

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第6期

Vol.38 No.6

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

PM _{2.5} 浓度空间分异模拟模型对比:以京津冀地区为例	吴健生,王茜,李嘉诚,涂媛杰 (2191)
北京地区近35年大气污染扩散条件变化	郭淳薇,孙兆彬,李梓铭,张小玲,杨慧玲 (2202)
北京市典型区域夏季降水及其对大气污染物的影响	韩力慧,张海亮,向欣,张鹏,程水源,魏巍 (2211)
北京山谷风环流特征分析及其对PM _{2.5} 浓度的影响	董群,赵普生,王迎春,苗世光,高健 (2218)
北京市建筑施工扬尘排放特征	薛亦峰,周震,黄玉虎,王堃,聂滕,聂磊,秦建平 (2231)
生物质成型燃料锅炉挥发性有机物排放特征	吴昌达,张春林,白莉,沈丽冉,王伯光,刘军,杨立辉 (2238)
广州番禺大气成分站复合污染过程VOCs对O ₃ 与SOA的生成潜势	邹宇,邓雪娇,李菲,殷长泰 (2246)
南京北郊大气臭氧周末效应特征分析	王俊秀,安俊琳,邵平,邹嘉南,林旭,张玉欣 (2256)
亚热带稻区大气氨/铵态氮污染特征及干湿沉降	王杰飞,朱潇,沈健林,曾冠军,王娟,吴金水,李勇 (2264)
宣威肺癌高发区燃煤排放颗粒物中铁的价态及其氧化性	王强翔,谭正莹,赵慧,李继华,田林玮,王青曜,米持真一,吕森林 (2273)
垃圾焚烧厂区二噁英污染及厂区工人呼吸暴露评估	杜国勇,汪倩,张姝琳,张素坤,邓春萍,张洪铭,朱盟翔,蒋昕,朱成旺,任燕玲 (2280)
重庆市新型干法水泥厂汞排放特征	张成,张雅惠,王永敏,王定勇,罗程钟,徐凤,何秀清 (2287)
轻型汽油车简易瞬态工况法与定容全流稀释采样法(CVS)的排放相关性	王鸿宇,黄成,胡馨遥,李莉,陈勇航,徐健 (2294)
不同排放标准公交车燃用生物柴油颗粒物排放特性	楼狄明,赵成志,徐宁,谭丕强,胡志远 (2301)
西江水氢氧同位素组成的空间变化及环境意义	许琦,李建鸿,孙平安,何师意,于爽 (2308)
基于SWAT与DNDC模型对比研究亚热带流域氮淋溶与输出过程	韩宁,陈维梁,高扬,郝卓,于贵瑞 (2317)
三峡库区澎溪河与磨刀溪电导率等水质特征与水华的关系比较	姜伟,周川,纪道斌,刘德富,任豫霜,Douglas Haffner,谢德体,张磊 (2326)
滇池草海间隙水与上覆水氮磷时空变化特征	王一茹,王圣瑞,焦立新,张云,高秋生,杨枫 (2336)
香溪河沉积物、间隙水的磷分布特征及释放通量估算	罗玉红,聂小倩,李晓玲,戴泽龙,胥焘,黄应平 (2345)
大冶湖表层水和沉积物中重金属污染特征与风险评价	张家泉,田倩,许大毛,占长林,刘婷,姚瑞珍,刘先利,肖文胜 (2355)
海水淡化低温多效蒸馏工艺(LT-MED)沿程溴代消毒副产物的生成	齐菲,孙迎雪,杨哲,胡春芳,常学明,胡洪营 (2364)
两种水体铜配合容量测试方法的适用性比较及应用	王晨烨,姜括,谢文龙,汪磊 (2373)
高地下水位地区透水铺装控制径流污染的现场实验	金建荣,李田,时珍宝 (2379)
稳定型纳米零价铁去除地下水中2,4-二氯苯酚	张永祥,常杉,李飞,徐毅,高维春 (2385)
超声、紫外增强H ₂ O ₂ /KI降解磺胺甲基嘧啶	魏红,孙博成,杨小雨,李克斌 (2393)
不同铅负载量改性膨润土对水中磷酸盐吸附作用的对比	姜博汇,林建伟,詹艳慧,邢云青,黄宏,储鸣,王星星 (2400)
铁炭内电解垂直流人工湿地对污水厂尾水深度脱氮效果	郑晓英,朱星,周翔,徐亚东,王菊,韦诚,高雅洁,周橄 (2412)
组合生物滤池对养殖废水的净化效率及影响因素分析	张世羊,张胜花,张翔凌,王广军 (2419)
温度对聚磷菌活性及基质竞争的影响	张玲,彭党聪,常蝶 (2429)
海洋厌氧氨氧化菌的富集培养及其脱氮特性	冯莉,于德爽,李津,单晓静,杨振琳 (2435)
不同生物过滤系统铵态氮转化速率及生物膜特性分析	周洪玉,韩梅琳,仇天雷,高敏,孙兴滨,王旭明 (2444)
磷酸盐对厌氧氨氧化活性污泥脱氮效能的影响	周正,刘凯,王凡,林兴,李祥,黄勇,顾澄伟 (2453)
碳源胁迫下脱氮除磷颗粒污泥性能变化及其机制	秦诗友,陈威,马兆瑞,刘小英,陈晓国,余文韬,夏媛媛,黄健 (2461)
外源Ca ²⁺ 对SBR启动期活性污泥胞外多聚物的动态影响	任丽飞,杨新萍,张雯雯 (2470)
膨胀污泥中丝状菌的分离鉴定与特性分析	张崇森,牛全睿,徐丽梅,王陇梅,王岱,武少华 (2477)
反硝化悬浮填料适用性及其微生物群落结构解析	谭阳,李激,徐巧,付磊,尤世界,王硕 (2486)
硫代硫酸钠对排硫硫杆菌固碳能力的影响及其作用机制	李欢,王磊,王亚楠 (2496)
关帝山森林土壤真菌群落结构与遗传多样性特征	乔沙沙,周永娜,柴宝峰,贾彤,李鑫 (2502)
基于受体模型与地统计的城市居民区土壤重金属污染源解析	陈秀端,卢新卫 (2513)
基于蒙特卡罗模拟的土壤环境健康风险评价:以PAHs为例	佟瑞鹏,杨校毅 (2522)
Eh、pH和铁对水稻土钾释放的影响机制	钟松雄,尹光彩,陈志良,林亲铁,黄润林,刘德玲,彭焕龙,黄玲,王欣,蒋晓璐 (2530)
典型土壤不同提取态Cd与水稻吸收累积的关系	陈齐,邓潇,陈珊,侯红波,彭佩钦,廖柏寒 (2538)
复合改良剂对Cd污染稻田早晚稻产地修复效果	陈立伟,杨文骏,辜娇峰,周航,高子翔,廖柏寒 (2546)
两种钝化剂对土壤Pb、Cd、As复合污染的菜地修复效果	田桃,雷鸣,周航,杨文骏,廖柏寒,胡立琼,曾敏 (2553)
大豆和小麦根系对非的吸持作用及其生物有效性	王红菊,李倩倩,沈羽,顾若尘,盛好,占新华 (2561)
源自腐殖土的溶解性有机质组分对棕壤和黑土吸附苯并三唑的影响	杨宁伟,毕二平 (2568)
地形、树种和土壤属性对喀斯特山区土壤胞外酶活性的影响	罗攀,陈浩,肖孔操,杨利琼,文丽,李德军 (2577)
长期定位有机物料还田对关中平原冬小麦-玉米轮作土壤N ₂ O排放的影响	郝耀旭,刘继璇,袁梦轩,周应田,杨学云,顾江新 (2586)
基于大气被动式采样的人体头发中类二噁英多氯联苯暴露的途径	袁浩东,白瑶,李秋旭,王英,金军 (2594)
广西刁江野生鱼类重金属积累特征及其健康风险评价	王俊能,马鹏程,张丽娟,陈棉彪,黄楚珊,柳晓琳,胡国成,许振成 (2600)
活性炭在中高温条件下对玉米秸秆厌氧发酵的影响	甘荣,葛明民,刘勇迪,贾红华,闫志英,雍晓雨,吴夏荒,周俊 (2607)
工艺过程源和溶剂使用源挥发性有机物排放成分谱研究进展	王红丽,杨肇勋,景盛翱 (2617)
《环境科学》征稿简则(2452) 《环境科学》征订启事(2560) 信息(2201, 2230, 2384)	

PM_{2.5} 浓度空间分异模拟模型对比:以京津冀地区为例

吴健生^{1,2}, 王茜¹, 李嘉诚³, 涂媛杰¹

(1. 北京大学城市规划与设计学院, 城市人居环境科学与技术重点实验室, 深圳 518055; 2. 北京大学城市与环境学院, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871; 3. 深圳市城市规划设计研究院, 城市发展与土地政策研究所, 深圳 518055)

