

E方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

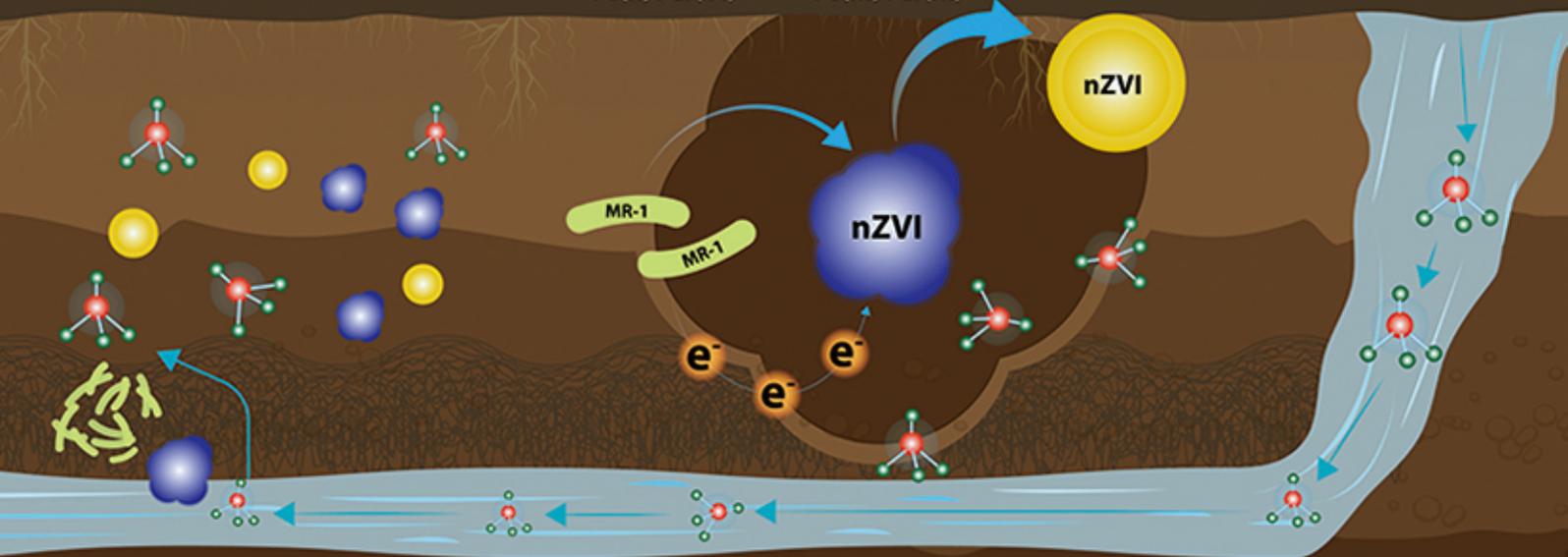
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJIANG KEXUE

电活性微生物激活生物质炭/零价铁协同钝化Cr(VI)及机制

廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年9月

第42卷 第9期
Vol.42 No.9

目次

北京市 2014~2020 年 PM_{2.5} 和 O₃ 时空分布与健康效应评估 陈菁, 彭金龙, 徐彦森 (4071)

京津冀地区高分辨率 PM_{2.5} 浓度时空变化模拟与分析 杨晓辉, 宋春杰, 范丽行, 张凌云, 魏强, 李夫星, 王丽艳, 王卫 (4083)

京津冀典型城市冬季人为源减排与气象条件对 PM_{2.5} 污染影响 邵玄逸, 王晓琦, 钟焜盛, 王瑞鹏 (4095)

太行山两侧污染物传输对横谷城市气溶胶的影响分析 王雁, 郭伟, 闫世明, 裴坤宁, 李明明, 陈二萍 (4104)

嘉善冬季碳质气溶胶变化特征及其来源解析 张颖龙, 李莉, 吴伟超, 吕升, 秦阳, 祝新明, 高晋徽, 唐倩, 夏崢 (4116)

基于机器学习算法的新冠疫情管控对河南省空气质量影响的模拟分析 魏煜, 徐起翔, 赵金帅, 张瑞芹 (4126)

新乡市大气 PM_{2.5} 载带金属元素季节分布、来源特征与健康风险 刘桓嘉, 贾梦珂, 刘永丽, 赵艺洁, 郑爱华, 刘恒志, 徐肃阳, 肖晴晴, 苏晓燕, 任言 (4140)

黄渤海气溶胶中砷的分布特征和季节变化 袁帅, 王艳, 刘汝海, 种习习, 刘晓雨, 邵龙 (4151)

天津市 2020 年冬季重污染过程气溶胶消光特性及其来源 李立伟, 肖致美, 杨宁, 蔡子颖, 闫斌峰, 元洁, 白宇, 郑乃源, 唐逸 (4158)

中国暖季近地面臭氧浓度空间格局演变及主要气象驱动因素 何超, 慕航, 杨璐, 王丹璐, 邸彦峰, 叶志祥, 易嘉慧, 柯碧钦, 田雅, 洪松 (4168)

乌海市夏季臭氧污染特征及基于过程分析的成因探究 张瑞欣, 陈强, 夏佳琦, 刘晓, 郭文凯, 李光耀, 陈梅 (4180)

珠江三角洲海岸背景区大气 VOCs 污染特征与来源 云龙, 李成柳, 张明棣, 何龙, 郭键锋 (4191)

永定河上游地表水-地下水水化学特征及其成因分析 孔晓乐, 杨永辉, 曹博, 王艺璇, 裴宏伟, 沈彦军 (4202)

汉江中下游水质时空变异与驱动因素识别 程兵芬, 张远, 夏瑞, 张楠, 张新飞 (4211)

环境持久性药物在江苏省地表水中的污染水平、分布特征及生态风险评估 赵美美, 范德玲, 古文, 汪贞, 梁梦园, 刘济宁, 张志 (4222)

柳江流域河流溶解态重金属时空分布及污染评价 张婉军, 辛存林, 于爽, 刘齐, 曾鹏 (4234)

雷州半岛地下水重金属来源解析及健康风险评价 师环环, 潘羽杰, 曾敏, 黄长生, 侯清芹, 皮鹏程, 彭红霞 (4246)

龙子祠泉域地下水金属元素分布特征及健康风险评价 谢浩, 梁永平, 李军, 邹胜章, 申豪勇, 赵春红, 王志恒 (4257)

硫氧同位素解析典型岩溶地下河流域硫酸盐季节变化特征和来源 任坤, 潘晓东, 兰干江, 彭聪, 梁嘉鹏, 曾洁 (4267)

包头南海湿地磷形态及污染源定量识别 拜亚红, 钱晨歌, 袁思静, 谢子嫣, 来凌子, 张敏, 刘颖, 苗春林 (4275)

城市新城区公园沟塘沉积物磷释放风险及影响因素分析 李如忠, 宋敏, 杨继伟 (4287)

水力停留时间对潜流湿地净化效果影响及脱氮途径解析 齐冉, 张灵, 杨帆, 颜昌宙 (4296)

锰砂人工湿地对污染物的强化去除 马权, 王东麟, 林慧, 柏耀辉 (4304)

4 种典型沉水植物对去除磷污染底泥的应用效果 陶理, 王沛芳, 袁秋生, 王洵, 胡斌 (4311)

输水情景下白洋淀好氧反硝化菌群落对溶解性有机物的响应 周石磊, 张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 于明会, 姚波, 崔建升, 罗晓 (4319)

木屑生物炭在雨水径流中的氮磷淋出和吸附特性 孟依柯, 王媛, 汪传跃 (4332)

海州湾潮间带沙蚕对沉积物微塑料的指示作用 王嘉旋, 宋可心, 孙一鑫, 方涛, 李瑾祯, 张涛, 冯志华 (4341)

纳米二氧化钛与镉对斜生栅藻 (*Scenedesmus obliquus*) 生长的拮抗效应及其作用机制 王璞, 赵丽红, 朱小山 (4350)

螺旋霉素废水处理过程中菌群结构、水质特征及抗性基因之间关系分析 武彩云, 李慧莉, 覃彩霞, 佟娟, 魏源送 (4358)

螯合铁对厌氧铁氨氧化脱氮效能及微生物群落的影响 廖宏燕, 宋诚, 万柳杨, 时绍鹏, 王兴祖 (4366)

溶解氧对低碳源城市污水处理系统脱氮性能与微生物群落的影响 池玉蕾, 石炬, 任童, 王晓昌, 金鹏康 (4374)

间歇梯度曝气下缩短 SRT 强化短程 SNEDPR 系统脱氮除磷 张玉君, 李冬, 王歆鑫, 张杰 (4383)

生物膜系统中部分反硝化实现特性 于莉芳, 张兴秀, 张琼, 王晓玉, 彭党聪, 张日霞 (4390)

厌氧推流进水对反硝化除磷好氧颗粒污泥系统的影响 李冬, 曹思雨, 王琪, 张杰 (4399)

不同好氧/缺氧时长联合分区排泥优化生活污水短程硝化反硝化除磷颗粒系统运行 王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (4406)

中国西南地区金属矿开采对矿区土壤重金属影响的 Meta 分析 张健琳, 瞿明凯, 陈剑, 杨兰芳, 赵永存, 黄标 (4414)

青藏高原典型流域土壤重金属分布特征及其生态风险评价 杜昊霖, 王莺, 王劲松, 姚玉璧, 周悦, 刘晓云, 芦亚玲 (4422)

电子垃圾拆解区土壤-农作物系统中镉元素的空间分布特征及其风险评价 张璐瑶, 赵科理, 傅伟军 (4432)

改性生物炭特性表征及对冶炼厂周边农田土壤铜镉形态的影响 王鑫宇, 孟海波, 沈玉君, 王佳锐, 张曦, 丁京涛, 周海宾, 李春燕, 程琼仪 (4441)

组配改良剂联合锌肥对土壤-水稻系统镉迁移转运的影响 周坤华, 周航, 王子钰, 刘雅, 刘佳伟, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4452)

不同结构改良剂对铜镉污染土壤水稻生长和重金属吸收的影响 魏玮, 李平, 郎漫 (4462)

1 株草螺属植物内生菌 R-13 的分离鉴定及对龙葵吸收土壤镉的影响 鹿杰, 刘月敏, 黄永春, 王常荣, 刘斌, 刘仲齐, 黄益宗, 黄雁飞, 张长波 (4471)

不同地区土壤古菌群落对重金属污染响应 李雨桐, 杨杉, 张艺, 范例, 刘坤, 张晟 (4481)

高通量测序分析黄土高原退耕还林区土壤细菌群落特征 刘晓华, 魏天兴 (4489)

餐厨垃圾生物发酵液对黄土丘陵区土壤质量的影响试验 邵立明, 任俊达, 吕凡, 章骅, 何品晶 (4500)

秦岭不同海拔土壤团聚体稳定性及其与土壤酶活性的耦合关系 马震菲, 胡汗, 李益, 郭鑫鑫, 任成杰, 赵发珠 (4510)

电活性微生物激活生物质炭/零价铁协同钝化 Cr(VI) 及机制 廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚 (4520)

