘, 陶金花, 等. 气溶胶遥感定量反演研究与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2011. 92-99.
- [33] 杨以坤, 孙林, 韦晶, 等. MODIS C5、C6 气溶胶产品验证及区域适应性评价 [J]. *山东科技大学学报 (自然科学版)*, 2016, **35**(5): 17-27.
- Yang Y K, Sun L, Wei J, *et al.* Verification of MODIS C5 and C6 and their regional adaptability evaluation [J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2016, **35**(5): 17-27.
- [34] 孙林. 城市地区大气气溶胶遥感反演研究 [D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2006.
- [35] Chudnovsky A A, Lee H J, Kostinski A, *et al.* Prediction of daily fine particulate matter concentrations using aerosol optical depth retrievals from the geostationary operational environmental satellite (GOES) [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2012, **62**(9): 1022-1031.
- [36] Li R, Gong J H, Chen L F, *et al.* Estimating ground-level $PM_{2.5}$ using fine-resolution satellite data in the megacity of Beijing, China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2015, **15**(4): 1347-1356.
- [37] 马宗伟. 基于卫星遥感的我国 $PM_{2.5}$ 时空分布研究 [D]. 南京: 南京大学, 2015.
- [38] Tao M H, Chen L E, Su L, *et al.* Satellite observation of regional haze pollution over the North China Plain [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2012, **117** (D12): D12203.

CONTENTS

Air Pollutant Emission Inventory from Iron and Steel Industry in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and Its Impact on PM _{2.5}	DUAN Wen-jiao, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (1445)
Simulation of the Spatio-temporally Resolved PM _{2.5} Aerosol Mass Concentration over the Inland Plain of the Beijing-Tianjin-Hebei Region	HAO Jing, SUN Cheng, GUO Xing-yu, <i>et al.</i> (1455)
Effect of Relative Humidity on Particulate Matter Concentration and Visibility During Winter in Chengdu	LIU Fan, TAN Qin-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1466)
Vertical Distributional Characteristics of Inorganic Ions of PM _{2.5} at Mt. Huashan, Inland China	CAO Cong, WANG Ge-hui, WU Can, <i>et al.</i> (1473)
Analysis of the Composition of Atmospheric Fine Particles (PM _{2.5}) Produced by Burning Fireworks	XIE Rui-jia, HOU Hong-xia, CHEN Yong-shan (1484)
Chemical Composition Characteristics of PM _{2.5} Emitted by Medium and Small Capacity Coal-fired Boilers in the Yangtze River Delta Region	XU Jian, HUANG Cheng, LI Li, <i>et al.</i> (1493)
Emission Factors of Heavy Metals in Size-resolved Particles Emitted from Residential Coal Combustion	YAN Qin, KONG Shao-fei, LIU Hai-biao, <i>et al.</i> (1502)
Distribution of Oxalate in Atmospheric Aerosols and the Related Influencing Factors in Qingdao, During Winter and Spring	ZHANG Shuai, SHI Jin-hui, YAO Xiao-hong, <i>et al.</i> (1512)
Concentrations and Solubility of Trace Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao	LI Qian, SHI Jin-hui, LI Peng-zhi, <i>et al.</i> (1520)
Occurrence and Gas-particle Partitioning of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Air of Liaodong Bay	ZHANG Yu-feng, SONG Yong-gang, TIAN Jin, <i>et al.</i> (1527)
Analysis of Sources, Pollution Characteristics, and Human Exposure to Atmospheric New Halogenated Flame Retardants in Selected Areas	LI Qi-lu, YANG Kong, LI Jun, <i>et al.</i> (1537)
Contamination Characterization and Human Exposure Levels to Polybrominated Diphenyl Ethers in Indoor and Outdoor Air in Industrial Park of Suzhou City	WANG Jun-xia, GU Hai-dong, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (1544)
Effect of Air Pollution on the Cold Disease in Shanghai	YANG Si-xu, MA Yu-xia, ZHOU Jian-ding, <i>et al.</i> (1552)
Fluorescent Dissolved Organic Matter and Its Correlation with Water Quality in a Urban River: A Case Study of the Lujiang River in Beilun, Ningbo	CAO Chang-li, LIANG Meng-qi, HE Gui-ying, <i>et al.</i> (1560)