摘要: 在我国快速的城市化进程中, 快速的经济发展和日益增加的能源消耗带来的大气污染不断增加, 特别是细颗粒物污染如 PM_{2.5} 污染越来越严重, PM_{2.5} 污染相关研究成为一个热点议题。高浓度的 PM_{2.5} 是形成我国京津冀、珠三角和长三角地区大气灰霾的主要原因, 大气污染已成为制约京津冀地区乃至全国可持续发展的关键问题, 长期暴露在 PM_{2.5} 大气污染中, 会对人类健康造成诸多不良影响。土地利用回归模型可以实现大气污染物浓度的时空模拟, 明晰 PM_{2.5} 浓度的空间分布特征对于大气污染的防治和流行病学的研究具有重要意义。本研究利用 2014 年 1 月 1 日至 2014 年 12 月 31 日京津冀地区 104 个监测站点的大气污染物浓度数据, 结合 VIIRS (visible infrared imaging radiometer) AOD (aerosol optical depth)、土地覆被、气象因子、道路分布、人口密度、污染源分布等信息, 分别利用最小二乘和地理加权回归构建土地利用回归模型, 对 PM_{2.5} 浓度时空分布情况进行模拟, 其中包括含 VIIRS AOD 数据的最小二乘土地利用模型和地理加权土地利用模型, 以及不包含 VIIRS AOD 数据的最小二乘土地利用模型和地理加权土地利用模型, 这 4 个模型的修正 R^2 值分别为 82.13%、84.87%、80.45% 和 81.99%。研究表明, 相比最小二乘回归, 使用地理加权回归的方法能一定程度上提升土地利用回归模型的结果。

关键词: 土地利用回归模型; PM_{2.5}; 地理加权回归; 空间分异; 大气污染

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)06-2191-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201611114

Comparison of Models on Spatial Variation of PM_{2.5} Concentration: A Case of Beijing-Tianjin-Hebei Region

WU Jian-sheng^{1,2}, WANG Xi¹, LI Jia-cheng³, TU Yuan-jie¹

(1. Key Laboratory for Urban Habitat Environmental Science and Technology, School of Urban Planning and Design, Peking University, Shenzhen 518055, China; 2. Laboratory of Earth Surface Processes of Ministry of Education, College of Urban and Environment Science, Peking University, Beijing 100871, China; 3. Department of Urban Development and Land Policy, Urban Planning and Design Institute of Shenzhen, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Due to the rapid urbanization and increasing energy consumption, air pollution, especially some fine particulates like PM_{2.5} rise in the context of fast urbanization. PM_{2.5} pollution has been given considerable attention recent years. High PM_{2.5} concentration is the main reason for the atmospheric haze in Beijing-Tianjin-Hebei region. Air pollution has become the key issue restricting the sustainable development of Beijing-Tianjin-Hebei region and even the whole country. Long-term exposure to PM_{2.5} is likely to cause adverse effects on human health. The spatial-temporal variation of air pollution can be characterized by the land use regression model. It is significant to have a good knowledge of spatial characteristics of PM_{2.5} concentration, which could assist air pollution management and the epidemiological research. This manuscript used air quality data of 104 monitoring sites of Beijing-Tianjin-Hebei region from 1st January 2014 to 31st December, 2014, combined with VIIRS (visible infrared imaging radiometer) AOD (aerosol optical depth), land use, meteorological factors, road network, population, and pollutant sources distribution to establish the land use regression model by least square method and geographically weighted method respectively. The four models established were least square land use regression model with VIIRS AOD data, geographically weighted land use regression model with VIIRS AOD data, least square land use regression model without VIIRS AOD data and geographically weighted land use regression model without VIIRS AOD data. And the adjusted R^2 values for these four models were 82.13%, 84.87%, 80.45% and 81.99%, respectively. Research results demonstrated that the geographically weighted method performed better than the least square method and improved the land use regression model to a certain extent.

Key words: land use regression; PM_{2.5}; geographical weighted regression; spatial variation; air pollution

随着城市化进程的加快, 城市面积、人口持续扩张, 工业排放、能源消耗和机动车持有量不断增加, 我国主要城市空气质量指数暴表事件频发, 大气污染成为了社会各界讨论的热点问题。目前, 我国的细颗粒物污染呈现逐年增加的趋势, 尤其是在中

收稿日期: 2016-11-14; 修订日期: 2016-12-22

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41330747); 深圳科技创新项目(JCYJ20140903101902349)

作者简介: 吴健生(1965~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为景观生态与 GIS 及 PM_{2.5} 污染时空分异, E-mail: wujs@pkusz.edu.cn

东部地区^[1], 26% 的区域^[2] $\text{PM}_{2.5}$ 浓度超过了国家规定 (GB 3095-2012) 的日均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度限值 $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 高于世界卫生组织指导值 (AQGs) 的 3.5 倍以上. 大气污染, 尤其是细颗粒物污染, 已成为制约京津冀地区乃至我国可持续发展的关键环境问题, 也是世界上许多大城市在城镇化进程中普遍面临的一个难题^[3].

细颗粒物又称 $\text{PM}_{2.5}$, 是指环境空气中空气动力学当量直径小于等于 $2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物. $\text{PM}_{2.5}$ 已成为我国大气复合污染的首要污染物^[4]. $\text{PM}_{2.5}$ 污染作为一种时空上连续且不均匀分布的现象, 其时空浓度的分异受到如气候^[5, 6]、地形^[7, 8] 和人类活动^[9, 10] 等不同因素的影响, 明确其浓度的空间分布特征对于大气污染防治和流行病学的研究均有重要的意义. 从 2012 年 12 月起, 我国在京津冀、长三角、珠三角区域及直辖市、省会城市和计划单列市等 74 个城市建立了 $\text{PM}_{2.5}$ 监测网络, 并开始实时向公众发布 $\text{PM}_{2.5}$ 监测数据. 但是由于监测站的建设成本高昂, 一个城市的站点有限, 并不能完全覆盖整个城市, 更不能用一个笼统的数据来概括整个城市的空气质量状况. 此外, 我国的很多流行病学研究多采用研究区内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的均值^[11~13], 或者采用简单的空间插值方法^[14, 15] 得到的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的空间分布作为剂量反应函数的自变量, 这些方法通常不能真实反映研究区内的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的空间分异. 而土地利用回归模型有着很强的模拟污染物浓度的空间分异的能力, 并且将覆盖范围广的卫星遥感数据产品大气气溶胶光学厚度 AOD (aerosol optical depth) 用于地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的模拟^[16, 17], 恰到好处地弥补了以上缺陷. AOD 数据产品多种多样, 常见的是 MODIS (moderate resolution imaging spectroradiometer) 的 AOD 数据. 近年来, Suomi NPP 卫星搭载的 VIIRS (visible infrared imaging radiometer, 可见光红外辐射计组合仪) 所提供的气溶胶产品成为了 $\text{PM}_{2.5}$ 遥感反演的热点^[18], VIIRS AOD 较 MODIS AOD 有空间覆盖度广、空间分辨率高、条带间无间隔等优势, 在模拟地面空气质量方面较大的应用前景^[19, 20].

本研究利用有限的站点监测数据, 结合 VIIRS AOD、土地覆被、气象因子、道路分布、人口密度、污染源分布等信息, 分别利用最小二乘和地理加权回归的土地利用回归模型对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度时空分布情况进行模拟, 比较两种方法对京津冀地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在不同时段的空间模拟结果, 并分析不同回归模型

的特点.

1 材料与方法

环境保护部发布的报告^[21] 指出, 京津冀地区是我国空气污染最严重的区域, 首要污染物为细颗粒物, 其年均浓度为 $93 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 京津冀地区 13 个地级以上城市中, 有 12 城市细颗粒物浓度超标, 有 11 个城市排在污染最重的前 20 位, 其中有 8 个城市排在前 10 位, 区域内 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度平均超标 1.6 倍以上, 空气重度及以上污染天数占全年天数 17%.

1.1 数据来源及预处理

研究所用的资料主要有由中国环境监测总站 (<http://113.108.142.147:20035/emcpublish/>) 和北京市环境保护监测中心 (<http://zx.bjmemc.com.cn/>) 提供的 2014 年 1 月 1 日至 2014 年 12 月 31 日的 $\text{PM}_{2.5}$ 小时监测数据. 京津冀地区共有 104 个监测站点, 其中北京市有 36 个站点, 天津市有 15 个站点, 河北省有 53 个站点. 各站点的空间分布情况如图 1 所示.

