

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第12期

Vol.38 No.12

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

京津冀区域 PM _{2.5} 污染相互输送特征	王燕丽, 薛文博, 雷宇, 王金南, 武卫玲 (4897)
顾及尺度效应的多源遥感数据“源”“汇”景观的大气霾效应	许凯, 余添添, 孙姣姣, 袁兆祥, 秦昆 (4905)
基于多源数据的 PM _{2.5} 浓度时空分布预测与制图	肖璐, 郎艺超, 夏浪, 楼昭涵, 孙楠, 黄李童, George Christakos (4913)
华东区域 PM _{2.5} 变化背景下浙江省人口经济暴露水平评估	郁珍艳, 高大伟, 李正泉, 杨续超, 王阔, 马浩, 徐宏辉 (4924)
南京北郊不同大气污染程度下气溶胶化学组分特征	张程, 于兴娜, 安俊琳, 朱彬, 林梦凡 (4932)
菏泽市 PM _{2.5} 碳组分季节变化特征	刘泽珺, 吴建会, 张裕芬, 梁丹妮, 马威, 刘保双, 冯银厂, 张勤勤 (4943)
辽宁典型城市道路扬尘 PM ₁₀ 中水溶性无机离子组分特征及来源解析	张伟, 姬亚芹, 张军, 张蕾, 王伟, 王士宝 (4951)
天津冬季一次重污染过程颗粒物中水溶性离子粒径分布特征	姚青, 刘子锐, 韩素芹, 蔡子颖, 刘敬乐, 黄小娟, 刘景云, 王跃思 (4958)
高原城市昆明公路隧道大气中 PM _{2.5} 理化特征分析	王成辉, 闫琨, 韩新宇, 施择, 毕丽玫, 向峰, 宁平, 史建武 (4968)
2015 年中国近地面臭氧浓度特征分析	段晓瞳, 曹念文, 王潇, 张玉欣, 梁静舒, 杨思鹏, 宋秀瑜 (4976)
不同 CDPF 贵金属负载量对柴油公交车 VOCs 组分排放影响	楼狄明, 张子骏, 刘继强, 谭丕强, 胡志远 (4983)
ENSO 事件对上海降水中氢氧同位素变化的影响	董小芳, 杨华玮, 张杰, 朱志鹏, 杨言, 郑祥民, 周立旻 (4991)
我国南方两个典型森林生态系统的硫、氮和汞沉降量	程正霖, 罗遥, 张婷, 段雷 (5004)
新安江水库二氧化碳排放的时空变化特征	杨乐, 李贺鹏, 孙滨峰, 岳春雷 (5012)
三峡库区表层沉积物营养盐时空变化及评价	卓海华, 邱光胜, 翟婉盈, 刘云兵, 兰静 (5020)
三门峡水库水体中不同形态汞的分布特征	程柳, 麻冰涓, 周伟立, 王力, 耿音, 刘清伟, 毛宇翔 (5032)
太子河流域中游地区河流硝酸盐来源及迁移转化过程	李艳利, 孙伟, 杨梓睿 (5039)
典型入湖河流水体氮素变化特征及其对降雨的响应: 以太湖乌溪港为例	连慧妹, 刘宏斌, 李旭东, 宋挺, 刘申, 雷秋良, 任天志, 武淑霞, 李影 (5047)
缙云山常绿阔叶林湿沉降过程中不同空间层次水质变化特征	马明, 孙涛, 李定凯, 王定勇 (5056)
基于 MIKE11 模型提高污染河流水质改善效果的方法	熊鸿斌, 陈雪, 张斯思 (5063)
北京市地下水典型抗生素分布特征与潜在风险	陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (5074)
深圳茅洲河下游柱状沉积物中碳氮同位素特征	凌郡鸿, 张依章, 王民浩, 周北海, 陶明, 陈惠明, 闫振广 (5081)
供水管网铁释放的影响因素相对重要性分析	刘莹, 于影, 石宝友, 刘书明, 吴雪 (5090)
低温高铁锰氨氮地下水生物同池净化	李冬, 曹瑞华, 杨航, 王刘煜, 张杰, 曾辉平 (5097)
臭氧预氧化强化混凝对二级出水中 DON 作用机制探讨	刘冰, 郑煜铭, 王大祥, 李清飞, 赵承美, 余国忠, 古励 (5106)
碱活化过一硫酸盐降解水中环丙沙星	葛勇建, 蔡显威, 林翰, 徐梦苑, 沈一挺, 周丹, 钱梦洁, 邓靖 (5116)
MIL-88A@MIP 催化活化过硫酸盐靶向降解邻苯二甲酸二丁酯	王九妹, 关泽宇, 万金泉, 王艳, 马邕文, 闫志成, 张桂华 (5124)
常温下加装脱硫装置的 MCBMBR 处理高硫酸盐有机废水试验	徐婷, 金艳青, 李勇 (5132)
载镁天然沸石复合材料对污水中氮磷的同步回收	成雪君, 王学江, 王浩, 张志昊, 赵建夫 (5139)
不同运行模式下改良型 CAST 工艺处理生活污水的除磷性能	马娟, 王谨, 俞小军, 周猛, 孙洪伟, 王磊 (5146)
ABR-MBR 工艺处理生活污水实现短程硝化	吕亮, 赵诗惠, 韦佳敏, 张敏, 尤雯, 吴鹏, 沈耀良 (5154)
海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水的基质抑制及其动力学特性	周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王晓静 (5162)
游离氨 (FA) 对氨氧化过程氨逃逸影响试验	孙洪伟, 于雪, 尤永军, 彭永臻, 王淑莹 (5169)
西安市典型景观水体水质及反硝化细菌种群结构	康鹏亮, 黄廷林, 张海涵, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾宽宇 (5174)
厌氧氨氧化启动过程及微生物群落结构特征	汪瑶琪, 张敏, 姜滢, 徐乐中, 陈重军, 沈耀良 (5184)
SBAF 单级自养脱氮快速启动、稳定运行及微生物群落演化	岳秀, 刘竹寒, 于广平, 吉世明, 唐嘉丽 (5192)
活性污泥中硝化螺菌 (Nitrospira) 的富集及其动力学参数	姚倩, 彭党聪, 赵俏迪, 王博 (5201)
pH 值对零价铁自养反硝化过程的影响	张宁博, 李祥, 黄勇 (5208)
接种单一/混合污泥对厌氧氨氧化反应器快速启动的影响	张泽文, 李冬, 张杰, 郭跃洲, 李帅 (5215)
活性污泥法和生物膜法 SBR 工艺亚硝化启动和稳定运行性能对比	孙艺齐, 卞伟, 王盟, 赵青, 王文啸, 梁东博, 李军 (5222)
长期暴露下纳米 TiO ₂ 对厌氧颗粒污泥体系稳定性的影响	李慧婷, 崔福义 (5229)
长三角典型城郊不同土地利用土壤抗生素组成及分布特征	赵方凯, 陈利顶, 杨磊, 方力, 孙龙, 李守娟 (5237)
不同有机肥中磷在土壤剖面中累积迁移特征与有效性差异	张田, 许浩, 茹淑华, 苏德纯 (5247)
有机磷酸酯在三峡库区土壤中污染特征	何明靖, 杨婷, 杨志豪, 魏世强 (5256)
上海某生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染特征、来源分析及潜在生态风险评价	郭彦海, 孙许超, 张士兵, 余广杰, 唐正, 刘振涛, 薛昱, 高品 (5262)
大庆市不同环境介质中多环芳烃污染特征对比及来源解析	宋宁宁, 冯嘉申, 于洋, 李迎霞 (5272)
工业区户外儿童游乐场地表灰尘重金属污染的磁学响应	杨孟, 李慧明, 李凤英, 王金花, 刁一伟, 钱新, 杨兆平, 王成 (5282)
上海市郊工业区附近蔬菜中重金属分布及其健康风险	周雅, 毕春娟, 周泉潇, 张焕焕, 陈振楼, 包新一 (5292)
基施硅肥对土壤微生物有效性及水稻镉累积效应的影响	高子翔, 周航, 杨文弢, 辜娇峰, 陈立伟, 杜文琪, 徐珺, 廖柏寒 (5299)
水稻对气态单质汞的吸收与挥发	尚帅, 田珮, 蒋煜, 武婧轩, 姜珊, 邓泓 (5308)
麦田 O ₃ 浓度的长期变化及其对冬小麦干物质和产量损失的估算	赵辉, 郑有飞, 李硕, 徐静馨, 曹嘉晨, 魏莉, 关清 (5315)
缓控释肥侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果	侯朋福, 薛利祥, 俞映惊, 薛利红, 范立慧, 杨林章 (5326)
生物炭和有机肥对华北农田盐碱土 N ₂ O 排放的影响	石玉龙, 刘杏认, 高佩玲, 张晴雯, 张爱平, 杨正礼 (5333)
成都平原不同类型沟渠 CO ₂ 、CH ₄ 和 N ₂ O 排放通量特征及其影响因素	冯香荣, 邓欧平, 邓良基, 吴铭, 姚昆, 杨泽鹏 (5344)
河流 CO ₂ 与 CH ₄ 排放研究进展	王晓峰, 袁兴中, 陈槐, 何奕忻, 罗珍, 刘恋, 何宗茂 (5352)
《环境科学》第 38 卷 (2017 年) 总目录	(5367)
《环境科学》征稿简则 (4950) 《环境科学》征订启事 (5031) 信息 (4923, 5105, 5161)	

