

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第5期

Vol.39 No.5

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

餐饮行业细颗粒物(PM _{2.5})排放测算方法:以上海市为例	王红丽, 景盛翱, 楼晟荣, 陶士康, 乔利平, 李莉, 黄成, 林立, 陈长虹 (1971)
上海夏季PM _{2.5} 中有机物的组分特征、空间分布和来源	高雅琴, 王红丽, 景盛翱, 乔利平, 李莉, 朱书慧, 楼晟荣, 陶士康, 冯加良, 李想, 陈长虹 (1978)
北京南郊区PM _{2.5} 中水溶性无机盐季节变化及来源分析	高韩钰, 魏静, 王跃思 (1987)
基于样方法的天津市春季道路扬尘PM ₁₀ 中水溶性离子特征及来源解析	赵静琦, 姬亚芹, 张蕾, 王士宝, 李越洋 (1994)
广州秋季HONO污染特征及夜间来源分析	田智林, 杨闻达, 虞小芳, 张曼曼, 张贺伟, 程丁, 程鹏, 王伯光 (2000)
基于硫氧同位素研究南京北郊夏季大气中硫酸盐来源及氧化途径	韩珣, 任杰, 陈善莉, 王瑾瑾, 沈潇雨, 魏英, 郭照冰, 朱彬 (2010)
区县尺度机动车高分辨率排放清单建立方法及应用	樊守彬, 郭津津, 李雪峰 (2015)
典型工业生物质锅炉多环芳烃排放特征	林玉君, 白莉, 王焕香, 肖文, 刘军, 向运荣, 张春林 (2023)
多时间尺度HSPF模型参数不确定性研究	庞树江, 王晓燕, 马文静 (2030)
氮氧同位素联合稳定同位素模型解析水源地氮源	金赞芳, 张文辽, 郑奇, 朱晨阳, 李非里 (2039)
白洋淀水体挥发性有机物污染特征与风险评价	高秋生, 赵永辉, 焦立新, 田自强, 杨柳, 杨苏文, 崔志丹, 郝子峰 (2048)
太湖颗粒态有机质的荧光特征及环境指示意义	吕伟伟, 姚昕, 张保华, 刘延龙, 李元鹏 (2056)
长江口滩涂表层沉积物中微塑料的分布及沉降特点	朱晓桐, 衣俊, 强丽媛, 程金平 (2067)
桂林五里峡水库丰水期溶解有机碳特征	卢晓漩, 李强, 靳振江, 彭文杰, 房君佳, 黄炳惠, 宋昂 (2075)
青藏高原多年冻土区典型植被下河流溶解性有机碳的生物可利用性	马小亮, 刘桂民, 吴晓东, 徐海燕, 叶琳琳, 张晓兰, 白炜 (2086)
城郊与城镇河流中溶解性有机质与重金属的相关性	梁梦琦, 邵美玲, 曹昌丽, 纵亚男, 唐剑锋 (2095)
溶解性有机质在岩溶水系统中的迁移转化及影响因素分析	张连凯, 刘朋雨, 覃小群, 单晓静, 刘文, 赵振华, 姚昕, 邵明玉 (2104)
三峡库区澎溪河回水区溶解态金属离子来源和时空分布特征分析	赵晓松, 蔚建军, 付莉, 姜伟, 周川, 李波, Douglas Haffner, Christopher Weisener, 张磊 (2117)
澜沧江流域沉积物间隙水-上覆水营养盐特征与交换通量分析	望雪, 程豹, 杨正健, 刘德富, 徐雅倩 (2126)
蓄水期三峡水库香溪河沉积物-水系统营养盐分布特征	苏青青, 刘德富, 纪道斌, 宋林旭, 崔玉洁, 李欣, 陈秀秀, 刘心愿 (2135)
两种沉水植物对上覆水和间隙水中各形态磷的影响	杨文斌, 高顺峰, 万锐, 孙祥, 王赢 (2145)
于桥水库沉积物-水界面氮磷剖面特征及交换通量	文帅龙, 龚琬晴, 吴涛, 郑小兰, 江雪, 李鑫, 钟继承 (2154)
岷江干流表层沉积物中磷形态空间分布特征	杨耿, 秦延文, 韩超南, 马迎群, 刘志超, 杨晨晨 (2165)
农业排水沟渠硝态氮吸收动力学特征及相关性分析	李如忠, 殷齐贺, 高苏蒂, 陈广洲 (2174)
不同合成条件对ZnAl-LDHs覆膜改性生物陶粒除磷效果的影响	向洋, 张翔凌, 雷雨, 方晨佳, 袁野, 姜应和, 徐舟影 (2184)
真空紫外/过二硫酸盐去除饮用水中嗅味物质	孙昕, 史路肖, 张燧, 杨煜, 唐晓 (2195)
石墨烯负载铁锰氧化物活化过一硫酸盐降解金橙G	夏文君, 刘峰, 郝尚斌, 黄天寅, 王忠明, 陈家斌 (2202)
载铜或铈生物炭吸附水体中As(V)的作用机制	李锦, 祖艳群, 李刚, 孙国新 (2211)
DOM不同相对分子质量组分在无机矿物上的吸附及其对卡马西平吸附的影响实验	梁雨, 何江涛, 张思 (2219)
污水处理厂中有机磷阻燃剂的污染特征	孙佳薇, 丁炜楠, 张占恩, 王俊霞, 顾海东 (2230)
低温污水前置强化混凝	刘海龙, 任宇霞, 张忠民 (2239)
印染废水反渗透脱盐系统运行性能及膜污堵特性	谭玉琨, 张泽田, 吴乾元, 姚颖, 胡洪营, 丘培文 (2249)
生物膜CANON反应器性能的优化:从FBBR到MBBR	付昆明, 李慧, 周厚田, 仇付国 (2256)
两次污泥颗粒化过程中微生物群落的动态变化	高景峰, 张丽芳, 张树军, 高永青, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲 (2265)
铝、铁、钛3种金属盐基混凝剂调理污泥的性能比较	王晓萌, 王鑫, 杨明辉, 张淑娟 (2274)
热、热碱处理对污泥溶胞和溶解性有机物的影响	代勤, 张文哲, 于潘芬, 易皓, 刘俊新, 肖本益 (2283)
曝气时间比对亚硝化颗粒污泥形成的影响	李冬, 郭跃洲, 曹美忠, 劳会妹, 李帅, 张杰 (2289)
中国城市污泥中汞含量的时空分布特征	王宁, 刘清伟, 职音, 程柳, 麻冰涓, 毛宇翔 (2296)
夏季太湖湖/藻型湖区N ₂ O生成与迁移特征及其影响因素	郑小兰, 文帅龙, 李鑫, 龚琬晴, 刘德鸿, 钟继承 (2306)
太湖藻型湖区CH ₄ 、CO ₂ 排放特征及其影响因素分析	贾磊, 蒲旖旎, 杨诗俊, 苏荣明珠, 秦志昊, 张弥 (2316)
内蒙古典型草原季节性冻土区土壤剖面CO ₂ 、N ₂ O特征	李晋波, 姚楠, 李秀, 赵英, 张阿凤, 兰志龙, 范庭 (2330)
黄土高原成龄苹果园生态系统CO ₂ 通量特征	杨剑锋, 杨小妮, 王俊花, 段宇敏, 祁香宁, 张林森 (2339)
生物炭施用对紫色水稻土温室气体排放的影响	祁乐, 高明, 郭晓敏, 牛海东, 李婷, 孙涛, 曹群岭, 汤铭豪 (2351)
不同施肥处理对东北黑土温室气体排放的短期影响	李平, 郎漫, 李森, 魏玮, 李凯凯 (2360)
ITS高通量测序研究黄海微型真核浮游生物多样性及分布特征	张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 张晓娇 (2368)
不同排海方式城市尾水微生物扩散规律	郎秀璐, 宋志文, 徐爱玲, 牛成洁, 郭明月 (2380)
旅游活动对岩溶洞穴地下水中细菌群落的影响:以重庆丰都两个洞穴为例	吕现福, 贺秋芳, 王凤康, 赵瑞一, 张弘 (2389)
不同沼灌年限稻田土壤微生物群落分析	朱金山, 张慧, 马连杰, 廖敦秀, 杨星勇, 王龙昌, 王定勇 (2400)
生物炭对褐土理化特性及真菌群落结构的影响	阎海涛, 殷金玉, 丁松爽, 任天宝, 许家来, 宗浩, 高强, 刘国顺 (2412)
铅锌尾矿砂污染下的岩溶土壤微生物群落碳源代谢特征	房君佳, 李强, 刘畅, 靳振江, 梁月明, 黄炳惠, 卢晓漩, 彭文杰 (2420)
湖库沉积物好氧反硝化菌群脱氮特性及种群结构	康鹏亮, 张海涵, 黄廷林, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾亮宇 (2431)
反硝化菌群的蔡代谢与反硝化偶联机制	张泽宇, 王明霞, 程永毅, 周志峰 (2438)
广西西江流域土壤铅空间分布与污染评价	张云霞, 宋波, 陈同斌, 伏凤艳, 黄飞, 庞瑞, 潘惠妹 (2446)
三峡库区消落带农业活动对土壤汞变化的影响	陈秋禹, 孙松, 尹德良, 王永敏, 张成, 王定勇 (2456)
水稻不同生长时期不同组织中抗肿内生菌的筛选与鉴定	王伯勋, 王学东, 段桂兰 (2464)
汞在酸性紫色水稻土的转化与水稻汞富集特征	李雨岑, 孙涛, 邓晗, 张成, 王永敏, 王定勇 (2472)
华北平原不同生产模式设施蔬菜生命周期环境影响评价	徐强, 胡克林, 李季, 韩卉, 杨合法 (2480)
基于细菌毒性测试与小鼠肺基因转录分析的PM _{2.5} 健康效应	宋鹏程, 陆书玉, 魏永杰, 陈倩倩, 罗丽娟 (2489)
中国PM _{2.5} 污染空间分布的社会经济影响因素分析	段杰雄, 翟卫欣, 程承旗, 陈波 (2498)
《环境科学》征订启事(2094)	
《环境科学》征稿简则(2164)	
信息(2183, 2411, 2445)	