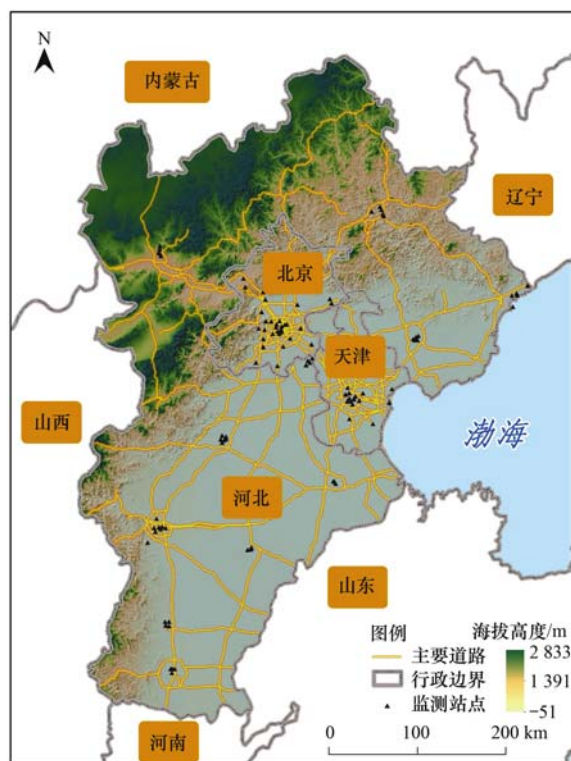


图 1 京津冀地区空气质量监测站点分布情况示意

Fig. 1 Distribution of air quality monitoring sites in Beijing-Tianjin-Hebei region

本研究用到的资料还有来源于美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 卫星应用和研究中心 (STAR) 官方网站 (<http://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/>)

emb/viirs_aerosol/index. php) 提供的 VIIRS Aerosol Environmental Data Record (EDR) AOD 数据产品. 省、地、市行政边界数据来源于国家基础地理信息系统网站 (<http://nfgis.nsd.gov.cn>). 土地覆被数据 (2010) 来源于国家基础地理信息中心 GlobeLand30 网站 (<http://www.globeland30.org/GLC30Download/index.aspx>), 空间分辨率为 30m. 京津冀地区气象数据 (2014) 来源于中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.nmic.cn/home.do>), 该数据集提供了京津冀地区 26 个气象站点的日值气象数据, 包括平均气温 ($^{\circ}\text{C}$)、平均风速 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)、平均相对湿度 (%)、最大风速的风向 (16 个方位)、日降水量 (mm). 路网数据由矢量化 OpenStreetMap Data Extracts (<http://download.geofabrik.de/>) 的数据得到, 分为主干道和次要道路两类. 归一化植被指数 (NDVI) 数据为 MODIS MOD13Q1 数据集, 来源于美国国家航空航天局戈达德宇宙飞行中心 (NASA Goddard Space Flight Center) 网站 (<https://landsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>), 具有 250 m 的空间分辨率, 每隔 16 d 提供一次. 所用到的数字高程数据 (DEM) 为 ASTER GDEM V2 全球数字高程数据, 来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>), 空间分辨率为 30 m. 废气排放重点污染源数据来源于环境保护部发布的 2014 年国家重点监控企业名单 (http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201312/t20131231_265877.htm), 污染源分布情况借助于公众环境研究中心 (IPE) 公布的污染地图来确定, 最终确定了 307 家废气排放企业的分布情况. 本文使用的人口分布数据为 LandScan 2013 数据集, 来源于美国橡树岭国家实验室 (<http://web.ornl.gov/sci/landscan/index.shtml>), 其空间分辨率为 0.5". 文中的机场、港口分布数据由 Google Earth 数据矢量化得到.

由于 $\text{PM}_{2.5}$ 数据和气象数据的监测站点分布、时间分辨率均有所差异, 需要对 $\text{PM}_{2.5}$ 监测数据、气象数据以及 VIIRS AOD 数据进行时空匹配. 在统一坐标系统 (Albers 正轴等面积割圆投影) 的基础上, 以 $\text{PM}_{2.5}$ 站点监测数据为基础, 对 VIIRS AOD 数据和地面气象资料数据进行空间采样以完成数据的空间匹配. Suomi NPP 卫星的过境时间为 13:30, 在模型使用 VIIRS AOD 作为自变量时, 因变量需选取对应卫星过境时刻前后 1 h (即 13:00 和 14:00) 的 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度. 对于地面气象资料数据, 依据泰森多边形的原理, 采用最近邻原则进行数据匹配, 取距

离 $\text{PM}_{2.5}$ 监测站点最邻近的气象站点观测数据作为该站点的气象自变量. 受到气象数据时间分辨率的限制, 每日内同一个站点各时刻气象自变量是相同的. 以上数据时空匹配过程借助 Python 脚本完成, 最终获得 345 d 数据时空匹配结果, 表现为 345 条 Shapfile 监测站点数据, 它们拥有共同的属性表结构, 即各站点名称、投影 X Y 坐标、 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度 (包括卫星过境前后 1 h 平均浓度和日平均浓度)、VIIRS AOD 数据和地面气象数据 (包括风速、温度、地面相对湿度、降水量).

1.2 模型构建

土地利用回归模型 (land use regression, LUR) 通常能获得高于 100 m 空间精度的大气污染物空间浓度分布结果, 其被广泛应用于城市尺度的大气污染和流行病学研究. 该模型最早是由 Briggs 于 1997 年提出^[22], 现已广泛用于估计研究区内任意位置的大气污染物浓度.

最小二乘法 (ordinary least square, OLS) 是计量经济学中常用的一种拟合估算方法, 将自变量与因变量采用全局回归, 从而探究两者之间的关系. 而地理加权回归 (geographically weighted regression, GWR) 模型是由 Brunson 等^[23] 和 Fotheringham 等^[24] 基于非参数建模的思想所提出的用于研究空间非平稳性的新方法. 它是对普通线性回归全局模型的扩展, 将数据的地理位置嵌入到回归参数之中, 容许局部而不是全局的参数估计, 其本质上代表对每个观测点分别回归, 因此生成每个区域特有的参数.

1.2.1 模型变量的生成

模型的因变量为京津冀地区 104 个监测站点的 $\text{PM}_{2.5}$ 监测数据, 本文选取 2014 年各站点的浓度均值作为模型的因变量, 而模型在使用 VIIRS AOD 时作为自变量时, 因变量需选取对应卫星过境时刻前后 1 h (即 13:00 和 14:00) 的 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度. 图 2 分别是所有监测站点 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度和卫星过境时刻年均浓度的分布, 两者通过 Kolmogorov-Smirnov 检验后均近似服从正态分布.

模型的自变量共分为 7 大类, 共包含 63 个, 用来表征站点周边的交通排放、土地覆被、人口密度因素, 站点所在位置的 VIIRS 气溶胶光学厚度, 站点到特定污染源等地物的距离, 以及站点所在位置的气象、地形、植被覆盖等可能影响 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的因素. 所有自变量均在 ArcGIS (ESRI China Inc., Version 10.1) 中生成, 其分类、描述和缓冲区设置

如表 1 所示.

1.2.2 模型先验假定和算法设置

自 SAVIAH 研究^[22]之后,大多数研究都继承了 Briggs 等所采用的模型先验假定,本文依据以往研

究所描述的各类因素对 PM_{2.5}浓度的影响情况,对各个自变量系数的符号做出如表 1 的假定. 本文所采用的土地利用回归模型算法参考了文献[25 ~ 27]的研究.

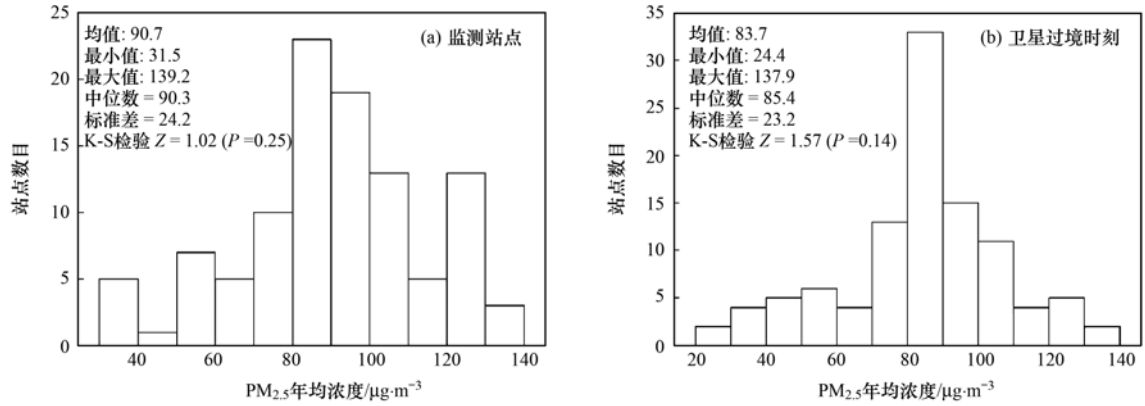


图 2 PM_{2.5}年均浓度分布

Fig. 2 Distribution of PM_{2.5} annual concentration

表 1 自变量的分类、描述、缓冲区设置以及系数符号假定

Table 1 Classification and description of independent variables, buffer setting, and assumption of coefficient				
变量类别 (个数)	变量描述	变量子类别	缓冲区/m	变量名称及系数 符号规定
路网(12)	每种类型道路在不同缓冲区内的 总长度/m	mr(主干道); sr(次要道路)	100; 200; 300; 500; 750; 1 000 ¹⁾	mr_xx ²⁾ (+) sr_xx(+)
土地覆被(35)	每种土地覆被类型在不同缓冲区 内的总面积/m ²	bud(不透水地表)	100; 200; 300; 500;	bud_xx(+)
		vege(自然植被)	1 000; 2 000; 3 000	vege_xx(-)
		wat(水体)		wat_xx(-)
		bare(裸地)		bare_xx(+)
		crop(农田)		corp_xx(NA ³⁾)
人口(3)	不同缓冲区内的人口总数/人	pop(人口密度)	1 000; 2 000; 5 000	pop_xx(+)
VIIRS AOD(1)	站点处的 VIIRS 气溶胶光学厚度	AOD	N/A	AOD(+)
距离变量(4)	到特定地物的距离/m	dis_gas(国控废气排放企业)	N/A	dis_gas(-)
		dis_air(机场)		dis_air(-)
		dis_har(港口)		dis_har(-)
		dis_coa(海岸线)		dis_coa(+)
气象变量(4)	站点最近邻的气象站的监测数据	winds(风速)	N/A	winds(-)
		hum(相对湿度)		hum(+)
		rain(降水量)		rain(-)
		temp(气温)		temp(NA ³⁾)
其他(4)	其他描述监测站点属性的变量	NDVI(归一化植被指数)	N/A	NDVI(-)
		DEM(数字高程)		DEM(-)
		X(站点投影 ⁴⁾ 横坐标)		X(NA ³⁾)
		Y(站点投影 ⁴⁾ 纵坐标)		Y(NA ³⁾)