Relationship Between Landscape Pattern and Water Quality in the Ebinur Lake Region	CAO Can, ZHANG Fei, Ayinigeer·Yalikun, <i>et al.</i> (1568)
CH ₄ Fluxes During the Algal Bloom in the Pengxi River	QIN Yu, ZHANG Yu-yang, LI Zhe, <i>et al.</i> (1578)
Dynamic Variations and Sources of Nitrate During Dry Season in the Lijiang River	MIAO Ying, ZHANG Cheng, XIAO Qiong, <i>et al.</i> (1589)
Heavy Metal Pollution of the Drinking Water Sources in the Lujiang River Basin, and Related Health Risk Assessments	ZHANG Qing-hua, WEI Yong-zhu, CAO Jian-hua, <i>et al.</i> (1598)
Characteristics of Phosphorus Fractions and Phosphate Diffusion Fluxes of Sediments in Cascade Reservoirs of the Huangbai River	LIU Jia, LEI Dan, LI Qiong, <i>et al.</i> (1608)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Baiyangdian Lake	GAO Qiu-sheng, JIAO Li-xin, YANG Liu, <i>et al.</i> (1616)
Simulating the Fate of Typical Organochlorine Pesticides in the Multimedia Environment of the Pearl River Delta	GAO Zi-wen, XU Yue, YI Ru-han (1628)
Mechanisms and Efficiencies of Removal of PPCPs by Pilot River Water Bypass Treatment Process	LI Li, ZHU Bing, BAI Yao, <i>et al.</i> (1637)
Chlorination of Naproxen: Removal, Transformation and Risk Assessment	FAN Xin-xin, DU Er-deng, LI Jia-qi, <i>et al.</i> (1645)
Removing Typical Odorants in Drinking Water by Vacuum Ultraviolet Combined with Chlorine	SUN Xin, ZHANG Yi, SHI Lu-xiao, <i>et al.</i> (1654)
Degradation of Triclosan by Heat Activated Persulfate Oxidation	JIANG Meng-di, ZHANG Qing-yue, JI Yue-fei, <i>et al.</i> (1661)
Adsorption of Tetracycline on Simulated Suspended Particles in Water	XU Long-feng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i> (1668)
Characteristics and Performance of Embedded ANAMMOX Bacteria in Treating Saline Wastewater	SHAN Xiao-jing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (1677)
Enhanced Nitrogen Removal of ANAMMOX Treating Saline Wastewater With Betaine Addition	YU De-shuang, WU Guo-dong, LI Jin, <i>et al.</i> (1688)
Pilot-scale Experiment on Enrichment of Nitrifying Activated Sludge and Its Application in Enhancing a Wastewater Biological Treatment System Against Ammonia Shocking Loads	SHENG Xiao-lin, CUI Can-can, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (1697)
Effect of Step Feed on Denitrifying Phosphorus and Nitrate Removal in a Modification of the Two Sludge A ² /O-BAF System	NAN Yan-bin, PENG Yong-zhen, ZENG Li-yun, <i>et al.</i> (1704)
Achieving Partial Nitrification in a Continuous-flow Aerobic Granular Sludge Reactor at Different Temperatures Through Ratio Control	LIANG Dong-bo, BIAN Wei, KAN Rui-zhe, <i>et al.</i> (1713)
Mechanism of Action of Activated Sludge Properties in Nitrogen Removal by Endogenous Denitrification Through an Intelligent Aeration-controlled A/O Process	XU Min-yang, HU Zhan-bo, ZHANG Sui-sheng, <i>et al.</i> (1720)
Effect of Temperature on the Performance and Microbial Community Structure in an Integrated Anaerobic Fluidized-bed Membrane Bioreactor Treating Benzothiazole Wastewater	LI Yue, HU Qi, GAO Da-wen (1731)
Removal of Antibiotics During In-situ Sludge Ozone-reduction Process	WANG Lu, BEN Wei-wei, LI Yan-gang, <i>et al.</i> (1739)
Effect of Zero Valent Iron on the Horizontal Gene Transfer of Tetracycline Resistance Genes During Anaerobic Sludge Digestion Process	YANG Fan, XU Wen-li, QIAN Ya-jie, <i>et al.</i> (1748)
Effects of Environmental Factors on the Synergy of Functional Bacteria in Completely Autotrophic Granular Sludge	CHEN Xi, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (1756)