中国 PM_{2.5} 污染空间分布的社会经济影响因素分析

段杰雄¹, 翟卫欣¹, 程承旗^{2*}, 陈波²

(1. 北京大学遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871; 2. 北京大学工学院, 北京 100871)

摘要: 中国的细颗粒物(PM_{2.5})污染具有危害性强、覆盖范围大、空间分布不均匀的特点。本研究以 2015 年中国 PM_{2.5} 监测站点数据为基础, 尝试结合空间分析的方法, 对 PM_{2.5} 污染空间分布的社会经济影响因素进行分析。首先以省级行政区划为基本单元, 选取 Moran's I 指数和局部自相关指数(LISA)分析 PM_{2.5} 在国家尺度上的分布特征。然后利用普通最小二乘回归模型(OLS)和地理加权回归模型(GWR)分析 PM_{2.5} 浓度的空间分布和各项社会经济指标的相关性。结果表明, GWR 模型比 OLS 模型更好地揭示出 PM_{2.5} 浓度分布和各项因素之间的关系。PM_{2.5} 浓度在空间分布上存在以京津冀为中心的高浓度聚集区向四周逐渐递减, 在广西、四川等南部省份形成低浓度聚集区的空间分布结构。另外, 森林覆盖率和人均电力消费量与 PM_{2.5} 浓度显著负相关, 人均私家车保有量和 PM_{2.5} 浓度显著正相关, 其中人均私家车保有量是对 PM_{2.5} 浓度影响最大的因素。

关键词: PM_{2.5}; 社会经济; 空间统计; 空间自相关; 空间回归

中图分类号: X24; X513; X823 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)05-2498-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201709087

Socio-economic Factors Influencing the Spatial Distribution of PM_{2.5} Concentrations in China: An Exploratory Analysis

DUAN Jie-xiong¹, ZHAI Wei-xin¹, CHENG Cheng-qi^{2*}, CHEN Bo²

(1. Institute of Remote Sensing and GIS, Peking University, Beijing 100871, China; 2. College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: In recent years, the PM_{2.5} pollution in China has become a top environmental and health concern, involving the characterization of healthy effects over a broad spatial area with uneven geographical distribution. This research aims to explore the influential factors for the PM_{2.5} distribution from a socio-economic perspective, based on the observations from China's 1497 monitoring sites in 2015. First, the Moran's I index and the local indicators of spatial association (LISA) were computed to outline the distribution of PM_{2.5} on a national scale using provincial-level divisions. Second, the correlation between the spatial distribution of PM_{2.5} and socio-economic factors were analyzed by ordinary least squares (OLS) and geo-weighted regression (GWR) models. The results indicated that the GWR model explained the causal relationships better. Generally, Beijing, Tianjin, and Hebei had peak levels of PM_{2.5}, while Guangxi, Sichuan, and several other southern provinces had the lowest levels. Particularly, forest coverage rate and electricity consumption per capita were negatively correlated with the concentration of PM_{2.5}. In this study, the vehicle ownership per capita proved to be the most significant factor that positively contributed to the concentration.

Key words: PM_{2.5}; socio-economy; spatial statistics; spatial autocorrelation; spatial regression

近年来, 中国多次出现大范围的持续空气污染, 对民众的身体健康与正常的生产生活造成了严重的危害, 引发了社会各界的极大关注^[1, 2]。大气颗粒物是影响中国主要城市空气环境质量的首要污染物^[3, 4], 其中, 细颗粒物(PM_{2.5})是当前中国大部分地区的首要污染物, 并与中国近年来多发的雾霾天气有着十分密切的关系。PM_{2.5}具有粒径小, 比表面积大, 活性强, 易富集有毒、有害物质等特点, 对人体健康有重要危害^[3~5]。影响 PM_{2.5} 的组成、来源、浓度水平及时空特征的因素众多, 其中工业生产、机动车使用等社会经济因素^[6]是其重要组成部分。因此, 探究 PM_{2.5} 浓度分布的空间特征和社会经济之间的关联, 为 PM_{2.5} 污染的风险识别和防控管理提供理论基础是近年来国内外学者研究的热

点^[7]。

目前, 研究者对 PM_{2.5} 的空间分布特征的研究主要尺度停留在街道级^[8~10]、城市级^[11~13]或者特定城市群^[14, 15], 多集中在单个城区或城市展开, 涉及到地区或者国家层面的区域尺度的研究相对较少。另外, 对 PM_{2.5} 的影响因素的研究主要集中在组成成分、污染源特征等大气化学领域^[16, 17]或者气象、地貌等自然地理领域^[18, 19], 从全国各个省份

收稿日期: 2017-09-10; 修订日期: 2017-11-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0503700); 高分辨率对地观测系统国家重大专项(11-Y20A02-9001-16/17, 30-Y20A01-9003-16/17, 30-Y30B13-9003-14/16); 测绘地理信息公益性行业科研专项(201512020)

作者简介: 段杰雄(1993~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为空间统计分析, E-mail: djxstc@163.com