基于多源数据的 $PM_{2.5}$ 浓度时空分布预测与制图

肖璐¹, 郎艺超¹, 夏浪³, 楼昭涵¹, 孙楠¹, 黄李童¹, George Christakos^{1,2*}

(1. 浙江大学海岛与海岸带研究所, 舟山 316021; 2. Department of Geography, San Diego State University, San Diego, CA, USA; 3. 北京市农林科学院北京市农业智能装备技术研究中心, 北京 100089)

摘要: 随着我国经济、工业化、城市化进程迅速发展, $PM_{2.5}$ 污染在中国已经成为一个极端的环境和社会问题, 并引起广泛关注. 采用新技术估算的地表 $PM_{2.5}$ 质量浓度, 收集并处理了遥感反演的气溶胶光学厚度 (AOD), 气象数据, 其他地理数据和污染物排放数据, 采用贝叶斯最大熵 (BME) 结合地理加权回归 (GWR) 来分析 2015 年冬季的 $PM_{2.5}$ 暴露在我国东部大范围区域的时空变异特征. 结果表明, BME 模型的十折交叉验证结果的决定系数 R^2 为 0.92, 均方根误差 (RMSE) 为 $8.32 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 平均拟合误差 (MPE) 为 $-0.042 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 平均绝对拟合误差 (MAE) 为 $4.60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 与地理加权回归模型的结果相比 ($R^2 = 0.71$, $\text{RMSE} = 15.68 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\text{MPE} = -0.095 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\text{MAE} = 11.14 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), BME 的预测结果有极大的提高. 空间上, $PM_{2.5}$ 高浓度地区主要集中在华北、长江三角洲、四川盆地, 低浓度地区主要集中在我国的最南部如珠江三角洲和云南的西南部; 时间上, 不同月份的研究区域 $PM_{2.5}$ 空间分布所有差别, 2015 年的 12 月、2016 年 1 月 $PM_{2.5}$ 污染最为严重, 2015 年的 11 月, 2016 年的 2 月污染相对较低.

关键词: $PM_{2.5}$; 遥感; 气溶胶光学厚度; 贝叶斯最大熵; 地理加权回归; 制图

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)12-4913-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201705122

Space-Time Estimations and Mapping of $PM_{2.5}$ Fine Particulates Based on Multi-source Data

XIAO Lu¹, LANG Yi-chao¹, XIA Lang³, LOU Zhao-han¹, SUN Nan¹, HUANG Li-tong¹, George Christakos^{1,2*}

(1. Institute of Islands and Coastal Ecosystems, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China; 2. Department of Geography, San Diego State University, San Diego, CA, USA; 3. Beijing Agricultural Intelligent Equipment Technology Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100089, China)

Abstract: $PM_{2.5}$ pollution in China has become an extreme environmental and social problem and has generated widespread public concern. We estimate ground-level $PM_{2.5}$ from satellite-derived aerosol optical depth (AOD), topography data, meteorological data, and pollutant emissions using a new technique, Bayesian maximum entropy (BME) combined with geographically weighted regression (GWR), to evaluate the spatial and temporal characteristics of $PM_{2.5}$ exposure in an eastern region of China in winter. The overall 10-fold cross-validation R^2 is 0.92, and the root mean squared prediction error (RMSE) is $8.32 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. The mean prediction error (MPE) of the predicted monthly $PM_{2.5}$ is $-0.042 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, the mean absolute prediction error (MAE) is $4.60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Compared with the results of the Geographically Weighted Regression model-GWR ($R^2 = 0.71$, $\text{RMSE} = 15.68 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\text{MPE} = -0.095 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\text{MAE} = 11.14 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), the prediction by the BME were greatly improved. In this location, the high $PM_{2.5}$ concentration area is mainly concentrated in North China, the Yangtze River Delta, and Sichuan Basin. The low concentration area is mainly concentrated in the south of China, including the Pearl River Delta and southwest of Yunnan. Temporally, there is migration trend from the coastal areas inland, and $PM_{2.5}$ pollution is most serious in December 2015 and January 2016. It is relatively low in November 2015 and February 2016.

Key words: $PM_{2.5}$; remote sensing; aerosol optical depth (AOD); Bayesian maximum entropy (BME); geographically weighted regression (GWR); air pollution mapping

环境空气污染物包括颗粒物、臭氧、二氧化氮、二氧化硫等污染物, 空气动力学直径小于 $2.5 \mu\text{m}$ 的细颗粒物 ($PM_{2.5}$), 它是呼吸道, 心脏病, 肺部疾病的主要污染物质之一^[1]. $PM_{2.5}$ 可引起严重的心血管疾病, 心脏病, 呼吸系统疾病甚至肺癌^[2, 3], 根据世界卫生组织 2014 年的报告, 2012 年世界各地发生了 370 万人与周围空气污染有关的过早死亡事件. 特别是对于中国这样的人口大国, 随

着中国经济, 工业化, 城市化进程迅速发展, 公众更容易暴露在污染的空气中, $PM_{2.5}$ 污染在中国已经成为一个极端的环境和社会问题^[4], 并且引起了公众以及政府环保部门的重点关注^[4~8].

收稿日期: 2017-05-12; 修订日期: 2017-06-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (529105-N11701ZJ)

作者简介: 肖璐 (1993~), 女, 硕士, 主要研究方向为空气污染时空数据分析与建模, E-mail: xiaolu93@zju.edu.cn

* 通信作者, E-mail: gchristakos@zju.edu.cn

一般来说,地面测量被认为是收集 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最可靠的方法,但是大多数污染物浓度信息是从地面监测点获得的,这些方法有很多限制比如这些监测站点数量有限,分布不均匀^[9],并且在不同年份具有不同的数量和测量频率范围^[10]. 中国在 2012 年底陆续开展了全国大中城市的地面站点 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的实时采样监测,然而受仪器设备价格、监测站要求高、人力资源限制等,我国在 2013 年前还没有建立起全国的空气质量监测网络系统,所以仅依靠稀少站点的监测手段是无法满足获取全国大范围内的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度时空分布信息^[11]. 遥感技术可以提供连续高分辨率和大范围时空尺度的 $\text{PM}_{2.5}$ 数据,因为其反演的大气气溶胶光学厚度(aerosol optical depth, AOD)产品与大气颗粒浓度具有显著的相关性^[12]. 国内外研究表明,许多研究人员试图使用一系列传统的统计模型估算地面 $\text{PM}_{2.5}$ 水平, Wang 等^[13]使用了线性回归模型, Liu 等^[14]提出了化学传输模型(CTM), Lee 等^[15]提出了混合效应模型(MEM),而 Ma 等^[16]应用了地理加权回归(GWR)模型,都达到了显著的效果. 因此,遥感技术、时空模型和预测理论在评估空气污染和环境卫生方面发挥了重要作用. 但现有研究缺乏对模型的精度和稳健性分析^[11],以及一套严谨的针对地统计的时空地理数据分析的理论框架的应用还比较缺乏.

因此本研究拟结合高分辨率的遥感 AOD、气象数据、污染物排放数据以及其他基础地理空间数据,而且综合考虑 $\text{PM}_{2.5}$ 空间差异性,提出一种集成多源数据集预测冬季中国东部大气污染浓度的新的时空建模方法——基于贝叶斯最大熵的时空预测和制图技术(BME)结合地理加权回归,以期今后的政府环保部门的污染治理以及人体暴露研究提供决策上的支持.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

本研究区域选取我国大部分区域,即除去新疆、西藏、青海、内蒙古、黑龙江省(图 1),由于这些区域的 $\text{PM}_{2.5}$ 监测点稀疏且分布不均匀,为了模型的精度和准确性,而且由于受冬季雪地,海拔,雾气和云等影响,黑龙江地区、新疆、西藏大部分地区、青海和内蒙古东部、四川盆地等地无法获得有效的遥感观测数据,先前的研究如 Ma 等^[16]、Zou^[17]、陈辉等^[18]对这些区域的 $\text{PM}_{2.5}$ 的预测也都是空白区域,所以这些省份不纳入本研究区域. 本

文整个研究地区面积为 418 万 km^2 , 占全国总面积的 47.08%, 研究区域人口为 12.72 亿, 占总人口的 93%, 其中包括 357 997 个 $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ 分辨率的空间规则格网. 如此大区域及人口对于我国治理环境污染并开展健康效益评估有重大的意义.

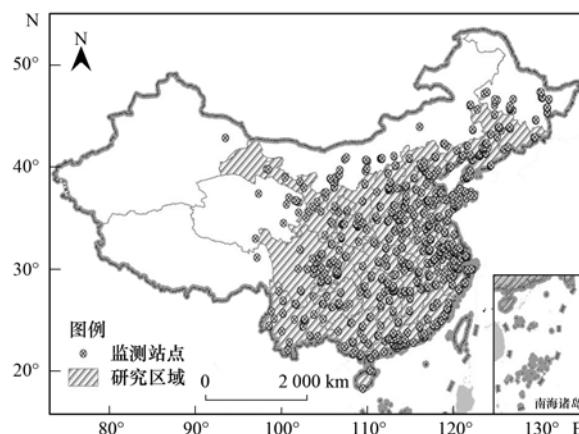


图 1 研究区域及 $\text{PM}_{2.5}$ 站点分布示意

Fig. 1 Spatial distribution of $\text{PM}_{2.5}$ monitoring sites in the study area

