

目次(卷终)

基于气象条件指数的我国重点区域 PM _{2.5} 和臭氧复合污染气象影响评估	杨欣, 杨元琴, 李红, 高健, 牛军捷, 储王辉, 刘世杰, 陈义珍, 何友江, 赵好希 (6433)
“2+26”城市 PM _{2.5} 与气象因子的尺度依存关系及影响因素分析	吴舒祺, 金团团, 郑冬阳, 顾杨吻, 赵文吉 (6441)
武汉军运会前后大气 PM _{2.5} 化学组分和来源	刘世豪, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 祁士华 (6452)
2016~2020年邯郸市冬季 PM _{2.5} 污染特征与来源解析	牛红亚, 高娜娜, 鲍晓磊, 胡伟, 胡德豪, 吴春苗, 马心怡, 纪晓腾, 樊景森, 王金喜 (6463)
渭南市冬季 PM _{2.5} 化学组成及来源解析	郭景宁, 李小飞, 余锋, 张蕊, 高月, 杨雯 (6474)
长三角城郊冬季 PM _{2.5} 中铵盐的形成过程及来源解析	项妍琨, 曹芳, 张雯洪, 范美益, 章炎麟 (6486)
上海城区硝基芳香族化合物的化学组成及特征分析	杨露, 马英歌, 郁建珍, 吴宇航, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 黄成, 童张法 (6495)
吕梁市 PM _{2.5} 中多环芳烃的来源解析及健康风险评估	牟玲, 刘紫叶, 李杨勇, 李雪梅, 李晓帆, 刘添, 冯传阳, 姜辛 (6508)
广西背景大气中生物质燃烧对碳质气溶胶组成和吸光性的影响	吴星麒, 曹芳, 洪一航, 邢佳莉 (6518)
南京北郊大气棕碳吸光特性、来源及其季节变化特征	陈星州, 崔世杰, 张运江, 先久坤, 王镜雯, 汪俊峰, 盖鑫磊 (6529)
京津冀地区“煤改电”对 PM _{2.5} 污染的健康效益评估	张茹婷, 陈传敏, 刘松涛, 吴华成, 周卫青, 李朋 (6541)
基于化学损耗修正的青岛胶州市环境 VOCs 来源解析	孔翠丽, 吴雨彤, 顾瑶, 宋江邦, 孟赫, 石来元, 刘保双 (6551)
聊城市城区夏季 VOCs 污染特征及来源解析	李万勇, 黄浩瑜, 王艳振, 朱子博, 王一秋, 高艳珊, 彭娜娜, 伦小秀, 黄亮, 冯如帆, 菅月诚, 王强 (6564)
基于三维空气质量模型的淄博市臭氧及前体物来源解析	张馨心, 赵秀颖, 黄凌, 薛金, 卞锦婷, 王杨君, 李莉 (6576)
中国高温下臭氧抑制事件的时空特征及其影响因素	欧林冲, 陈伟华, 伍永康, 吴乐敏, 王雪梅 (6586)
基于无人机的城市大气颗粒物与臭氧污染探测与溯源研究进展	曲雅微, 王体健, 袁成, 吴昊 (6598)
京津冀地区机动车细颗粒物污染的健康影响分析	郝永佩, 宋晓伟, 宋晓东, 王京伟, 程鹏 (6610)
中国水泥行业通过 CCUS 技术的减排潜力评估	魏宁, 刘胜男, 魏凤, 李小春 (6621)
钢铁行业生命周期碳排放核算及减排潜力评估	宋晓璐, 杜帅, 邓陈宁, 谢明辉, 沈鹏, 赵慈, 陈忱, 刘晓宇 (6630)
珠江三角洲二氧化碳源汇演变特征及驱动因素	胡景心, 沙青娥, 刘慧琳, 张雪驰, 郑君瑜 (6643)
东莞市低碳路径下加速电气化对 CO ₂ 和污染物协同减排影响	吴乐敏, 陈丙寅, 欧林冲, 白玉洁, 刘可旋, 王伟文, 彭勃, 王雪梅 (6653)
县域尺度下长株潭地区城市化与碳排放的关系	刘贤赵, 李阳 (6664)
城市草坪温室气体排放特征及影响因素	陈丽涵, 刘硕, 林溢, 郭娜, 臧昆鹏, 陈圆圆, 李嘉鑫, 邱珊珊, 卿雪梅, 洪海祥, 蒋凯, 熊浩宇, 方双喜 (6680)
双视角下中国畜牧业甲烷排放的温室效应	刘舒乐, 严薇, 高庆先, 马占云 (6692)
中国典型流域有机磷酸酯的污染特征与风险评估	赵江陆, 路海健, 吕佳佩, 杨江涛, 罗莹, 曹渺, 孙善伟, 郭昌胜, 徐建 (6700)
黄河下游悬河段饮用水源地土壤重金属污染、来源及健康风险	彭超月, 任翀, 申浩欣, 王艳锋, 段海静, 王玉龙, 李旭辉, 刘德新, 马建华 (6710)
黄河干流沉积物重金属的赋存形态特征及污染评价	王依滴, 欧阳威, 刘连华, 陆中桂 (6720)
土地利用结构与空间格局对鄱阳湖流域中小河流水质的影响	温嘉伟, 王鹏, 黄高翔, 张华, 聂明华, 丁明军, 折远洋 (6728)
内蒙古典型湖泊水环境特征及水质评价	王欣远, 潘保柱, 王立新, 刘铁军, 廖梓龙, 韩语, 杨子杰 (6744)
锡林河上游雨季降水、河水和地下水转化关系	孙金, 王怡璇, 杨璐, 段利民, 褚少杰, 张桂馨, 张波, 刘廷玺 (6754)
西北盐湖流域地下水水化学特征及控制因素	艳艳, 高瑞忠, 刘廷玺, 房丽晶, 王银龙 (6767)
巴里坤-伊吾盆地平原区地下水污染风险评价	刘钰, 曾妍妍, 周金龙, 闫志云, 白凡 (6778)
亚硫酸氢盐强化微量 Fe ²⁺ 活化过二硫酸盐降解扑热息痛	莫苗婷, 聂淑华, 晏彩霞, 丁明军, 陈诗瑶, 聂明华 (6790)
污泥生物炭活化过一硫酸盐降解环丙沙星	郑大洋, 邹佳丽, 徐皓, 王滕, 石宇翔, 陈永健, 李彬阳, 王亚宜, 冯沁, 吴敏 (6801)
NaHCO ₃ 活化荞麦皮生物炭对碘酸钾的吸附	魏红, 赵江娟, 景立明, 钮金芬, 付冉, 董莹 (6811)
竹基 N、P 共掺杂活性炭的制备及其铜离子吸附性能	王贵龙, 刘艳艳, 江荣源, 李思敏, 林冠峰, 卢贝丽, 黄彪, 陈燕丹 (6823)
西南高山峡谷区植被变化及影响因素分析	赖金林, 齐实, 崔冉冉, 廖瑞恩, 唐颖, 李鹏 (6833)
生物炭施用对农田土壤团聚体及有机碳影响的整合分析	孟艳, 沈亚文, 孟维伟, 王旭清, 李宗新, 刘开昌, 代红翠 (6847)
农田土壤碳循环过程及其量化方法	孙昭安, 朱彪 (6857)
生物炭施用 5 a 后对桂北桉树人工林土壤有机碳组分的影响	牟芝熠, 沈育伊, 曹杨, 王紫卉, 陈运霜, 滕秋梅, 黄科朝, 毛馨月, 徐广平 (6869)
喀斯特地区植被恢复下土壤活性有机碳与碳库管理指数的演变特征	蔡华, 舒英格, 王昌敏, 廖远行, 罗秀龙, 龙慧, 李雪梅 (6880)
中国典型抗生素在环境介质中的污染特征与生态风险评估	陈丽红, 曹莹, 李强, 孟甜, 张森 (6894)
基于 MGWR 的土壤 pH 值空间建模及其影响因素分析	赵明松, 陈宣强, 徐少杰, 邱士其, 王世航 (6909)
某燃煤电厂周边农田土壤重金属污染特征及源解析	张军, 李旭, 刘磊玉, 李雨茹 (6921)
重庆典型在产石化场地土壤污染特征及来源解析	张渝蓉, 罗帅, 陈媛, 曹军, 刘斌, 刘元元 (6933)
高垦殖丘陵区不同类型农用地土壤中抗生素抗性基因分布特征	陈瑞, 程建华, 唐翔宇 (6947)
有机肥配施生物炭对果园土壤反硝化微生物和酶活性的影响	邓正昕, 高明, 熊子怡, 王莹燕, 谢军, 王子芳 (6955)
有机肥处理对旱地红壤细菌群落及玉米生产力的影响	林婷婷, 郑洁, 朱国繁, 李璐, 杨叶钰萍, 刘佳, 徐勤松, 孙波, 蒋瑞霖 (6965)
微塑料和镉复合污染对狼尾草根际土壤微生物群落结构和功能的影响	段莉阳, 张玉, 任学敏, 李玉英, 张英君, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (6973)
设施番茄种植年限对土壤理化性质及微生物群落的影响	赵阳阳, 刘银双, 宋瑶, 张晓旭, 贾振华, 黄亚丽 (6982)
3 种氧化剂对焦化场地多环芳烃的修复效果与土著微生物的响应关系	李伟, 王伟伟, 孟祥宇, 孙英杰, 王亚楠, 李书鹏, 杨乐巍, 刘鹏, 刘渊文 (6992)
河北省不同盐渍化土壤类型的微生物多样性与种群结构	刘银双, 牛宏进, 赵阳阳, 孙宏勇, 陈晓波, 黄亚丽 (7004)
玉米根际微生物氮磷转化的功能基因组学分析	汪香君, 姜美彤, 李森, 倪浩为, 孙波, 梁玉婷 (7014)
外源菌剂联合柠檬酸强化龙葵修复土壤镉污染	王楷, 王丽, 王一钲, 游梦, 梁婷, 邹茸, 范洪黎 (7024)
1 株肠杆菌与硫酸盐联合施用对水稻积累镉的影响	张朴心, 姚俊帆, 刘玉玲, 张威宇, 尹雪斐, 铁柏清 (7036)
《环境科学》第 44 卷(2023 年)总目录	(7045)
《环境科学》征订启事(6507)	
《环境科学》征稿简则(6620)	
信息(6743, 6846, 6856)	