* 通信作者, E-mail: ccq@pku.edu.cn

的层面讨论城市的经济社会条件对 PM_{2.5} 的空间分布结构的影响的研究相对有限。

本文以中国省级行政区划为基本单元, 首先以 1 497 个 PM_{2.5} 监测站点数据为基础讨论 PM_{2.5} 浓度在国家尺度上的分布特征; 然后再研究各项社会经济指标对 PM_{2.5} 浓度分布的影响。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究的 PM_{2.5} 浓度数据来自中国环境监测总站的全国城市空气质量实时发布平台。本文选取 2015 年全年的全国 PM_{2.5} 实时监测数据, 共有 1 497 个站点, 覆盖全国 31 个省级行政区(香港、澳门、台湾除外)。每个站点的采样间隔为 1 h, PM_{2.5} 浓度的单位为。首先计算得到每个监测站点的年平均值, 然后对其进行克里金插值, 得到全国 PM_{2.5} 的年均浓度分布情况。插值结果交叉检验的误差标准平均值为 0.023 4, 接近于 0, 标准均方根误差为 0.748, 平均标准误差 10.778 7 接近于误差均方根 8.102 4。以上结果表明采用克里格插值法对全国 PM_{2.5} 进行空间插值的精度较高, 效果较好。

社会经济类数据来源于文献[20]。本研究选取了 12 类社会经济影响因素: 人口数、城市人口密度、地区生产总值、第一产业占比、第二产业占比、人均私家车保有量、烟粉尘排放量、公共交通工具运营数、绿化覆盖率、人均电力消费量、建成区面积、森林覆盖率。

1.2 研究方法

1.2.1 空间自相关分析

空间自相关分析主要研究地理空间上的各项观测值之间的相关程度^[21, 22]。空间自相关的基本度量是空间的自相关系数, 莫兰指数(Moran's I 指数)是最常见的一种, 又可分为全局 Moran's I 指数^[23]和局部 Moran's I 指数^[24]。全局空间自相关可以用来描述整个研究区域上所有空间对象之间的平均关联程度、空间分布模式及显著性。局域空间自相关可以用来描述不同空间位置上可能存在的空间关联模式, 从而发现数据之间的空间异质性。

1.2.2 多重共线性分析

因为社会经济类因素之间可能存在多重共线性问题, 本文引入方差膨胀因子(variance inflation factor, VIF)来检查各因素之间的多重共线性。方差膨胀因子由 Marquardt 于 1970 年提出^[25], 是衡量多元线性回归模型中多重共线性严重程度的一个指

标。它表示回归系数估计量的方差与假设自变量间非线性相关时方差相比的比值。方差膨胀因子(VIF)越大, 表明共线性越严重。经验判断方法表明: 当 $0 < VIF < 10$ 时, 不存在多重共线性; 当 $10 \leq VIF < 100$ 时, 存在较强的多重共线性。

1.2.3 地理加权回归分析

传统的统计模型是基于数据独立、均匀分布假设的前提下建立的。全局空间回归模型就是假定回归参数与样本数据的地理位置无关, 其回归模型与最小二乘回归模型(ordinary least squares, OLS)相同。而在 PM_{2.5} 浓度分布的问题中, 不同影响因素在不同地理位置上往往表现的也不同, 也就是说回归参数随地理位置变化, 这时如果仍然采用全局空间回归模型, 得到的回归参数估计将是回归参数在整个研究区域内的平均值, 不能反映回归参数的真实空间特征。为解决上述问题, Fotheringham 提出了地理加权回归模型(geographical weighted regression, GWR)^[26], 该模型是用于研究空间关系的一种回归模型, 可以有效地揭示被观测者空间非平稳性和空间依赖。

本文采用地理加权回归分析工具 GWR4 对 PM_{2.5} 浓度分布和各社会经济影响因素进行地理回归加权分析。考虑到各指标可能与 PM_{2.5} 存在非线性关系, 将每个指标的平方^[7], 参与到模型的建立过程中, 并对各个因素都进行了归一化处理。空间权重矩阵是地理加权回归模型(GWR)的核心, 空间权重函数的选取对地理加权回归模型(GWR)的参数估计影响很大。本文采取通常使用的 bi-square 函数来计算权重, bi-square 函数形式如公式(1)所示:

$$w_{ij} = \begin{cases} \left[1 - \left(\frac{d_{ij}}{b}\right)^2\right]^2 & d_{ij} \leq b \\ 0 & d_{ij} > b \end{cases} \quad (1)$$

式中, d_{ij} 表示数据点 j 与位置点之间的距离, 本文选择以各省的中心点的地理距离表示 d_{ij} ; w_{ij} 是对位置 i 点刻画模型时数据点 j 的权重; b 是带宽, 有两层含义: 首先 b 作为一个临界值, 在数据点带宽范围之外的点不参加该点的权值计算; 其次在带宽 b 的范围内, 指的就是权重与距离之间函数关系的非负衰减参数, 带宽越大, 权重随距离的增加衰减的越慢, 带宽越小, 权重随距离的增加衰减的就快。为了取得最优带宽, Fotheringham 提出一个标准, 当 GWR 模型的赤池信息准则(AIC)^[27]是最小时, 带宽 b 为最佳。

2 结果与分析

2.1 空间自相关结果分析

中国各省级行政区的 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度的分布如图 1 所示,基本呈现为以京津冀、山东、河南为中心高浓度地区,向四周逐渐递减的空间分布结构,表现出一定的聚集性。

全局 Moran's I 指数指示 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在整个中国地区的空间关联程度。 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度数据的全局 Moran 散点图如图 2 所示,其 Moran's I 指数为 0.578, P 值为 0.0010,这说明中国地域的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布从省级行政区划的尺度上看,存在明显的空间自相关性。另一方面,图 2 中散点集中分布在第一象限(“高-高”)和第三象限(“低-低”),表明高值区域被高值邻居所包围的地域和低值区域被低值邻居所包围的地域普遍存在,即表示区域与其周边地区的差异较小,较高值或较低值的地区集中分布。结合中国各省级行政区浓度分布(图 1),可以得出中国 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度的分布基本呈现为以京津冀、山东、河南为中心高浓度地区,向四周逐渐递减的空间分布结构,表现出一定的聚集性。

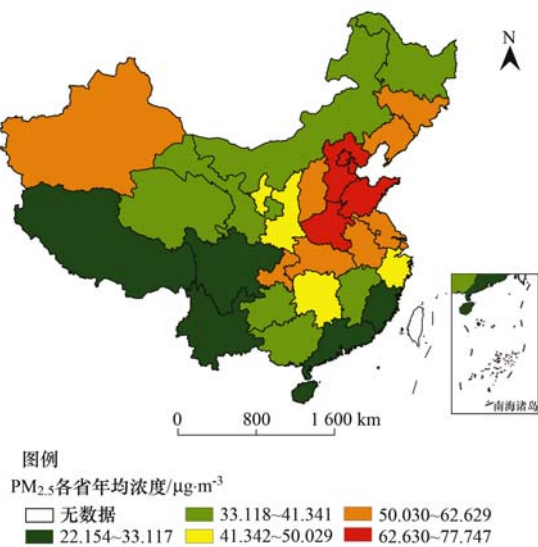


图 1 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度分布

Fig. 1 Distribution of $\text{PM}_{2.5}$ concentration

对中国地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的局部空间自相关情况检验,生成局部自相关指标(local indicators of spatial association, LISA)聚集图(图 3)和局部自相关指标显著性图(图 4)。从图 3 和图 4 中可以看出在京津冀、河南、安徽、山东一带呈现明显的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高值聚集(“高-高”),而广西、四川、西藏、云南一带呈现明显的低值聚集(“低-低”),其它省级