降水变化对荒漠草原土壤呼吸的影响 蒿廉伊, 张丽华, 谢忠奎, 赵锐锋, 王军锋, 郭亚飞, 高江平 (4527)

氮肥分施次数及硝化抑制剂对盆栽玉米 N₂O 排放的影响 符佩娇, 吉恒宽, 何秋香, 汤水荣, 王鸿浩, 伍延正, 孟磊 (4538)

负载 NH₄⁺-N 生物炭对土壤 N₂O-N 排放和 NH₃-N 挥发的影响 马晓刚, 何建桥, 陈玉蓝, 李德天, 刘川, 董建新, 郑学博 (4548)

微塑料添加对橘园土壤有机碳矿化的影响 张秀玲, 鄢紫薇, 王峰, 王玺, 徐晗, 胡荣桂, 严昶, 林杉 (4558)

1985~2019 年中国全氟辛酸磺酰基化合物的动态物质流分析 王佳钰, 陈景文, 唐伟豪, 崔蕴晗, 王中钰, 宋国宝, 陈伟强 (4566)

《环境科学》征订启事(4201) 《环境科学》征稿简则(4340) 信息(4382, 4537, 4565)

京津冀地区高分辨率 PM_{2.5} 浓度时空变化模拟与分析

杨晓辉^{1,2}, 宋春杰^{1,2}, 范丽行^{1,2}, 张凌云^{1,2}, 魏强^{1,2}, 李夫星^{1,3}, 王丽艳^{1,2}, 王卫^{1,2*}

(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; 3. 河北省环境变化遥感识别技术创新中心, 石家庄 050024)

摘要: 为了全覆盖、高分辨率和高精度识别京津冀地区大气 PM_{2.5} 质量浓度时空变化, 选取多角度大气校正算法遥感反演的 1 km AOD 为主要预测因子, 多种气象要素和土地利用要素为辅助预测因子, 构建了混合效应模型 + 地理加权回归模型的两阶段统计模型, 并针对京津冀地区 PM_{2.5} 污染较严重的特点, 模型中引入了 AOD² 等独特预测因子. 通过上述两阶段模型定量预测了研究区 2017 年 1 km² 空间分辨率的每日 PM_{2.5} 质量浓度. 结果表明, 模型交叉验证的决定系数 R^2 为 0.94, 斜率为 0.95, 均方根预测误差为 13.14 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 在前人基础上预测精度进一步提升, 可用于 PM_{2.5} 浓度时空变化预测与分析. 2017 年, 京津冀地区 PM_{2.5} 浓度年均值为 44.96 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 年均值范围在 0 ~ 89.89 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间. PM_{2.5} 浓度时空变化差异性明显, 整体上呈现“平原西南部浓度高、平原东北部浓度中等和山区高原浓度低”的空间分布格局以及“冬季浓度高、夏季浓度低和春秋过渡”的季节变化特点. 模型预测结果的高时空分辨率可以支持流行病学研究在较小区域的暴露评估和识别小尺度污染源的时空变化, 分析发现在大气污染防治行动计划实施以来, 污染较严重的冀中南山麓平原区可能出现了重要污染源的空间变化. 模型预测与分析结果可以为京津冀大气污染防治提供科学支撑.

关键词: MAIAC AOD; PM_{2.5}; 线性混合效应模型; 地理加权回归模型; 京津冀地区

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)09-4083-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202012197

High-resolution Estimation of Spatio-temporal Variation in PM_{2.5} Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region

YANG Xiao-hui^{1,2}, SONG Chun-jie^{1,2}, FAN Li-hang^{1,2}, ZHANG Ling-yun^{1,2}, WEI Qiang^{1,2}, LI Fu-xing^{1,3}, WANG Li-yan^{1,2}, WANG Wei^{1,2*}

(1. College of Resources and Environmental Science, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China; 2. Hebei Laboratory of Environmental Evolution and Ecological Construction, Shijiazhuang 050024, China; 3. Hebei Technology Innovation Center for Remote Sensing Identification of Environmental Change, Shijiazhuang 050024, China)

Abstract: This study developed a two-stage statistical model (linear mixed effect (LME) model + geographical weight regression (GWR) model) to determine the spatio-temporal variation of PM_{2.5} concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region with full-coverage, high resolution, and high accuracy. The model employs multi-angle implementation of atmospheric correction aerosol optical depth (MAIAC AOD) data, with a 1 km spatial resolution, as the main predictor and meteorological data/land-use data as the auxiliary predictors. To determine the characteristics of heavy PM_{2.5} pollution in the BTH region, unique predictors such as AOD² were also introduced into the two-stage model. The two-stage model was used to estimate the daily PM_{2.5} concentrations with a 1 km resolution. After being cross-validated against ground observations, the R^2 of PM_{2.5} was found to be 0.94, with a slope value of 0.95 and RMSPE value of 13.14 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Compared to previous studies such as LME, the two-stage model has much higher accuracy, suitable for estimating PM_{2.5} concentrations. The PM_{2.5} concentration in the BTH region ranged from 0 to 89.89 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ in 2017, with a mean value of 44.96 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. The spatio-temporal variability of PM_{2.5} over the BTH region was significant, exhibiting high values over the southwestern plain, moderate values over the northeastern plain, and low values over the mountainous plateau. In terms of seasonal variation, PM_{2.5} concentrations were high in winter, low in summer, and moderate in spring and autumn. The estimated PM_{2.5} concentrations, with high spatio-temporal resolution, are useful for exposure assessments in epidemiological studies and identifying the spatio-temporal variation of pollution sources at a fine spatial scale. The results show that the locations of vital pollution sources over the severely polluted south-central Hebei piedmont plain may have changed since the implementation of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan. This study could provide a scientific basis for the prevention and control of air pollution in the BTH region.

Key words: MAIAC AOD; PM_{2.5}; linear mixed effect model; geographical weight regression model; Beijing-Tianjin-Hebei region

流行病学研究表明短期或长期暴露于高浓度的 PM_{2.5} 环境中会导致呼吸道、心血管和癌症的发病率和死亡率增加^[1~3], 高分辨率 PM_{2.5} 浓度时空变化的精准预测能够直接为上述污染健康影响评价提供基础支撑^[4~7]; 同时, 亦能够为高精度追溯污染源及其排放强度的时空分布提供科学支撑^[8]. 因此,

PM_{2.5} 浓度时空变化的精准预测研究长期以来始终

收稿日期: 2020-12-21; 修订日期: 2021-03-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471091); 河北省自然科学基金青年项目(D2019205027)

作者简介: 杨晓辉(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境演变与全球变化, E-mail: 1131066837@qq.com

* 通信作者, E-mail: wangwei@hebtu.edu.cn

是大气污染基础研究领域的热点。

卫星遥感反演的气溶胶光学厚度 (aerosol optical depth, AOD) 与近地面 $PM_{2.5}$ 质量浓度之间存在紧密但复杂的相关关系, 使得 AOD 成为 $PM_{2.5}$ 浓度非常重要的代用指标, 目前已被广泛应用于近地面 $PM_{2.5}$ 浓度预测。AOD 广泛的空间覆盖范围和对地球表面及大气的重复观测, 可以很好地填补由于地面监测网络站点稀疏而留下的数据空白^[9~11]。许多学者开发了多种统计模型建立 $PM_{2.5}$ -AOD 的相关关系, 早期统计模型 (例如土地利用回归模型) 既没有考虑到影响两者相关关系的预测因子 (如相对湿度和大气边界层高度) 具有时间变化特性, 也没有考虑到两者关系在空间上的非恒定性^[12,13]。在高级统计模型方面, 2011 年 Lee 等^[14] 在假设 $PM_{2.5}$ -AOD 间影响因子空间差异性很小的前提下, 构建了考虑时间随机效应的混合效应 (linear mixed effect, LME) 模型, 获得了较高精度的预测结果。鉴于在大区域范围内 AOD 等影响因子存在着空间差异性, Kloog 等^[15] 提出了加入空间随机效应来校正空间差异性的时空混合效应模型, Hu 等^[16,17] 提出了在混合效应模型的基础上加入地理加权回归 (geographical weighted regression, GWR) 模型来校正空间差异性的两阶段统计模型, 进一步推进了统计模型的预测精度和稳健性。近年来, 人工智能模型也被广泛应用于近地面 $PM_{2.5}$ 浓度预测中, 该类模型可以较好地解释 $PM_{2.5}$ -AOD 之间的非线性关系, 较为流行的随机森林^[18]、深度学习^[19] 和反向人工神经网络^[20] 等模型在模拟 $PM_{2.5}$ -AOD 的时空变化上表现出较优异的性能, 但模型对 $PM_{2.5}$ 本身的物理和地理特性顾及不足^[21]。

混合效应模型中除 AOD 这一主预测变量外, 还包括了辅助预测变量, 主要分为时间预测变量群和空间预测变量群两类, 前者包括气温、降水、风速、风向、相对湿度、气象能见度、气压和边界层高度等, 后者包括建设用地密度、道路密度、植被覆盖度、人口密度、耕地密度、污染源排放强度和海拔高度等, 此外, 还出现了一些交互项和 AOD 的二次项等预测变量。在不同区域模型中上述预测变量组合存在较明显差异^[14~21], 其中, AOD 的二次项等被认为在 $PM_{2.5}$ 污染较严重的区域能够纠正 $PM_{2.5}$ 浓度预测偏差^[22,23]。

AOD 产品的空间分辨率和覆盖度也是影响模拟精度的重要因素。以往用于预测 $PM_{2.5}$ 浓度的 AOD 产品大多来自于中分辨率成像光谱辐射计 (MODIS)、多角度成像光谱辐射计 (MISR) 等传感器。其中以 MODIS 10 km 分辨率和 MISR 17.6 km

分辨率的 AOD 产品因其质量保障、持续时间长而被频繁使用^[24~26]。然而流行病学研究中对较小区域 $PM_{2.5}$ 浓度的暴露评估和中小尺度污染源识别, 许多地理单位的空间分辨率远远小于 MODIS 和 MISR 的空间分辨率^[17]。2018 年, Lyapustin 等^[27] 开发了一种新的多角度大气校正算法 (multi-angle implementation of atmospheric correction, MAIAC), 并被用于计算 1 km 空间分辨率的 AOD。北美和南亚等多地实验研究证实了 MAIAC AOD 与 $PM_{2.5}$ 浓度水平高度相关^[28~32]。Choi 等^[26] 对多种气溶胶产品在东亚陆地上的表现进行比较, 发现 MAIAC AOD 与 AERONET AOD 的相关系数 R 达到 0.93, 预期误差为 0.68, 在所有遥感反演气溶胶产品中表现最好。许多研究也证明 MAIAC AOD 在中国表现性能良好^[25,33~35], 如 MAIAC 产品的精度和时空完整性均优于 MODIS DT 和 DB 产品^[36,37]。

目前, 在中国区域使用 MAIAC AOD 产品进行 $PM_{2.5}$ 浓度预测的研究还相对较少, 其中, 使用 MAIAC AOD 产品结合两阶段统计模型预测 $PM_{2.5}$ 浓度的研究还没有报道。因此本文基于融合后的 MAIAC AOD 数据及气象和土地利用数据, 发展了一个两阶段统计模型, 在 1 km 的空间分辨率下预测京津冀地区 2017 年逐日 $PM_{2.5}$ 浓度的时空分布, 以期为该区域大气污染防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