基于 MGWR 的土壤 pH 值空间建模及其影响因素分析

赵明松^{1,2,3}, 陈宣强^{1,2,3}, 徐少杰¹, 邱士其¹, 王世航^{1,2,3}

(1. 安徽理工大学空间信息与测绘工程学院, 淮南 232001; 2. 矿山采动灾害空地协同监测与预警安徽省教育厅重点实验室, 淮南 232001; 3. 矿区环境与灾害协同监测煤炭行业工程研究中心, 淮南 232001)

摘要: 以安徽、河南、江苏和山东省为研究区, 利用 599 个土壤样点数据, 从地形、气候和生物等方面选取与土壤 pH 相关的 9 个环境因子, 采用多尺度地理加权回归 (MGWR)、混合地理加权回归 (Mixed GWR)、地理加权回归 (GWR) 和多元线性回归 (MLR) 这 4 种模型对研究区土壤 pH 空间分布进行建模, 并结合 MGWR 与分位数回归揭示环境因子对土壤 pH 作用的空间差异性。结果表明: ① 研究区土壤 pH 在不同空间距离上呈不同程度的显著全局和局部空间自相关性, 聚集特征明显。② 4 种模型中 MGWR 模型最优, MGWR、Mixed GWR、GWR 和 MLR 的建模集 R^2_{adj} 为 0.64、0.62、0.59 和 0.48。MGWR 的残差独立分布性最强, 其空间自相关性最弱, 全局 Moran's I 仅为 0.07。③ 3 种 GWR 预测结果显示, 研究区土壤 pH 值空间分布总体由北至南逐渐降低, 河南北部最高, 安徽南部最低。④ MGWR 回归结果表明年均降雨量 (MAP)、多尺度谷底平坦度 (MRVBF) 和海拔对土壤 pH 的影响较强, 且存在较强的空间异质性。在江苏北部和山东大部分地区, MAP 对土壤 pH 的影响较强; 在江苏北部和山东西部, MRVBF 对土壤 pH 的正向作用较强; 在江苏北部和中部, 海拔对土壤 pH 的负向作用最强。⑤ MAP 对不同分位数水平上的土壤 pH 均呈显著负作用, 作用强度随分位数水平增加呈减弱趋势; MRVBF 对低分位数水平 (θ 为 0.1~0.4) 上的土壤 pH 呈显著负作用, 对高分位数水平 (θ 为 0.5~0.9) 的土壤 pH 作用不显著。研究结果可为利用 MGWR 开展大区域土壤属性影响因素分析及预测制图提供参考。

关键词: 土壤 pH; 多尺度地理加权回归 (MGWR); 混合地理加权回归; 分位数回归; 数字土壤制图

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)12-6909-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202212031

Spatial Prediction Modeling for Soil pH Based on Multiscale Geographical Weighted Regression (MGWR) and Its Influencing Factors

ZHAO Ming-song^{1,2,3}, CHEN Xuan-qiang^{1,2,3}, XU Shao-jie¹, QIU Shi-qi¹, WANG Shi-hang^{1,2,3}

(1. School of Geomatics, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Key Laboratory of Aviation-aerospace-ground Cooperative Monitoring and Early Warning of Coal Mining-induced Disasters of Anhui Higher Education Institutes, Huainan 232001, China; 3. Coal Industry Engineering Research Center of Collaborative Monitoring of Mining Area's Environment and Disasters, Huainan 232001, China)

Abstract: Anhui, Henan, Jiangsu, and Shandong provinces were selected as the study area. A total of 599 soil samples and nine environmental factors of soil pH were collected. The spatial distribution of soil pH was modeled based on multi-scale geographically weighted regression (MGWR), mixed geographically weighted regression (Mixed GWR), geographically weighted regression (GWR), and multiple linear regression (MLR) models. Then, the spatial difference in the effect of environmental factors on soil pH was revealed using MGWR and quantile regression models. The results showed that: ① soil pH showed significant global and local spatial autocorrelation at different spatial distances, and the clustering characteristics were obvious. ② The MGWR model was the best among the four models, and the R^2_{adj} of MGWR, Mixed GWR, GWR, and MLR were 0.64, 0.62, 0.59, and 0.48, respectively. The residual of MGWR had the strongest independent distribution and the weakest spatial autocorrelation with a global Moran's I of 0.07. ③ Three types of GWR predictions showed that the spatial distribution of soil pH decreased gradually from north to south in the study area, with the highest in northern Henan and the lowest in southern Anhui. ④ MGWR modeling results showed that there was strong spatial heterogeneity of mean annual precipitation (MAP), multi-resolution valley bottom flatness (MRVBF), and elevation affecting soil pH. MAP had a stronger effect on soil pH in northern Jiangsu and most parts of Shandong. The positive effect of MRVBF on soil pH was stronger in northern Jiangsu and western Shandong. The negative effect of elevation on soil pH was stronger in northern and central Jiangsu. ⑤ The quantile regression analysis showed that the mean annual precipitation had a significant negative effect on soil pH at different quantile levels of soil pH, and influence intensity decreased with the increase in pH quantile level. MRVBF had a significant negative effect on soil pH at a low quantile level (θ = 0.1 to 0.4) but had no significant effect on soil pH at a high quantile level (θ = 0.5 to 0.9). These results can provide an important reference for mapping soil properties and analyzing its influence factors based on the MGWR model in large regions.

Key words: soil pH; multi-scale geographically weighted regression (MGWR); mixed geographically weighted regression; quantile regression; digital soil mapping

土壤 pH 是重要的土壤属性, 它与土壤的肥力水平、微生物与动物群的活动和腐殖质的形成息息相关, 并直接影响土壤养分存在的形态和有效性^[1~3]。同时土壤 pH 还能够对土壤中重金属元素的存在状态、有效性和迁移转化特性进行控制, 从而对区域生态环境质量产生重要影响^[3~5]。因此, 预测土壤 pH 的空间分布, 探究不同环境因子对土壤

pH 空间分布的影响, 对于合理规划利用土壤资源、提升土壤环境质量有重要意义^[4,6]。

收稿日期: 2022-12-04; 修订日期: 2023-02-14

基金项目: 安徽省自然科学基金项目 (2208085MD88); 国家自然科学基金项目 (41501226); 安徽理工大学人才引进项目 (ZY020)

作者简介: 赵明松 (1983~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为数字土壤制图和土壤空间变异, E-mail: zhaomingsong@163.com

土壤形成发育过程中环境因子与土壤属性的关系存在空间差异性,随着空间位置的变化,环境因子对土壤属性的作用强度不同,在大区域中这种关系更为明显,传统的线性或全局模型难以处理它们间的复杂关系^[7,8]. 如有研究表明,中国农田土壤 pH 和有机质在旱地和水旱轮作的土壤上呈显著负相关,而在水田上则呈显著正相关^[8]. 此外,不同的环境因子对土壤属性的作用具有尺度依赖性^[9~11]. 有研究表明,北京顺义区土壤镉的空间分布存在多尺度空间变异,在小尺度上主要受土地利用强度的影响,大尺度上主要受土壤类型的影响^[11]. 不同空间尺度下,土壤类型、成土母质、地形、土地利用以及耕作施肥等因素均会对土壤 pH 值的空间变异产生不同程度的影响,即使在同一地区,不同时期的土壤 pH 值空间变异程度和主控因素也不同^[12~14].

近年来地理加权回归 (geographically weighted regression, GWR) 模型在土壤属性的空间建模中应用较多,且建模精度较高^[15~18]. GWR 模型中自变量的回归系数随空间位置而变化,能够直观地探测不同空间位置上环境因子对目标变量的影响程度^[19]. 普通 GWR 用一个固定的带宽来概括所有自变量对因变量作用的空间尺度,实际上它们作用的空间尺度并不一致. 在此基础上,学者们改进了普通 GWR 模型,如混合地理加权回归 (mixed geographically weighted regression, Mixed GWR)^[20] 和多尺度地理加权回归 (multi-scale geographically weighted regression, MGWR)^[21]. Mixed GWR 模型中自变量分为全局项和局部项,即采用两种带宽拟合模型,兼具了自变量对因变量作用的全局性和局部性. 与普通 GWR 模型相比, Mixed GWR 的建模精度有所提高^[20,22]. MGWR 模型考虑了不同环境因子的差异化作用尺度,能识别不同空间尺度下各自变量影响因变量的地理过程^[23]. 近年来 MGWR 模型逐渐应用于多个领域,如土壤有机碳多尺度建模^[24]、空气质量影响因素的空间异质性^[25,26]、房价影响因素的空间异质性^[27] 和工业发展效率驱动因素的尺度差异^[28] 等. MGWR 可以更加精确地建模,定量识别自变量对因变量作用的空间异质性和尺度差异性,在空间数据关系异质性建模方面将发挥更大的作用.