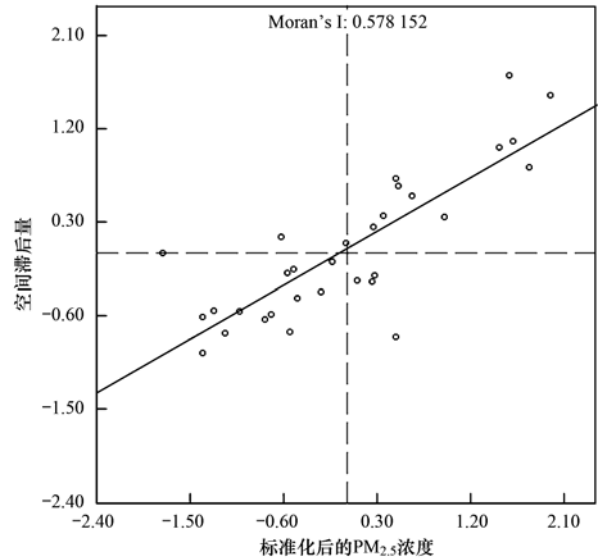


图 2 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度全局 Moran 散点图

Fig. 2 Univariate Moran's I for $\text{PM}_{2.5}$ concentration

行政区局部聚集情况并不显著。

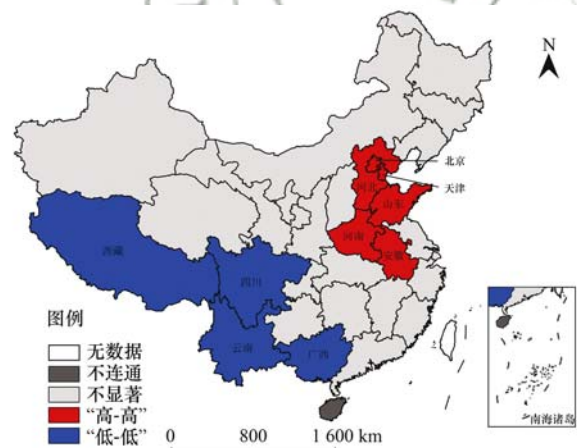


图 3 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度 LISA 聚集

Fig. 3 LISA cluster map for $\text{PM}_{2.5}$ concentration

2.2 多重共线性结果分析

为了解决多个因素之间的共线性问题,引入方差膨胀因子(VIF),计算各个因素之间的 VIF 值,结果如表 1 所示。

根据表 1 中的结果,人口数、地区生产总值、公共交通工具运营数和建成区面积四项因素的 VIF 值大于 10,表明每个因素自身与其它因素呈现较强的多重共线性,在之后的回归分析中舍弃。而城市人口密度、第一产业占比、第二产业占比、人均私家车保有量、烟粉尘排放量、绿化覆盖率、人均电力消费量、森林覆盖率这八项因素不存在或仅存在较弱的多重共线性,可以用于之后的回归分析当中。

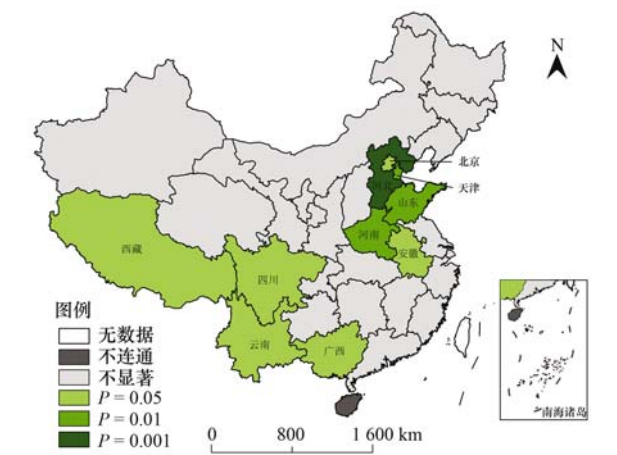


图 4 PM_{2.5} 年均浓度 LISA 显著性

Fig. 4 LISA significance map for PM_{2.5} concentration

表 1 各影响因素之间 VIF 值

Table 1 VIF values of drivers

变量	VIF 值	变量	VIF 值
人口数	11.334	烟粉尘排放量	2.539
人口密度	1.628	公共交通工具运营数	58.267
地区生产总值	23.210	绿化覆盖率	2.571
第一产业占比	6.554	人均电力消费量	2.731
第二产业占比	3.575	建成区面积	46.942
人均私家车保有量	3.603	森林覆盖率	2.527

2.3 地理加权回归结果分析

本研究得到 OLS 模型和 GWR 模型的对比结果如表 2 所示。

首先，根据 OLS 回归结果，模型整体上是显著的，根据 OLS 的 R^2_{adj} 的值表明，该模型能解释 PM_{2.5} 浓度分布的 49.2%。OLS 模型的残差图(图 5)中的 Moran's I 指数为 -0.171，可以看出，OLS 模型存在较高的空间自相关性。由于较强的空间自相关的存在，全局模型建立在 OLS 模型上是不合适的。

其次，对比 OLS 模型，GWR 模型在统计结果上非常显著，能解释 PM_{2.5} 浓度分布的 53.6%，高于 OLS 模型。并且 GWR 模型的残差平方和(RSS)以及赤池信息准则(AIC)也低于 OLS 模型。此外，GWR 模型的残差分布如图 6 所示，虽然空间自相关性仍然存在，但是计算 Moran's I 指数为 -0.159，优于 OLS 模型。总的来说，GWR 模型在各项指标上均优于 OLS 模型。在回归对象存在较强的空间自相关性的时候，GWR 模型可以比 OLS 模型更好地揭示出 PM_{2.5} 浓度分布和各项指标之间复杂的关系和空间依赖性。

表 3 列出了 OLS 和 GWR 估计的回归系数。8 个因素中，在显著性水平的情况下，只有森林覆盖

表 2 OLS 与 GWR 比较

Table 2 Comparison between OLS and GWR models

项目	Sigma	AIC	R^2_{adj}	P-value	RSS
OLS	0.037	-107.190	0.492	0.000	0.030
GWR	0.035	-111.274	0.536	0.000	0.022