京津冀地区位于中国北部, 包括北京和天津这 2 个直辖市以及河北省的 11 个地级市 (图 1)。40 年来, 该区域工业化和城市化发展迅速, 污染物排放强度较大^[18]。此外, 京津冀地区冬季的盛行风大多来自偏西或偏北方向, 而燕山山脉和太行山脉对盛行风起到了阻挡和削弱作用, 大气污染物质不易扩散, 使其成为中国大气污染特别是冬季污染最为严重的地区之一^[38]。

1.2 数据资料

1.2.1 近地面 $PM_{2.5}$ 监测数据

2017 年日平均 $PM_{2.5}$ 浓度数据来源于全国城市空气质量实时发布平台 (<http://106.37.208.233:20035/>)。本文采用了研究区 79 个国控监测站点数据 (图 1), 处理过程中将不在监测值范围内 (即 $< 2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $> 500 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 的 $PM_{2.5}$ 浓度数据剔除。由于地理加权模型是根据点之间的距离来预测 $PM_{2.5}$ 浓度, 为了不改变 $PM_{2.5}$ 与各预测因子之间的关系, 少数距离接近的监测点予以保留^[24]。

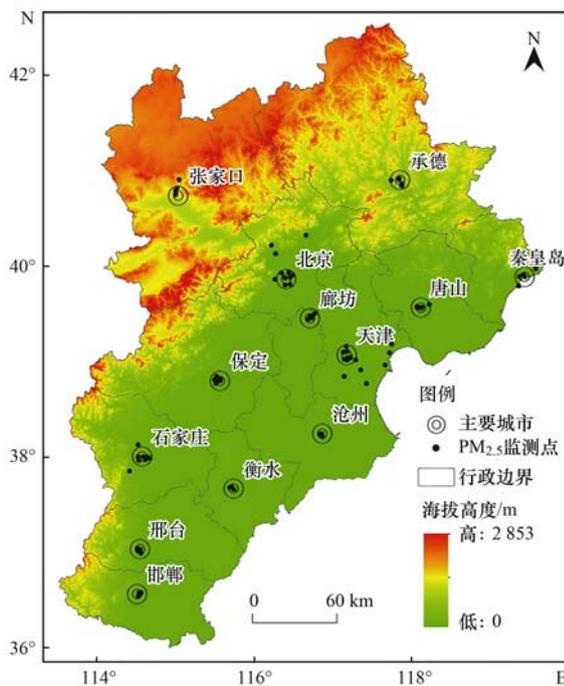


图1 研究区地理位置及空气质量监测站点分布

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

1.2.2 MAIAC AOD

MAIAC AOD 产品来源于 NASA 气候模拟中心 (<https://portal.nccs.nasa.gov/datashare/maiac/DataRelease/>). 本文采用了包括 h03v01、h03v02 和 h04v01 这 3 个条带数据内的 2017 年京津冀地区 AOD 数据. 为提高空间覆盖率, 本文采用 Terra 和 Aqua 卫星融合后的 MAIAC AOD 数据. 首先, 采用最小二乘法对 Terra、Aqua 逐月数据构建线性回归模型, 继而以此预测缺失的 AOD 值, 再将 Terra 和 Aqua 两星 AOD 值进行平均融合, 该平均值能更好地代表卫星过境时间 10:30 和 13:30 AOD 的平均状况^[17].

1.2.3 气象数据

采用的 2017 年气象数据包括行星边界层高度 (planetary boundary layer height, PBLH)、风速、气温、相对湿度、地面气压和降水量等因子. 其中, PBLH 原始数据来源于第 5 版的戈达德地球观测系统数据同化系统的网格化气象数据产品 (<ftp://rain.ucis.dal.ca/ctm/>), 水平空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.3125^\circ$ 的小时数据; 风速、气温、空气比湿、地面气压和降水量等原始气象数据来源于国家青藏高原数据中心 (<http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/>)^[39,40], 水平空间分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的日平均值. 为了进行数据集成, PBLH 数据选取卫星过境两个时间段数据的平均值代表其日均情况, 所有气象数据采用双线性内插法重采样成与 MAIAC AOD

相同分辨率的栅格数据.

1.2.4 土地利用数据

土地利用数据来源于地理国情监测云平台 (<http://www.dsac.cn/DataProduct/>), 采用空间分辨率为 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ 的 2015 年京津冀土地利用现状图来代表 2017 年的土地利用状况, 提取了森林覆盖率和建筑用地比率两个参数作为土地利用因子加入混合效应模型中, 在 ArcGIS 10.3 中主要利用区域统计工具来处理.

1.3 研究方法

1.3.1 模型构建

本文采用一种两阶段统计模型对 PM_{2.5}-AOD 关系的时空变化进行模拟. 第一阶段模型是表征 PM_{2.5} 与 MAIAC AOD 及气象因子、土地利用因子之间关系的混合效应模型. 模型中除了固定效应外, 关键是加入了时间随机效应, 通过随机效应来体现组内数据的相关性和不同组数据的异质性^[41], 实现对 PM_{2.5}-AOD 关系在时间维的局部校正. 在预测变量选择上, 除选择常规的时间与空间变量外, 针对研究区污染较严重的特点, 增加了 AOD² 和 PBLH 与 AOD 的交互项作为待选变量. 经过变量选择和多重共线性诊断最终确定模型如下:

$$\begin{aligned} \text{PM}_{2.5st} = & (\alpha + u_t) + (\beta_1 + v_t) \text{AOD}_{st} + \\ & (\beta_2 + k_t) \text{AOD}_{st}^2 + (\beta_3 + m_t) \text{PBLH}_{st} + \\ & (\beta_4 + h_t) \text{wind}_{st} + (\beta_5 + w_t) \text{temp}_{st} + \\ & (\beta_6 + e_t) \text{RH}_{st} + (\beta_7 + n_t) \text{prec}_{st} + \\ & (\beta_8 + p_t) \text{pres}_{st} + \beta_9 \times \text{PBLH}_{st} \times \\ & \text{AOD}_{st} + \beta_{10} \times \text{forest}_s + \beta_{11} \times \text{urban}_s + \varepsilon_{st} \\ & (u_t, v_t, k_t, m_t, h_t, w_t, e_t, n_t, p_t) \sim N(0, \Sigma), \\ & \varepsilon_{st} \sim N(0, \sigma^2) \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $\text{PM}_{2.5st}$ 表示第 s 个地面监测点第 t 日的 PM_{2.5} 浓度监测值; AOD_{st} 表示相应的第 s 个地面监测点所在网格在第 t 日的气溶胶光学厚度值; AOD_{st}^2 表示第 s 个地面监测点所在网格在第 t 日的气溶胶光学厚度的平方值; PBLH_{st} 、 wind_{st} 、 temp_{st} 、 RH_{st} 、 prec_{st} 和 pres_{st} 分别表示第 s 个地面监测点所在网格在第 t 日相应的行星边界层高度、近地面风速、近地面气温、近地面相对湿度、降水量和近地面气压; $\text{PBLH}_{st} \times \text{AOD}_{st}$ 表示第 s 个地面监测点所在网格在第 t 日的边界层高度和气溶胶光学厚度的乘积; forest_s 和 urban_s 表示第 s 个地面监测点所在网格森林覆盖率和建设用地比率; α 和 u_t 分别为模型的固定截距和随机截距; $\beta_1 \sim \beta_{11}$ 分别表示各自变量参数的固定效应斜率; v_t 、 k_t 、 m_t 、 h_t 、 w_t 、 e_t 、 n_t 和 p_t 为 AOD 和各气象变量的随机效应斜率; ε_{st} 为模型第 s 个地面监测点在第 t 日的随机误差, 服从独立等方差多元正

态分布;各随机效应亦服从多元正态分布,其中, Σ 为随机效应的无结构方差-协方差矩阵.

在较大空间区域内,PM_{2.5}-AOD的关系存在空间异质性,为此,在混合效应模型基础上,引入第二阶段模型即地理加权模型,实现对PM_{2.5}-AOD关系空间异质性的校正^[17,42],具体做法是在混合效应模型中嵌套地理加权模型,也就是将混合效应模型预测得到的PM_{2.5}浓度每日残差值(预测值-监测值)与MAIAC AOD进行地理加权模型拟合.GWR模型的核心是空间权重矩阵,它是通过选取不同的空间权重函数来表达对数据间空间关系的不同认识.具体的权重计算使用的核带宽函数采用近似高斯曲线的bi-square函数.由于PM_{2.5}监测站点空间分布不均,本研究选择自适应带宽,最优带宽具有最小AICc值^[43,44].

地理加权模型具体表达式如下:

$$\text{PM}_{2.5_residual_{st}} = \beta_0(u_s, v_s) + \beta_1(u_s, v_s) \text{AOD}_{st} + \varepsilon_{st}$$

$$\varepsilon_{st} \sim N(0, \sigma^2) \quad (2)$$

式中,PM_{2.5_residual_{st}}表示混合效应模型中地面监测站点s第t日的残差值,AOD_{st}表示站点s第t日的MAIAC AOD值,(u_s, v_s)表示监测站点s的空间坐标,β₀(u_s, v_s)和β₁(u_s, v_s)分别表示监测站点处的回归截距和回归斜率,随机误差项ε_{st}服从独立等方差正态分布.

最后,混合效应模型预测结果叠加地理加权模型预测结果,得到研究区近地面PM_{2.5}浓度预测结果.

1.3.2 模型诊断与验证

模型诊断是提高其稳健性的基本途径,主要包括:对自变量多重共线性的诊断,对模型假设条件的诊断包括对混合效应模型随机误差项正态分布和等方差的诊断、对两阶段模型随机误差项正态分布和等方差的诊断等.本文采用方差膨胀因子法(VIF)进行自变量多重共线性的诊断,采用频率直方图法进行混合效应模型和两阶段模型随机误差项正态分布的诊断,采用学生化残差的残差图法进行混合效应模型和两阶段模型的随机误差项等方差特性的诊断^[45].

模型验证是评估模型预测精度的基本方法,本文为了消除预测模型的过拟合问题,采用十折交叉验证(ten-cross validation)方法获得站点PM_{2.5}浓度预测值,以站点观测值为自变量、预测值为因变量建立线性回归模型.采用该模型决定系数(R²)、模型斜率、均方根预测误差(RSMPE)和相对预测误差(RPE)等指标来评估模型的预测精度.其中,R²是预测值与观测值的拟合程度,R²越接近于1,表明模型的预测精度越高;斜率用来解释模型的预测偏

差,斜率越接近于1,说明模型预测偏差越小;RSMPE反映模型预测的绝对误差,RPE反映模型预测的相对误差,二者均为数值越小,则模型预测精度越高.其中,RPE由于消除了均值大小带来的差异,可以用于不同区域的比较.

RSMPE和RPE指标计算公式如下:

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

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

式中,y_{model,i}表示模型中站点PM_{2.5}浓度预测值;y_{obs,i}表示站点PM_{2.5}浓度观测值;n为建模数据的样本总数;ȳ为PM_{2.5}浓度观测值的均值.