1) 按照文献[28]描述的交通变量缓冲区设置规则,道路长度变量的最大缓冲区范围设置为1 000 m; 2) xx 对应缓冲区的大小(m); 3) 符号不确定; 4) 投影采用的 Albers 正轴等面积圆锥投影

地理加权回归模型的执行是在 GWR 4.0 软件中完成的. 各样本的空间坐标选取 Albers 正轴等面积圆锥投影坐标,模型的解释变量选取与土地利用回归模型相同的解释变量. 空间权重函数选取自适应带宽的高斯(Gaussian)核函数,带宽设定准则设

置为校正的 Akaike 信息量准则(corrected akaike information criterion, AIC). 若模型结果中某一解释变量的全局变量差异标准(diff of criterion)值为正,则表明其系数在空间上没有显著的分异,此时将其设置为全局变量重新进行回归,直到所有系数的全

局变量差异标准值均为负值。

1.2.3 模型检验

以往研究主要采用交叉检验 (cross validation)^[28]的方法来判断模型的精度。由于样本数较多,本研究采用 10 折交叉验证 (10-fold Cross-validation, 10-fold CV) 的方法^[29, 30],也有的文献^[31, 32]中称之为分组交叉检验 (grouped cross-validation, GCV),即初始采样被随机地平均分割成 10 个子样本,一个单独的子样本被保留作为验证模型的数据,其他 9 个样本用来训练。交叉验证重复 10 次,每个子样本验证一次,平均 10 次的结果最终得到一个单一估测。

为了对比添加 VIIRS AOD 数据后对模型结果的影响,本研究分别构建包含 VIIRS AOD 数据和不包含该数据的回归模型。包含 VIIRS AOD 数据的土地利用回归模型选取对应卫星过境时刻的 PM_{2.5} 年均浓度作为因变量,不包含该数据的模型则选取 2014 年各站点的浓度均值作为模型因变量。采用 SPSS 20.0 软件利用上述模型算法进行逐步多元线性回归来估计待定参数,得出回归方程。之后在 MATLAB(R2010b)中执行 10 折交叉验证,估计模型的精度。

1.2.4 回归映射

得到最终回归模型以后,利用回归方程中各个解释变量系数的空间分布对京津冀地区非监测点位进行污染物浓度的空间模拟,此过程称为回归映射 (regression mapping)^[22]。回归映射通常利用 ArcGIS

中的栅格计算器工具实现,类似于地统计学中的空间插值,而它能更好地从机理上模拟污染物的空间分异。考虑到研究区的范围大小和各个解释变量的空间分辨率,将不包含 VIIRS 气溶胶数据的最小二乘土地利用回归模型和地理加权土地利用回归模型的回归映射的空间分辨率设置为 1 km,将包含 VIIRS 气溶胶数据的最小二乘土地利用回归模型和地理加权土地利用回归模型回归映射的空间分辨率设置为 6 km。若模型中涉及到气象因素,则参照专业气候数据空间插值软件 Anusplin 所采用的样条函数法 (Spline)^[33],根据京津冀地区的 26 个气象站点的观测数值进行空间插值,插值的空间分辨率为 1 km。

根据回归方程估计到的污染物浓度通常存在异常值(如存在负值或过高的估计浓度),根据已有研究^[25, 34, 35]本文对回归映射的结果做出如下规定:当某栅格的回归映射结果小于所有监测站点污染物浓度最小值的 60% 时,将该栅格的污染物浓度赋为监测站点污染物浓度最小值的 60%;当某栅格的回归映射结果超过所有监测站点污染物浓度最大值的 20% 时,将该栅格的污染物浓度赋为监测站点污染物浓度最大值的 120%。

2 结果与分析

2.1 最小二乘土地利用回归模型

利用最小二乘的土地利用回归模型得到的 PM_{2.5} 年均浓度模型如表 2 所示。

表 2 最小二乘土地利用回归模型结果
Table 2 Results of ordinary least-squares land use regression models

模型	因变量	进入模型的变量	模型系数					模型结果参数
			Estimate	Std. err	T	Sig.	VIF	
OLS without AOD	PM _{2.5} 年均浓度	Intercept	197.58	14.32	13.79	0.00		$R^2 = 81.21\%$;
		DEM ¹⁾	-0.09	6.64×10^{-4}	-13.71	0.00	1.35	Adj $R^2 = 80.45\%$;
		$x^2)$	-1.71×10^{-4}	1.22×10^{-4}	-13.94	0.00	1.43	CV- $R^2 = 77.28\%$ ⁷⁾ ;
		wat_2000 ³⁾	-3.62×10^{-6}	1.03×10^{-4}	-3.51	0.00	1.06	CV-RMSE ⁸⁾ = $11.29 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$
		hum ⁴⁾	1.22	0.25	4.87	0.00	1.68	Res Moran's I ⁹⁾ = 0.38 ($P < 0.01$)
OLS with AOD	PM _{2.5} 过境时刻年均浓度	Intercept	200.18	13.60	14.73	0.00		$R^2 = 82.82\%$;
		wind ⁵⁾	-6.16	2.38	-2.59	0.01	1.27	Adj $R^2 = 82.13\%$;
		AOD ⁶⁾	52.99	11.25	4.71	0.00	2.02	CV- $R^2 = 80.16\%$;
		x	-1.29×10^{-4}	1.11×10^{-5}	-11.66	0.00	1.41	CV-RMSE = $10.28 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$
		DEM	-0.07	8.22×10^{-3}	-8.82	0.00	2.48	Res Moran's I = 0.62 ($P < 0.01$)

1) DEM: 站点所在处的海拔; 2) x : 站点的投影横坐标; 3) wat_2000: 2 000 m 内水体面积; 4) hum: 距 PM_{2.5} 站点最近的气象站年均相对湿度; 5) wind: 距 PM_{2.5} 站点最近的气象站平均风速; 6) AOD: 站点所在位置的年均 VIIRS 气溶胶光学厚度; 7) CV- R^2 : 十折交叉检验拟合精度; 8) CV-RMSE: 十折交叉检验检验均方根误差; 9) Res Moran's I (p -value): 回归误差的全局 Moran's I 指数及对应的 P 值,下同

不添加 VIIRS 气溶胶数据 (模型 A) 和添加 VIIRS 气溶胶数据 (模型 B) 的京津冀地区 PM_{2.5} 年

均浓度的最小二乘土地利用回归模型分别为:
 $PM_{2.5_nonAOD} = 197.58 - 0.09DEM - 1.71 \times$

$$10^{-4}x - 3.62 \times 10^{-6}\text{wat_2000} + 1.22\text{hum} \quad (1)$$

$$\text{PM}_{2.5_AOD} = 200.18 - 6.16\text{wind} + 52.99\text{AOD} - 1.29 \times 10^{-4}x - 0.07\text{DEM} \quad (2)$$

模型 A 和 B 的回归散点图如图 3 所示,其中图 3(a)和 3(c)分别对应了模型 A 和 B 的拟合结果,图 3(b)和 3(d)分别对应了模型 A 和 B 的交叉验证结果.对比模型 A 和 B 的结果,可以发现加入

VIIRS AOD 数据,模型的拟合优度提升 0.76%,且模型交叉检验的误差略有减小.说明在区域尺度的 $\text{PM}_{2.5}$ 空间分异模拟中,加入 VIIRS AOD 数据对于土地利用回归模型的结果会有所提升.

2.2 地理加权土地利用回归模型

运用地理加权土地利用回归模型得到的 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度模型如表 3 所示.