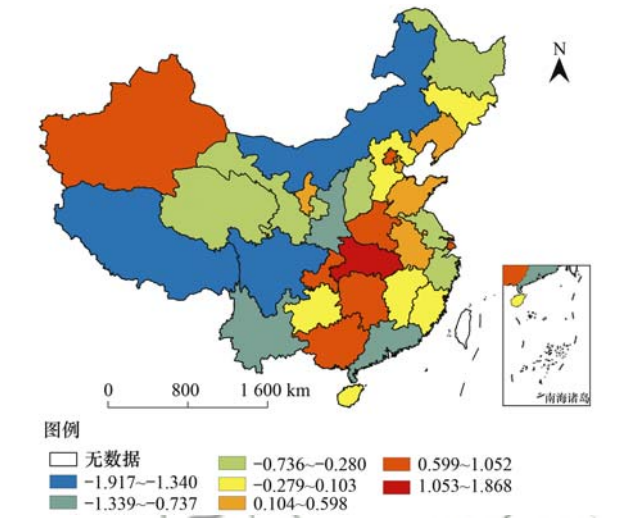


图 5 OLS 模型各省残差分布

Fig. 5 Residual map for OLS

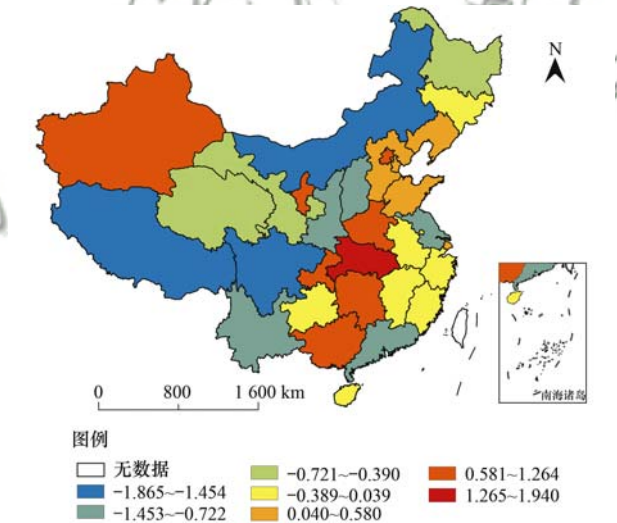


图 6 GWR 模型各省残差分布

Fig. 6 Residual map for GWR

率和人均私家车保有量达到显著性水平；在显著性水平的情况下，人均电力消费量也达到了显著性水平。其中，人均电力消费量和森林覆盖率与 PM_{2.5} 浓度呈负相关关系，人均私家车保有量呈正相关关系。

GWR 的估计系数分布的箱线图如图 7 所示。从中可以看出，第二产业占比、人均私家车保有量、绿化覆盖率和森林覆盖率对 PM_{2.5} 浓度分布的影响保持在较高水平，反之，烟尘排放量的影响并

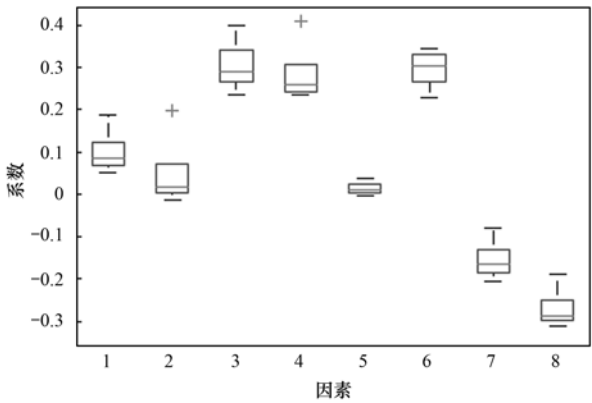
不显著. 此外, 第二产业占比、绿化覆盖率对 $PM_{2.5}$ 浓度分布的影响随着区位变化而变化的较为显著, 反之, 烟尘排放量的影响则不随区位变化而显著变化.

表 3 回归模型参数¹⁾

Table 3 Parameters in the regression models

自变量	OLS 模型的估计系数	GWR 模型的估计系数					
	系数(标准差)	平均值	最小值	最大值	下四分位数	中位数	上四分位数
截距	0.057(0.077)	0.063	-0.033	0.099	0.063	0.073	0.081
城市人口密度	0.097(0.067)	0.089	0.051	0.188	0.075	0.085	0.099
第一产业占比	0.043(0.092)	0.028	-0.013	0.197	0.007	0.018	0.029
第二产业占比	0.324(0.188)	0.292	0.236	0.401	0.275	0.290	0.322
人均私家车保有量	0.290** (0.097)	0.261	0.236	0.410	0.246	0.258	0.276
烟粉尘排放量	0.021(0.054)	0.012	-0.005	0.038	0.004	0.009	0.019
绿化覆盖率	0.269(0.307)	0.290	0.228	0.345	0.280	0.304	0.327
人均电力消费量	-0.146* (0.063)	-0.153	-0.206	-0.080	-0.176	-0.165	-0.149
森林覆盖率	-0.270** (0.078)	-0.268	-0.310	-0.188	-0.296	-0.286	-0.270

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$



横坐标的 1~8 分别代表城市人口密度、第一产业占比、第二产业占比、人均私家车保有量、烟粉尘排放量、绿化覆盖率、人均电力消费量、森林覆盖率这 8 项因素

图 7 GWR 模型各因素系数分布箱线图

Fig. 7 Box map of factor coefficient distribution in the GWR model

3 讨论

综合表 3 和箱线图(图 7)的各项指标显著性水平和回归系数, 人均私家车保有量是各项指标中影响 $PM_{2.5}$ 浓度的最重要的因素. 由 GWR 模型回归系数平均值可以看出, 人均私家车保有量的平方每提高 1, $PM_{2.5}$ 浓度提高 0.261. 由 $PM_{2.5}$ 浓度分布[图 8(a)]、人均私家车保有量分布[图 8(b)]对比可以看出, 人均私家车保有量的两个峰值分别是北京和浙江两地, 然后向中部逐渐降低, 在南部、中部大部分地区 and 西北部地区都处于较低水平和 $PM_{2.5}$ 分布情况大致符合. 图 8(b)中, GWR 模型的人均私家车保有量回归系数分布表现为从西向东逐渐减小, 两端极大值分别出现在新疆和东南沿海地区. 结合图 8(b)中的人均私家车保有量分布及其 GWR 模型回归系数分布, 可以很好的解释新疆地区虽然

人均私家车保有量处于较低水平, 但由于其影响程度更大, 所以 $PM_{2.5}$ 浓度处于中等水平; 而浙江省的人均私家车保有量很高, 但由于其影响程度较低, 所以 $PM_{2.5}$ 浓度分布处于中部水平, 高于东南部其它沿海省份, 但低于其它人均私家车保有量高的中部省份. GWR 模型的回归参数呈现这种分布规律可能是由于地形和气候的影响: 西部地区主要为内陆地区, 东南部地区主要为沿海地区, 沿海地区具有更好的气象条件来降低汽车尾气对 $PM_{2.5}$ 的影响.

森林覆盖率也对 $PM_{2.5}$ 浓度有显著的影响. 由 GWR 模型回归系数平均值可以看出, 森林覆盖率的平方每提高 1, $PM_{2.5}$ 浓度降低 0.268. 从箱线图和图 8(c)中 GWR 模型的森林覆盖率回归系数分布看, 森林覆盖率对 $PM_{2.5}$ 的影响一直保持在较高的水平, 整体上趋势表现为由西向东森林覆盖率对 $PM_{2.5}$ 浓度分布的影响逐渐增加. 对比 $PM_{2.5}$ 浓度分布[图 8(a)]和森林覆盖率分布[图 8(c)]可以看出, 中国森林覆盖率高的地区主要集中在南部沿海地区和东南地区, 这和 $PM_{2.5}$ 浓度在南部地区以及东南部地区较低的情况一致; 其余大部分地区森林覆盖率都处在较低水平, 对降低 $PM_{2.5}$ 浓度不能起到显著的影响.