2 结果与分析

2.1 描述性统计

2017年京津冀地区PM_{2.5}地面监测站点有效观测数据为28 275个,对应的AOD有效观测数据为17 288条,根据建模要求,每天匹配数据记录少于3对的数据被剔除,最后得到覆盖323天的16 961条有效建模数据记录.

表1为拟合模型各变量描述性统计.其中,2017年京津冀地区建模PM_{2.5}浓度范围为3~499 μg·m⁻³,标准差为53.53 μg·m⁻³,表明研究区内污染程度时空差异较大.年均PM_{2.5}浓度值为61.02 μg·m⁻³,远超过国家环境空气质量(GB 3095-2012)二级标准的限值(35 μg·m⁻³)以及世界卫生组织空气质量准则IT-1的标准值^[46],说明京津冀地区PM_{2.5}污染仍然较为严重.MAIAC AOD年均值为0.49,标准差为0.52,AOD的时空差异同样较大.

表1 2017年建模数据各参数的描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of each parameter of the modeling data from 2017

参数	均值	最小值	最大值	标准差
PM _{2.5} /μg·m ⁻³	61.02	3	499	53.53
AOD	0.49	0.003	3.27	0.52
边界层高度/m	394.50	61.96	2 554.72	329.17
风速/m·s ⁻¹	2.49	0.05	12.04	1.28
气温/K	285.28	257.62	306.50	11.57
相对湿度	0.46	0.04	1	0.18
地面气压/hPa	1 000.99	866.01	1 040.90	33.44
降水量/mm	0.39	0	99.12	2.74
森林覆盖率	0.05	0	0.68	0.14
建筑用地比率	0.55	0	0.79	0.29

2.2 模型拟合与诊断

首先采用逐步回归方法对模型进行变量选择,然后对初步选取的独立自变量进行多重共线性检

验,当方差膨胀因子 $VIF > 10$ 且容忍度 $TV < 0.1$ 时,则存在多重共线性. 结果表明(表 2),参与模型的所有独立自变量均为 $VIF < 10$ 和 $TV > 0.1$,表明独立自变量间不存在共线性问题.

表 2 多重共线性检验结果
Table 2 Multicollinearity test results

独立自变量	TV	VIF
AOD	0.66	1.50
边界层高度	0.75	1.32
风速	0.84	1.18
气温	0.78	1.27
相对湿度	0.57	1.75
地面气压	0.66	1.50
降水量	0.94	1.05
森林覆盖率	0.67	1.48
建筑用地比率	0.53	1.87

模型拟合结果的随机误差项诊断表明(图 2),第一阶段混合效应模型[图 2(a)]和两阶段模型[图 2(b)]的随机误差项频率直方图均符合正态分布的要求;混合效应模型[图 2(c)]和两阶段模型[图 2(d)]的随机误差项学生化残差散点图在 $[-2, 2]$ 区间的样本数比例分别达到了 94.8% 和 95.8%,并且散点基本呈现随机分布,均符合等方差的要求. 上述诊断结果保证了模型预测的稳健性.

表 3 为混合效应模型自变量优选后固定效应的解. 模型的固定效应(固定截距和固定斜率)表示全年内自变量对 PM_{2.5} 浓度的固定影响,其中, MAIAC AOD 固定斜率为 86.981,说明 PM_{2.5}-AOD 之间呈正相关; AOD² 固定斜率为 -21.087,与 PM_{2.5} 浓度呈负相关,可能反映了 PM_{2.5}-AOD 关系的跨季节对比; PBLH 固定斜率为 -0.036,与 PM_{2.5} 浓度呈现负

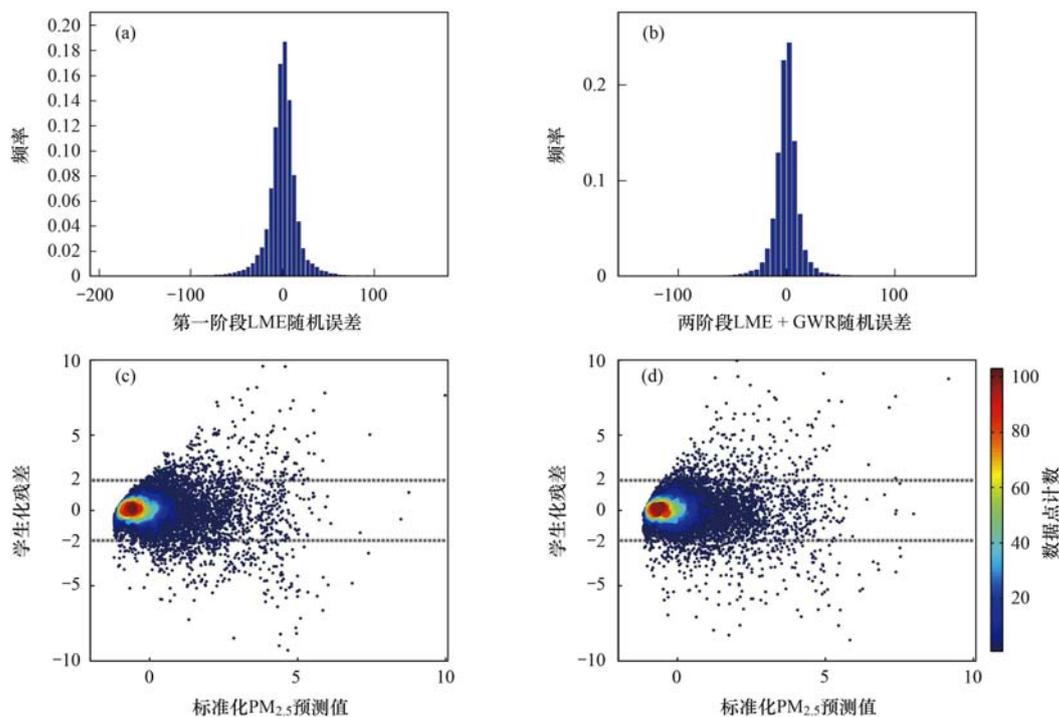


图 2 模型拟合结果的随机误差项诊断

Fig. 2 Random error term diagnosis of model fitting results

相关性; PBLH \times AOD 的固定斜率为 -0.039,与 PM_{2.5} 浓度呈负相关;温度的固定斜率为 2.102,与 PM_{2.5} 浓度呈正相关;相对湿度固定斜率为 38.745,与 PM_{2.5} 浓度呈明显的正相关;地面气压的固定斜率为 0.000 1,说明地面气压越高越有利于 PM_{2.5} 积累;风速固定斜率为 -0.798,与 PM_{2.5} 浓度呈负相关,风速越大越有利于大气污染物的扩散;降水量的固定斜率为 -1.548,与 PM_{2.5} 浓度呈负相关,说明降水对 PM_{2.5} 有重要清除作用;森林覆盖率的固定斜率为 -12.972,与 PM_{2.5} 浓度呈负相关,既反映了森林对 PM_{2.5} 的清除作用也间接反映了人类活动影

响微弱;建设用地比率的固定斜率为 -0.943,可能与建模数据主要分布在城市建成区有关.

对全年中拥有有效数据的 323 d 每日运行地理加权模型并进行 F 分布逼近法检验,结果表明(表 4), P 值 < 0.05 的次数比例达到 99%,模型参数估计的可靠性高.

2.3 模型拟合结果的交叉验证

模型验证是评价模型预测精度的基本途径. 图 3 为混合效应模型和混合效应模型 + 地理加权模型拟合及交叉验证结果. 结果表明,单一 LME 模型拟合及交叉验证后的斜率分别为 0.89 和 0.88,决定

表3 混合效应模型固定效应值

自变量	估计值	<i>t</i> 检验值	<i>P</i> 值
截距	-596.859	15.097	0.000
AOD	86.981	67.995	0.000
AOD ²	-21.087	-43.867	0.000
边界层高度	-0.036	5.748	0.000
边界层高度 × AOD	-0.039	-18.563	0.000
气温	2.102	-39.376	0.000
相对湿度	38.745	-5.308	0.000
风速	-0.798	-10.170	0.000
降水量	-1.548	-8.685	0.000
地面气压	0.0001	12.915	0.000
森林覆盖率	-12.972	-3.973	0.000
建筑用地比率	-0.943	2.131	0.033

表4 地理加权模型 *F* 分布逼近法检验结果的 *P* 值分布

参数	最大值	最小值	平均值	<i>P</i> < 0.05 的次数 百分比/%
<i>P</i> 值	0.06217	0.00000	0.00023	99

系数 R^2 分别为 0.91 和 0.88, RMSPE 和 RPE 分别

为 $16.49 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $18.28 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 表现出相当高的预测精度. GWR 模型加入后, 模型拟合及交叉验证斜率分别提高到 0.96 和 0.95, 表明 LME + GWR 模型的预测偏差较小, 能够更好克服“高值低估”问题; 并且拟合精度显著提升, 决定系数 R^2 分别提升到 0.96 和 0.94, 说明两阶段模型可以解释近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度 94% 以上的时空变化规律; 同时 RMSPE 和 RPE 也有明显降低, RMSPE 分别减小到 $10.33 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $13.14 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, RPE 分别减小到 16.91% 和 21.42%. 上述结果表明两阶段模型深刻揭示了 $\text{PM}_{2.5}$ -AOD 关系的时空异质性.

图 4 为基于两阶段模型交叉验证后, $\text{PM}_{2.5}$ 监测站点在月、季和年尺度上观测值和预测值的拟合状况. 与日值预测结果相比[图 3(d)], 随着时间尺度的增大, 模型的 RMSPE 和 RPE 逐渐减小, R^2 增大(年均值预测因为样本量偏少, 稍小于月均值和季均值预测); RMSPE 分别为 4.50、3.14 和 2.32 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; RPE 分别为 7.43%、5.25% 和 3.78%; R^2 分别为 0.97、0.97 和 0.96. 上述结果表明, 两阶段模型对月值以上尺度的预测精度又有显著提升.