安徽、河南、江苏和山东地处黄淮海平原和长江中下游平原,该区域气候、成土母质和地形变化多样,土壤类型丰富,是我国重要的粮食生产基地. 本研究以这 4 个省份的表层土壤 pH 值为研究对象,利用 MGWR、Mixed GWR、GWR 和多元线性回归 (multiple linear regression, MLR) 进行空间预测建模,并对比 4 种建模结果差异,同时通过 MGWR 和

分位数回归结果探究环境因子对土壤 pH 影响的空间异质性,以期利用 MGWR 模型在大区域开展土壤属性空间变异和预测制图提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区介于 $110^{\circ}21' \sim 122^{\circ}42'E$, $29^{\circ}41' \sim 38^{\circ}24'N$, 包括安徽、河南、江苏和山东, 总面积 $5.676 \times 10^5 \text{ km}^2$. 研究区地处亚热带向温带的过渡带, 年均降雨量 $550 \sim 1800 \text{ mm}$, 年均气温 $11 \sim 16.4^{\circ}\text{C}$. 地形西高东低, 海拔 $0 \sim 2237 \text{ m}$, 地势高的区域集中在河南西部、安徽的皖南、皖西山区和山东的中部, 其他区域地形平坦, 海拔在 100 m 以下 (图 1). 土地利用以耕地类型为主, 主要分布在地形平坦区域; 林地主要分布在安徽皖西和皖南丘陵山区, 河南西部山地, 江苏宁镇扬丘陵区和沂沭丘陵地区, 山东中部地区^[29~32].

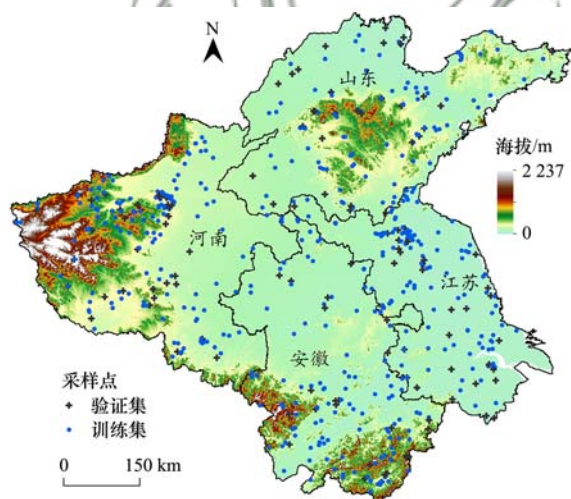


图 1 研究区位置与样点分布示意

Fig. 1 Location of study area and soil samples

1.2 数据来源

(1) 土壤样点数据 来源于《中国土系志·安徽卷》^[29]、《中国土系志·河南卷》^[30]、《中国土系志·江苏卷》^[31] 和《中国土系志·山东卷》^[32], 采样时间为 2010~2011 年 6~11 月, 样点采集按照优势土壤类型 (面积较大)、地形-母质-土地利用等景观要素组合, 共计 599 个土壤剖面. 由于土壤剖面按照发生层采样, 表层土壤的厚度不相同, 本研究按照深度加权后取 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层的土壤 pH 作为数字土壤制图对象.

(2) 环境因子数据 土壤 pH 作为土壤制图的目标变量. 选择地形、气候和生物因子作为环境因子用于土壤 pH 值的建模. 环境因子均为栅格形式的空间数据, 其中所有地形因子、生物因子和气候因子的原始空间分辨率分别为 90 m 、 250 m 和

1 000 m. 利用 ArcGIS 软件提取所有采样点的环境因子值,在 IBM SPSS Statistics 26 进行多重共线性检

测后,最终筛选 5 个地形因子,2 个气候因子和 2 个生物因子,所选环境因子数据描述见表 1.

表 1 环境因子数据描述

Table 1 Description of environment factor data

因子	项目	空间分辨率	来源
地形	海拔 (elevation)	90 m	中国科学院资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn)
	坡度 (slope)		
	地形湿度指数 (topographic wetness index, TWI)		
	多尺度谷底平坦度 (multi-resolution valley bottom flatness, MRVBF)		
	多尺度脊顶平坦度 (multi-resolution ridge top flatness, MRRTF)		
生物	植被增强指数 (enhanced vegetation index, EVI)	250 m	MODIS 陆地产品 16 d 合成植被指数地理数据空间云 (http://www.gscloud.cn)
	归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI)		
气候	年均降水量 (mean annual precipitation, MAP)	1 000 m	国家地球系统科学数据中心 (http://www.geodata.cn)
	年均温度 (mean annual temperature, MAT)		

地形因子主要利用 SAGA v. 2. 1. 4^[33] 软件从 SRTM 数字高程模型 (digital elevation model, DEM) 提取. 其中地形湿度指数 (TWI) 反映每个像元土壤水分的干湿程度,其值越大代表该地集水能力越强. 多尺度谷底平坦指数 (MRVBF) 识别多分辨率下的平坦和低地形进而识别谷底,多尺度脊顶平坦指数 (MRRTF) 识别高平坦区域来识别山脊. 当多尺度谷底 (脊顶) 平坦指数的值为 0 时,表示该地区为沉积 (侵蚀) 地区; 值等于或大于 1 时,表示该地区是逐渐增大的平坦区域^[34].

所有环境因子重采样为 1 000 m 空间分辨率,土壤 pH 预测结果的空间分辨率为 1 000 m.

1.3 研究方法

1.3.1 空间自相关

GWR 建模要求因变量存在显著的全局和局部空间自相关性^[35]. 采用全局莫兰指数和局部莫兰指数分析土壤 pH 值的全局和局部空间自相关性.

全局莫兰指数 (global Moran's I) 用于描述整个区域内地理实体间空间自相关程度,计算公式如下:

$$I = \frac{n}{S_0} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{X}) (x_j - \bar{X})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2} \quad (1)$$

式中, n 为样本总数, w_{ij} 为样本 i 和 j 之间的空间权重, S_0 为所有样本之间空间权重的和, x_i 为要素 i 的属性值, $\bar{X}$ 为对应属性的平均值. 全局 Moran's I 的值介于 $-1 \sim 1$ 之间,正值表明土壤 pH 整体上以空间聚类特征为主,负值则表明以离散分布为主,且绝对值越大表明空间相关程度越高; 越趋于 0 则表明越偏向于随机分布.

局部莫兰指数 (local Moran's I) 用于描述局部区域内地理实体间的空间自相关程度,计算公式如式(2)、式(3).

$$I_i = \frac{x_i - \bar{X}}{S_i^2} \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{ij} (x_j - \bar{X}) \quad (2)$$

$$S_i^2 = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^n (x_j - \bar{X})^2}{n - 1} \quad (3)$$

式中, n 、 w_{ij} 、 x_i 和 $\bar{X}$ 含义同公式(1). 局部 Moran's I 的值为正, Z (统计检验值) 得分为正时,为“高-高 (H-H)”聚类,即土壤 pH 的高值样点聚集分布; Z 得分为负时,为“低-低 (L-L)”聚类,即土壤 pH 的低值聚集分布. 局部 Moran's I 的值为负, Z 得分为正时,为“高-低 (H-L)”聚类,即土壤 pH 的高值点被低值点包围; Z 得分为负时,为“低-高 (L-H)”聚类,即土壤 pH 的低值点被高值点包围. 具体含义、计算和显著性检验过程参见文献[12,36].

1.3.2 分位数回归

分位数回归采用加权残差绝对值之和的方法估计参数. 当自变量对不同分位数上的因变量的分布产生不同的影响时,例如出现左偏或右偏的情况时,分位数回归能更加全面地刻画分布特征,描述自变量对因变量概率分布的影响. 公式如下^[37]:

$$S = \sum_{H_{ij} \geq H_{\theta}(d_{ij})} \theta [H_{ij} - H_{\theta}(d_{ij})] + \sum_{H_{ij} < H_{\theta}(d_{ij})} (1 - \theta) [H_{\theta}(d_{ij}) - H_{ij}] \quad (4)$$

式中, S 为不同分位点估计值; θ 为分位点; H_{θ} 和 H_{ij} 分别为第 i 个样点下第 j 个自变量在不同分位点 θ 的预测值与实际值; d_{ij} 为第 i 个样点第 j 个自变量的数值.

1.3.3 地理加权回归 (GWR)

MLR 假定自变量对因变量的作用在全局上是同质的,其回归系数在空间上一致,忽视了空间位置对作用程度的影响. GWR 是典型的局部回归模型,其公式如下:

$$Y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^k \beta_k(u_i, v_i) X_{ik} + \varepsilon_i \quad (5)$$

式中, (u_i, v_i) 为第 i 个样点的空间坐标; Y_i 和 X_{ik} 为因变量 Y 和自变量集 X_k 在空间位置处的实测值; $\beta_0(u_i, v_i)$ 为空间位置 (u_i, v_i) 处的常数项; $\beta_k(u_i, v_i)$ 为连续函数 $\beta_k(u, v)$ 在 i 点处的值; ε_i 为随机误差. 选用自适应 bi-square 空间权函数来拟合回归点的回归系数; 选用改进的赤池信息量准则 (corrected akaike information criterion, AICc) 来确定最优带宽^[38].

1.3.4 混合地理加权回归 (Mixed GWR)

Mixed GWR 将地理变异性较强的自变量作为局部变量, 其余作为全局变量, 其公式如下:

$$Y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^k \beta_k(u_i, v_i) X_{ik} + \sum_{l=1}^l \gamma_l z_{il} + \varepsilon_i \quad (6)$$

式中, z_{il} 为具有固定回归系数 γ_l 的自变量, 即全局变量, 与传统回归模型的系数一样在全局范围保持不变其余参数含义与公式 (5) 中相同. Mixed GWR 认为部分自变量对因变量的作用程度在整体区域内保持恒定, 应将其作为全局变量, 而剩余自变量对因变量的作用程度随着空间位置而变化, 则作为局部变量.