人均电力消费量对 $PM_{2.5}$ 浓度也存在一定的影响, 且和 $PM_{2.5}$ 浓度呈负相关. 由 GWR 模型回归系数平均值可以看出, 人均电力消费量的平方每提高 1, $PM_{2.5}$ 浓度降低 0.153. 从图 8(d)可以看出, 人均电力消费水平较高的地区主要分布在中国西北部 and 东部沿海地区, 中部地区人均电力消费水平较低, 与 $PM_{2.5}$ 高浓度地区主要集中在中部地区的情

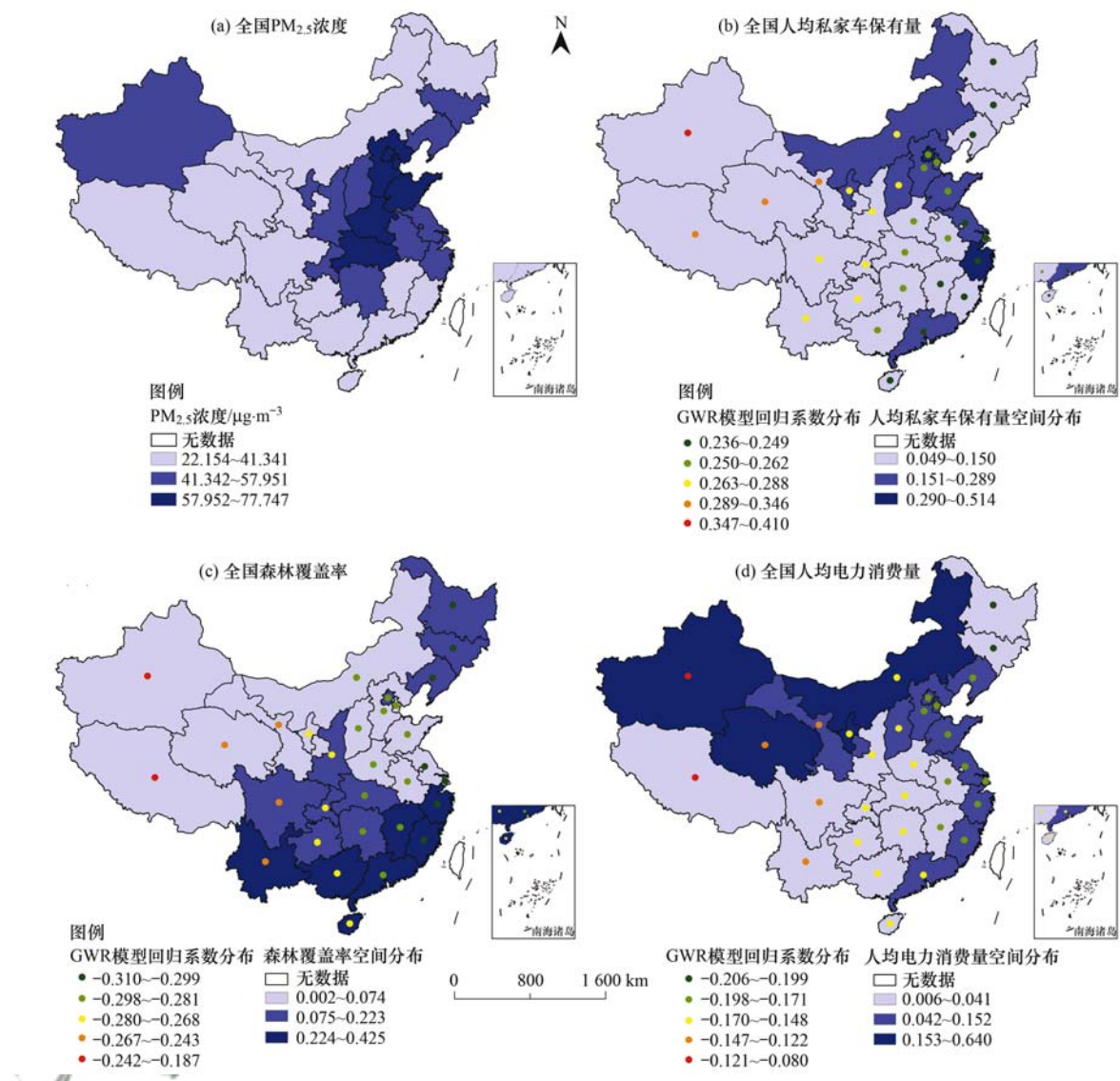


图8 全国PM_{2.5}浓度及显著性指标分布情况

Fig. 8 Distribution of PM_{2.5} concentration and significant index in China

况[图8(a)]相符. 影响各省人均电力消费量的因素众多, 人均电力消费量对PM_{2.5}浓度的影响可能是多种因素的综合体现(GDP因素、发电方式、电力行业排放等), 但从省级尺度来说, 人均电力消费量的增加有助于降低PM_{2.5}浓度.

4 结论

(1)空间自相关分析表明PM_{2.5}浓度在全国尺度的空间分布呈显著的正相关性, 存在以京津冀、山东、河南为中心高浓度地区, 向四周逐渐递减的空间分布结构, 且在广西、四川、西藏、云南一带呈现明显的低值聚集.

(2)比较OLS模型和GWR模型在PM_{2.5}回归分析中的优劣. 结论表明, GWR模型在处理本文中讨

论的具有较强空间自相关性的空间变量时, 有着更好的拟合程度.

(3)GWR模型结果表面, 在显著性水平的情况下, 森林覆盖率、人均私家车保有量和人均电力消费量这3个因素达到显著性水平. 其中, 人均电力消费量和森林覆盖率与PM_{2.5}浓度呈负相关关系, 其余均呈现正相关关系. 在本文涉及的所有因素中, 人均私家车保有量和森林覆盖率对PM_{2.5}浓度的影响最明显, 人均电力消费量也对抑制PM_{2.5}浓度有显著影响.

参考文献:

- [1] Li M N, Zhang L L. Haze in China: current and future challenges[J]. Environmental Pollution, 2014, 189: 85-86.
- [2] Tang D L, Li T Y, Chow J C, et al. Air pollution effects on fetal and child development: a cohort comparison in China[J].