1.2 数据收集和预处理

本研究数据如下. ① 地面空气污染物监测站点数据: 每日 24 h 平均 $\text{PM}_{2.5}$ 、 NO_2 、CO 浓度来源于中国环境监测总站网上发布平台 (<http://www.cnemc.cn>), 时间范围: 2015 年 11 月 1 日至 2016 年 2 月 29 日期间. $\text{PM}_{2.5}$ 、 NO_2 、CO 浓度小于 $2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ^[19] (占总记录的 5.6%) 而且一个月之内少于 15 d 观测记录的站点被剔除, 因为这些观察值和站点不符合中华人民共和国环境空气质量标准 (china national ambient air quality standards, CNAAQs) 的要求, 也不利于模型的构建. 日均 $\text{PM}_{2.5}$ 、 NO_2 、CO 数据用于计算每个月的平均浓度, 通过使用 R 3.3.2 (<https://www.r-project.org/>) 获得 4 个月相应污染物的浓度平均值, 得到了 3 种污染物的 1 408 个站点 3 009 个月平均质量浓度观测值, 同时为了减轻地理上的边缘效应, 将研究区域周围平均分布的 43 个监测站点纳入了研究范围; ② 本研究使用的 MODIS V5.2 版本的气溶胶光学厚度数据 (分辨率为 3 km) 来自于 NASA 戈达德飞航中心 (Goddard Space Flight Center, GSFC) 的数据分发系统 (level1 and the atmosphere archive and distribution system, LAADS). 2015 年 11 月 1 日到 2016 年 2 月 29 日的上午 10:30 过境的 Terra MODIS 数据和下午 1:30 过境的 Aqua MODIS 被用来合成获取中国区域的逐日气溶胶数据产品. ③ 气象监测数据: 包括温度、相对湿度、气压、降水、风速, 其来源于中国气

象数据共享服务系统 (<http://cdc.cma.gov.cn>) ; ④ 研究区域道路矢量图来源于 Wiki 世界地图数据库 (<http://www.openstreetmap.org>) ; ⑤ 人口数据 (1 km 分辨率) 来源于 the Gridded Population of the World, Version 4 (GPWv4) (<http://sedac.ciesin.columbia.edu/data/collection/gpw-v4>) ; ⑥ 其他地理基础数据: 500 m 分辨率的地表分类数据来自 Global Land Cover Facility-MODIS Land Cover (<http://www.landcover.org/data/lc/>) ; 30m 分辨率的数字高程 (DEM) 数据来自 the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM, <http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>) .

基于数据预处理和提取, 本研究首先通过专业气象插值软件 (ANUSPLIN) 将所有类型气象数据插值成 3 km 分辨率; 同样再通过 ArcGIS 10.3 的反距离加权方法 (inverse distance weighted, IDW) 将 NO₂、CO 质量浓度数据插值成 3 km × 3 km 分辨率数据, 所有的地图数据处理均采用 Asia Lambert Conformal Conic 坐标系统. 最后, 本研究创建了 3 km × 3 km 空间分辨率的空间规则格网数据, 包括 357 997 个网格单元, 通过该格网数据分别提取本研究的所有环境因子数据: AOD、NO₂、CO 和气象因子, 4 种土地利用类型数据: 森林、绿地、城市、水体, 人口数据, 高程和道路数据. 此外由于数据的数量级和种类复杂繁多, 本研究通过使用 z-score 方法先将环境数据标准化, 再通过多元回归 (multiple linear regression, MLR) 筛选出了与 PM_{2.5} 显著相关的上文提及的环境因子.

1.3 方法

1.3.1 地理加权回归模型

基于最小二乘回归 (OLS), 1996 年, Fotheringham 等^[20]开发了一种通过构建局部回归模型——地理加权回归 (geographic weighted regression, GWR) 来探索空间异质性的方法. GWR 模型将空间位置嵌入到回归参数中, 并考虑参数的局部估计^[21], 即考虑局部特征作为权重, 用空间权重矩阵来表征不同区域的空间非平稳性, 增强变量间空间位置关系的自适应性, 使得其进行空间建模的结果更贴合实际情况^[22]. 地理加权回归模型的核心是空间权重矩阵, 它是根据不同空间权函数来表达数据不同的空间关系, 因此空间权函数的选取对模型参数的正确估计很重要, 本文采取了最常用的自适应带宽高斯 (Gaussian) 核函数, 带宽的准则设定为校正 Akaike 信息量准则 (corrected akaike information criterion,

AICc). 本文 GWR 模型公式如下:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_k \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} + \varepsilon_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中, (u_i, v_i) 代表采样点 i 的空间坐标, $\beta_0(u_i, v_i)$ 是样本 i 的截距, $\beta_k(u_i, v_i)$ 是采样点 i 的回归系数. ε_i 是随机误差, 如果 $\beta_k(u_1, v_1) = \beta_k(u_2, v_2) = \dots = \beta_k(u_n, v_n)$, GWR 模型将被改变成一个 OLS 模型^[23].

1.3.2 贝叶斯最大熵

贝叶斯最大熵 (bayesian maximum entropy, BME) 是由 George Christakos 教授 1990 年提出的时空建模与预测理论^[24, 25], 相比传统的插值方法如克里格, 有着数据的不确定性, 是否高斯分布等限制, 但是 BME 的数据可以是非线性的和非高斯的, 它能综合来自许多不同来源的信息数据以达到精准预测和制图的效果^[26]. 它的过程可以在各种软件库上实现, 例如, 基于 Matlab 的 SEKS-GUI 时空分析软件 (<http://140.112.63.249/SEKSGUI/SEKSHome.html>)、BMElib、QuantumBME 和 StarBME^[25, 27, 28]. BME 是一套逻辑性严谨的而非简单计算的方法, BME 将所有收集到的数据、信息统称为下知识库 (knowledge base, K), K 根据性质的差异划分为两大类, 即核心知识库 (core knowledge base, G) 和特定知识 (site-specific knowledge base, S). 核心知识库 G 包括时空协方差模型, 物理法则和科学理论, 比如 GWR 模型, 理论的 BME 协方差函数; 特定知识库 S 包括硬数据 (hard data) 和软数据 (soft data), 硬数据是误差可以忽略的数据, 比如污染物浓度站点数据, 而软数据是相对不精确的数据, 比如 GWR 预测的污染浓度数据. 主要包括 3 个阶段: 先验阶段 (prior stage)、中间阶段 (meta-prior stage) 和后验阶段 (posterior stage). 在第一阶段主要利用最大熵原理 (maximum entropy) 找到包含最大信息量 G 的、最贴近真实情况的先验概率密度函数 (prior pdf) f_G ; 在中间阶段, 将特定知识 S 以合理的形式表达出来; 后验阶段结合 S 和 f_G , 在广义贝叶斯条件 (operational Bayesian conditionalization) 基于 K , 得到后验概率密度函数 (posterior pdf) f_K ^[29]. 根据 f_K 可计算出待出图预测点的预测均值 $\hat{\chi}_{k, \text{mean}}$, 上述函数具体构造如下:

$$f_G(\chi_{\text{map}}) = e^{\mu_0 + \mu^T g} \quad (2)$$

$$f_K(\chi_k) = A^{-1} \int f_G(\chi_k) d\chi_k \quad (3)$$

$$\hat{\chi}_{k, \text{mean}} = \int \chi_k f_K(\chi_k) d\chi_k \quad (4)$$

式中, $\chi_{\text{map}} = [\chi_{\text{data}}, \chi_k]$, 其中 $\chi_{\text{data}} = [\chi_{\text{hard}}, \chi_{\text{soft}}]$, χ_{hard} 、 χ_{soft} 分别表示硬数据和软数据在各自相应位置的实现值, $\chi_{\text{hard}} = [\chi_1, \dots, \chi_{m_k}]^T$, $\chi_{\text{soft}} = [\chi_{m_k+1}, \dots, \chi_m]^T$; μ_0 是体现归一化约束条件的常数项; μ 表示每个函数的相对重要性的系数向量; g 在数学上表示可用的核心知识库 G (core knowledge base) 的函数向量 (g 和 μ 都表示向量的内积, 它们都是时空的函数). 式中, χ_k 表示某个待估计点 p_k 的估计值, A 是归一化参数.

关于上述 BME 方程的更多技术细节可以在相关研究中找到^[24, 27, 30].

1.3.3 贝叶斯最大熵结合地理加权回归模型理论

本研究把 $\text{PM}_{2.5}$ 站点数据当做因变量, AOD、气象因子、NO、CO、地理基础数据当做自变量, 基于 GWR 预测 3 km 分辨率的空间规则格网的中心坐标的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值和已知 $\text{PM}_{2.5}$ 站点的预测浓度值, 然后把得到的已知 $\text{PM}_{2.5}$ 站点残差数据当做硬数据放入 BME, 进行时空协方差拟合, 预测未知的 3 km

分辨率的规则格网的中心坐标的 $\text{PM}_{2.5}$ 残差浓度值, 那么最终 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的估计值可由式(5)和(6)计算得出.

$$R_{s,t} = O_{s,t} - Z_{\text{GWR}} \quad (5)$$

$$Z(s,t) = Z_{\text{GWR}} + Z_{\text{BME}}(R_{s,t}) \quad (6)$$

式中, $R_{s,t}$ 表示实际观测值与 GWR 预测值的残差值; $O_{s,t}$ 表示实际的观测值, Z_{GWR} 表示 GWR 的预测值. $Z(s,t)$ 代表最终的预测值, $Z_{\text{BME}}(R_{s,t})$ 表示 BME 预测的残差值, 由式(4)推算得到.

1.3.4 模型精度评价

本文采用交叉验证的方法 cross-validation (CV)^[31] 来验证和比较 GWR 和 BME 模型的可靠性. 具体使用十折交叉验证方法 10-fold cross validation^[32], 基于决定系数 (R^2), 平均拟合误差 (MPE), 平均绝对误差 (MAE) 和均方根误差 (RMSE) 来评估这两种模型进行预测的精度与稳定性. 本文的数据集和研究方法如图 2 流程所示.