1.3.5 多尺度地理加权回归 (MGWR)

MGWR 区分各自变量对因变量作用的空间尺度, 允许不同的地理过程在各自最佳的带宽上运行, 增加了整体模型的可靠性, MGWR 的公式如下:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{j=1}^k \beta_{bwj}(u_i, v_i) x_{ij} + \varepsilon_i \quad (7)$$

式中, (u_i, v_i) 为第 i 个样点的空间坐标; y_i 和 x_{ij} 为因变量和自变量集在 i 处的值; $\beta_0(u_i, v_i)$ 为空间位置 (u_i, v_i) 处的常数项; ε_i 为随机误差项, $\beta_{bwj}(u_i, v_i)$ 为使用特定带宽 bwj 拟合的空间位置 i 处第 j 个自变量的回归系数.

1.3.6 精度评价

模型精度评价选用以下指标: Lin 氏一致性协调相关系数 (Lin's concordance correlation coefficient, LCCC)、平均绝对误差 (mean absolute error, MAE)、均方根误差 (root mean square error, RMSE) 以及调整后决定系数 (R_{adj}^2). LCCC 是比较实际值和预测值之间一致性的方法; MAE 用来衡量实际值与预测值之间的偏差; R_{adj}^2 反映因变量的全部变异被自变量解释的比例.

$$LCCC = \frac{2\rho\sigma_o\sigma_p}{(\bar{O} - \bar{P})^2 + \sigma_o^2 + \sigma_p^2} \quad (8)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - P_i| \quad (9)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \right]^{0.5} \quad (10)$$

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{(n-1) \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{(n-p-1) \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (11)$$

式中, n 为样本总数, ρ 为实际值和预测值的相关系数, O_i 和 P_i 为样点 i 的实际值和预测值; $\bar{O}$ 和 $\bar{P}$ 分别为实际值与预测值的均值; σ_o 和 σ_p 分别为实际值和预测值的标准差.

空间模型的优劣也可以根据模型的残差趋势进行评估^[19], 若模型残差空间自相关性下降可以间接证明模型的改善, 残差存在较强的空间相关性则说明模型还存在一些未捕捉到的可预测信息. 除上述 4 个精度评价指标外, 本研究还通过对比土壤 pH 值建模残差的空间自相关性的强弱, 来比较模型的优劣.

1.4 数据处理与分析

① 首先根据土壤 pH 值进行随机抽样, 将 599 个样点按照 4:1 比例分为建模集 (479 个) 和验证集 (120 个); ② 对所选的环境因子进行了容差和方差膨胀因子检验, 剔除出环境因子间的多重共线性, 在 IBM SPSS Statistics 26 软件中完成; ③ 分析不同空间距离上土壤 pH 全局和局部空间自相关性, 在 ArcGIS 10.7 软件中完成; ④ 利用筛选出的环境因子进行 MGWR、Mixed GWR、GWR 与 MLR 建模, 在 MGWR 2.2 和 GWR 4.0 软件中完成, 比较建模精度; ⑤ 结合分位数回归和 MGWR 回归系数分析环境因子对土壤 pH 影响的空间异质性, 分位数回归在 IBM SPSS Statistics 26 软件中完成.

2 结果与讨论

2.1 土壤 pH 值描述统计特征

研究区土壤 pH 的平均值为 7.10, 变化范围在 4.20 ~ 9.18, 变异系数为 15.35%, 属于中等变异 (表 2). 训练集和验证集的平均值、中位数、标准差和变异系数都非常接近. 研究区碱性土壤样本 ($pH > 7.5$) 占 42.57%, 主要分布在北部; 中性样点 ($6.5 \leq pH \leq 7.5$) 占 28.55%; 酸性土壤样点 ($pH < 6.5$) 占 28.88%, 主要分布在安徽和江苏南部 (图 2). 从各省土壤 pH 均值来看, 大小排序为: 河南 > 山东 > 江苏 > 安徽, 变异系数大小排序为: 安徽 > 江苏 > 河南 > 山东, 表明安徽的土壤 pH 值变异程度最大, 山东的土壤 pH 值变异程度最小.

2.2 土壤 pH 值空间自相关分析

对总样本的土壤 pH 进行全局空间自相关检验, 在默认空间距离阈值为 56.4 km 下存在显著的全局自相关性, 全局 Moran's I 为 0.70 ($P < 0.01$),

表 2 土壤 pH 值统计特征

Table 2 Statistical characteristics of soil pH value									
样本	点数	最大值	中位数	最小值	平均值	标准差	变异系数/%	偏度	峰度
总样本	599	9.18	7.27	4.20	7.10	1.09	15.35	0.39	2.29
训练集	479	9.18	7.30	4.20	7.10	1.10	15.49	0.40	2.29
验证集	120	9.07	7.22	4.65	7.09	1.05	14.81	0.37	2.26
安徽	140	8.67	6.03	4.60	6.37	1.09	17.11	0.48	2.07
河南	178	9.18	8.07	5.00	7.89	0.81	10.27	-0.99	3.70
江苏	159	8.68	6.90	4.20	6.90	1.04	15.07	-0.45	2.29
山东	122	8.21	7.20	5.17	7.06	0.62	8.78	-0.68	3.15

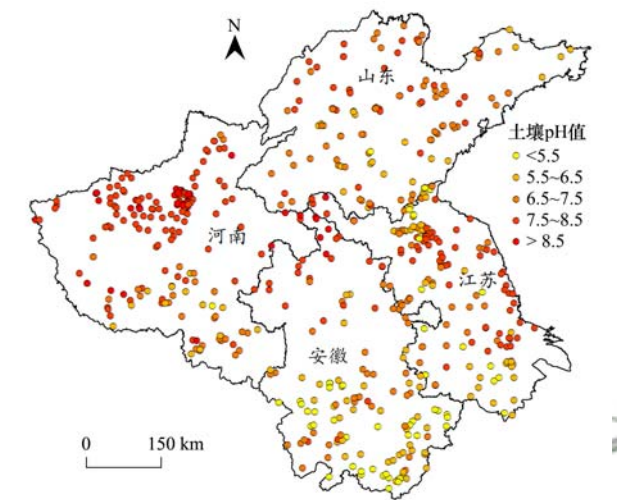


图 2 研究区样点分布

Fig. 2 Distribution of soil samples in the study area

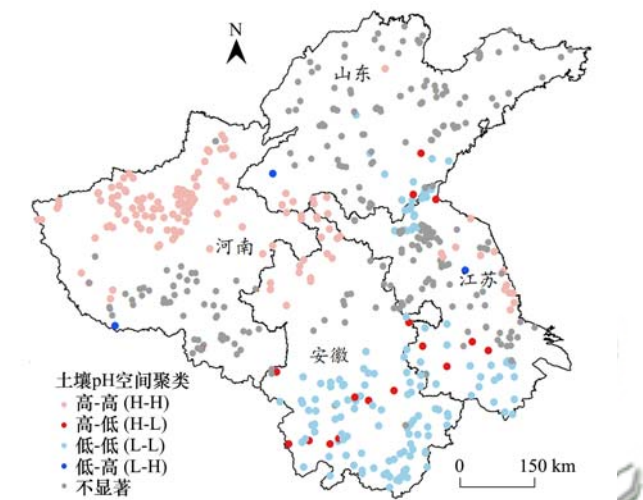


图 3 土壤 pH 局部聚类

Fig. 3 Local spatial cluster of soil pH

总体上土壤 pH 以聚集分布为主. 在 100、200、300、400、500 和 600 km 的空间距离阈值下, 全局 Moran's I 值分别为 0.65 ($P < 0.01$)、0.58 ($P < 0.01$)、0.52 ($P < 0.01$)、0.47 ($P < 0.01$)、0.43 ($P < 0.01$) 和 0.39 ($P < 0.01$). 整体上在不同空间距离阈值上, 土壤 pH 均呈现显著的空间自相关性, 且随着空间距离阈值的增大, 全局 Moran's I 值逐渐下降, 即全局空间自相关性逐渐减弱.

在不同空间距离阈值上, 研究区土壤 pH 也呈现出相似的局部空间聚类特征. 本文仅展示默认空间距离阈值下的局部空间自相关聚类图 (图 3). 研究区中有 298 个样点存在显著局部空间聚类, 其中“高-高”聚类点共 156 个 (土壤 pH 值较高且空间差异较小的样点聚集分布) 主要分布于河南北部、安徽北部; “低-低”聚类点共 142 个 (土壤 pH 值较低且空间差异较小的样点聚集分布) 主要分布在江苏和安徽南部.

2.3 基于多种 GWR 的土壤 pH 空间建模

综合多种精度指标比较, 建模精度由高到低依次为: MGWR > Mixed GWR > GWR > MLR (表 3). 3 种 GWR 模型的精度高于 MLR 模型, GWR 区分了不同空间位置上环境因子对土壤 pH 的作用程度, 模

型解释能力得到很大的改善, 这与大量的研究结果一致^[15~17,39]. GWR 模型较 MLR 模型, 其 AICc 值降低了 74.31, 一般认为 AICc 值减小 2 以上时, 认为改进后模型明显更优^[19]; 残差平方和 (residual sum of squares, RSS) 降低了 88.42, R^2_{adj} 增加了 0.11, 说明 GWR 模型对预测变量进行局部回归的方式有效改进了 MLR 全局回归模型, 有效呈现了在不同空间位置上环境因子对土壤 pH 作用程度的差异性, 较大地提升了模型的预测精度.