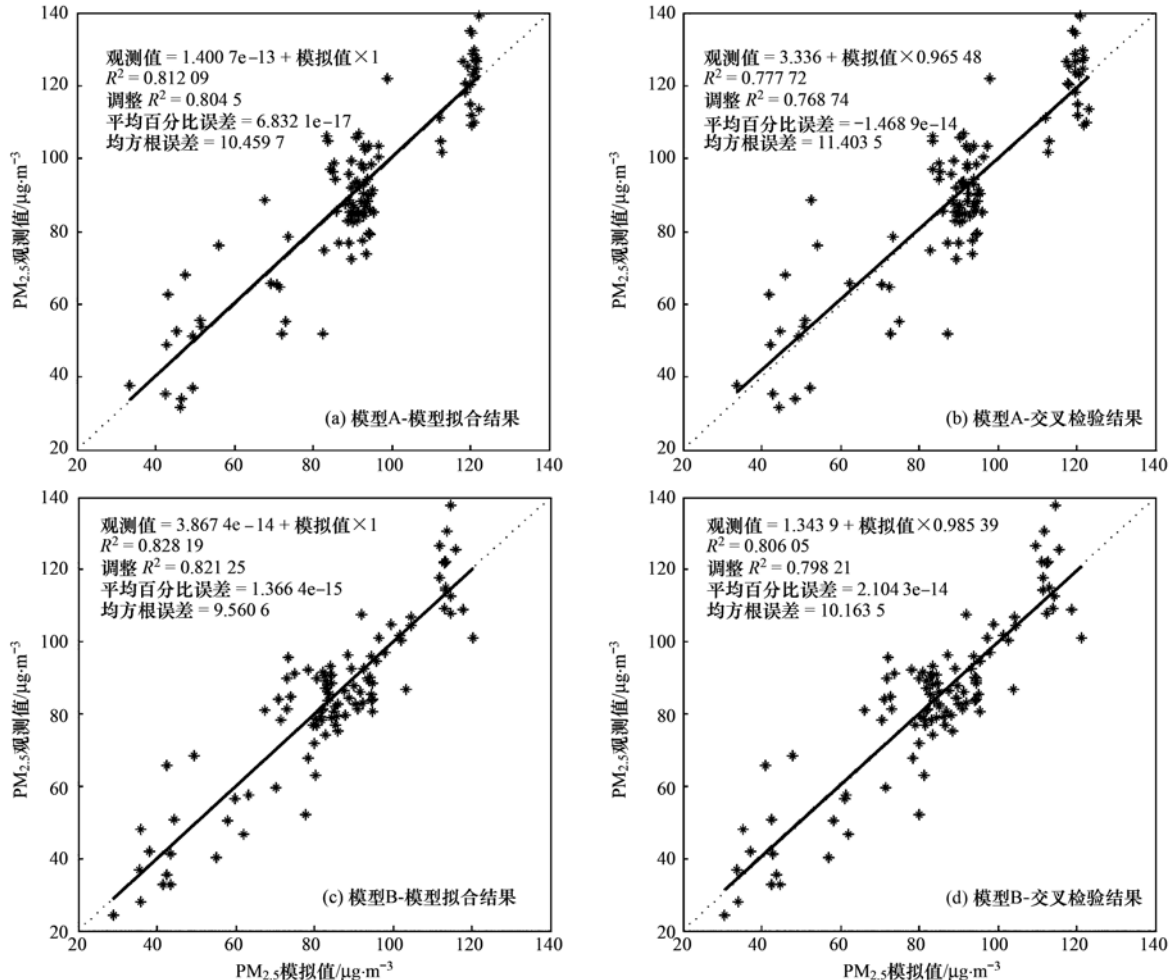


图3 最小二乘土地利用回归模型的回归散点图

Fig. 3 Scatter diagram of ordinary least-squares land use regression models

不添加 VIIRS 气溶胶数据(模型 C)和添加 VIIRS 气溶胶数据(模型 D)的京津冀地区 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度的地理加权土地利用回归模型分别为:

$$\text{PM}_{2.5_nonAOD} = 181.24 - 0.09\text{DEM} - 1.53 \times 10^{-4}x - 4.00 \times 10^{-6}\text{wat_2000} + 1.19\text{hum} \quad (3)$$

$$\text{PM}_{2.5_AOD} = 169.92 - 2.02\text{wind} + 43.62\text{AOD} - 1.04 \times 10^{-4}x - 0.07\text{DEM} \quad (4)$$

模型 C 和 D 的回归散点图如图 4 所示,其中图 4(a)和 4(c)分别对应了模型 C 和 D 的拟合结果,图 4(b)和 4(d)分别对应了模型 C 和 D 的交叉验证结果.

2.3 最小二乘土地利用回归模型和地理加权土地利用回归模型对比分析

利用上述确定的 4 个模型得到京津冀地区 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度空间分异结果如图 5 所示.为了更好地呈现京津冀地区 $\text{PM}_{2.5}$ 的空间分异,选取北京市和天津市中心的连线,并将其向两端适当延伸,作为截面线进行 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度的截面分析.4 个模型在截面线的 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度分布如图 6 所示.

如图 5 所示,京津冀地区 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度呈现出很强的空间异质性,有明显的纬度分异、海陆分异和海拔分异特征.纬度分异特征上,随着纬度的增

表 3 地理加权土地利用回归模型结果
Table 3 Results of geographically weighted regression models

模型	因变量	进入模型的变量	模型系数统计				DOC ⁵⁾	模型结果参数
			Mean Coef. ¹⁾	Std. err ²⁾	Lwr. Quart. ³⁾	Upr. Quart. ⁴⁾		
GWR without AOD	PM _{2.5} 年均浓度	Intercept	181.24	13.77	169.99	197.04	-13.61	$R^2 = 83.43\%$; Adj $R^2 = 81.99\%$; CV- $R^2 = 76.51\%$; CV-RMSE = 11.78 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ Res Moran's I = 0.36 ($P < 0.01$)
		DEM	-0.09	4.65×10^{-3}	-0.09	-0.08	-0.82	
		x	-1.53×10^{-4}	1.70×10^{-5}	-1.74×10^{-4}	-1.41×10^{-4}	-3.16	
		wat_2000	-4.00×10^{-6}	1.00×10^{-6}	-5.00×10^{-6}	-3.00×10^{-6}	-4.18	
		hum	1.19	0.09	1.16	1.27	-1.60	
GWR with AOD	PM _{2.5} 过境时刻年均浓度	Intercept	169.92	22.27	152.51	165.36	-17.77	$R^2 = 86.00\%$; Adj $R^2 = 84.87\%$; CV- $R^2 = 82.80\%$; CV-RMSE = 9.64 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ Res Moran's I = 0.56 ($P < 0.01$)
		wind	-2.02	3.80	-6.10	-1.00	-6.74	
		AOD	43.62	7.00	38.66	43.15	-6.17	
		x	-1.04×10^{-4}	1.80×10^{-5}	-1.23×10^{-4}	-1.01×10^{-4}	-12.42	
		DEM	-0.07	1.93×10^{-3}	-0.07	-0.07	-0.13	

1) Mean Coef. : 模型系数空间变化的均值; 2) Std. err: 模型系数空间变化的标准差; 3) Lwr. Quart: 模型系数空间变化的第一四分位数; 4) Upr. Quart: 模型系数空间变化的第三四分位数; 5) DOC: 全局变量差异标准(diff of criterion)

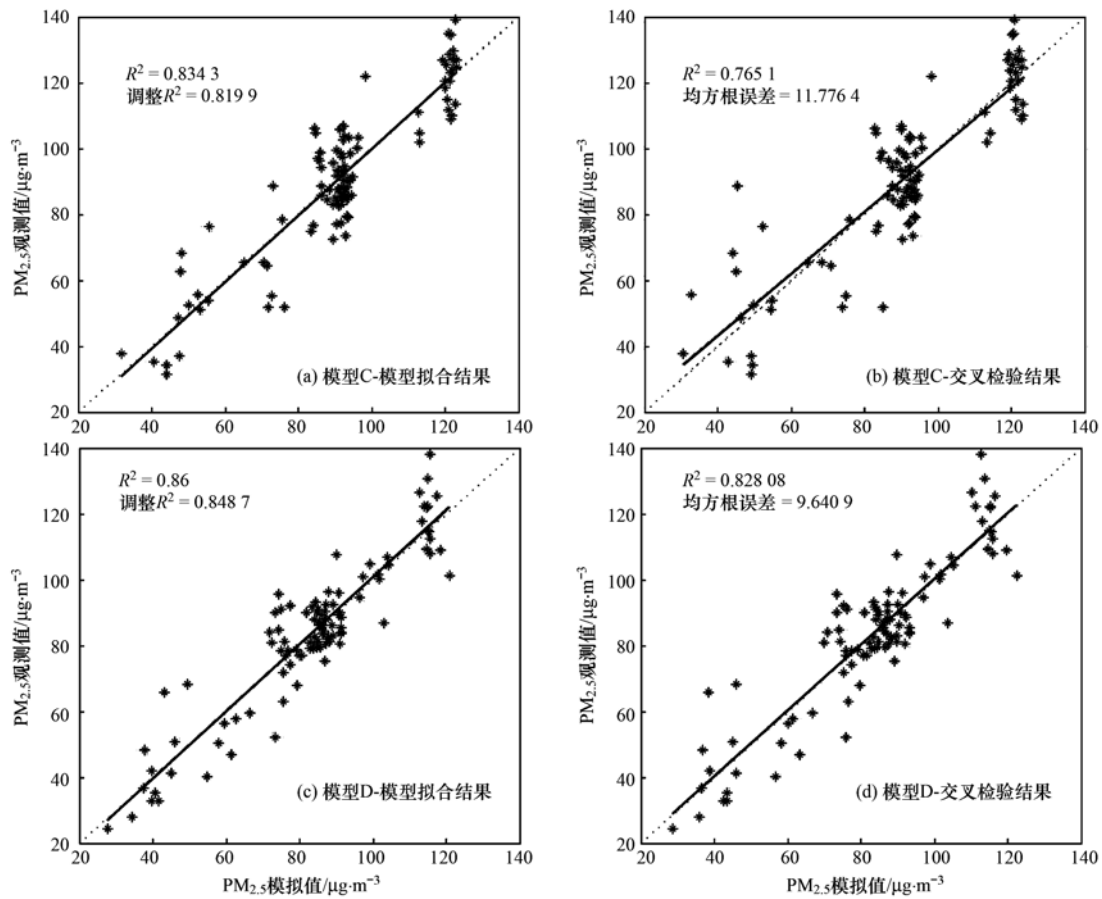


图 4 地理加权土地利用回归模型的回归散点图

Fig. 4 Scatter diagram of geographically weighted land use regression models

加,PM_{2.5}浓度有明显降低;海陆分异上,随着到海岸线距离的增加,PM_{2.5}浓度略有增加;而海拔分异最为明显,随着海拔的上升,PM_{2.5}浓度显著降低. 西南部平原地区 PM_{2.5}浓度很高,是京津冀 PM_{2.5}污染的空间热点地区,主要包括保定市、石家庄市、邢台市、邯郸市和衡水市. 该区域地势以平原为主,