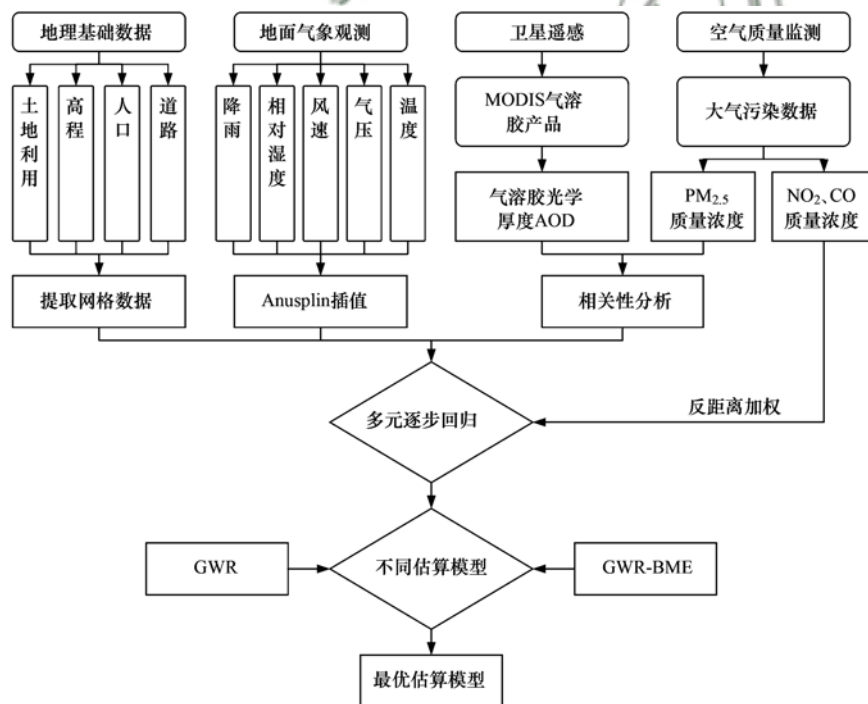


图 2 研究区域 $\text{PM}_{2.5}$ 预测流程

Fig. 2 $\text{PM}_{2.5}$ prediction processes in the study area

2 结果与讨论

2.1 数据的描述性统计

在所有类型数据即变量在数据预处理和匹配之后, 本文对模型采用的所有相关数据进行了箱线图分析, 相关数据包括 $\text{PM}_{2.5}$ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、气溶

胶 AOD (无量纲)、一氧化碳 CO ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、二氧化氮 NO_2 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、道路长度 Road_Length (m)、城市面积 City (m^2)、森林 Forest (m^2)、高程 DEM (m)、风速 WS ($0.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)、降雨 Prec (0.1 mm)、气压 Pres (0.1 Pa)、相对湿度 RH (%)、水体 Water (m^2)、绿地 Green (m^2)、温度 Temp

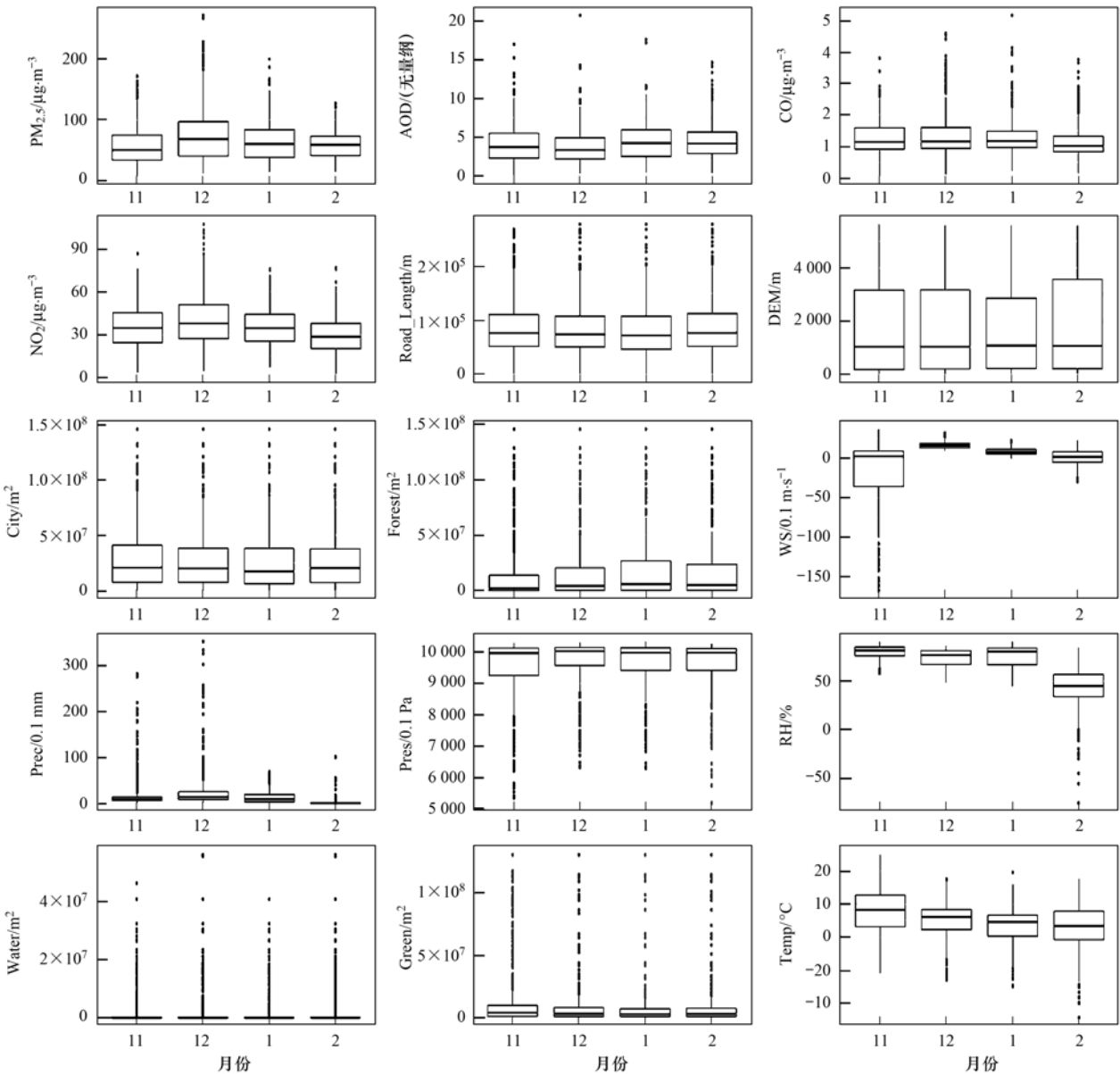


图3 2015 年 11 月 ~ 2016 年 2 月的 $PM_{2.5}$ 及环境变量的月平均值

Fig. 3 Box plot of monthly average concentration $PM_{2.5}$ and environmental variables from Nov. 2015 to Feb. 2016

($0.1^{\circ}C$)。箱线图的结果如图 3 所示，各个变量都有较大的时空变异。

2.2 多元回归筛选变量结果

研究区域 2015 年 11 月到 2016 年 2 月的月平均 $PM_{2.5}$ 质量浓度多元回归模型结果如表 1 所示。从中可以看出,2016 年 1 月 2 月只是部分环境变量进入模型。所有进入模型的变量在 $\alpha = 0.05$ 水平上具有统计学显著性(Sig. 值均小于 0.05)，而且共线性诊断指标——方差膨胀因子 VIF(variance inflation factor)均接近 1 小于 10,说明变量之间的共线性很小。

2.3 GWR 和 BME 模型拟合结果

研究区域 2015 年 11 月到 2016 年 2 月的月平

均 $PM_{2.5}$ 质量浓度地理加权回归最佳模型及参数如表 2 所示。GWR 模型的 4 个月的模型拟合度在 0.63 ~ 0.83，冬季平均拟合度为 0.76。类似的研究如蒲强等^[11]对京津冀地区 2013 年的年均、季均 $PM_{2.5}$ 浓度模拟制图的研究结果表明,结合遥感 AOD 数据的地理加权回归模型拟合度在 0.66 左右；陈辉等^[18]基于卫星遥感、气象数据采用地理加权模型进行对我国 2013 年冬季的 $PM_{2.5}$ 质量浓度预测，结果表明模型拟合结果在 0.7 左右。以上的所有相关研究都表明地理加权回归模型(GWR)明显优于传统的多元线性回归(MLR)。从模型各变量系数统计结果来看，每个月的 AOD、降雨、湿度、温