表 3 各模型的建模结果

Table 3 Modeling results of each model				
建模精度指标	模型			
	MGWR	Mixed GWR	GWR	MLR
AICc	924.49	1 040.65	1 078.84	1 153.15
RSS	153.41	195.96	208.70	297.12
R^2_{adj}	0.64	0.62	0.59	0.48

图 4 为验证结果, 综合所有指标来看验证精度由高到低依次为: MGWR > Mixed GWR > GWR > MLR. MGWR 在验证集的 R^2_{adj} 为 0.57, 对 pH 变异的解释能力达到了 57%, MAE 和 RMSE 分别为 0.53 和 0.66, LCCC 值为 0.76, 与 Mixed GWR 和普通 GWR 的精度较接近. 从散点图的分布来看 MGWR 的验证结果在 1:1 线附近分布得更均匀集中. 因此,

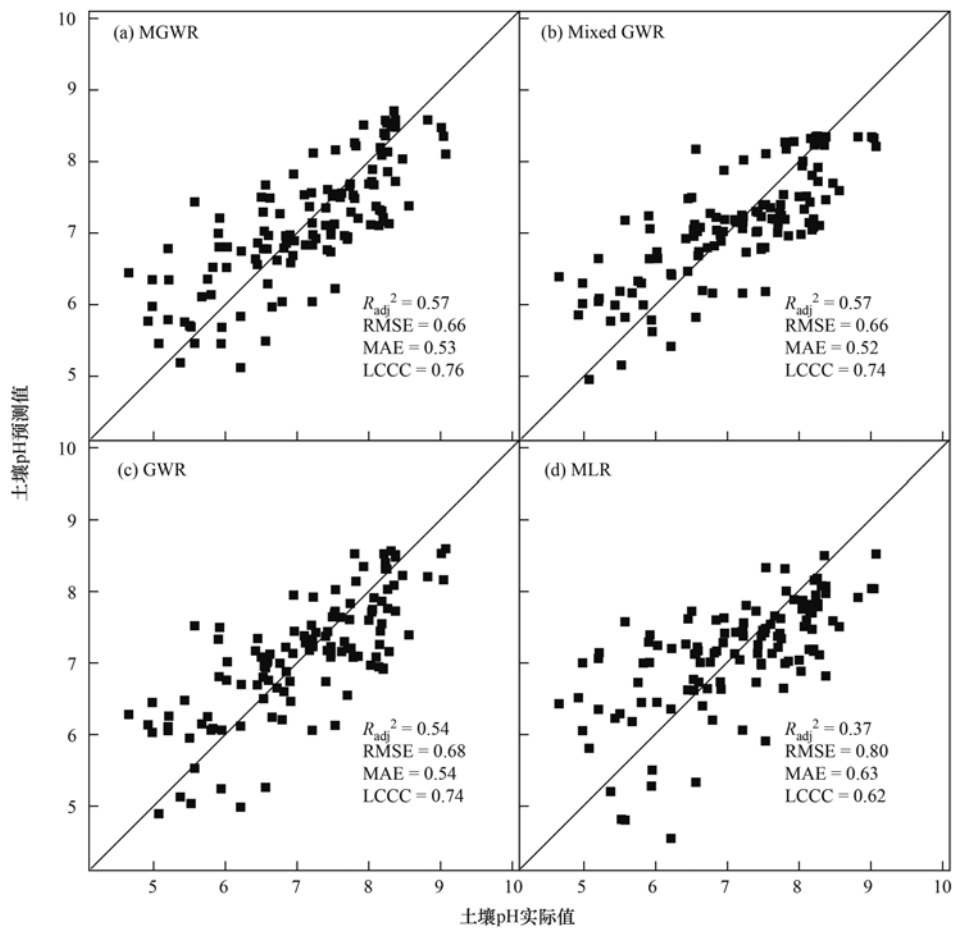


图 4 各模型验证结果散点图
Fig. 4 Scatter plots of validation of each model

总体上 MGWR 模型的精度最优,这与多数研究结果一致^[27,28]. 3 种 GWR 模型训练集和验证集的 R_{adj}^2 变化在 0.05 ~ 0.07 以内,表明 GWR 及其改进模型均有较高的稳定性.

对建模集的土壤 pH 残差进行全局和局部空间自相关检验,结果表明所有模型的残差都存在一定的空间自相关性(图 5),其空间自相关性由强到弱依次为: MLR > GWR > Mixed GWR > MGWR. MGWR 的残差空间自相关性最弱,残差独立分布性最强,全局 Moran's I 仅为 0.07 ($P < 0.05$),在空间上存在高-高聚类点 19 个,低-低聚类点 4 个. 其次是 Mixed GWR 模型,其全局 Moran's I 为 0.10 ($P < 0.01$),在空间上存在高-高聚类点 20 个,低-低聚类点 22 个. GWR 模型的全局 Moran's I 为 0.17 ($P < 0.01$),在空间上存在高-高聚类点 40 个,低-低聚类点 30 个. MLR 模型的全局 Moran's I 为 0.33 ($P < 0.01$),在空间上存在高-高聚类点 85 个,低-低聚类点 54 个. MGWR 不仅能反映空间对象局部效应,还考虑了不同影响因子的差异化作用尺度,有效降低了模型的残差自相关性,模型更优.

2.4 基于 MGWR 的土壤 pH 预测制图

基于 4 种模型和环境因子栅格图预测了研究区土壤 pH 空间分布(图 6). 研究区土壤总体呈南酸北碱的格局,安徽南部地区土壤 pH 最低,河南地区最高. MGWR 和 Mixed GWR 模型的预测制图结果的空间格局相似,结果较为平滑. 普通 GWR 和 MLR 预测结果呈碎斑化,即出现了较多低值被高值包围和高值被低值包围的斑块区域. 土壤 pH 的空间分布图汇总统计结果显示(表 4),4 种模型预测制图的 pH 均值介于 7.13 ~ 7.20,均略高于采样点土壤 pH 均值 7.10,表明预测制图结果均存在不同程度的高估现象. 土壤样点 pH 实际值的标准差为 1.09,预测制图结果的标准差介于 0.67 ~ 0.77,表明制图结果存在一定程度的平滑效应. MGWR 预测制图结果的均值、标准差以及各 pH 值分级比例与土壤 pH 实际值最接近,制图结果最优.