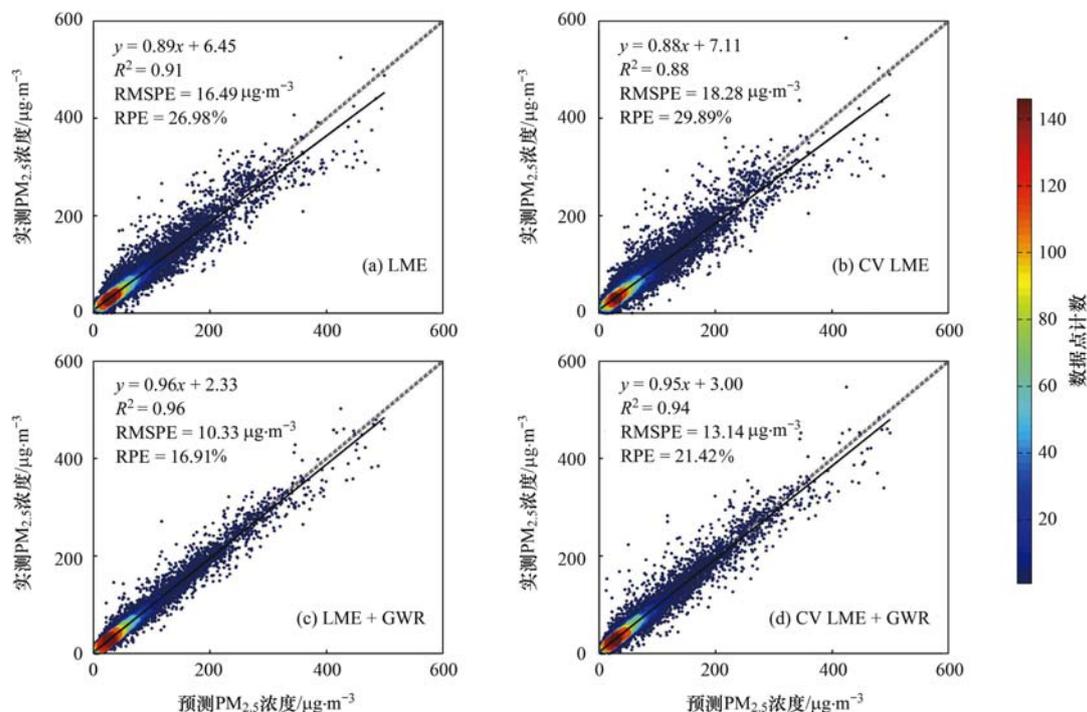


图3 2017年 LME 模型和 LME + GWR 模型交叉验证结果对比

Fig. 3 Comparison of cross-validation results between LME model and LME + GWR model for 2017

2.4 京津冀全域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度时空分布

基于两阶段模型预测出京津冀地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度年均分布状况(图 5). 从中可知, 2017 年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度年均值范围在 $0 \sim 89.89 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间, 全域年均值为 $44.96 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. $\text{PM}_{2.5}$ 浓度低值区分布在北部燕山山区与坝上高原和西部太行山区, 这些区域人类活

动较弱, 污染物排放强度小, 主要包括张家口、承德、北京西北部和秦皇岛北部等. 平原东北部的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度为中值区, 推测原因是滨海部分主要得益于大气扩散条件好, 内陆部分以北京为代表主要得益于产业结构高端化带来的污染物排放强度相对较小. $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的高值区主要分布在平原西南部, 主要包

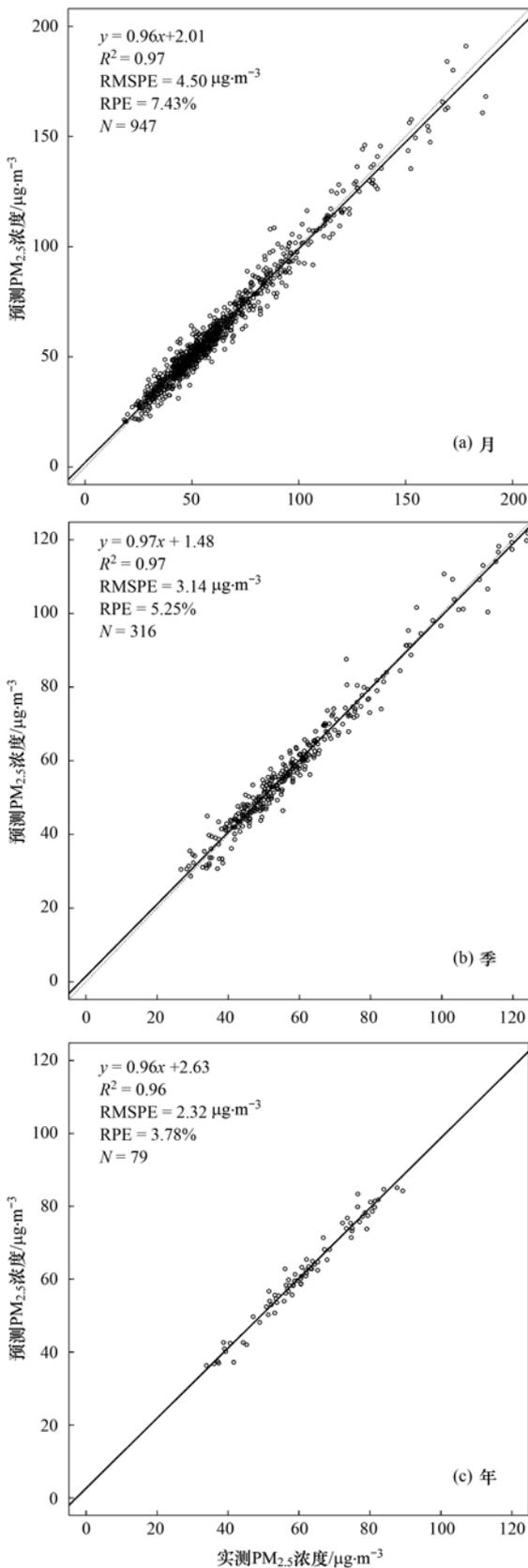


图4 基于两阶段模型交叉验证结果的月、季和年时间尺度上站点的观测值和预测值拟合

Fig. 4 Comparison of predicted and observed PM_{2.5} concentrations, at monthly, seasonal, and yearly scales based on the results of cross-validation in the two-stage model

括石家庄、保定、邢台和邯郸等, PM_{2.5} 年均值高于 $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 推测原因主要是人口众多、交通网和工业企业密集导致污染物排放强度较大,同时处在太行山麓半封闭地形中,冬季大气扩散条件差.

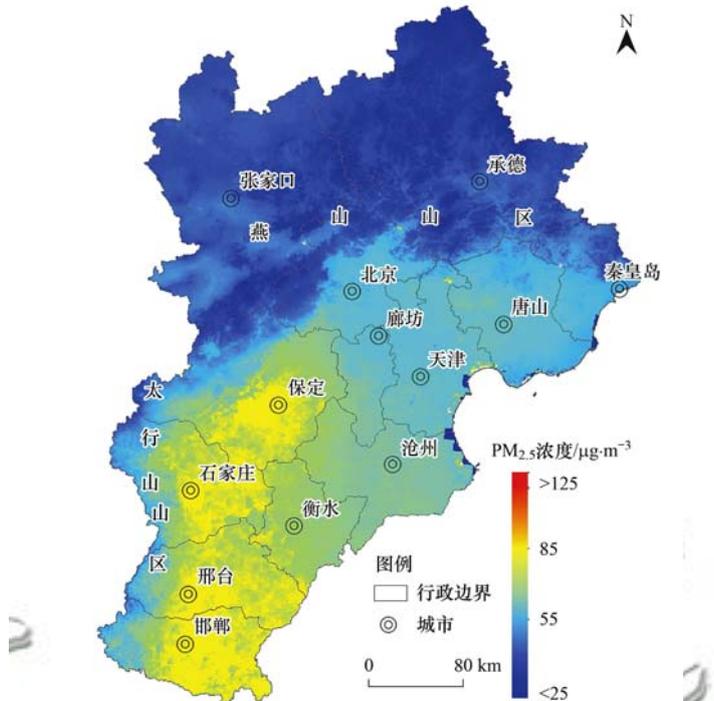


图5 2017年 PM_{2.5} 浓度年均值分布

Fig. 5 Annual mean distribution of PM_{2.5} concentration in 2017

全域 PM_{2.5} 浓度具有较明显的季节差异(图6). 四季(3~5月为春季,6~8月为夏季,9~11月为秋季,12、1和2月为冬季)PM_{2.5} 浓度季均值分别为 42.80 、 36.92 、 42.07 和 $55.97 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,呈现“冬季高、夏季低和春秋过渡”的季节变化特点. 冬季 PM_{2.5} 浓度明显高于其他3个季节,保定、石家庄、邢台和邯郸等市山麓平原地区在 $115 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上,同夏季相比,PM_{2.5} 提升 $30 \sim 60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 值不等,推测原因主要是冬季民用采暖增大了污染物排放,大气层结比较稳定,较强的逆温极易出现^[47,48],导致 PM_{2.5} 等污染物快速积累. 夏季 PM_{2.5} 浓度低的主要原因是气温高,大气垂直扩散旺盛,降水集中有利于污染物清除;春季多风沙和扬尘天气,是 PM_{2.5} 的重要来源;秋季大气层结向冬季转换,扩散条件开始逐渐变差.

2.5 冀中南山麓平原冬季 PM_{2.5} 浓度空间差异分析

当前研究区大气污染治理施策的最大不确定性在于精准识别污染源分布. 在已知环境空气 PM_{2.5} 浓度的时空分布条件下,追踪污染物排放源的时空分布是一个复杂的物理化学过程. 通过一定时间尺度聚合,能够定性判断污染源的空间差异. 一般来说,大部分人为污染源的空间尺度会明显小于大气扩散

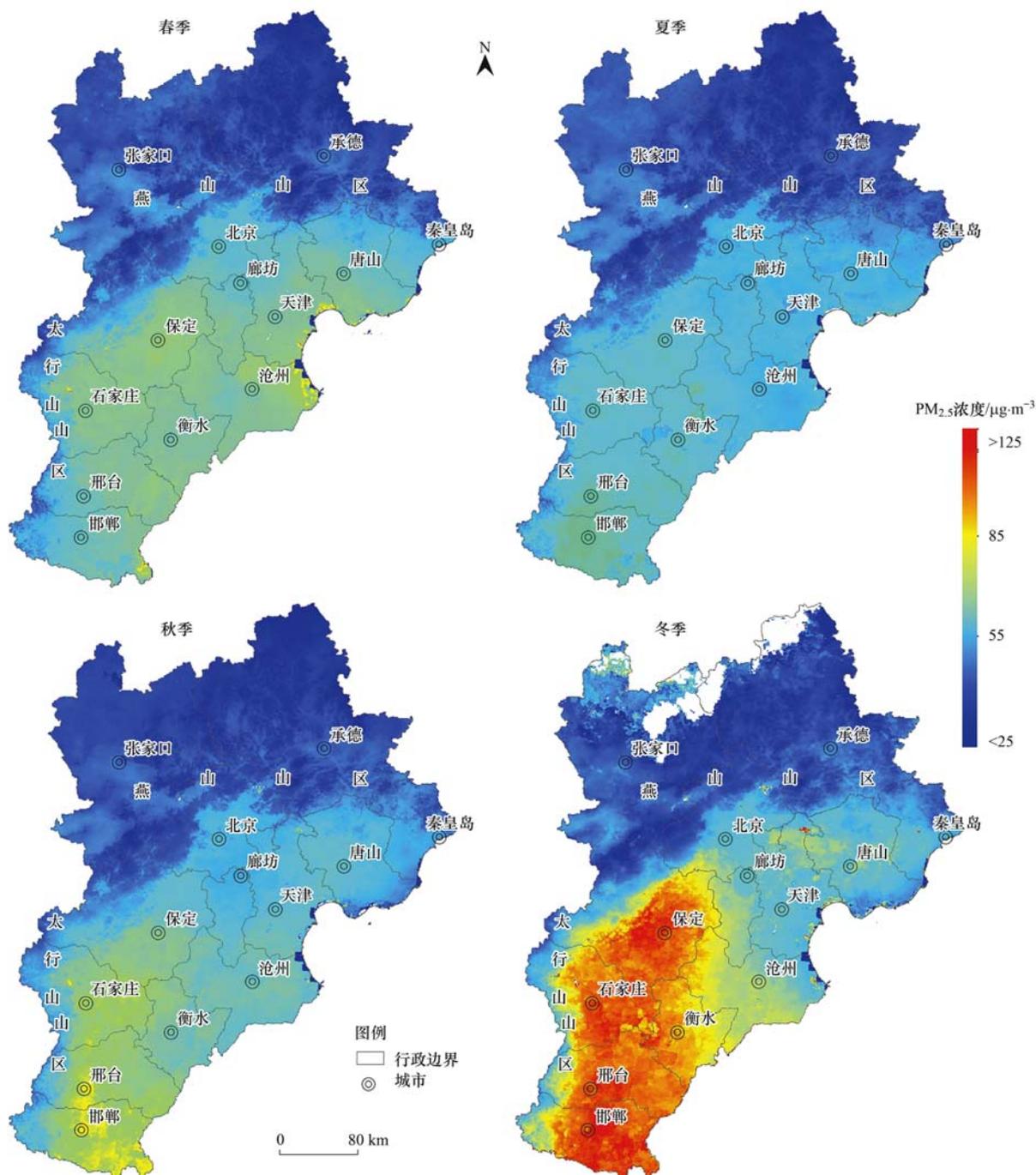


图6 2017年各季节 $PM_{2.5}$ 平均浓度空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of average $PM_{2.5}$ concentration in each season of 2017