农用地和城镇工矿用地占比很高,生态用地覆盖严重缺失. 在区域的工业化、城镇化过程中土地粗放利用,生态破坏严重,城镇地区不顾生态环境监管大规模上马较多煤矿开采、钢铁、化工等高污染、高耗能产业,农村地区乡镇或村办工厂分布广泛而密集,包括小水泥、小冶金、小化工等企业,对 PM_{2.5}

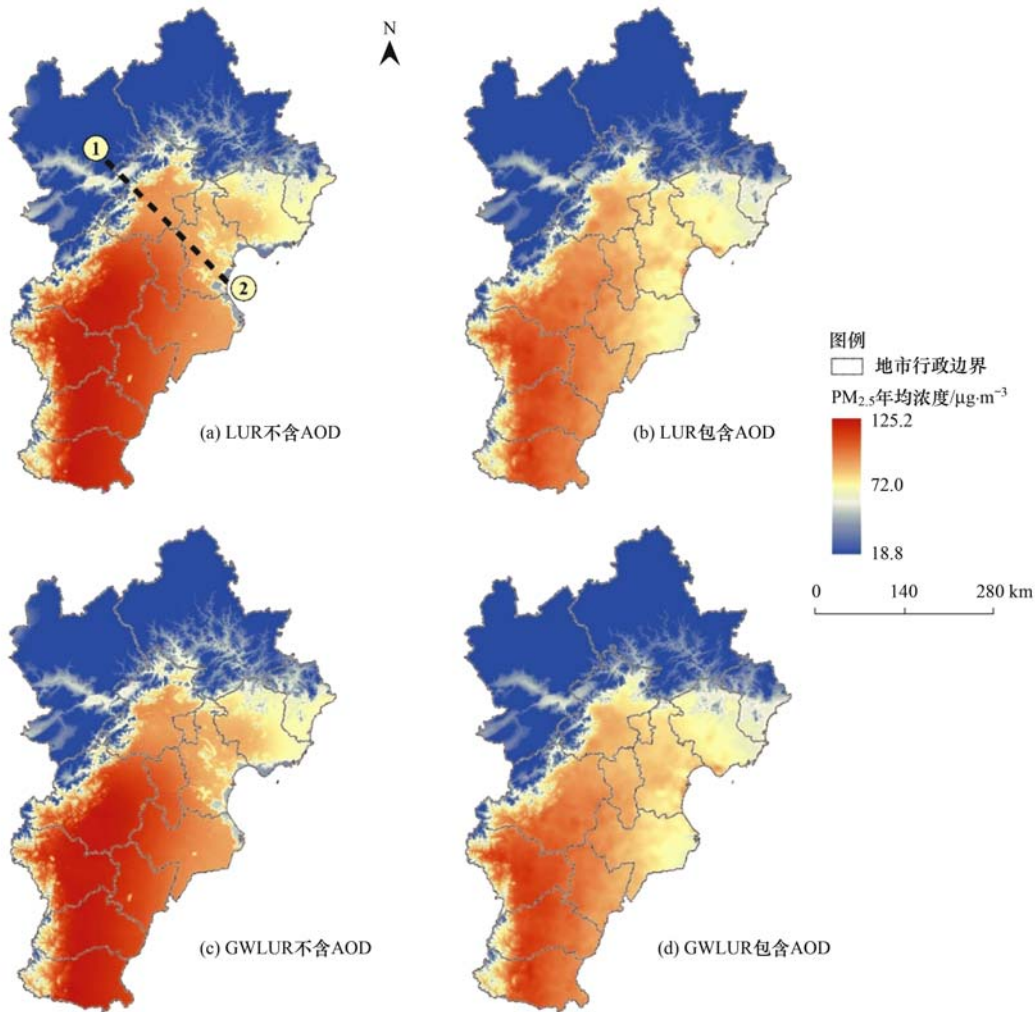


图 5 京津冀地区 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度空间分异结果

Fig. 5 Space variation results of $\text{PM}_{2.5}$ annual concentration in Beijing-Tianjin-Hebei region

的贡献不容忽视,这些因素均导致了西南部平原地区 $\text{PM}_{2.5}$ 的高污染. 北部山区是京津冀地区 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的冷点, $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度较低, 主要包括了张家口市、承德市和秦皇岛市. 该区域地势较高, 自然植被覆盖度较好, 污染产业较少, 旅游业发达, 是京津冀地区的重要生态涵养区. 北京和天津两直辖市虽然机动车保有量很高, 人口密集且能源消耗大, 但在该地区率先完成了产业转型升级和能源结构调整, 并将主要的污染企业迁出至周边欠发达地区, 城市化过程配套了较多的生态用地, 因此两直辖市的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在京津冀地区处于中等偏低水平.

3 讨论

对比 4 个模型得到的回归映射结果可以发现, 图 5 所反映的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度空间分异相似程度很高, 并且图 6 中各条截面线重合度较大, 说明了不论是否加入 VIIRS AOD 变量或者是使用地理加权回归的

方法, 土地利用回归模型均能较为准确地反映污染物浓度的空间分异. 回归映射得到的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在北部山区存在较多的异常值(多为负值), 本研究对这些异常结果按照观测浓度的最小值进行了修正, 因此图 5 中各模型在北部山区的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度差异很小.

4 个模型所反映 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度空间分布结果的差异主要集中在平原地区. 图 6 中, 随着距离的增加, 4 条截面线之间的差异明显增大. 由于年均浓度模型(模型 A 和 C, 不添加 AOD 变量)和过境浓度模型(模型 B 和 D, 添加 AOD 变量)的解释变量不同, 所以两者得到的 $\text{PM}_{2.5}$ 回归映射结果略有差异. 比较 GWR 模型和 OLS 模型的模拟结果, 图 6 中曲线 C 和 D 较曲线 A 和 B 在平原地区的波动更大, 即 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在地理加权回归模型中所反映的空间分异更为明显, 这充分体现了地理加权回归模型较最小二乘回归更能反映因变量的空间分异的特性.

地理加权回归和最小二乘回归的模型结果对比如表 4 所示. 对比两者结果可以发现, 模型 C 较模型 A 的解释能力提升 1.54%, 交叉检验误差略有

提高; 模型 D 较模型 B 的解释能力提升 2.74%, 交叉检验 R^2 提升了 1.16%, 交叉检验均方根误差减少了 $0.92\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

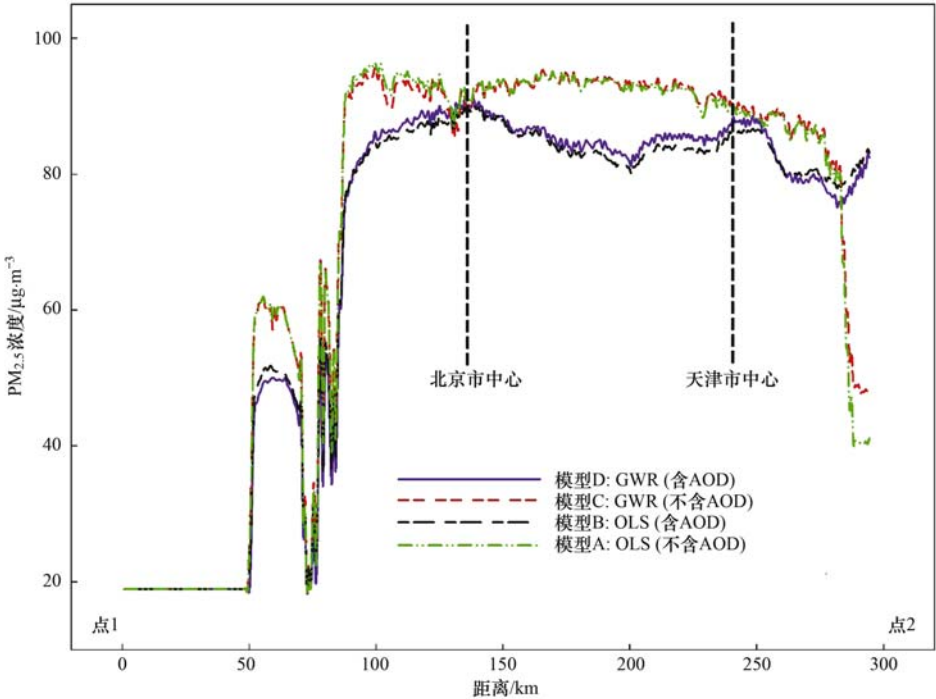


图 6 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度截面分析图

Fig. 6 Diagram of $\text{PM}_{2.5}$ annual concentration in cross-section analysis

表 4 地理加权回归和最小二乘回归的模型结果对比

Table 4 Comparison between the results of weighted geographically weighted land use regressions and ordinary least-squares land use regression models							
模型	回归方法	因变量	$R^2/\%$	Adj $R^2/\%$	CV- $R^2/\%$	CV-RMSE	Res Moran's I (P)
A	OLS	$\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度	81.21	80.45	77.28	11.29	0.38 ($P < 0.01$)
B	OLS	过境时刻 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度	82.82	82.13	80.16	10.28	0.62 ($P < 0.01$)
C	GWR	$\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度	83.43	81.99	76.51	11.78	0.36 ($P < 0.01$)
D	GWR	过境时刻 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度	86.00	84.87	82.80	9.64	0.56 ($P < 0.01$)

4 结论

(1) 虽然地理加权回归模型的残差仍呈现空间正相关, 但 Moran's I 指数却有了一定程度的下降, 模型的可信度得到了提升, 研究证实地理加权回归模型可以显著降低残差空间自相关性.