2.5 环境因子对土壤 pH 影响的空间异质性

2.5.1 多尺度地理加权回归系数分析

MGWR 的标准化回归系数统计结果见表 5. 全局带宽为样本数 479,MRRTF、坡度、EVI 和 MAT 接近全局尺度,其回归系数值变化也较小,表明这些

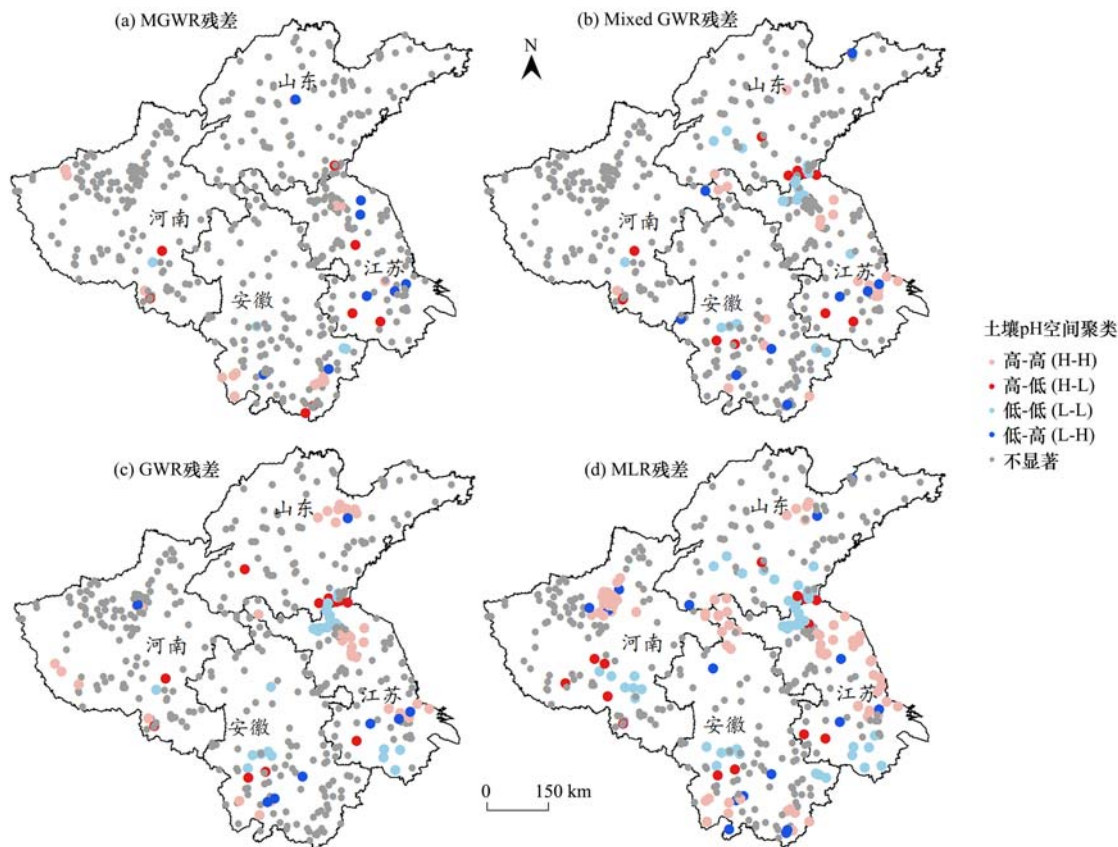


图5 各模型残差局部聚类
Fig. 5 Local clustering maps of residual of each model

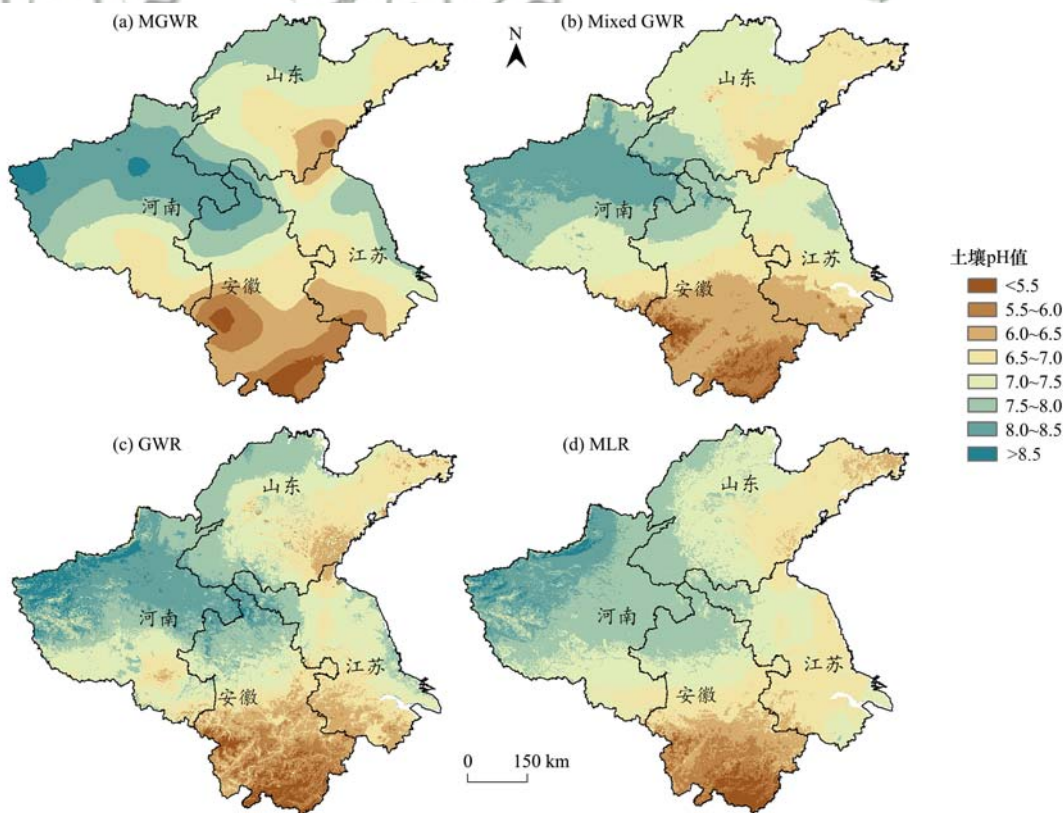


图6 土壤 pH 制图结果
Fig. 6 Results of soil pH mapping

表 4 各模型制图结果 pH 统计特征

Table 4 Statistical characteristics of mapping results of each model

项目	pH 值域分布比例/%					pH 平均值	pH 标准差
	<5.5	5.5~6.5	6.5~7.5	7.5~8.5	>8.5		
实际值	9.52	20.03	27.88	34.89	7.68	7.10	1.09
MGWR	1.66	17.66	44.26	34.97	1.45	7.17	0.76
Mixed GWR	1.66	18.21	50.27	29.80	0.06	7.13	0.72
GWR	2.29	15.22	44.94	34.97	2.58	7.20	0.77
MLR	2.03	10.70	51.60	34.72	0.95	7.18	0.67

环境因子趋向于在全局范围上影响土壤 pH 值. TWI、MRVBF、海拔和 MAP 的带宽较小,表明其对土壤 pH 的影响存在较强的空间异质性,回归系数在研究区上变化差异也较大. 从影响因子的标准化回归系数的平均值和中值的绝对值来看,MAP、海拔、MRVBF 和 MRRTF 对研究区土壤 pH 空间分布的影响程度较高. 下文以 MAP、海拔、MRVBF 和 MRRTF 的标准化回归系数分布(图 7),阐述环境因子对土壤 pH 影响的空间差异性.

MAP 的回归系数值介于 $-0.679 \sim -0.175$ 之间[图 7(a)],均值和中值为 -0.435 和 -0.494 (表 5),说明 MAP 对土壤 pH 呈负向作用,其它环境因子不变的情况下,随着 MAP 的增大,土壤 pH 逐渐

下降.我国主要农田酸化的原因是氮沉降和盐基离子淋失^[40],而这两者都与降雨密切相关,当降雨量远大于蒸发量时,淋溶作用的发生让土壤酸化.在江苏北部和山东大部分地区,MAP 的回归系数绝对值较高,表明这些区域的 MAP 对土壤 pH 的负向作用较强;低值集中在安徽南部和江苏南部地区,在这些区域 MAP 对土壤 pH 的影响较弱.

海拔对土壤 pH 的影响强度存在强烈的地区差异,回归系数介于 $-1.233 \sim 0.068$ 之间,回归系数均值和中值为 -0.362 和 -0.174 (表 5),以负向作用为主[图 7(b)],即其它环境因子不变的情况下,随海拔增加土壤 pH 呈降低趋势.这与陈清霞等^[12]和吴正祥等^[14]研究的结果相似.研究区中的安徽南

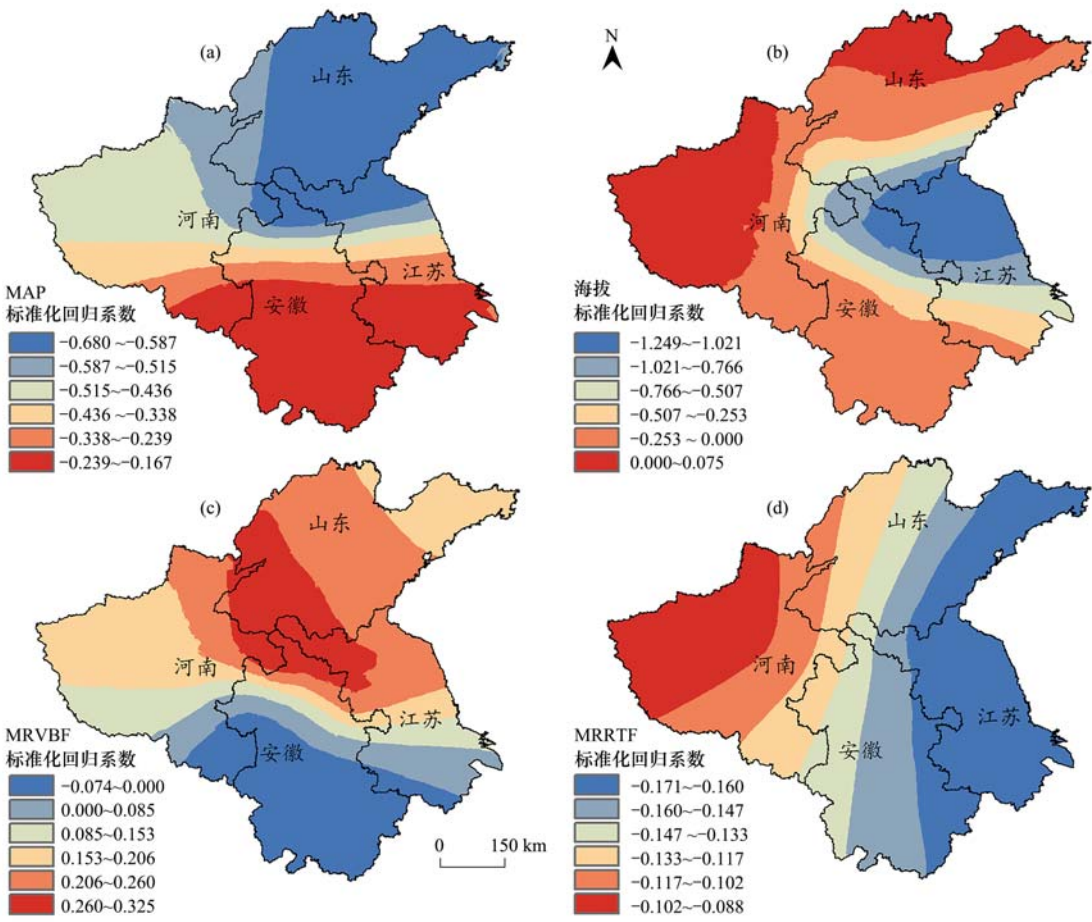


图 7 MGWR 的标准化回归系数分布

Fig. 7 Standardized regression coefficient distribution in MGWR model

表 5 MGWR 标准化回归系数¹⁾
Table 5 Standardized regression coefficients of MGWR

变量	带宽	平均值	标准差	最小值	中值	最大值	MLR 系数
常数项	43	-0.339	0.726	-1.774	-0.474	0.965	7.108 **
TWI	216	-0.003	0.051	-0.084	-0.010	0.112	0.074
MRVBF	229	0.143	0.119	-0.073	0.186	0.325	-0.193 *
MRRTF	470	-0.140	0.028	-0.171	-0.151	-0.089	-0.079
坡度	478	-0.079	0.016	-0.108	-0.076	-0.057	-0.215 **
海拔	138	-0.362	0.449	-1.233	-0.174	0.068	0.244 **
EVI	478	-0.055	0.006	-0.067	-0.054	-0.047	0.090
NDVI	385	0.084	0.042	0.028	0.070	0.154	-0.126
MAT	467	0.088	0.016	0.059	0.092	0.118	0.331 **
MAP	278	-0.435	0.178	-0.679	-0.494	-0.175	-0.853 **

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

部和皖西地区属山地丘陵区,海拔较高 300 ~ 1 700 m. 随着海拔的升高,降雨量不断增大,雨水冲刷和淋失作用不断增强,土壤盐基不饱和度变大,致使土壤不断向酸性方向发展^[14],该地区土壤 pH 预测值低于 6.5,主要呈弱酸性和强酸性(图 6),这体现了 MAP 和海拔对土壤 pH 的负向作用. 回归系数正值集中在河南西部和山东北部,其余地区海拔对土壤 pH 呈负作用,其中在江苏北部海拔对土壤 pH 的负向作用较强.