条件均质空间的尺度. 为此, 本文做如下假设: 一次颗粒物和二次颗粒物的主要前体物的排放强度与 $PM_{2.5}$ 浓度呈正相关关系; 在月均值及其以上的时间尺度上, 较大空间尺度上的 $PM_{2.5}$ 浓度差异主要反映扩散条件的空间差异, 较小空间尺度上的 $PM_{2.5}$ 浓度差异主要反映污染物排放强度的空间差异. 基于上述假设, 选择研究区污染最严重的冀中南山麓平原区, 分析不同空间尺度上 $PM_{2.5}$ 浓度的空间差异, 并初步推断污染源的空间分布特点. 图7为冀中南山麓平原冬季 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布, 可以看出, 全域

$PM_{2.5}$ 浓度大体在 $105 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上, 明显高于毗邻区域, 这一空间尺度的主要分异因素应归于大气扩散条件. 区域内部的 $PM_{2.5}$ 浓度差异应归于污染源排放强度差异, 其中 $PM_{2.5}$ 污染较严重的地方($>105 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $<125 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)多分布在交通线两侧以及重点污染企业周围, 指示了传统重要污染源的空间分布; 而污染最严重的地方($>125 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 图中蓝圈范围)与交通线和重点污染企业的分布不一致. 笔者推测, 随着京津冀地区持续深入开展大气污染防治攻坚行动, 国家及省级重点监控企业的排放量

减少,导致重要污染源分布发生了变化. 这种情况应当引起关注.

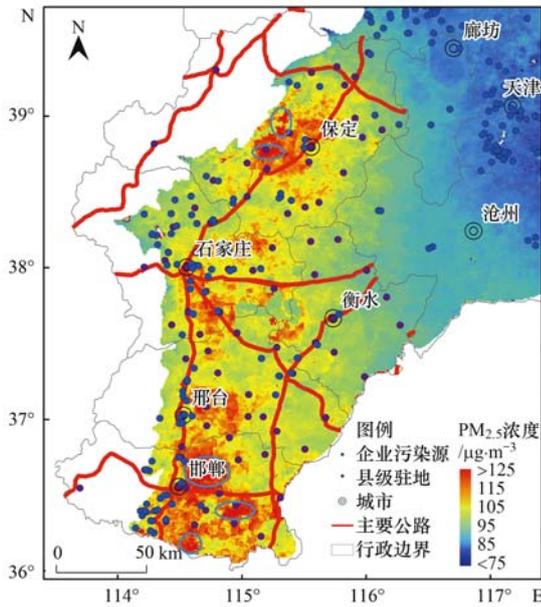


图 7 冀中南山麓平原冬季 PM_{2.5} 浓度空间差异

Fig. 7 Spatial variation in PM_{2.5} concentration in winter over the piedmont plain of central and southern Hebei Province

3 讨论

3.1 模型预测精度的国内外比较

本文采用两阶段模型预测京津冀地区 PM_{2.5} 浓度的时空分布,其中第一阶段采用混合效应模型来反映 PM_{2.5}-AOD 关系随时间变化规律,第二阶段加入地理加权模型来反映 PM_{2.5}-AOD 关系的空间变异.表 5 为基于时空维模拟的相同或相似模型对比结果,其中,与同模型的研究^[17]: 2001 ~ 2010 年美国东南部 PM_{2.5} 浓度时空变化相比, R² 有明显提高,原因是在地理加权模型上该模型采用逐月拟合,而本文采用逐日拟合,使得模型预测精度提高;与利用时空混合效应模型^[28] 预测 2003 ~ 2011 年美国东北部相比, R² 提高;与使用 VIIRS AOD 以及时间固定效应回归 (TEFR) 和 GWR 模型^[49] 相比, R² 提高, RMSPE 降低.表 6 为与京津冀区域内使用各种主流方法的研究结果对比,与同 AOD 分辨率使用 DBN 模型^[6] 和随机森林模型^[18] 相比, R² 提高,斜率提高, RMSPE 有所降低,模型精度明显提高.

表 5 与基于时空维模拟的相同或相近方法研究结果对比¹⁾

Table 5 Comparison of results from different studies with similar or identical methods and spatio-temporal dimensions

研究年份	研究区域	使用模型	R ²	斜率	RMSPE/μg·m ⁻³	文献
2021	京津冀地区	LME + GWR 模型	0.94	0.95	13.14	本研究
2014	美国东南部	LME + GWR 模型	0.62 ~ 0.78	0.93 ~ 0.96	3.12 ~ 5.00	[17]
2014	美国东北部	时空混合效应模型	0.84 ~ 0.91	0.99 ~ 1.02	1.91 ~ 2.79	[28]
2019	中国	TFER + GWR 模型	0.31 ~ 0.69	—	16.07 ~ 25.27	[49]

1) “—”表示文章中没有相关数据

表 6 与京津冀区域内使用各种主流方法的研究结果对比

Table 6 Comparison of results with those of other models commonly used in the Beijing-Tianjin-Hebei region

研究年份	使用模型	R ²	斜率	RMSPE/μg·m ⁻³	文献
2021	两阶段模型	0.94	0.95	13.14	本研究
2018	DBN 模型	0.71	0.66	17.63	[6]
2020	随机森林模型	0.86	0.82	23.48	[18]

3.2 AOD 数据缺失对模型预测精度的影响

本文两阶段模型建模共获得 2017 年 323 d 的 16 961 对 PM_{2.5}-AOD 有效数据,全年平均时间有效数据比率为 88%、空间有效数据比率为 64.92%.表 7 分别计算了每月 AOD 有效建模数据的时间和空间有效数据比率,可以看出,时空有效数据比率分别

为 70.9% ~ 100% 和 42.9% ~ 78.3%.有研究表明, AOD 数据缺失较多会对模型预测精度产生影响,京津冀地区 AOD 数据缺失往往与重污染天气相对应,因此,对模型预测精度的影响主要表现为“高值低估”,并派生出“低值高估”问题,产生预测偏差^[25,38].

表 7 2017 年 AOD 时间和空间有效数据比率¹⁾/%

Table 7 Percentage of AOD data used for modeling in 2017/%

项目	月份											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
时间	93.5	92.8	87.1	80.0	90.3	83.3	74.2	90.3	100.0	70.9	100.0	100.0
空间	51.4	63.3	68.7	70.2	78.3	63.3	60.4	42.9	59.9	56.5	82.7	77.3

1) 时间有效数据比率 = AOD 有效数据天数/全部天数,空间有效数据比率 = AOD 有效数据栅格数/全部栅格数

为了探查 AOD 建模数据缺失对本文模型预测精度的影响,图 8 给出了基于站点的全部 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度观测值的年均值与站点模型预测值的年均值拟合 [图 8(a)] 和基于站点建模 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度观测值的年均值与站点模型预测值的年均值拟合 [图 8(b)] 的结

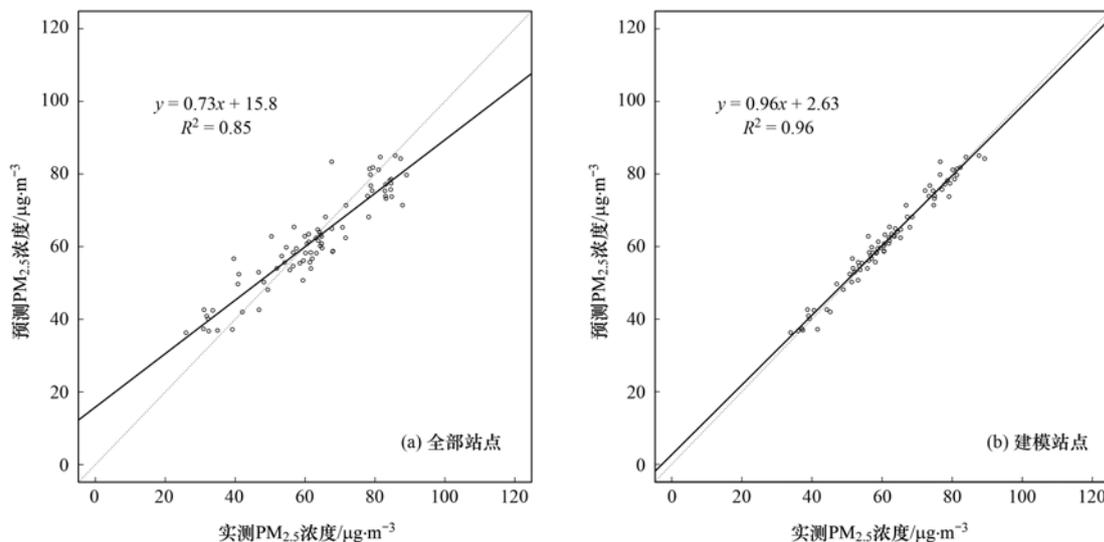


图 8 站点全部观测值和站点建模观测值的年均值与模型预测年均值拟合结果对比

Fig. 8 Measured and predicted annual mean regression results for all stations and modeled stations

4 结论

(1) $\text{PM}_{2.5}$ 与 AOD 的直接线性相关性较低. 本文构建了加入 AOD^2 和 PBLH 与 AOD 乘积以及多变量的线性混合效应模型,校正了 $\text{PM}_{2.5}$ -AOD 关系的时间差异性,在此基础上加入了能够校正空间差异性的地理加权模型作为第二阶段模型. 两阶段模型拟合结果与观测值验证的决定系数 R^2 为 0.96,斜率为 0.96,十折交叉验证后 R^2 为 0.94,斜率为 0.95. 说明上述两阶段模型通过对 $\text{PM}_{2.5}$ -AOD 关系在时空两个维度上进行局部校正,可以极大提高两者之间的相关性,模型模拟精度和改善偏差的能力均有明显提高.