表 1 基于多元线性回归模型结果

Table 1 Results from MLR model

MLR 模型	变量	非标准化系数	标准误差	标准系数	<i>t</i>	Sig.	VIF
2015 年 11 月	截距	-69.035	15.274		-4.52	0.00	
	AOD (无量纲)	6.789	2.989	0.051	2.271	0.023	1.514
	Prec/0.1mm	0.021	0.03	0.025	0.71	0.008	3.652
	Pres/0.1Pa	0.013	0.001	0.418	11.733	0.00	3.878
	RH/%	-0.246	0.107	-0.061	-2.304	0.021	2.153
	Temp/0.1℃	-0.209	0.012	-0.514	-17.238	0.00	2.713
	WS/0.1m·s ⁻¹	-0.009	0.019	-0.012	-0.471	0.038	1.919
	NO ₂ /μg·m ⁻³	0.591	0.053	0.276	11.109	0.00	1.88
	CO/μg·m ⁻³	8.083	1.512	0.133	5.345	0.00	1.899
	Road_Length/m	8.02 × 10 ⁻⁶	0	0.013	0.628	0.003	1.213
	DEM/m	0	0	-0.019	-0.992	0.001	1.158
	Pop/people	0	0	0.022	1.163	0.005	1.63
	Forest/m ²	-3.20 × 10 ⁻⁸	0	-0.027	-1.236	0.017	1.46
	Green/m ²	-6.34 × 10 ⁻⁸	0	-0.045	-2.187	0.029	1.302
	City/m ²	6.10 × 10 ⁻⁸	0	0.056	2.762	0.006	1.255
	Water/m ²	-8.94 × 10 ⁻⁸	0	-0.015	-0.791	0.029	1.087
	R ²	0.69					
2015 年 12 月	截距	-23.144	28.448		-0.814	0.016	
	AOD (无量纲)	-10.695	4.249	-0.051	-2.517	0.012	1.23
	Prec/0.1mm	-0.057	0.03	-0.059	-1.886	0.06	2.96
	Pres/0.1Pa	0.011	0.002	0.204	6.338	0.00	3.13
	RH/%	-0.302	0.206	-0.057	-1.465	0.043	4.520
	Temp/0.1℃	-0.234	0.023	-0.317	-10.138	0.00	2.928
	WS/0.1m·s ⁻¹	-1.463	0.258	-0.145	-5.672	0.00	1.975
	NO ₂ /μg·m ⁻³	0.794	0.069	0.323	11.449	0.00	2.389
	CO/μg·m ⁻³	18.986	1.833	0.309	10.357	0.00	2.662
	Road_Length/m	1.87E-05	0	0.021	1.049	0.024	1.219
	DEM/m	0.002	0	0.1	4.957	0.00	1.232
	Pop/people	0	0.001	0.004	0.193	0.047	1.557
	Forest/m ²	-7.59 × 10 ⁻⁸	0	-0.047	-2.062	0.04	1.545
	Green/m ²	1.19 × 10 ⁻⁸	0	0.004	0.231	0.018	1.138
	City/m ²	-2.00 × 10 ⁻⁸	0	-0.012	-0.607	0.044	1.217
	Water/m ²	2.23 × 10 ⁻⁸	0	0.032	1.653	0.009	1.102
	R ²	0.77					
2016 年 1 月	截距	-37.703	16.434		-2.294	0.022	
	AOD (无量纲)	4.025	4.137	0.029	0.973	0.031	1.374
	Prec/0.1mm	-0.883	0.078	-0.444	-11.346	0.00	1.80
	Pres/0.1Pa	0.009	0.002	0.248	5.961	0.00	1.97
	RH/%	-0.023	0.16	-0.008	-0.141	0.008	5.072
	WS/0.1m·s ⁻¹	-1.491	0.556	-0.197	-2.679	0.008	5.104
	NO ₂ /μg·m ⁻³	0.839	0.079	0.355	10.594	0.00	1.585
	CO/μg·m ⁻³	12.637	2.027	0.223	6.234	0.00	1.921
	DEM/m	0.001	0.001	0.061	2.168	0.031	1.147
	Forest/m ²	-1.30 × 10 ⁻⁷	0	-0.112	-3.508	0.00	1.437
	R ²	0.67					
2016 年 2 月	截距	-139.272	17.321		-8.041	0.00	
	AOD (无量纲)	18.02	2.449	0.2	7.358	0.00	1.242
	Pres/0.1Pa	0.023	0.003	0.999	9.217	0.00	2.593
	RH/%	-1.144	0.213	-1.167	-5.361	0.00	3.034
	WS/0.1m·s ⁻¹	2.219	0.221	1.032	10.03	0.00	1.556
	NO ₂ /μg·m ⁻³	0.496	0.055	0.295	8.969	0.00	1.592
	CO/μg·m ⁻³	2.165	1.261	0.052	1.716	0.006	1.615
	Forest/m ²	-8.54 × 10 ⁻⁸	0	-0.118	-3.984	0.00	1.459
	City/m ²	-4.96 × 10 ⁻⁸	0	-0.063	-2.407	0.016	1.38
	Water/m ²	-1.62 × 10 ⁻⁷	0	-0.048	-1.97	0.049	1.039
	R ²	0.53					

表 2 GWR 模型拟合结果

Table 2 Model fitting for GWR

GWR 模型	变量	模型变量系数统计			
		极小值	极大值	均值	标准差
2015 年 11 月	截距	-20.46	54.94	24.05	26.35
	AOD (无量纲)	-0.74	7.08	2.42	1.54
	Prec/0.1 mm	-25.00	9.85	-6.63	8.64
	Pres/0.1 Pa	1.04	25.81	16.04	8.34
	RH/%	-26.83	28.41	2.88	16.22
	Temp/0.1 °C	-49.74	-2.08	-26.86	14.94
	WS/0.1 m·s ⁻¹	-2.26	1.50	-0.01	1.13
	NO ₂ /μg·m ⁻³	2.92	11.37	6.07	1.97
	CO/μg·m ⁻³	1.24	5.92	3.69	1.28
	Road_Length/m	-0.25	1.87	1.01	0.61
	DEM/m	-0.91	0.84	-0.02	0.46
	Pop/people	-1.24	2.29	0.26	0.94
	Forest/m ²	-4.52	0.16	-1.80	1.05
	Green/m ²	-2.05	2.50	0.07	1.15
	City/m ²	-0.61	2.48	0.95	0.89
	Water/m ²	-2.56	0.05	-0.79	0.63
	R ²	0.78			
2015 年 12 月	截距	12.91	62.21	37.12	8.65
	AOD (无量纲)	-4.26	-0.93	-3.28	0.71
	Prec/0.1 mm	-13.55	4.59	-4.00	4.80
	Pres/0.1 Pa	9.78	19.44	15.31	2.73
	RH/%	-19.30	-0.92	-12.52	3.91
	Temp/0.1 °C	-50.18	-0.01	-27.64	10.96
	WS/0.1 m·s ⁻¹	-34.84	9.16	-15.81	14.99
	NO ₂ /μg·m ⁻³	6.31	11.76	8.91	1.37
	CO/μg·m ⁻³	2.95	9.11	6.10	1.87
	Road_Length/m	-1.21	3.57	0.61	1.36
	DEM/m	1.69	5.22	3.29	0.97
	Pop/people	-4.81	2.32	-0.81	0.88
	Forest/m ²	-3.39	-0.76	-2.13	0.56
	Green/m ²	-0.20	4.09	1.58	1.12
	City/m ²	-0.97	1.54	0.44	0.54
	Water/m ²	0.20	2.44	0.96	0.45
	R ²	0.83			
2016 年 1 月	截距	14.24	128.89	71.62	29.89
	AOD (无量纲)	-7.85	6.19	-0.20	2.99
	Prec/0.1 mm	-142.04	-16.81	-59.29	35.81
	Pres/0.1 Pa	-9.93	16.30	5.76	6.94
	RH/%	-16.47	7.25	-3.47	6.49
	WS/0.1 m·s ⁻¹	-94.65	116.82	13.08	57.56
	NO ₂ /μg·m ⁻³	4.75	13.87	7.91	2.06
	CO/μg·m ⁻³	0.37	7.20	3.70	1.71
	DEM/m	-2.15	3.86	0.42	1.69
	Forest/m ²	-5.85	1.42	-1.62	1.70
	R ²	0.8			
2016 年 2 月	截距	49.46	73.72	60.89	6.28
	AOD (无量纲)	1.28	8.62	5.19	2.27
	Pres/0.1 Pa	12.58	44.63	31.14	8.44
	RH/%	-31.60	-6.68	-22.27	5.87
	WS/0.1 m·s ⁻¹	18.93	57.66	49.76	8.61
	NO ₂ /μg·m ⁻³	3.81	6.48	5.13	0.70
	CO/μg·m ⁻³	-0.39	1.58	0.60	0.51
	Forest/m ²	-2.76	-0.92	-1.87	0.43
	City/m ²	-1.71	0.44	-0.90	0.54
	Water/m ²	-1.47	-0.41	-0.93	0.22
	R ²	0.63			

度和 NO_2 对 $\text{PM}_{2.5}$ 的污染浓度有较大的贡献,这也说明了不利的气象条件和本地的污染排放可能会对 $\text{PM}_{2.5}$ 的污染浓度造成主要的影响。

由于 GWR 只能对空间进行预测不能对时间进行预测,所以每个月每个监测点的预测模型都不一样,其包含的自变量也是不一样的,而 BME 能同时充分考虑到时间和空间的差异,是一套有效的时空插值理论。

本研究将监测站点的 GWR 预测值与实际观测值的残差作为硬数据(hard data)放入 BME,分别进行时间和空间的协方差拟合如图 4,本研究注

意到,图上方三维协方差拟合图中,原点附近真实值与拟合的表面比较贴近,但随着距离和时间的增加,贴合度降低,这也符合地理学第一定律:地理事物或属性在空间分布上互为相关,越近的事物间相关性越强。分开来看,协方差在空间上,接近原点附近显示出急剧下降的趋势,而它们在时间轴上表现出非常缓慢的下降。这种双重行为表明时空中的变异性随着采样点的距离和时间增加而缩短,但是在时间上变化得相对缓慢。总体来讲,在空间维度和时间维度上,BME 协方差模型拟合结果较好。