MRVBF 的回归系数值介于 -0.073 ~ 0.325 之间[图 7(c)],均值和中值为 0.143 和 0.186(表 5),表明了 MRVBF 对土壤 pH 的正向作用. MRVBF 越小表示该位置越接近山谷地貌,山谷地区蓄水能力较强,淋溶作用更加剧烈,土壤 pH 相对较小. 回归系数正值的高值集中在山东西部和江苏北部,在这些区域 MRVBF 对土壤 pH 的正向作用较强,低值集中在山东东部、江苏中部和河南东北部地区,这些区域 MRVBF 对土壤 pH 的正向作用较弱.

MRRTF 的回归系数值介于 -0.171 ~ -0.089 [图 7(d)],均值和中值为 -0.140 和 -0.151(表 5),为负向作用. MRRTF 越小即该位置越接近山脊地貌,山脊地区相对于平坦区域和山谷地区的蓄水能力更差,淋溶作用相对更弱,所以土壤 pH 值相对较大. 回归系数绝对值呈自西向东逐渐增大的趋势,绝对值高值集中在山东半岛、安徽东部和江苏,这些区域 MRRTF 对土壤 pH 的影响较强;低值集中在河南西北部地区,表明在这些区域 MRRTF 对土壤 pH 的影响较弱.

2.5.2 分位数回归结果

以土壤 pH 值的 0.1 ~ 0.9 共 9 个分位点为例,分析不同 pH 水平下,环境因子对其作用的差异,建模结果及参数检验结果见表 6 和图 8. 当土壤 pH 值处于不同水平上时,各因素对其影响有较大差异. TWI、坡度、海拔和 MAT 的两种回归系数的置信区间重合较多,分位数回归结果与 MLR 结果没有显著差异.

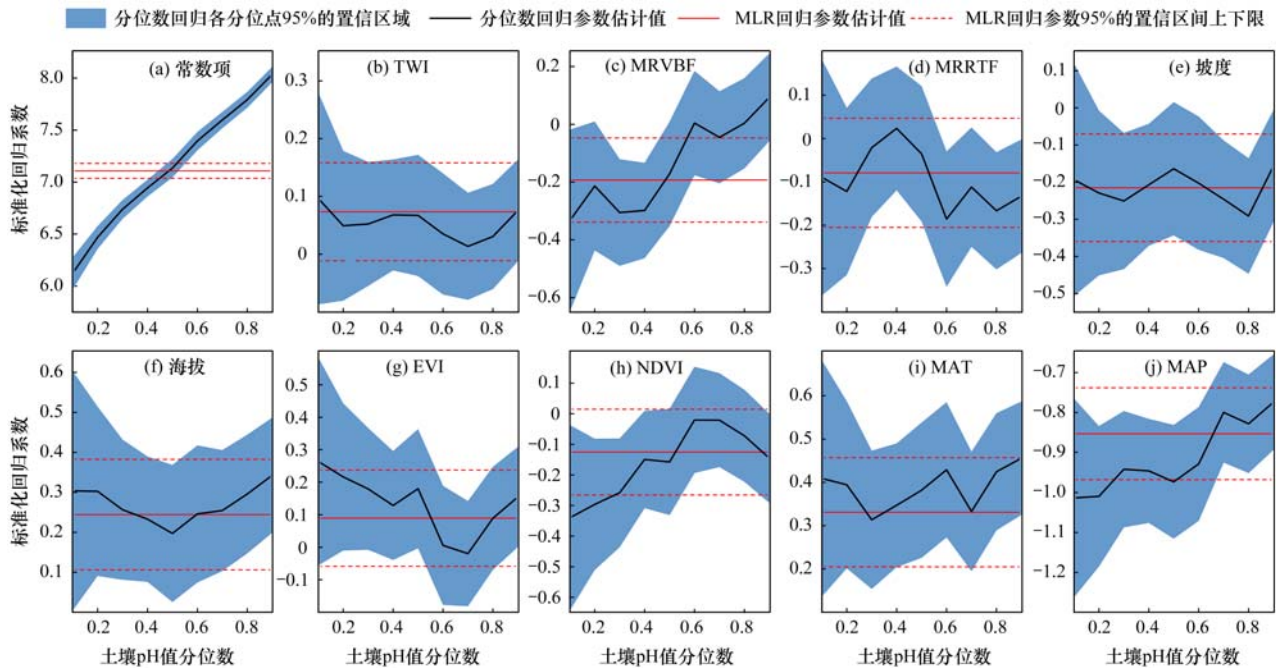
表 6 土壤 pH 分位数回归系数¹⁾
Table 6 Soil pH quantile regression coefficient

项目	常数项	TWI	MRVBF	MRRTF	坡度	海拔	EVI	NDVI	MAT	MAP
MLR 系数	7.108 **	0.074	-0.193 *	-0.079	-0.215 **	0.244 **	0.090	-0.126	0.331 **	-0.853 **
$\theta = 0.1$	6.122 **	0.097	-0.334 *	-0.089	-0.193	0.304 *	0.265	-0.341 *	0.409 **	-1.014 **
$\theta = 0.2$	6.468 **	0.049	-0.213	-0.122	-0.229 *	0.303 **	0.217	-0.297 **	0.394 **	-1.010 **
$\theta = 0.3$	6.738 **	0.053	-0.305 **	-0.021	-0.251 **	0.257 **	0.180	-0.259 **	0.314 **	-0.942 **
$\theta = 0.4$	6.943 **	0.068	-0.298 **	0.024	-0.207 *	0.233 **	0.129	-0.150	0.347 **	-0.946 **
$\theta = 0.5$	7.135 **	0.067	-0.172	-0.035	-0.164	0.197 *	0.181	-0.158	0.382 **	-0.974 **
$\theta = 0.6$	7.395 **	0.035	0.004	-0.185 *	-0.203 *	0.246 **	0.006	-0.021	0.429 **	-0.929 **
$\theta = 0.7$	7.597 **	0.014	-0.045	-0.112	-0.246 **	0.254 **	-0.019	-0.021	0.333 **	-0.800 **
$\theta = 0.8$	7.793 **	0.031	0.004	-0.166 *	-0.291 **	0.296 **	0.089	-0.073	0.424 **	-0.829 **
$\theta = 0.9$	8.036 **	0.076	0.094	-0.133 *	-0.157 *	0.343 **	0.155 *	-0.146 *	0.456 **	-0.774 **

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$; θ 为分位数点,参数含义见公式(4)

在 MLR 模型中,MRVBF 对土壤 pH 呈显著负作用. 在分位数回归中,MRVBF 对低分位数(θ 为 0.1 ~ 0.4)水平上的土壤 pH 呈显著负作用,且回归系数的绝对值大于 MLR 回归中的系数绝对值,表明

MRVBF 作用强度大于 MLR 模型;在土壤 pH 的高分位数水平时(θ 为 0.5 ~ 0.9),MRVBF 的回归系数不显著,且其对土壤 pH 作用强度小于 MLR 模型中的作用强度(表 6). 在 MLR 中坡度对土壤 pH 呈



水平红色实直线表示 MLR 回归参数估计值,虚线为 MLR 回归参数 95% 的置信区间上下限;黑色实折线表示分位数回归参数估计值,蓝色区域表示分位数回归各分位点 95% 的置信区域;当两个模型置信区间重叠时,可以认为两个结果差异没有统计学意义

图 8 土壤 pH 分位数回归系数变化

Fig. 8 Variation in regression coefficient of soil pH quantile

显著负作用,在分位数回归中坡度整体上对土壤 pH 作用显著,其中当土壤 pH 处在 0.8 分位数水平时其作用强度最高,在其它分位数水平下坡度对土壤 pH 作用强度保持稳定。

在 MLR 模型和分位数回归模型中,EVI 和 NDVI 对土壤 pH 的作用均不显著。分位数回归结果可以看出 NDVI 在 0.1 ~ 0.3 和 0.9 的分位数水平上对土壤 pH 呈显著负作用,其它分位数水平上 NDVI 对土壤 pH 呈负作用,但不显著。

在 MLR 模型中,MAP 对土壤 pH 呈显著负作用;分位数回归结果中,MAP 对土壤 pH 的作用强度随着 pH 分位数水平的增加呈现逐渐减弱的趋势。在 0.1 ~ 0.7 分位数水平上,MAP 的回归系数绝对值较大,表明其对土壤 pH 的作用强度大于 MLR 模型; $\theta > 0.7$ 分位数水平时 MAP 的分位数回归系数略小于 MLR 中的回归系数,表明其对 pH 作用强度小于 MLR 模型中的作用强度。

上述结果分析表明,环境因子对不同的土壤 pH 等级的影响强度及作用关系(正向或负向作用)存在不同程度的异质性。研究区土壤 pH 空间分布规律明显(图 6),由北向南土壤 pH 值降低。不同土壤 pH 等级分布在不同的地理区域,因此不同分位数上的回归结果,可以视为具有一定空间作用尺度的局部模型。与 MGWR 模型的作用类似,本研究中分位数回归可以评价环境因子对 pH 作用的空间异质性。