(2) 与 10 km MODIS AOD 数据相比,1 km 空间分辨率的 MAIAC AOD 应用明显改善了 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度站点数据与遥感 AOD 栅格数据由于空间尺度差异产生的拟合误差,有效提高了模型的预测精度,能够支持流行病学研究在城市尺度或更小区域的暴露评估,也能对识别小尺度污染源的时空变化提供基础支持.

(3) 从两阶段模型预测的京津冀地区 2017 年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度时空分布状况可以看出,在空间分布上,污染严重的高值区分布在平原西南部,中值区分布在平原东北部,低值区分布在山区与高原;在季节分布上,表现为冬季高、夏季低和春秋过渡的特征.

果对比,可以看出, AOD 数据缺失产生了“高值低估”并派生出“低值高估”的预测偏差,其中,高值低估的最大值为 $9.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,低值高估的最大值为 $8.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 可见 AOD 数据缺失对本模型预测精度影响不容忽视,这是本研究下一步完善的方向之一.

对污染最严重的冀中南山麓平原冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度空间分布深入分析可以发现,污染最严重的小区域与主要交通线及重点污染企业等传统污染源的空间分布出现不一致,可能出现了重要污染源的空间变化.

参考文献:

- [1] Chow J C, Watson J G, Mauderly J L, *et al.* Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2006, **56** (10): 1368-1380.
- [2] Gao M, Saide P E, Xin J Y, *et al.* Estimates of health impacts and radiative forcing in winter haze in Eastern China through constraints of surface $\text{PM}_{2.5}$ predictions [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51** (4): 2178-2185.
- [3] Lyu D, Chen Z J, Almansoob S, *et al.* Transcriptomic profiling of human corneal epithelial cells exposed to airborne fine particulate matter ($\text{PM}_{2.5}$) [J]. *The Ocular Surface*, 2020, **18** (4): 554-564.
- [4] Lim S S, Vos T, Flaxman A D, *et al.* A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990-2010: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010 [J]. *The Lancet*, 2012, **380** (9859): 2224-2260.
- [5] Wang Q, Wang J N, He M Z, *et al.* A county-level estimate of $\text{PM}_{2.5}$ related chronic mortality risk in China based on multi-model exposure data [J]. *Environment International*, 2018, **110**: 105-112.
- [6] 崔相辉. 京津冀地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度预测模型建立与时空分析 [D]. 泰安: 山东科技大学, 2018.
- [7] 马宗伟. 基于卫星遥感的我国 $\text{PM}_{2.5}$ 时空分布研究 [D]. 南京: 南京大学, 2015.
- [8] 黄顺祥, 刘峰, 盛黎, 等. 基于伴随方法的大气污染溯源 [J]. *科学通报*, 2018, **63** (16): 1594-1605.

- Huang S X, Liu F, Sheng L, *et al.* On adjoint method based atmospheric emission source tracing [J]. Chinese Science Bulletin, 2018, **63**(16): 1594-1605.
- [9] 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), doi: 10.1029/2003GL018174.
- [10] 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.
- [11] Hidy G M, Brook J R, Chow J C, *et al.* Remote sensing of particulate pollution from space: have we reached the promised land? [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2009, **59**(10): 1130-1139.
- [12] Gryparis A, Paciorek C J, Zeka A, *et al.* Measurement error caused by spatial misalignment in environmental epidemiology [J]. Biostatistics, 2009, **10**(2): 258-274.
- [13] 余娟, 龚威, 朱忠敏. 高斯曲线优化能见度与气溶胶光学厚度转换模型[J]. 遥感学报, 2011, **15**(5): 1008-1023.
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.
- [14] Lee H J, Yiu 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.
- [15] Kloog I, Sorek-Hamer M, Lyapustin A, *et al.* Estimating daily PM_{2.5} and PM₁₀ across the complex geo-climate region of Israel using MAIAC satellite-based AOD data [J]. Atmospheric Environment, 2015, **122**: 409-416.
- [16] Hu X, Waller L A, Lyapustin A, *et al.* 10-year spatial and temporal trends of PM_{2.5} concentrations in the Southeastern US estimated using high-resolution satellite data [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, **14**(12): 6301-6314.
- [17] Hu X F, Waller L A, Lyapustin A, *et al.* Estimating ground-level PM_{2.5} concentrations in the Southeastern United States using MAIAC AOD retrievals and a two-stage model [J]. Remote Sensing of Environment, 2014, **140**: 220-232.
- [18] Zhao C, Wang Q, Ban J, *et al.* Estimating the daily PM_{2.5} concentration in the Beijing-Tianjin-Hebei region using a random forest model with a 0.01° × 0.01° spatial resolution [J]. Environment International, 2020, **134**, doi: 10.1016/j.envint.2019.105297.
- [19] Li L F, Franklin M, Girguis M, *et al.* Spatiotemporal imputation of MAIAC AOD using deep learning with downscaling [J]. Remote Sensing of Environment, 2020, **237**, doi: 10.1016/j.rse.2019.111584.
- [20] 罗毅, 邓琼飞, 杨昆, 等. 近 20 年来中国典型区域 PM_{2.5} 时空演变过程[J]. 环境科学, 2018, **39**(7): 3003-3013.
Luo Y, Deng Q F, Yang K, *et al.* Spatial-temporal change evolution of PM_{2.5} in typical regions of China in recent 20 years [J]. Environmental Science, 2018, **39**(7): 3003-3013.
- [21] 沈焕锋, 李同文. 大气 PM_{2.5} 遥感制图研究进展[J]. 测绘学报, 2019, **48**(12): 1624-1635.
Shen H F, Li T W. Progress of remote sensing mapping of atmospheric PM_{2.5} [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, **48**(12): 1624-1635.
- [22] Xiao Q Y, Wang Y J, Chang H H, *et al.* Full-coverage high-resolution daily PM_{2.5} estimation using MAIAC AOD in the Yangtze River Delta of China [J]. Remote Sensing of Environment, 2017, **199**: 437-446.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] Liang F C, Xiao Q Y, Wang Y J, *et al.* MAIAC-based long-term spatiotemporal trends of PM_{2.5} in Beijing, China [J]. Science of the Total Environment, 2018, **616-617**: 1589-1598.
- [26] Choi M, Lim H, Kim J, *et al.* Validation, comparison, and integration of GOCI, AHI, MODIS, MISR, and VIIRS aerosol optical depth over East Asia during the 2016 KORUS-AQ campaign [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2019, **12**(8): 4619-4641.
- [27] Lyapustin A, Wang Y J, Korkin S, *et al.* MODIS collection 6 MAIAC algorithm [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2018, **11**(10): 5741-5765.
- [28] Kloog I, Chudnovsky A A, Just A C, *et al.* A new hybrid spatio-temporal model for estimating daily multi-year PM_{2.5} concentrations across Northeastern USA using high resolution aerosol optical depth data [J]. Atmospheric Environment, 2014, **95**: 581-590.
- [29] Chudnovsky A A, Koutrakis P, Kloog I, *et al.* Fine particulate matter predictions using high resolution Aerosol Optical Depth (AOD) retrievals [J]. Atmospheric Environment, 2014, **89**: 189-198.
- [30] Jethva H, Torres O, Yoshida Y. Accuracy assessment of MODIS land aerosol optical thickness algorithms using AERONET measurements over North America [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2019, **12**(8): 4291-4307.
- [31] Martins V S, Lyapustin A, de Carvalho L A S, *et al.* Validation of high-resolution MAIAC aerosol product over South America [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, **122**(14): 7537-7559.
- [32] Mhawish A, Banerjee T, Sorek-Hamer M, *et al.* Comparison and evaluation of MODIS multi-angle implementation of atmospheric correction (MAIAC) aerosol product over South Asia [J]. Remote Sensing of Environment, 2019, **224**, doi: 10.1016/j.rse.2019.01.033.
- [33] Huang K Y, Xiao Q Y, Meng X, *et al.* Predicting monthly high-resolution PM_{2.5} concentrations with random forest model in the North China Plain [J]. Environmental Pollution, 2018, **242**(Pt A): 675-683.
- [34] Li R K, Ma T X, Xu Q, *et al.* Using MAIAC AOD to verify the PM_{2.5} spatial patterns of a land use regression model [J]. Environmental Pollution, 2018, **243**: 501-509.
- [35] Tao M H, Wang J, Li R, *et al.* Performance of MODIS high-resolution MAIAC aerosol algorithm in China: characterization and limitation [J]. Atmospheric Environment, 2019, **213**: 159-169.
- [36] Liu N, Zou B, Feng H H, *et al.* Evaluation and comparison of multiangle implementation of the atmospheric correction algorithm, Dark Target, and Deep Blue aerosol products over China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, **19**(12): 8243-8268.
- [37] Zhang Z Y, Wu W L, Fan M, *et al.* Evaluation of MAIAC aerosol retrievals over China [J]. Atmospheric Environment, 2019, **202**: 8-16.

- [38] 郝静, 孙成, 郭兴宇, 等. 京津冀内陆平原区 $PM_{2.5}$ 浓度时空变化定量模拟[J]. 环境科学, 2018, **39**(4): 1455-1465.
Hao J, Sun C, Guo X Y, *et al.* Simulation of the spatio-temporally resolved $PM_{2.5}$ aerosol mass concentration over the Inland Plain of the Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Environmental Science, 2018, **39**(4): 1455-1465.
- [39] He J, Yang K, Tang W J, *et al.* The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China [J]. Scientific Data, 2020, **7**(1), doi: 10.1038/s41597-020-0369-y.
- [40] Yang K, He J, Tang W J, *et al.* On downward shortwave and longwave radiations over high altitude regions: observation and modeling in the Tibetan Plateau [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, **150**(1): 38-46.
- [41] 王明高, 孟生旺. 贝叶斯非线性混合效应模型及其应用研究[J]. 统计与信息论坛, 2016, **31**(12): 10-16.
Wang M G, Meng S W. Bayesian nonlinear mixed effects models and their applications [J]. Statistics & Information Forum, 2016, **31**(12): 10-16.
- [42] 付宏臣, 孙艳玲, 王斌, 等. 基于 AOD 数据和 GWR 模型估算京津冀地区 $PM_{2.5}$ 浓度[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(11): 4530-4537.
Fu H C, Sun Y L, Wang B, *et al.* Estimation of $PM_{2.5}$ concentration in Beijing-Tianjin-Hebei region based on AOD data and GWR model [J]. China Environmental Science, 2019, **39**(11): 4530-4537.
- [43] 陈辉, 厉青, 张玉环, 等. 基于地理加权模型的我国冬季 $PM_{2.5}$ 遥感估算方法研究[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(6): 2142-2151.
Chen H, Li Q, Zhang Y H, *et al.* Estimations of $PM_{2.5}$ concentrations based on the method of geographically weighted regression [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(6): 2142-2151.
- [44] 郭玮. 基于两阶段模型的京津冀地区 $PM_{2.5}$ 浓度时空变化研究[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2020.
- [45] 何晓群, 闵素芹. 实用回归分析[M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2014.
- [46] World Health Organization. Air quality guidelines global update 2005: particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide[R]. Copenhagen, Denmark; WHO, 2006.
- [47] 王晨, 时悦, 景悦, 等. 基于遥感数据的京津冀地区 $PM_{2.5}$ 时空分布特征[J]. 环境监测管理与技术, 2020, **32**(1): 37-41.
Wang C, Shi Y, Jing Y, *et al.* Spatial and temporal distribution characteristics of $PM_{2.5}$ in Beijing-Tianjin-Hebei Region based on remote sensing data [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2020, **32**(1): 37-41.
- [48] 金团团, 杨兴川, 晏星, 等. 京津冀及周边 MAIAC AOD 和 $PM_{2.5}$ 质量浓度特征及相关性分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(6): 2604-2615.
Jin J N, Yang X C, Yan X, *et al.* MAIAC AOD and $PM_{2.5}$ mass concentration characteristics and correlation analysis in Beijing-Tianjin-Hebei and surrounding areas [J]. Environmental Science, 2021, **42**(6): 2604-2615.
- [49] Yao F, Wu J S, Li W F, *et al.* A spatially structured adaptive two-stage model for retrieving ground-level $PM_{2.5}$ concentrations from VIIRS AOD in China [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2019, **151**: 263-276.

CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Health Impacts of PM _{2.5} and O ₃ in Beijing, from 2014 to 2020	CHEN Jing, PENG Jin-long, XU Yan-sen (4071)
High-resolution Estimation of Spatio-temporal Variation in PM _{2.5} Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, FAN Li-hang, <i>et al.</i> (4083)
Impacts of Anthropogenic Emission Reduction and Meteorological Conditions on PM _{2.5} Pollution in Typical Cities of Beijing-Tianjin-Hebei in Winter	SHAO Xuan-yi, WANG Xiao-qi, ZHONG Yi-sheng, <i>et al.</i> (4095)
Influence of Pollutant Transport from Both Sides of the Taihang Mountains on Cross-Valley Urban Aerosols	WANG Yan, GUO Wei, YAN Shi-ming, <i>et al.</i> (4104)
Variation Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Aerosols in Winter in Jiashan	ZHANG Ying-long, LI Li, WU Wei-chao, <i>et al.</i> (4116)
Simulation Analysis of the Impact of COVID-19 Pandemic Control on Air Quality in Henan Province based on Machine Learning Algorithm	WEI Yu, XU Qi-xiang, ZHAO Jin-shuai, <i>et al.</i> (4126)
Seasonal Variation, Source Identification, and Health Risk of PM _{2.5} -bound Metals in Xinxiang	LIU Huan-jia, JIA Meng-ke, LIU Yong-li, <i>et al.</i> (4140)
Distribution Characteristics and Seasonal Variations of Arsenic in Atmospheric Aerosols over the Yellow Sea and Bohai Sea	YUAN Shuai, WANG Yan, LIU Ru-hai, <i>et al.</i> (4151)
Extinction Characteristics of Aerosols and the Contribution of Pollution Sources to Light Extinction During Three Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2020 in Tianjin	LI Li-wei, XIAO Zhi-mei, YANG Ning, <i>et al.</i> (4158)
Spatial Variation of Surface Ozone Concentration During the Warm Season and Its Meteorological Driving Factors in China	HE Chao, MU Hang, YANG Lu, <i>et al.</i> (4168)
Exploring Characteristics and Causes of Summer Ozone Pollution Based on Process Analysis in Wuhai	ZHANG Rui-xin, CHEN Qiang, XIA Jia-qi, <i>et al.</i> (4180)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric VOCs in the Coastal Background of the Pearl River Delta	YUN Long, LI Cheng-liu, ZHANG Ming-di, <i>et al.</i> (4191)
Hydrochemical Characteristics and Factors of Surface Water and Groundwater in the Upper Yongding River Basin	KONG Xiao-le, YANG Yong-hui, CAO Bo, <i>et al.</i> (4202)
Temporal and Spatial Variations in Water Quality of Hanjiang River and Its Influencing Factors in Recent Years	CHENG Bing-fen, ZHANG Yuan, XIA Rui, <i>et al.</i> (4211)
Pollution Level, Distribution Characteristic, and Ecological Risk Assessment of Environmentally Persistent Pharmaceutical Pollutants in Surface Water of Jiangsu Province	ZHAO Mei-mei, FAN De-ling, GU Wen, <i>et al.</i> (4222)
Spatial and Temporal Distribution and Pollution Evaluation of Soluble Heavy Metals in Liujiang River Basin	ZHANG Wan-jun, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i> (4234)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Groundwater of Leizhou Peninsula	SHI Huan-huan, PAN Yu-jie, ZENG Min, <i>et al.</i> (4246)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements in Groundwater of Longzici Spring Area	XIE Hao, LIANG Yong-ping, LI Jun, <i>et al.</i> (4257)
Seasonal Variation and Sources Identification of Dissolved Sulfate in a Typical Karst Subterranean Stream Basin Using Sulfur and Oxygen Isotopes	REN Kun, PAN Xiao-dong, LAN Gan-jiang, <i>et al.</i> (4267)
Phosphorus Fractions and Quantitative Identification of Pollution Sources in Nanhai Wetland, Baotou	BAI Ya-hong, QIAN Chen-ge, YUAN Si-jing, <i>et al.</i> (4275)
Release Risk of Phosphorus by Sediments and Its Influencing Factors in Ponds and Ditches of a New Urban District Park	LI Ru-zhong, SONG Min, YANG Ji-wei (4287)
Effect of Hydraulic Residence Time on Removal Efficiency of Pollutants in Subsurface Flow Constructed Wetlands and Analysis of Denitrification Mechanism	QI Ran, ZHANG Ling, YANG Fan, <i>et al.</i> (4296)
Enhanced Removal of Pollutants in Constructed Wetlands with Manganese Sands	MA Quan, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (4304)
Application Effect of Four Typical Submerged Macrophytes on Removing Cadmium from Polluted Sediment	TAO Li, WANG Pei-fang, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i> (4311)
Structure of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Response to Dissolved Organic Matter in Baiyangdian Lake During the Water Delivery Period	ZHOU Shi-lei, ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (4319)
Nitrogen and Phosphorus Leaching Characteristics and Adsorption Properties of Hardwood Biochar in Stormwater Runoff	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue (4332)
Indicator Function of Ragworm (Nereididae) on Sediment Microplastic in Haizhou Bay Intertidal Zone	WANG Jia-xuan, SONG Ke-xin, SUN Yi-xin, <i>et al.</i> (4341)
Antagonistic Effect and Mechanism of Nano Titanium Dioxide and Cadmium on the Growth of <i>Scenedesmus obliquus</i>	WANG Pu, ZHAO Li-hong, ZHU Xiao-shan (4350)
Mutual Influence Between Microbial Community, Wastewater Characteristics, and Antibiotic Resistance Genes During Spiramycin Production Wastewater Treatment	WU Cai-yun, LI Hui-li, QIN Cai-xia, <i>et al.</i> (4358)
Effect of Chelated Iron on Nitrogen Removal Efficiency and Microbial Community Structure in the Anaerobic Ferric Ammonium Oxidation	LIAO Hong-yan, SONG Cheng, WAN Liu-yang, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Dissolved Oxygen on Nutrient Removal Performance and Microbial Community in Low Carbon/Nitrogen Municipal Wastewater Treatment Process	CHI Yu-lei, SHI Xuan, REN Tong, <i>et al.</i> (4374)
Shortening SRT of Intermittent Gradient Aeration to Realize Nitrogen and Phosphorus Removal in Short-range SNEDPR System	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (4383)
Characteristics of Partial Denitrification in Biofilm System	YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, ZHANG Qiong, <i>et al.</i> (4390)
Effect of Anaerobic Plug-flow on Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Aerobic Granular Sludge with Intermittent Aeration	LI Dong, CAO Si-yu, WANG Qi, <i>et al.</i> (4399)
Combining Different Aerobic/Anoxic Durations with Zoned Sludge Discharge to Optimize Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules in Domestic Sewage	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (4406)
Meta-analysis of the Effects of Metal Mining on Soil Heavy Metal Concentrations in Southwest China	ZHANG Jian-lin, QU Ming-kai, CHEN Jian, <i>et al.</i> (4414)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Watersheds of the Qinghai-Tibet Plateau	DU Hao-lin, WANG Ying, WANG Jin-song, <i>et al.</i> (4422)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Cadmium Pollution in Soil-crops system of an E-waste Dismantling Area	ZHANG Lu-yao, ZHAO Ke-li, FU Wei-jun (4432)
Characteristics of Modified Biochars and Their Immobilization Effect on Cu and Cd in Polluted Farmland Soil Around Smelter	WANG Xin-yu, MENG Hai-bo, SHEN Yu-jun, <i>et al.</i> (4441)
Combined Effects of Soil Amendment and Zinc Fertilizer on Accumulation and Transportation of Cadmium in Soil-Rice System	ZHOU Kun-hua, ZHOU Hang, WANG Zi-yu, <i>et al.</i> (4452)
Effects of Different Soil Conditioners on Rice Growth and Heavy Metal Uptake in Soil Contaminated with Copper and Cadmium	WEI Wei, LI Ping, LANG Man (4462)
Isolation and Identification of the Plant Endophyte R-13 and Its Effect on Cadmium Accumulation in <i>Solanum nigrum</i> L.	PANG Jie, LIU Yue-min, HUANG Yong-chun, <i>et al.</i> (4471)
Response of Soil Archaeal Community to Heavy Metal Pollution in Different Typical Regions	LI Yu-tong, YANG Shan, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4481)
High-throughput Sequencing Analysis of Soil Bacterial Community in the Grain for Green Project Areas of the Loess Plateau	LIU Xiao-hua, WEI Tian-xing (4489)
Experimental Influence of Food Waste Fermentation Broth on the Soil Quality in a Loess Hilly Area	SHAO Li-ming, REN Jun-da, LÜ Fan, <i>et al.</i> (4500)
Stability of Soil Aggregates at Different Altitudes in Qinling Mountains and Its Coupling Relationship with Soil Enzyme Activities	MA Huan-fei, HU Han, LI Yi, <i>et al.</i> (4510)
Reactivation of Passivated Biochar/Nanoscale Zero-Valent Iron by an Electroactive Microorganism for Cooperative Hexavalent Chromium Removal and Mechanisms	LIAO Cong-jian, ZHAO Xiao-lei, LIU Kai, <i>et al.</i> (4520)
Influence of Precipitation Change on Soil Respiration in Desert Grassland	HAO Lian-yi, ZHANG Li-hua, XIE Zhong-kui, <i>et al.</i> (4527)
Effects of Nitrogen Fertilizer Application Times and Nitrification Inhibitor on N ₂ O Emission from Potted Maize	FU Pei-jiao, JI Heng-kuan, HE Qiu-xiang, <i>et al.</i> (4538)
Gaseous Nitrogen Emission from Soil After Application of NH ₄ ⁺ -N Loaded Biochar	MA Xiao-gang, HE Jian-qiao, CHEN Yu-lan, <i>et al.</i> (4548)
Effects of Microplastics Addition on Soil Organic Carbon Mineralization in Citrus Orchard	ZHANG Xiu-ling, YAN Zi-wei, WANG Feng, <i>et al.</i> (4558)
Dynamic Material Flow Analysis of Perfluorooctane Sulfonate in China; 1985-2019	WANG Jia-yu, CHEN Jing-wen, TANG Wei-hao, <i>et al.</i> (4566)