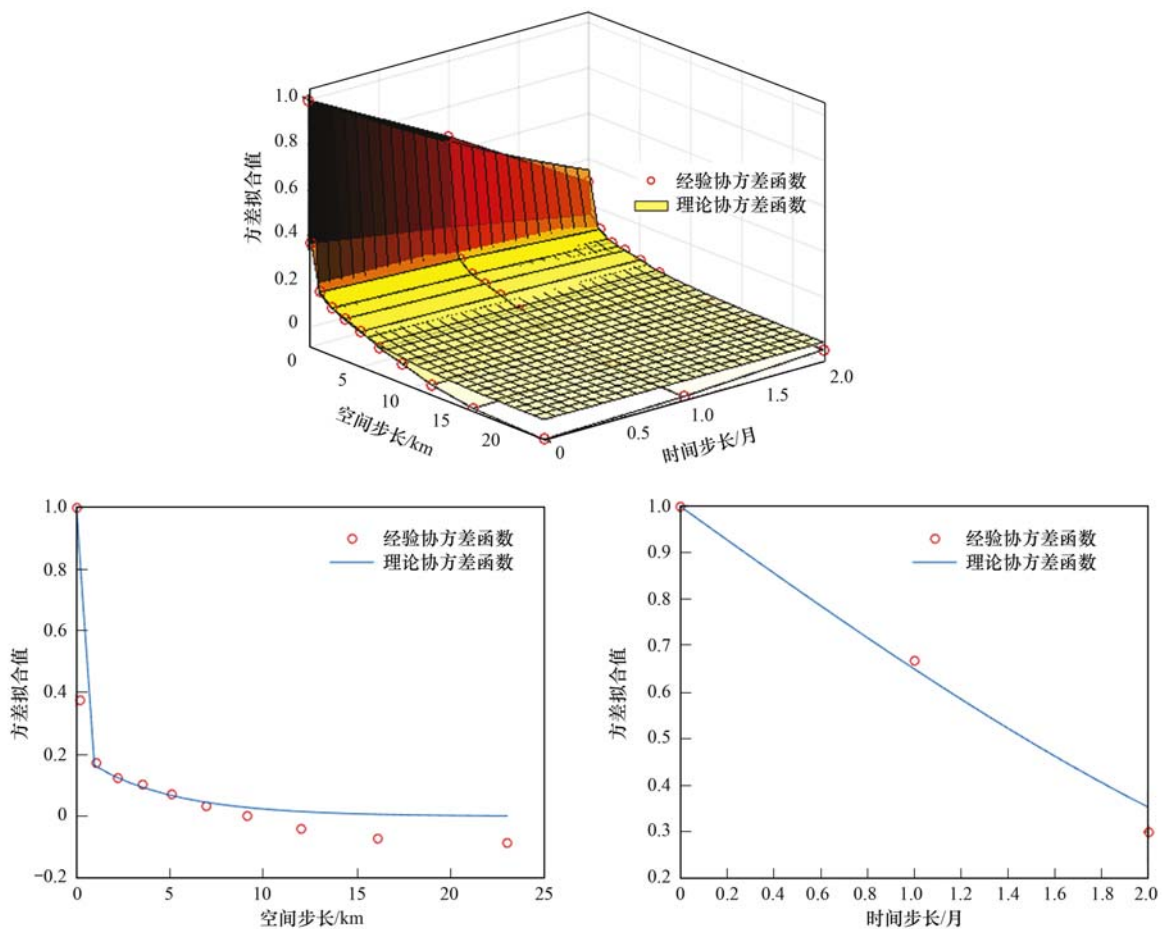


图 4 BME 协方差拟合结果

Fig. 4 Covariance model fitting of BME

2.4 GWR 与 BME 十折交叉验证结果比较

本研究区域广泛,时间精度比较高,虽然 GWR 模型能从局部体现 $\text{PM}_{2.5}$ 污染程度空间差异特性,但是它却不能体现时间尺度上的差异性,而 BME 是一套完整的时空数据分析理论框架,能较好地与 GWR 相结合,成为一种新的时空数据预测模型。

表 3 是比较 GWR 和 BME 模型的精度评价结果,结果表明在 GWR 模型的预测基础上,在加入

BME 后,预测的精度得到了明显的提高, R^2 由 0.71 提高到了 0.92, RMSE 由 $15.68 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 降低到了 $8.32 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, MPE 由 $-0.095 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 上升到了 $-0.042 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, MAE 由 $11.14 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 下降到了 $4.60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。综合各个精度评价指标来看, BME 模型结果优于 GWR。

2.5 基于 BME 的 $\text{PM}_{2.5}$ 时空预测制图

为了进一步分析 $\text{PM}_{2.5}$ 时空差异性,根据 BME

表 3 GWR 和 BME 模型的交叉验证结果比较

Table 3 10-fold cross validation of GWR and BME models

模型	R^2	RMSE/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	MPE/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	MAE/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
GWR	0.71	15.68	-0.095	11.14
BME	0.92	8.32	-0.042	4.60

模型的结果，以 2015 年开始的冬季 4 个月的 PM_{2.5} 的时空预测分布(3 km 分辨率)情况如图 5 所示，可以看出，空间上，PM_{2.5} 的分布呈整体一片模式而且有明显的区域分布特性，高浓度地区主要分布在华北、长江三角洲、四川盆地，但是随着时间的推移，

不同月份的研究区域的 PM_{2.5} 空间分布有所差别，2015 年的 12 月、2016 年 1 月 PM_{2.5} 污染最为严重，2015 年的 11 月，2016 年的 2 月污染相对较低，而以四川盆地与沿海地区为例，到了 12 月，四川盆地四面环山，风速小、气压低，所以 PM_{2.5} 浓度长期居高不下^[33]，而沿海地区受季风和降雨的影响^[34]，空气中污染颗粒物浓度随着时间变化得到充分的稀释，所以浓度有所降低。而且中国的最南部如珠江三角洲和云南的西南部一直以来是污染最低的区域。

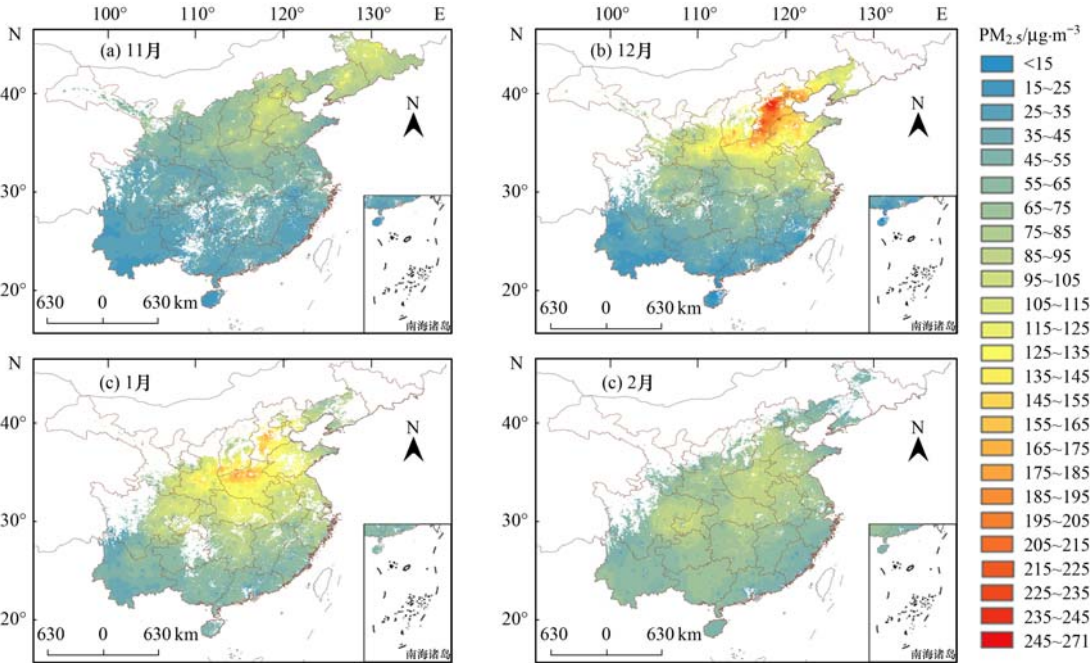


图 5 基于 BME 模型的 2015 年 11 月至 2016 年 2 月的月均 PM_{2.5} 质量浓度时空预测分布

Fig. 5 Spatial distribution of the monthly average PM_{2.5} concentrations estimated by the BME model

3 结论

(1) 本研究中单纯采用地理加权回归模型的结果与国内外的类似的研究结果基本保持了一致性，甚至比其他大部分研究结果略高，在引入贝叶斯最大熵理论后，模型的精度得到了更大的提高，充分显示了该理论的优越性。

(2) 本研究分析 2015 年 11 月~2016 年 2 月全国大部分地区 PM_{2.5} 浓度时空变化的情况，结果显示 PM_{2.5} 浓度有明显的时空差异特性，空间上，PM_{2.5} 高浓度地区主要分布在华北、长江三角洲、四川盆地，低浓度地区主要集中在中国的最南部如珠江三角洲和云南的西南部。时间上，2015 年 12 月、2016 年 1 月 PM_{2.5} 污染最为严重，2015 年 11 月，2016 年 2 月次之。本研究主要集中在污染最严重的冬季，有较高的空间分辨率和时间分辨率，可为今

后政府环保部门的污染治理以及人体暴露研究提供决策上的支持。

致谢：中国环境监测总站全国城市空气质量实时发布平台为本次研究提供了 PM_{2.5} 小时浓度监测数据，NASA 提供的 MODIS AOD 产品下载服务，中国气象数据共享服务系统提供地面气象因子监测数据，在此一并致谢。