Microbiological Characteristics of a Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process	ZHANG Qian, JI Fang-ying, XU Xuan (1763)
Aerobic Denitrification and Microbial Community Shift in SBR Bioaugmented with Strains YH01 and YH02	CHEN Hai-sheng, CAO Gang, ZHANG Di, <i>et al.</i> (1773)
Performance, Sludge Characteristics, and the Microbial Community Dynamics of Bulking Sludge Under Different Nitrogen and Phosphorus Imbalances	HE Xue-meng, DING Li-li, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (1782)
Degradation Characteristics and Metabolic Pathway of a Pyrene-Degrading <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain	LI Xiang, ZHANG Xue-ying, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (1794)
Driving Factors of the Dynamics of Microbial Community in a Dam of Copper Mine Tailings	LI Cui, JING Ju-hui, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (1804)
Effects of Reclamation on Soil Nutrients and Microbial Activities in the Huixian Karst Wetland in Guilin	HUANG Ke-chao, SHEN Yu-yi, XU Guang-ping, <i>et al.</i> (1813)
Effects of the Farmland-to-Forest/Grassland Conversion Program on the Soil Bacterial Community in the Loess Hilly Region	CHEN Meng-li, ZENG Quan-chao, HUANG Yi-mei, <i>et al.</i> (1824)
Insight into the Mechanism of Feammox in the Surface Soils of a Riparian Zone	DING Bang-jing, LI Zheng-kui, ZHU Hong-jie, <i>et al.</i> (1833)
Soil Degradation-Associated Microbial Community Structure Changes in an Alpine Meadow Under Tibetan Pig Herding	ZHAN Peng-fei, XIAO De-rong, YAN Peng-fei, <i>et al.</i> (1840)
Characteristics of Iron Plaque and Its Heavy Metal Enrichment in Typical Mangrove Plants in Shenzhen Bay, China	SHEN Xiao-xue, LI Rui-li, CHAI Min-wei, <i>et al.</i> (1851)
Spatial Distribution of DDTs and PCBs in Wild Fish from Hong Kong Coastal Areas and Potential Human Health Risk Assessment	SU Yang, BAO Lian-jun, ZENG Eddy Y (1861)
Pollution Characteristics of PAHs in Soil from a Remote Mountain Wetland-Dajihu Lake, Shengnongjia	HU Tian-peng, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1872)
Migration and Transformation of Mercury in Unsubmerged Soil and Sediment at One Typical Forest Reservoir in Southwest China	SUN Tao, MA Ming, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (1880)
Accumulation of Cd and Its Risks in the Soils of the Xijiang River Drainage Basin in Guangxi	SONG Bo, YANG Zi-jie, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (1888)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on As Accumulation in Upland Red Earth and the Crops Growing on It	ZHANG Rong, YU Guang-hui, LI Ya-qing (1901)
Effects of a Tribasic Amendment on Cadmium and Arsenic Accumulation and Translocation in Rice in a Field Experiment	GU Jiao-feng, ZHOU Hang, JIA Run-yu, <i>et al.</i> (1910)
Quantitative Relationship Between Paddy Soil Properties and Cadmium Content in Rice Grains	WANG Meng-meng, HE Meng-yuan, SU De-chun (1918)
Effect of Ca-bentonite on Cu and Zn Forms in Compost and Soil, and Their Absorption by Chinese Cabbage	ZHAO Jun-chao, WANG Quan, REN Xiu-na, <i>et al.</i> (1926)
Effects of Short-term Exogenous Nitrogen and Carbon Input on Soil Respiration Under Changing Precipitation Pattern	HE Yun-long, QI Yu-chun, PENG Qin, <i>et al.</i> (1934)
Effects of Simulated Precipitation Reduction on Soil Respiration in a Soybean-Winter Wheat Rotation Cropland	WANG Zhao-hui, CHEN Shu-tao, SUN Lu, <i>et al.</i> (1943)
Seasonal Variation in Nitric Oxide Emission from an Agricultural Headwater Ditch in the Hilly Purple Soil Area and the Factors Influencing Emission	TIAN Lin-lin, REN Guang-qian, ZHU Bo (1952)
Effects of Seasonal Asymmetric Warming on Soil CO ₂ Release in Karst Region	TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i> (1962)