(2) 相对于最小二乘回归, 运用地理加权回归的方法能一定程度上提升土地利用回归模型的结果.

(3) 地理加权回归模型较最小二乘回归模型的解释力高, 说明气溶胶光学厚度与 $\text{PM}_{2.5}$ 之间的存在空间异质性, 同时表明在年均 $\text{PM}_{2.5}$ 空间分异模拟上, 地理加权土地利用回归模型最优, 不过该模型存在普适性差的问题; 而最小二乘土地利用回归模型的 R^2 虽然较低, 但是其可以适用于每天的反演, 应

用性较广.

参考文献:

[1] Peng J, Chen S, Lü H L, *et al.* Spatiotemporal patterns of remotely sensed $\text{PM}_{2.5}$ concentration in China from 1999 to 2011 [J]. Remote Sensing of Environment, 2016, **174**: 109-121.

[2] Han L J, Zhou W Q, Li W F. City as a major source area of fine particulate ($\text{PM}_{2.5}$) in China [J]. Environmental Pollution, 2015, **206**: 183-187.

[3] Han L J, Zhou W Q, Pickett S T A, *et al.* An optimum city size? The scaling relationship for urban population and fine particulate ($\text{PM}_{2.5}$) concentration [J]. Environmental Pollution, 2016, **208**: 96-101.

[4] Yang F, Tan J, Zhao Q, *et al.* Characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ speciation in representative megacities and across China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, **11** (11): 5207-5219.

[5] Du C L, Liu S Y, Yu X, *et al.* Urban boundary layer height characteristics and relationship with particulate matter mass

- concentrations in Xi'an, central China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2013, **13**(5): 1598-1607.
- [6] Tai A P K, Mickley L J, Jacob D J. Correlations between fine particulate matter ($PM_{2.5}$) and meteorological variables in the United States: implications for the sensitivity of $PM_{2.5}$ to climate change[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(32): 3976-3984.
- [7] Saide P E, Carmichael G R, Spak S N, *et al.* Forecasting urban PM_{10} and $PM_{2.5}$ pollution episodes in very stable nocturnal conditions and complex terrain using WRF-Chem CO tracer model [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(16): 2769-2780.
- [8] Tanner R L, Bairai S T, Olszyna K J, *et al.* Diurnal patterns in $PM_{2.5}$ mass and composition at a background, complex terrain site [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(21): 3865-3875.
- [9] Braniš M, Řezáčová P, Domasová M. The effect of outdoor air and indoor human activity on mass concentrations of PM_{10} , $PM_{2.5}$, and PM_1 in a classroom [J]. *Environmental Research*, 2005, **99**(2): 143-149.
- [10] Chen Q, Hildemann L M. The effects of human activities on exposure to particulate matter and bioaerosols in residential homes [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(13): 4641-4646.
- [11] Hou Q, An X Q, Wang Y, *et al.* An evaluation of resident exposure to respirable particulate matter and health economic loss in Beijing during Beijing 2008 Olympic Games [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(19): 4026-4032.
- [12] Zhang A, Qi Q W, Jiang L L, *et al.* Population exposure to $PM_{2.5}$ in the urban area of Beijing [J]. *PLoS One*, 2013, **8**(5): e63486.
- [13] 谢元博, 陈娟, 李巍. 雾霾重污染期间北京居民对高浓度 $PM_{2.5}$ 持续暴露的健康风险及其损害价值评估 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(1): 1-8.
- Xie Y B, Chen J, Li W. An assessment of $PM_{2.5}$ related health risks and impaired values of Beijing residents in a consecutive high-level exposure during heavy haze days [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(1): 1-8.
- [14] 张衍桑, 马国霞, 於万, 等. 2013 年 1 月灰霾污染事件期间京津冀地区 $PM_{2.5}$ 污染的人体健康损害评估 [J]. *中华医学杂志*, 2013, **93**(34): 2707-2710.
- Zhang Y S, Ma G X, Yu F, *et al.* Health damage assessment due to $PM_{2.5}$ exposure during haze pollution events in Beijing-Tianjin-Hebei region in January 2013 [J]. *National Medical Journal of China*, 2013, **93**(34): 2707-2710.
- [15] 邹滨, 彭芬, 焦利民, 等. 高分辨率人口空气污染暴露 GIS 空间区划研究 [J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2013, **38**(3): 334-338.
- Zou B, Peng F, Jiao L, *et al.* GIS aided spatial zoning of high-resolution population exposure to air pollution [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, **38**(3): 334-338.
- [16] Chu D A, Ferrare R, Szykman J, *et al.* Regional characteristics of the relationship between columnar AOD and surface $PM_{2.5}$: application of lidar aerosol extinction profiles over Baltimore—Washington corridor during DISCOVER-AQ [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **101**: 338-349.
- [17] 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.
- [18] Schueler C F, Clement J E, Ardanuy P E, *et al.* NPOESS VIIRS sensor design overview [C]//Proceedings of SPIE 4483, Earth Observing Systems VI, 11. San Diego, CA, USA: SPIE, 2002.
- [19] Jackson J M, Liu H Q, Laszlo I, *et al.* Suomi-NPP VIIRS aerosol algorithms and data products [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, **118**(22): 12673-12689.
- [20] Sayer A M, Hsu N C, Bettenhausen C, *et al.* Validation and uncertainty estimates for MODIS Collection 6 “Deep Blue” aerosol data [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, **118**(14): 7864-7872.
- [21] 环境保护部. 环境保护部发布 2014 年重点区域和 74 个城市空气质量状况 [R/OL]. http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/qt/201502/t20150202_295333.htm, 2015-02-02.
- [22] Briggs D J, Collins S, Elliott P, *et al.* Mapping urban air pollution using GIS: a regression-based approach [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 1997, **11**(7): 699-718.
- [23] 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.
- [24] Fotheringham A S. Trends in quantitative methods I: stressing the local [J]. *Progress in Human Geography*, 1997, **21**(1): 88-96.
- [25] Henderson S B, Beckerman B, Jerrett M, *et al.* Application of land use regression to estimate long-term concentrations of traffic-related nitrogen oxides and fine particulate matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(7): 2422-2428.
- [26] Kashima S, Yorifuji T, Tsuda T, *et al.* Application of land use regression to regulatory air quality data in Japan [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **407**(8): 3055-3062.
- [27] Saraswat A, Apte J S, Kandlikar M, *et al.* Spatiotemporal land use regression models of fine, ultrafine, and black carbon particulate matter in New Delhi, India [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(22): 12903-12911.
- [28] 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.
- [29] Mercer L D, Szpiro A A, Sheppard L, *et al.* Comparing universal kriging and land-use regression for predicting concentrations of gaseous oxides of nitrogen (NO_x) for the Multi-Ethnic Study of Atherosclerosis and Air Pollution (MESA Air) [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(26): 4412-4420.
- [30] Novotny E V, Bechle M J, Millet D B, *et al.* National satellite-based land-use regression: NO_2 in the United States [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(10): 4407-4414.
- [31] Amini H, Taghavi-Shahri S M, Henderson S B, *et al.* Land use regression models to estimate the annual and seasonal spatial variability of sulfur dioxide and particulate matter in Tehran, Iran [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **488-489**: 343-353.
- [32] Tang R, Blangiardo M, Gulliver J. Using building heights and

street configuration to enhance intraurban PM₁₀, NO_x, and NO₂ land use regression models [J]. Environmental Science & Technology, 2013, **47**(20): 11643-11650.

[33] 钱永兰, 吕厚荃, 张艳红. 基于 ANUSPLIN 软件的逐日气象要素插值方法应用与评估[J]. 气象与环境学报, 2010, **26**(2): 7-15.

Qian Y L, Lv H Q, Zhang Y H. Application and assessment of spatial interpolation method on daily meteorological elements based on ANUSPLIN software [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2010, **26**(2): 7-15.

[34] Abernethy R C, Allen R W, McKendry I G, *et al.* A land use regression model for ultrafine particles in Vancouver, Canada [J]. Environmental Science & Technology, 2013, **47**(10): 5217-5225.

[35] Wu J S, Li J C, Peng J, *et al.* Applying land use regression model to estimate spatial variation of PM_{2.5} in Beijing, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(9): 7045-7061.

《环境科学》连续 5 次荣获
“中国最具国际影响力学术期刊”称号

2016 年 11 月 22 日,中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2016 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果.《环境科学》再获“2016 中国最具国际影响力学术期刊”称号,是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊,也是自首次评选以来连续 5 次获此殊荣. 评选以期刊国际影响力指数进行排序,遴选出排名前 5% (Top5%) 的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”.