参考文献：

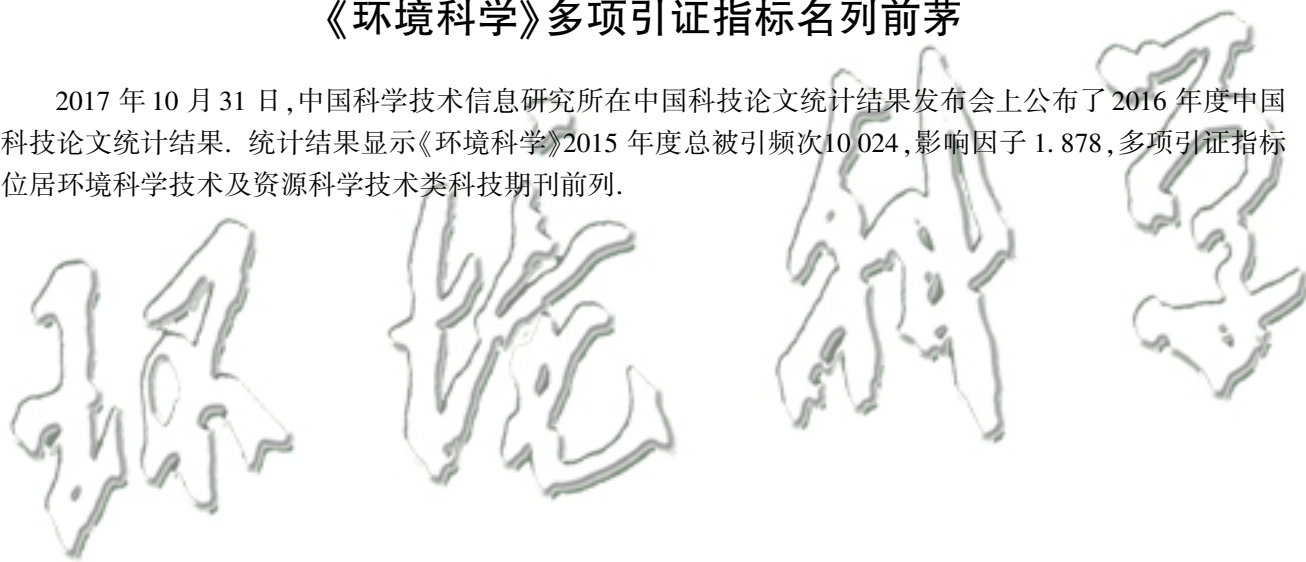
[1] 吴健生, 王茜, 李嘉诚, 等. PM_{2.5} 浓度空间分异模拟模型对比：以京津冀地区为例[J]. 环境科学, 2017, 38(6): 2191-2201.
Wu J S, Wang Q, Li J C, et al. Comparison of models on spatial variation of PM_{2.5} concentration: a case of Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Environmental Science, 2017, 38(6): 2191-2201.
[2] Brook R D, Rajagopalan S, Pope C A, et al. Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: an update to the scientific statement from the American Heart Association[J]. Circulation, 2010, 121(21): 2331-2378.

- [3] Hoek G, Krishnan R M, Beelen R, *et al.* Long-term air pollution exposure and cardio-respiratory mortality: a review[J]. *Environmental Health*, 2013, **12**(1): 43.
- [4] 黄德生, 张世秋. 京津冀地区控制 PM_{2.5} 污染的健康效益评估[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(1): 166-174.
Huang D S, Zhang S Q. Health benefit evaluation for PM_{2.5} pollution control in Beijing-Tianjin-Hebei region of China[J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(1): 166-174.
- [5] 戴海夏, 宋伟民, 高翔, 等. 上海市 A 城区大气 PM₁₀、PM_{2.5} 污染与居民日死亡数的相关分析[J]. *卫生研究*, 2004, **33**(3): 293-297.
Dai H X, Song W M, Gao X, *et al.* Study on relationship between ambient PM₁₀, PM_{2.5} pollution and daily mortality in a district in Shanghai[J]. *Journal of Hygiene Research*, 2004, **33**(3): 293-297.
- [6] 张莉, 王五一, 廖永丰. 城市空气质量健康风险评估研究进展[J]. *地理科学进展*, 2006, **25**(3): 39-47.
Zhang L, Wang W Y, Liao Y F. Research progress on urban air quality health risk assessment[J]. *Progress in Geography*, 2006, **25**(3): 39-47.
- [7] 王家成, 朱成杰, 朱勇, 等. 北京地区多气溶胶遥感参量与 PM_{2.5} 相关性研究[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(7): 1947-1956.
Wang J C, Zhu C J, Zhu Y, *et al.* Correlation between remote sensing aerosol parameters and PM_{2.5} in Beijing [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(7): 1947-1956.
- [8] 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.
- [9] Gupta P, Christopher S A. An evaluation of Terra-MODIS sampling for monthly and annual particulate matter air quality assessment over the southeastern United States[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(26): 6465-6471.
- [10] Lee M, Kloog I, Chudnovsky A, *et al.* Spatiotemporal prediction of fine particulate matter using high-resolution satellite images in the southeastern US 2003-2011[J]. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 2016, **26**(4): 377-384.
- [11] 蒲强, 邹滨, 翟亮, 等. 集成多源遥感数据的 PM_{2.5} 浓度空间分布制图[J]. *地球信息科学学报*, 2016, **18**(12): 1717-1724.
Pu Q, Zou B, Zhai L, *et al.* Mapping of PM_{2.5} fine particulates using multi-source remote sensing data [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2016, **18**(12): 1717-1724.
- [12] Lin C Q, Li Y, Yuan Z B, *et al.* Using satellite remote sensing data to estimate the high-resolution distribution of ground-level PM_{2.5}[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, **156**: 117-128.
- [13] 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.
- [14] Liu Y, Park R J, Jacob D J, *et al.* Mapping annual mean ground-level PM_{2.5} concentrations using Multiangle Imaging Spectroradiometer aerosol optical thickness over the contiguous United States [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, **109**(D22): D22206.
- [15] 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.
- [16] Ma Z W, Hu X F, Huang L, *et al.* Estimating ground-level PM_{2.5} in China using satellite remote sensing[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(13): 7436-7444.
- [17] Zou B, Pu Q, Bilal M, *et al.* High-resolution satellite mapping of fine particulates based on geographically weighted regression [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, **13**(4): 495-499.
- [18] 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.
- [19] Lehmden D J V, Nelson C. Quality assurance handbook for air pollution measurement systems. vol II ambient air specific methods[J]. *Entropy*, 1977, **16**(5): 2512-2529.
- [20] Fotheringham A S, Charlton M E, Brunsdon C. Geographically weighted regression: a natural evolution of the expansion method for spatial data analysis [J]. *Environment and Planning A*, 1998, **30**(11): 1905-1927.
- [21] Lin G, Fu J Y, Jiang D, *et al.* Spatial variation of the relationship between PM_{2.5} concentrations and meteorological parameters in China[J]. *Biomed Research International*, 2015, **2015**: 684618.
- [22] Brunsdon C, Fotheringham A S, Charlton M E. Geographically weighted regression: a method for exploring spatial nonstationarity [J]. *Geographical Analysis*, 1996, **28**(4): 281-298.
- [23] Fotheringham A S, Brunsdon C, Charlton M. Geographically weighted regression: the analysis of spatially varying relationships [M]. New York: John Wiley & Sons, 2002.
- [24] Christakos G. A Bayesian/maximum-entropy view to the spatial estimation problem[J]. *Mathematical Geology*, 1990, **22**(7): 763-777.
- [25] Christakos G. Modern spatiotemporal geostatistics [M]. New York: Oxford University Press, 2000.
- [26] 江曲图, 何俊昱, 王占山, 等. 基于 LUR/BME 的海岸带地区 PM_{2.5} 时空特性研究[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(2): 424-431.
Jiang Q T, He J Y, Wang Z S, *et al.* Spatiotemporal analysis of PM_{2.5} in large coastal domains by combining Land Use Regression and Bayesian Maximum Entropy [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(2): 424-431.
- [27] Yu H L, Kolovos A, Christakos G, *et al.* Interactive spatiotemporal modelling of health systems: the SEKS-GUI framework [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2007, **21**(5): 555-572.
- [28] Christakos G. Integrative problem-solving in a time of decadence [M]. New York: Springer, 2010.
- [29] 张楚天. 贝叶斯最大熵方法时空预测关键问题研究与应用

- [D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.
- Zhang C T. Research on key issues of Bayesian Maximum Entropy spatiotemporal prediction and it's application [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016.
- [30] 杨勇, 张若兮. 贝叶斯最大熵地统计方法研究与应用进展[J]. 土壤, 2014, **46**(3): 402-406.
- Yang Y, Zhang R X. Review on Bayesian Maximum Entropy geostatistics method[J]. Soils, 2014, **46**(3): 402-406.
- [31] 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.
- [32] Rodriguez J D, Perez A, Lozano J A. Sensitivity analysis of k-fold cross validation in prediction error estimation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, **32**(3): 569-575.
- [33] 王淑兰, 柴发合, 张远航, 等. 成都市大气颗粒物污染特征及其来源分析[J]. 地理科学, 2004, **24**(4): 488-492.
- Wang S L, Chai F H, Zhang Y H, *et al.* Analysis on the sources and characters of particles in Chengdu[J]. Scientia Geographica Sinica, 2004, **24**(4): 488-492.
- [34] 刘洁, 张小玲, 徐晓峰, 等. 北京地区 SO_2 、 NO_x 、 O_3 和 $PM_{2.5}$ 变化特征的城郊对比分析[J]. 环境科学, 2008, **29**(4): 1059-1065.
- Liu J, Zhang X L, Xu X F, *et al.* Comparison analysis of variation characteristics of SO_2 , NO_x , O_3 and $PM_{2.5}$ between rural and urban areas, Beijing [J]. Environmental Science, 2008, **29**(4): 1059-1065.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2017 年 10 月 31 日, 中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了 2016 年度中国科技论文统计结果. 统计结果显示《环境科学》2015 年度总被引频次 10 024, 影响因子 1.878, 多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.