- Environmental Pollution, 2014, **185**: 90-96.
- [3] Xie P, Liu X Y, Liu Z R, *et al.* Human health impact of exposure to airborne particulate matter in Pearl River Delta, China[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2011, **215**(1-4): 349-363.
- [4] Wu S W, Deng F R, Wei H Y, *et al.* Association of cardiopulmonary health effects with source-appointed ambient fine particulate in Beijing, China: a combined analysis from the healthy volunteer natural relocation (HVNR) study [J]. Environmental Science & Technology, 2014, **48**(6): 3438-3448.
- [5] Sofowote U M, Su Y S, Dabek-Zlotorzynska E, *et al.* Constraining the factor analytical solutions obtained from multiple-year receptor modeling of ambient PM_{2.5} data from five speciation sites in Ontario, Canada[J]. Atmospheric Environment, 2015, **108**: 151-157.
- [6] Lin G, Fu J Y, Jiang D, *et al.* Spatio-Temporal variation of PM_{2.5} concentrations and their relationship with geographic and socioeconomic factors in China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2014, **11**(1): 173-186.
- [7] 杨昆, 杨玉莲, 朱彦辉, 等. 中国 PM_{2.5} 污染与社会经济的空间关系及成因[J]. 地理研究, 2016, **35**(6): 1051-1060.
Yang K, Yang Y L, Zhu Y H, *et al.* Social and economic drivers of PM_{2.5} and their spatial relationship in China[J]. Geographical Research, 2016, **35**(6): 1051-1060.
- [8] 李龙凤, 王新明, 赵利容, 等. 广州市街道环境 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 质量浓度的变化特征[J]. 地球与环境, 2005, **33**(2): 57-60.
Li L F, Wang X M, Zhao L R, *et al.* Variations of PM₁₀ and PM_{2.5} levels in street microenvironment in Guangzhou[J]. Earth and Environment, 2005, **33**(2): 57-60.
- [9] Kim K Y, Kim Y S, Roh Y M, *et al.* Spatial distribution of particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}) in Seoul Metropolitan Subway stations[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, **154**(1-3): 440-443.
- [10] 欧阳, 赵文吉, 郑晓霞, 等. 机动车排放对 PM_{2.5} 空间分布的影响研究[J]. 生态环境学报, 2015, **24**(12): 2009-2016.
Ou Y, Zhao W J, Zheng X X, *et al.* Effect of vehicles on the temporal and spatial distribution of PM_{2.5} [J]. Ecology and Environment Sciences, 2015, **24**(12): 2009-2016.
- [11] 吴健生, 廖星, 彭建, 等. 重庆市 PM_{2.5} 浓度空间分异模拟及影响因素[J]. 环境科学, 2015, **36**(3): 759-767.
Wu J S, Liao X, Peng J, *et al.* Simulation and influencing factors of spatial distribution of PM_{2.5} concentrations in Chongqing[J]. Environmental Science, 2015, **36**(3): 759-767.
- [12] 焦利民, 许刚, 赵素丽, 等. 基于 LUR 的武汉市 PM_{2.5} 浓度空间分布模拟[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, **40**(8): 1088-1094.
Jiao L M, Xu G, Zhao S L, *et al.* LUR-based simulation of the spatial distribution of PM_{2.5} of Wuhan [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, **40**(8): 1088-1094.
- [13] Xu G, Jiao L M, Zhang B E, *et al.* Spatial and temporal variability of the PM_{2.5}/PM₁₀ Ratio in Wuhan, Central China [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2017, **17**(3): 741-751.
- [14] 许刚, 焦利民, 肖丰涛, 等. 土地利用回归模型模拟京津冀 PM_{2.5} 浓度空间分布[J]. 干旱区资源与环境, 2016, **30**(10): 116-120.
Xu G, Jiao L M, Xiao F T, *et al.* Applying land use regression model to estimate spatial distribution of PM_{2.5} concentration in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, **30**(10): 116-120.
- [15] 周磊, 武建军, 贾瑞静, 等. 京津冀 PM_{2.5} 时空分布特征及其污染风险因素[J]. 环境科学研究, 2016, **29**(4): 483-493.
Zhou L, Wu J J, Jia R J, *et al.* Investigation of temporal-spatial characteristics and underlying risk factors of PM_{2.5} pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Area [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, **29**(4): 483-493.
- [16] 洪纲, 周静博, 姜建彪, 等. 空气细颗粒物(PM_{2.5})的污染特征及其来源解析研究进展[J]. 河北工业科技, 2015, **32**(1): 64-71.
Hong G, Zhou J B, Jiang J B, *et al.* Research progress of characteristics and source apportionment of air fine particle pollution (PM_{2.5}) [J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2015, **32**(1): 64-71.
- [17] Chen Y, Schleicher N, Cen K, *et al.* Evaluation of impact factors on PM_{2.5} based on long-term chemical components analyses in the megacity Beijing, China [J]. Chemosphere, 2016, **155**: 234-242.
- [18] Tunno B J, Dalton R, Michanowicz D R, *et al.* Spatial patterning in PM_{2.5} constituents under an inversion-focused sampling design across an urban area of complex terrain [J]. Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology, 2016, **26**(4): 385-396.
- [19] Liang X, Zou T, Guo B, *et al.* Assessing Beijing's PM_{2.5} pollution: severity, weather impact, APEC and winter heating [J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences, 2015, **471**(2182): 20150257.
- [20] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴-2016[EB/OL]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2016/indexch.htm>, 2016-10-18.
- [21] Griffith D A. Provincial-level spatial statistical modelling of the change in per capita disposable Family Income in Spain, 1975-1983 [J]. Cybergeo: European Journal of Geography, 1998, doi: 10.4000/cybergeo.385.
- [22] 翟卫欣, 程承旗. 一种空间权重矩阵的优化方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, **42**(6): 731-736.
Zhai W X, Cheng C Q. An improved spatial weights matrix construction strategy[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, **42**(6): 731-736.
- [23] Moran P A P. The interpretation of statistical maps[J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1948, **10**(2): 243-251.
- [24] Anselin L. Local indicators of spatial association—LISA [J]. Geographical Analysis, 1995, **27**(2): 93-115.
- [25] Marquardt D W. Generalized inverses, ridge regression, biased linear estimation, and nonlinear estimation[J]. Technometrics, 1970, **12**(3): 591-612.
- [26] Brunson C, Fotheringham A S, Charlton M E. Geographically weighted regression: a Method for Exploring Spatial Nonstationarity[J]. Geographical Analysis, 1996, **28**(4): 281-298.
- [27] Akaike H. Factor analysis and AIC[J]. Psychometrika, 1987, **52**(3): 317-332.