CONTENTS

Comparison of Models on Spatial Variation of PM _{2.5} Concentration; A Case of Beijing-Tianjin-Hebei Region	WU Jian-sheng, WANG Xi, LI Jia-cheng, <i>et al.</i> (2191)
Change of Atmospheric Pollution Diffusion Conditions in Beijing in Recent 35 Years	GUO Chun-wei, SUN Zhao-bin, LI Zi-ming, <i>et al.</i> (2202)
Precipitation and Its Effects on Atmospheric Pollutants in a Representative Region of Beijing in Summer	HAN Li-hui, ZHANG Hai-liang, XIANG Xin, <i>et al.</i> (2211)
Impact of Mountain-Valley Wind Circulation on Typical Cases of Air Pollution in Beijing	DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2218)
Fugitive Dust Emission Characteristics from Building Construction Sites of Beijing	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> (2231)
Characteristics of Volatile Organic Compounds Emitted from Biomass-pellets-fired Boilers	WU Chang-da, ZHANG Chun-lin, BAI Li, <i>et al.</i> (2238)
Effect of VOCs on O ₃ and SOA Formation Potential During the Combined Pollution Process in Guangzhou Panyu Atmospheric Composition Station	ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (2246)
Characteristic Study on the "Weekend Effect" of Atmospheric O ₃ in Northern Suburb of Nanjing	WANG Jun-xiu, AN Jun-lin, SHAO Ping, <i>et al.</i> (2256)
Atmospheric Ammonia/Ammonium-nitrogen Concentrations and Wet and Dry Deposition Rates in a Double Rice Region in Subtropical China	WANG Jie-fei, ZHU Xiao, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2264)
Species of Iron in Size-resolved Particle Emitted from Xuanwei Coal Combustion and Their Oxidative Potential	WANG Qiang-xiang, TAN Zheng-ying, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2273)
Dioxin Pollution and Occupational Inhalation Exposure of PCDD/Fs in Municipal Solid Waste Incinerator	DU Guo-yong, WANG Qian, ZHANG Shu-lin, <i>et al.</i> (2280)
Characteristics of Mercury Emissions from Modern Dry Processing Cement Plants in Chongqing	ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (2287)
Correlations of Light-duty Gasoline Vehicle Emissions Based on VMAS and CVS Measurement Systems	WANG Hong-yu, HUANG Cheng, HU Qing-yao, <i>et al.</i> (2294)
Emission Characteristics of Particulate Matter from Diesel Buses Meeting Different China Emission Standards Fueled with Biodiesel	LOU Di-ming, ZHAO Cheng-zhi, XU Ning, <i>et al.</i> (2301)
Spatial Variation and Environmental Significance of δ ¹⁸ O and δD Isotope Composition in Xijiang River	XU Qi, LI Jian-hong, SUN Ping-an, <i>et al.</i> (2308)
Comparative Study of SWAT and DNDC Applied to N Leach and Export from Subtropical Watershed	HAN Ning, CHEN Wei-liang, GAO Yang, <i>et al.</i> (2317)
Comparison of Relationship Between Conduction and Algal Bloom in Pengxi River and Modao River in Three Gorges Reservoir	JIANG Wei, ZHOU Chuan, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2326)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in Sediment Pore Water and Overlying Water of Dianchi Caohai Lake	WANG Yi-ru, WANG Sheng-ru, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2336)
Distribution and Emission Flux Estimation of Phosphorus in the Sediment and Interstitial Water of Xiangxi River	LUO Yu-hong, NIE Xiao-qian, LI Xiao-ling, <i>et al.</i> (2345)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment from Daye Lake	ZHANG Jia-quan, TIAN Qian, XU Da-mao, <i>et al.</i> (2355)
Formation of Brominated Disinfection By-products in Low Temperature Multi-effect Distillation (LT-MED) Process for Seawater Desalination	QI Fei, SUN Ying-xue, YANG Zhe, <i>et al.</i> (2364)
Applicability Comparison and Application Study of Two Methods for Determination of the Copper Complexing Capacity of Waters	WANG Chen-ye, JIANG Kuo, XIE Wen-long, <i>et al.</i> (2373)
Performance of Applying Scale Permeable Pavements for Control of Runoff Pollution in an Area with High Groundwater Level	JIN Jian-rong, LI Tian, SHI Zhen-bao (2379)
Removal of 2,4-dichlorophenol in Underground Water by Stabilized Nano Zero-valent Iron	ZHANG Yong-xiang, CHANG Shan, LI Fei, <i>et al.</i> (2385)
Enhancement of Sulfamerazine Degradation Under H ₂ O ₂ /KI System by Ultrasound and UVA Irradiation	WEI Hong, SUN Bo-cheng, YANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (2393)
Comparison of Phosphate Adsorption onto Zirconium-Modified Bentonites with Different Zirconium Loading Levels	JINAG Bo-hui, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2400)
Removal of Nitrogen in Municipal Secondary Effluent by a Vertical Flow Constructed Wetland Associated with Iron-carbon Internal Electrolysis	ZHENG Xiao-ying, ZHU Xing, ZHOU Xiang, <i>et al.</i> (2412)
Purification Efficiency and Influencing Factors of Combined Bio-filters for Aquaculture Wastewater	ZHANG Shi-yang, ZHANG Sheng-hua, ZHANG Xiang-ling, <i>et al.</i> (2419)
Effect of Temperature on PAO Activity and Substrate Competition	ZHANG Ling, PENG Dang-cong, CHANG Die (2429)
Enrichment and Nitrogen Removal Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	FENG Li, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2435)
Ammonia Removal Rate and Microbial Community Structures in Different Biofilters for Treating Aquaculture Wastewater	ZHOU Hong-yu, HAN Mei-lin, QIU Tian-lei, <i>et al.</i> (2444)
Influence of Phosphate on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge	ZHOU Zheng, LIU Kai, WANG Fan, <i>et al.</i> (2453)
Characteristics and Mechanism of Biological Nitrogen and Phosphorus Removal Granular Sludge Under Carbon Source Stress	QIN Shi-you, CHEN Wei, MA Zhao-rui, <i>et al.</i> (2461)
Evolution of Extracellular Polymeric Substances of the Activated Sludge with Calcium Ion Addition During Set-up Period of Sequencing Batch Reactors	REN Li-fei, YANG Xin-ping, ZHANG Wen-wen (2470)
Isolation, Identification and Characterization of the Filamentous Microorganisms from Bulking Sludge	ZHANG Chong-miao, NIU Quan-rui, XU Li-mei, <i>et al.</i> (2477)
Applicability and Microbial Community Structure of Denitrification Suspended Carriers	TAN Yang, LI Ji, XU Qiao, <i>et al.</i> (2486)
Effect of Thiosulfate on the Carbon Fixation Capability of <i>Thiobacillus thioparus</i> and Its Mechanism	LI Huan, WANG Lei, WANG Ya-nan (2496)
Characteristics of Fungi Community Structure and Genetic Diversity of Forests in Guandi Mountains	QIAO Sha-sha, ZHOU Yong-na, CHAI Bao-feng, <i>et al.</i> (2502)
Source Apportionment of Soil Heavy Metals in City Residential Areas Based on the Receptor Model and Geostatistics	CHEN Xiu-duan, LU Xin-wei (2513)
Environmental Health Risk Assessment of Contaminated Soil Based on Monte Carlo Method; A Case of PAHs	TONG Rui-peng, YANG Xiao-yi (2522)
Influencing Mechanism of Eh, pH and Iron on the Release of Arsenic in Paddy Soil	ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2530)
Correlations Between Different Extractable Cadmium Levels in Typical Soils and Cadmium Accumulation in Rice	CHEN Qi, DENG Xiao, CHEN Shan, <i>et al.</i> (2538)
Remedying Effects of a Combined Amendment for Paddy Soil Polluted with Cd for Spring and Autumn Rice	CHEN Li-wei, YANG Wen-tao, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (2546)
Effects of Two Amendments on Remedying Garden Soil Complexly Contaminated with Pb, Cd and As	TIAN Tao, LEI Ming, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (2553)
Sorption of Phenanthrene to Soybean and Wheat Roots and the Bioavailability of Sorbed Phenanthrene	WANG Hong-ju, LI Qian-qian, SHEN Yu, <i>et al.</i> (2561)
Effects of Dissolved Organic Matter Fractions Extracted from Humus Soil on Sorption of Benzotriazole in Brown Soil and Black Soil	YANG Ning-wei, BI Er-ping (2568)
Effects of Topography, Tree Species and Soil Properties on Soil Enzyme Activity in Karst Regions	LUO Pan, CHEN Hao, XIAO Kong-cai, <i>et al.</i> (2577)
Effects of Long-term Organic Amendments on Soil N ₂ O Emissions from Winter Wheat-maize Cropping Systems in the Guanzhong Plain	HAO Yao-xu, LIU Ji-xuan, YUAN Meng-xuan, <i>et al.</i> (2586)
Exposure Route of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in Hair Based on Passive Sampling	YUAN Hao-dong, BAI Yao, LI Qiu-xu, <i>et al.</i> (2594)
Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Wild Fish Species from Diaojiang River, Guangxi	WANG Jun-neng, MA Peng-cheng, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (2600)
Effect of Activated Carbon Addition on the Anaerobic Fermentation of Corn Straw in Mesophilic and Thermophilic Conditions	GAN Rong, GE Ming-min, LIU Yong-di, <i>et al.</i> (2607)
Volatile Organic Compounds (VOCs) Source Profiles of Industrial Processing and Solvent Use Emissions; A Review	WANG Hong-li, YANG Zhao-xun, JING Sheng-ao (2617)