CONTENTS

Regional Transport Matrix Study of PM _{2.5} in Jingjinji Region, 2015	WANG Yan-li, XUE Wen-bo, LEI Yu, <i>et al.</i> (4897)
Effect of Atmospheric Haze Based on Multi-source Remote Sensing Data Considering the Size Effect of Landscape Sources and Sinks	XU Kai, YU Tian-tian, SUN Jiao-jiao, <i>et al.</i> (4905)
Space-Time Estimations and Mapping of PM _{2.5} Fine Particulates Based on Multi-source Data	XIAO Lu, LANG Yi-chao, XIA Lang, <i>et al.</i> (4913)
Exposure Level of Population and Economy in Zhejiang Province Considering the Background of PM _{2.5} in East China	YU Zhen-yan, GAO Da-wei, LI Zheng-quan, <i>et al.</i> (4924)
Aerosol Chemical Characteristics for Different Air Pollution Levels in North Suburban Nanjing	ZHANG Cheng, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (4932)
Seasonal Variation of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Heze	LIU Ze-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (4943)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust PM _{2.5} in Selected Cities in Liaoning Province	ZHANG Wei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4951)
Characteristics of the Size Distribution of Water-soluble Ions During a Heavy Pollution Episode in the Winter in Tianjin	YAO Qing, LIU Zi-rui, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (4958)
Physico-chemical Characteristic Analysis of PM _{2.5} in the Highway Tunnel in the Plateau City of Kunming	WANG Cheng-hui, YAN Kun, HAN Xin-yu, <i>et al.</i> (4968)
Characteristics Analysis of the Surface Ozone Concentration of China in 2015	DUAN Xiao-tong, CAO Nian-wen, WANG Xiao, <i>et al.</i> (4976)
Effects of Different Precious Metal Loads of CDPF on Characteristics of VOCs Emissions from a Diesel Bus	LOU Di-ming, ZHANG Zi-jun, LIU Ji-yue, <i>et al.</i> (4983)
Influence of ENSO Events on the Hydrogen ($\delta^2\text{H}$) and Oxygen ($\delta^{18}\text{O}$) Isotopic Values of Precipitation in Shanghai	DONG Xiao-fang, YANG Hua-wei, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (4991)
Deposition of Sulfur, Nitrogen and Mercury in Two Typical Forest Ecosystems in Southern China	CHENG Zheng-lin, LUO Yao, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (5004)
Spatial and Temporal Variability of CO ₂ Emissions from the Xin'anjiang Reservoir	YANG Le, LI He-peng, SUN Bin-feng, <i>et al.</i> (5012)
Evaluation of Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nutrients in Surface Sediment in the Three Gorges Reservoir Area	ZHUO Hai-hua, QIU Guang-sheng, ZHAI Wan-ying, <i>et al.</i> (5020)
Distribution of Different Mercury Species in the Waterbody at Sanmenxia Reservoir	CHENG Liu, MA Bing-juan, ZHOU Wei-li, <i>et al.</i> (5032)
Identification of Nitrate Sources and Transformation Processes in Midstream Areas; A Case in the Taizi River Basin	LI Yan-li, SUN Wei, YANG Zi-rui (5039)
Characteristics of Nitrogen Variation and Its Response to Rainfall; A Case Study in Wuxi Port at Taihu Lake Basin	LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (5047)
Dynamics of the Water Quality in a Broad-leaf Evergreen Forest at Different Spatial Levels on Jinyun Mountain	MA Ming, SUN Tao, LI Ding-kai, <i>et al.</i> (5056)
Method of Improving the Water Quality of Polluted Rivers Based on the MIKE11 Model	XIONG Hong-bin, CHEN Xue, ZHANG Si-si (5063)
Distribution Characteristics and Risk Analysis of Antibiotic in the Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i> (5074)
Characteristics of Carbon and Nitrogen in the Downstream Columnar Sediment of Maozhou River, Shenzhen	LING Jun-hong, ZHANG Yi-zhang, WANG Min-hao, <i>et al.</i> (5081)
Relative Importance of Factors Influencing Iron Release in Drinking Water Distribution Systems	LIU Ying, YU Ying, SHI Bao-you, <i>et al.</i> (5090)
Removal of High Concentration of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen from Low Temperature Groundwater Using Single Bio-filter	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i> (5097)
Mechanism of Pre-ozonation Enhanced Coagulation on DON in the Secondary Effluent	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, WANG Da-xiang, <i>et al.</i> (5106)
Base Activation of Peroxymonosulfate for the Degradation of Ciprofloxacin in Water	GE Yong-jian, CAI Xian-wei, LIN Han, <i>et al.</i> (5116)
MIL-88A@MIP Activated Persulfate for Targeted Degradation of Dibutyl Phthalate	WANG Jiu-mei, GUAN Ze-yu, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (5124)
Methane Cycle Anaerobic Membrane Bioreactor with Desulfurization for Treating High Sulfate Organic Wastewater at Normal Temperature	XU Ting, JIN Yan-qing, LI Yong (5132)
Simultaneous Recovery of Nutrients from Wastewater by Mesoporous MgO-loaded Natural Zeolite	CHENG Xue-jun, WANG Xue-jiang, WANG Hao, <i>et al.</i> (5139)
Phosphorus Removal Capacity of Domestic Wastewater Treated by a Modified CAST Process Under Different Operating Modes	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (5146)
Realization of Shortcut Nitrification in the ABR-MBR Process Treating Domestic Wastewater	LÜ Liang, ZHAO Shi-hui, WEI Jia-min, <i>et al.</i> (5154)
Substrate Inhibition and Kinetic Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (5162)
Effect of Free Ammonia on Ammonia Escape During an Ammonia Oxidation Process	SUN Hong-wei, YU Xue, YOU Yong-jun, <i>et al.</i> (5169)
Water Quality and Diversity of Denitrifier Community Structure of Typical Scenic Water Bodies in Xi'an	KANG Peng-liang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (5174)
Start-up and Characteristics of the Microbial Community Structure of ANAMMOX	WANG Yao-qi, ZHANG Min, JIANG Ying, <i>et al.</i> (5184)
Fast Start-up and Performance of the CANON Process Based on a SBAF System and Evolution Properties of Microorganisms	YUE Xiu, LIU Zhu-han, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (5192)
Enrichment of <i>Nitrospira</i> in Activated Sludge and Kinetic Characterization	YAO Qian, PENG Dang-cong, ZHAO Qiao-di, <i>et al.</i> (5201)
Effect of pH Value on Autotrophic Denitrification Process of Zero Valent Iron Substrate	ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong (5208)
Effect of Seeding Single/Mixed Sludge on Rapid Start-up of an ANAMMOX Reactor	ZHANG Ze-wen, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (5215)
Comparison of Start-up and Stable Performance of Nitrification in Activated Sludge and Biofilm Processes in a SBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (5222)
Long-term Impacts of TiO ₂ Nanoparticles on the Stability of an Anaerobic Granular Sludge Bioreactor	LI Hui-ting, CUI Fu-yi (5229)
Composition and Distribution of Antibiotics in Soils with Different Land Use Types in a Typical Peri-urban Area of the Yangtze River Delta	ZHAO Fang-kai, CHEN Li-ding, YANG Lei, <i>et al.</i> (5237)
Distribution of Phosphorus in Soil Profiles after Continuous Application of Different Fertilizers	ZHANG Tian, XU Hao, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (5247)
Occurrence of Organophosphate Esters in Soils of the Three Gorges Reservoir	HE Ming-jing, YANG Ting, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5256)
Pollution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Surrounding a Municipal Solid Waste Incineration Plant in Shanghai	GUO Yan-hai, SUN Xu-chao, ZHANG Shi-bing, <i>et al.</i> (5262)
Comparison of Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media in the Urban Area of Daqing City	SONG Ning-ning, FENG Jia-shen, YU Yang, <i>et al.</i> (5272)
Magnetic Response of Heavy Metal Pollution in Playground Dust of an Industrial Area	YANG Meng, LI Hui-ming, LI Feng-ying, <i>et al.</i> (5282)
Distribution Characteristics and Health Risk for Heavy Metals in Vegetables Near the Industrial Areas in Shanghai	ZHOU Ya, BI Chun-juan, ZHOU Xiao-xiao, <i>et al.</i> (5292)
Impacts of Silicon Fertilizer as Base Manure on Cadmium Bioavailability in Soil and on Cadmium Accumulation in Rice Plants	GAO Zi-xiang, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (5299)
Uptake and Volatilization of Gaseous Elemental Mercury by Paddy Rice	SHANG Shuai, TIAN Pei, JIANG Yu, <i>et al.</i> (5308)
Long Term Variations of Ozone Concentration of in a Winter Wheat Field and Its Loss Estimate Based on Dry Matter and Yield	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, LI Shuo, <i>et al.</i> (5315)
Control Effect of Side Deep Fertilization with Slow-release Fertilizer on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YU Ying-liang, <i>et al.</i> (5326)
Effects of Biochar and Organic Fertilizer on Saline-alkali Soil N ₂ O Emission in the North China Plain	SHI Yu-long, LIU Xing-ren, GAO Pei-ling, <i>et al.</i> (5333)
Flux Characteristics of CO ₂ , CH ₄ , and N ₂ O and their Influencing Factors in Different Types of Ditches on the Chengdu Plain	FENG Xiang-rong, DENG Ou-ping, DENG Liang-ji, <i>et al.</i> (5344)
Review of CO ₂ and CH ₄ Emissions from Rivers	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, CHEN Huai, <i>et al.</i> (5352)