CONTENTS

Estimation of Fine Particle ($PM_{2.5}$) Emission Inventory from Cooking: Case Study for Shanghai	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1971)
Chemical Characterization, Spatial Distribution, and Source Identification of Organic Matter in $PM_{2.5}$ in summertime Shanghai, China	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, JING Sheng-ao, <i>et al.</i> (1978)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Salts in $PM_{2.5}$ in the Southern Suburbs of Beijing	GAO Han-yu, WEI Jing, WANG Yue-si (1987)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust $PM_{2.5}$ During Spring in Tianjin Using the Quadrat Sampling Method	ZHAO Jing-qi, JI Ya-qin, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (1994)
HONO Pollution Characteristics and Nighttime Sources During Autumn in Guangzhou, China	TIAN Zhi-lin, YANG Wen-da, YU Xiao-fang, <i>et al.</i> (2000)
Sulfur Sources and Oxidation Pathways in Summer Aerosols from Nanjing Northern Suburbs Using S and O Isotopes	HAN Xun, REN Jie, CHEN Shan-li, <i>et al.</i> (2010)
Methods for Determining and Applications of High-Resolution Vehicle Emission Inventory at County Scale	FAN Shou-bin, GUO Jin-jin, LI Xue-feng (2015)
Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Emitted from Typical Industrial Biomass Boilers	LIN Yu-jun, BAI Li, WANG Huan-xiang, <i>et al.</i> (2023)
Research of Parameter Uncertainty for the HSPF Model Under Different Temporal Scales	PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, MA Wen-jing (2030)
Contribution of Nitrogen Sources in Water Sources by Combining Nitrogen and Oxygen Isotopes and SIAR	JIN Zan-fang, ZHANG Wen-liao, ZHENG Qi, <i>et al.</i> (2039)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds in Baiyangdian Lake	GAO Qiu-sheng, ZHAO Yong-hui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2048)
Fluorescent Characteristics and Environmental Significance of Particulate Organic Matter in Lake Taihu, China	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i> (2056)
Distribution and Settlement of Microplastics in the Surface Sediment of Yangtze Estuary	ZHU Xiao-tong, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (2067)
Water Chemistry and Characteristics of Dissolved Organic Carbon During the Wet Season in Wulixia Reservoir, SW China	LU Xiao-xuan, LI Qiang, JIN Zhen-jiang, <i>et al.</i> (2075)
Bioavailability of Dissolved Organic Carbon in Rivers for Typical Vegetation Types in the Permafrost Regions on the Qinghai-Tibet Plateau	MA Xiao-liang, LIU Gui-min, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (2086)
Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) and Relationship with Dissolved Heavy Metals in a Peri-urban and an Urban River	LIANG Meng-qi, SHAO Mei-ling, CAO Chang-li, <i>et al.</i> (2095)
Migration and Transformation of Dissolved Organic Matter in Karst Water Systems and an Analysis of Their Influencing Factors	ZHANG Lian-kai, LIU Peng-yu, QIN Xiao-qun, <i>et al.</i> (2104)
Source and Distribution of Dissolved Metal Ions in the Backwater Area of Pengxi River in Three Gorges Reservoir	ZHAO Xiao-song, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (2117)
Differences in Diffusive Fluxes of Nutrients from Sediment Between the Natural River Areas and Reservoirs in the Lancang River Basin	WANG Xue, CHENG Bao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (2126)
Nutrient Distribution Characteristics of the Sediment-water System in the Xiangxi River During the Impoundment of TGR	SU Qing-qing, LIU De-fu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2135)
Effects of Submerged Macrophytes on Different Phosphorus Fractions in Overlying Water and Interstitial Water	YANG Wen-bin, GAO Shun-feng, WAN Rui, <i>et al.</i> (2145)
Distribution Characteristics and Fluxes of Nitrogen and Phosphorus at the Sediment-water Interface of Yuqiao Reservoir	WEN Shuai-long, GONG Wan-qing, WU Tao, <i>et al.</i> (2154)
Distribution of Phosphorus Fractions in Surface Sediments of Minjiang Mainstreams	YANG Geng, QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, <i>et al.</i> (2165)
Nitrate Uptake Kinetics and Correlation Analysis in an Agricultural Drainage Ditch	LI Ru-zhong, YIN Qi-he, GAO Su-di, <i>et al.</i> (2174)
Influencing Factors for Phosphorus Removal by Modified Bio-ceramic Substrates Coated with ZnAl-LDHs Synthesized by Different Modification Conditions	XIANG Yang, ZHANG Xiang-ling, LEI Yu, <i>et al.</i> (2184)
Removal of Odorants in Drinking Water Using VUV/Persulfate	SUN Xin, SHI Lu-xiao, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (2195)
Degradation of OG with Peroxymonosulfate Activated by a $MnFe_2O_4$ -graphene Hybrid	XIA Wen-jun, LIU Feng, HAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism of As(V) Removal from Water by Lanthanum and Cerium Modified Biochars	LI Jin, ZU Yan-qun, LI Gang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption of Dissolved Organic Matter with Different Relative Molecular Masses on Inorganic Minerals and Its Influence on Carbamazepine Adsorption Behavior	LIANG Yu, HE Jiang-tao, ZHANG Si (2219)
Pollution Characteristics of Organophosphorus Flame Retardants in a Wastewater Treatment Plant	SUN Jia-wei, DING Wei-nan, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (2230)
Enhanced Coagulation as a Pretreatment for Low Temperature Wastewater	LIU Hai-long, REN Yu-xia, ZHANG Zhong-min (2239)
Operating Characteristics and Fouling Characteristics of a RO Membrane System for Desalination of Dyeing Wastewater	TAN Yu-jun, ZHANG Ze-tian, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (2249)
Optimization of the Nitrogen Removal Performance on the CANON Process in a Biofilm Reactor: From FBBR to MBBR	FU Kun-ming, LI Hui, ZHOU Hou-tian, <i>et al.</i> (2256)
Microbial Community Dynamics During Two Sludge Granulation Processes	GAO Jing-feng, ZHANG Li-fang, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2265)
Sludge Conditioning Performance of Polyaluminum, Polyferric, and Titanium Xerogel Coagulants	WANG Xiao-meng, WANG Xin, YANG Ming-hui, <i>et al.</i> (2274)
Effects of Heat and Heat-alkaline Treatments on Disintegration and Dissolved Organic Matter in Sludge	DAI Qin, ZHANG Wen-zhe, YU Pan-fen, <i>et al.</i> (2283)
Effect of Different Ratios of Anaerobic Time and Aeration Time on the Formation of Partial Nitrification Granules	LI Dong, GUO Yue-zhou, CAO Mei-zhong, <i>et al.</i> (2289)
Spatial and Temporal Variation of Mercury in Municipal Sewage Sludge in China	WANG Ning, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (2296)
Characteristics of N_2O Release and Influencing Factors in Grass-type and Algae-type Zones of Taihu Lake During Summer	ZHENG Xiao-lan, WEN Shuai-long, LI Xin, <i>et al.</i> (2306)
Analysis of Greenhouse Gas Emission Characteristics and Their Influencing Factors in the Algae Zone of Lake Taihu	JIA Lei, PU Yi-ni, YANG Shi-jun, <i>et al.</i> (2316)
Dynamics of CO_2 and N_2O in Seasonal Frozen Soil Profiles for a Typical Steppe in Inner Mongolia	LI Jin-bo, YAO Nan, LI Xiu, <i>et al.</i> (2330)
Characteristics of CO_2 Flux in a Mature Apple (<i>Malus domestica</i>) Orchard Ecosystem on the Loess Plateau	YANG Jian-feng, YANG Xiao-ni, WANG Jun-hua, <i>et al.</i> (2339)
Effects of Biochar Application Rates on Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil	QI Le, GAO Ming, GUO Xiao-min, <i>et al.</i> (2351)
Short-Term Effects of Different Fertilization Treatments on Greenhouse Gas Emissions from Northeast Black Soil	LI Ping, LANG Man, LI Miao, <i>et al.</i> (2360)
Eukaryotic Micro-plankton Community Diversity and Characteristics of Regional Distribution in the Yellow Sea by ITS High-throughput Sequencing	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (2368)
Influence of Different Patterns of Discharge on Microbial Diffusion in Municipal Treated Wastewater	LANG Xiu-lu, SONG Zhi-wen, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (2380)
Impact of Tourism on Bacterial Communities of Karst Underground River: A Case Study from Two Caves in Fengdu, Chongqing	LÜ Xian-fu, HE Qiu-fang, WANG Feng-kang, <i>et al.</i> (2389)
Diversity of the Microbial Community in Rice Paddy Soil with Biogas Slurry Irrigation Analyzed by Illumina Sequencing Technology	ZHU Jin-shan, ZHANG Hui, MA Lian-jie, <i>et al.</i> (2400)
Effect of Biochar Amendment on Physicochemical Properties and Fungal Community Structures of Cinnamon Soil	YAN Hai-tao, YIN Quan-yu, DING Song-shuang, <i>et al.</i> (2412)
Carbon Metabolism Characteristics of the Karst Soil Microbial Community for Pb-Zn Mine Tailings	FANG Jun-jia, LI Qiang, LIU Chang, <i>et al.</i> (2420)
Denitrification Characteristics and Community Structure of Aerobic Denitrifiers from Lake and Reservoir Sediments	KANG Peng-liang, ZHANG Hai-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2431)
Investigation of the Coupling Mechanism between Naphthalene Degradation and Denitrification of a Naphthalene Degraded Bacterial Consortium Under Denitrification	ZHANG Ze-yu, WANG Ming-xia, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2438)
Spatial Distribution Study and Pollution Assessment of Pb in Soils in the Xijiang River Drainage of Guangxi	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2446)
Effects of Agricultural Activities on Soil Mercury Changes in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	CHEN Qiu-yu, SUN Song, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2456)
Screening and Identification of Arsenic-resistant Endophytic Bacteria from Different Rice Tissues (<i>Oryza sativa</i> L.) in Different Growth Stages	WANG Bo-xun, WANG Xue-dong, DUAN Gui-lan (2464)
Characteristics of Mercury Transformation in Soil and Accumulation in Rice Plants in an Acidic Purple Paddy Soil Area	LI Yu-qin, SUN Tao, DENG Han, <i>et al.</i> (2472)
Life Cycle Environmental Impact Assessment on Different Modes of Greenhouse Vegetable Production in the North China Plain	XU Qiang, HU Ke-lin, LI Ji, <i>et al.</i> (2480)
Health Effects of $PM_{2.5}$ Based on Bacterial Toxicity Test and Transcriptional Analysis in Lungs of Mice	SONG Peng-cheng, LU Shu-yu, WEI Yong-jie, <i>et al.</i> (2489)
Socio-economic Factors Influencing the Spatial Distribution of $PM_{2.5}$ Concentrations in China: An Exploratory Analysis	DUAN Jie-xiong, ZHAI Wei-xin, CHENG Cheng-qi, <i>et al.</i> (2498)