3 结论

(1) 研究区土壤 pH 均值为 7.10,变化范围在 4.20 ~ 9.18。在不同空间尺度上,土壤 pH 存在不同程度的全局和局部空间自相关性,以空间聚集特征为主。

(2) 3 种 GWR 模型可以有效地预测土壤 pH。MGWR 优于其它模型,可以解释建模集土壤 pH 的 64% 的变异,验证集 57% 的变异,其残差分布独立性相较其他模型更强。MGWR 的土壤 pH 预测制图结果表明,研究区土壤 pH 值空间分布呈由北至南逐渐降低的趋势。

(3) MGWR 结果表明,MAP、MRVBF、海拔和 MRRTF 对研究区土壤 pH 影响较强,且存在较强的空间差异性。在江苏北部和山东大部分地区 MAP 和 MRVBF 对土壤 pH 的作用较强,江苏北部海拔对土壤 pH 的负向作用强。

(4) MAP 和 MRVBF 等对不同分位数上的土壤 pH 的作用强度不同。MAP 对土壤 pH 呈显著负作用,其作用强度随着 pH 分位数的增加逐渐减弱;MRVBF 对低分位数上的土壤 pH 呈显著负作用。

参考文献:

- [1] Chen S C, Liang Z Z, Webster R, *et al.* A high-resolution map of soil pH in China made by hybrid modelling of sparse soil data and environmental covariates and its implications for pollution [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **655**: 273-283.
- [2] Li Q Q, Li S, Xiao Y, *et al.* Soil acidification and its

- influencing factors in the purple hilly area of southwest China from 1981 to 2012[J]. CATENA, 2019, **175**: 278-285.
- [3] Zeng F R, Ali S, Zhang H T, *et al.* The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants[J]. Environmental Pollution, 2011, **159**(1): 84-91.
- [4] 陈怀满. 土壤中化学物质的行为与环境质量[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [5] 杨忠平, 卢文喜, 辛欣, 等. 长春市城区土壤中 Pb、Cu、Zn、Cd 及 Cr 化学形态特征[J]. 土壤通报, 2011, **42**(5): 1247-1255.
- Yang Z P, Lu W X, Xin X, *et al.* Chemical morphological features of Pb, Cu, Zn, Cd and Cr in urban soil of Changchun City, China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, **42**(5): 1247-1255.
- [6] 杨忠芳, 陈岳龙, 钱鑫, 等. 土壤 pH 对镉存在形态影响的模拟实验研究[J]. 地学前缘, 2005, **12**(1): 252-260.
- Yang Z F, Chen Y L, Qian X, *et al.* A study of the effect of soil pH on chemical species of cadmium by simulated experiments[J]. Earth Science Frontiers, 2005, **12**(1): 252-260.
- [7] 赵明松, 张甘霖, 李德成, 等. 江苏省土壤有机质变异及其主要影响因素[J]. 生态学报, 2013, **33**(16): 5058-5066.
- Zhao M S, Zhang G L, Li D C, *et al.* Variability of soil organic matter and its main factors in Jiangsu province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, **33**(16): 5058-5066.
- [8] 韩天富, 柳开楼, 黄晶, 等. 近 30 年中国主要农田土壤 pH 时空演变及其驱动因素[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, **26**(12): 2137-2149.
- Han T F, Liu K L, Huang J, *et al.* Spatio-temporal evolution of soil pH and its driving factors in the main Chinese farmland during past 30 years[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, **26**(12): 2137-2149.
- [9] 徐慧秋, 黄银华, 吴志峰, 等. 广州市农业土壤 As 和 Cd 污染及其对景观异质性的多尺度响应[J]. 应用生态学报, 2016, **27**(10): 3283-3289.
- Xu H Q, Huang Y H, Wu Z F, *et al.* Agricultural soil contamination from As and Cd and its responses to landscape heterogeneity at multiple scales in Guangzhou, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, **27**(10): 3283-3289.
- [10] Liu Y, Lv J S, Zhang B, *et al.* Spatial multi-scale variability of soil nutrients in relation to environmental factors in a typical agricultural region, eastern China[J]. Science of the Total Environment, 2013, **450-451**: 108-119.
- [11] 刘伟, 郜允兵, 周艳兵, 等. 农田土壤重金属空间变异多尺度分析——以北京顺义土壤 Cd 为例[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(1): 87-94.
- Liu W, Gao Y B, Zhou Y B, *et al.* Multi scale analysis of spatial variability of heavy metals in farmland soils: case study of soil Cd in Shunyi District of Beijing, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, **38**(1): 87-94.
- [12] 陈清霞, 陆晓辉, 涂成龙. 安顺市土壤 pH 空间变异及影响因素分析[J]. 环境科学, 2022, **43**(4): 2124-2132.
- Chen Q X, Lu X H, Tu C L. Spatial variation and influencing factors of soil pH in Anshun city[J]. Environmental Science, 2022, **43**(4): 2124-2132.
- [13] 李伟峰, 叶英聪, 朱安繁, 等. 近 30 a 江西省农田土壤 pH 时空变化及其与酸雨和施肥量间关系[J]. 自然资源学报, 2017, **32**(11): 1942-1953.
- Li W F, Ye Y C, Zhu A F, *et al.* Spatio-temporal variation of pH in cropland of Jiangxi province in the past 30 years and its relationship with acid rain and fertilizer application[J]. Journal of Natural Resources, 2017, **32**(11): 1942-1953.
- [14] 吴正祥, 周勇, 木合塔尔·艾买提, 等. 鄂西北山区耕层土壤 pH 值空间变异特征及其影响因素研究[J]. 长江流域资源与环境, 2020, **29**(2): 488-498.
- Wu Z X, Zhou Y, Muhtar · Amat, *et al.* Spatial variability of soil pH value and its influencing factors in the soil layer of northwestern Hubei Province[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, **29**(2): 488-498.
- [15] 赵明松, 刘斌寅, 卢宏亮, 等. 基于地理加权回归的地形平缓区土壤有机质空间建模[J]. 农业工程学报, 2019, **35**(20): 102-110.
- Zhao M S, Liu B Y, Lu H L, *et al.* Spatial modeling of soil organic matter over low relief areas based on geographically weighted regression[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, **35**(20): 102-110.
- [16] Zhang C S, Tang Y, Xu X L, *et al.* Towards spatial geochemical modelling: use of geographically weighted regression for mapping soil organic carbon contents in Ireland[J]. Applied Geochemistry, 2011, **26**(7): 1239-1248.
- [17] Wang D, Li X X, Zou D F, *et al.* Modeling soil organic carbon spatial distribution for a complex terrain based on geographically weighted regression in the eastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. CATENA, 2020, **187**, doi: 10.1016/j.catena.2019.104399.
- [18] Song X D, Brus D J, Liu F, *et al.* Mapping soil organic carbon content by geographically weighted regression: a case study in the Heihe River Basin, China[J]. Geoderma, 2016, **261**: 11-22.
- [19] Fotheringham A S, Brunson C, Charlton M. Geographically weighted regression — the analysis of spatially varying relationships[M]. Chichester: John Wiley & Sons Inc, 2002.
- [20] Brunson C, Fotheringham A S, Charlton M. Some notes on parametric significance tests for geographically weighted regression[J]. Journal of Regional Science, 1999, **39**(3): 497-524.
- [21] Fotheringham A S, Yang W B, Kang W. Multiscale geographically weighted regression (MGWR)[J]. Annals of the American Association of Geographers, 2017, **107**(6): 1247-1265.
- [22] Yang S H, Liu F, Song X D, *et al.* Mapping topsoil electrical conductivity by a mixed geographically weighted regression kriging: a case study in the Heihe River Basin, Northwest China[J]. Ecological Indicators, 2019, **102**: 252-264.
- [23] 卢宾宾, 葛咏, 秦昆, 等. 地理加权回归分析技术综述[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, **45**(9): 1356-1366.
- Lu B B, Ge Y, Qin K, *et al.* A review on geographically weighted regression[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, **45**(9): 1356-1366.
- [24] 南富森, 李宗省, 张小平, 等. 基于 MGWR 的黄河流域土壤有机碳密度和影响因素分析[J]. 环境科学, 2023, **44**(2): 912-923.
- Nan F S, Li Z S, Zhang X P, *et al.* Spatial distribution characteristics and influencing factors of soil organic carbon density in Yellow River Basin based on MGWR model[J]. Environmental Science, 2023, **44**(2): 912-923.
- [25] 周梦鸽, 杨依, 孙媛, 等. 2016~2020 年山东省空气质量时空分布特征及影响因素分析[J]. 环境科学, 2022, **43**(6): 2937-2946.
- Zhou M G, Yang Y, Sun Y, *et al.* Spatio-temporal characteristics of air quality and influencing factors in Shandong province from 2016 to 2020[J]. Environmental Science, 2022, **43**(6): 2937-2946.
- [26] 周志凌, 程先富. 基于 MGWR 模型的中国城市 PM_{2.5} 影响因

- 素空间异质性[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(6): 2552-2561.
- Zhou Z L, Cheng X F. Spatial heterogeneity of influencing factors of PM_{2.5} in Chinese cities based on MGWR model[J]. China Environmental Science, 2021, **41**(6): 2552-2561.
- [27] 沈体雁, 于瀚辰, 周麟, 等. 北京市二手住宅价格影响机制——基于多尺度地理加权回归模型(MGWR)的研究[J]. 经济地理, 2020, **40**(3): 75-83.
- Shen T Y, Yu H C, Zhou L, *et al.* On hedonic price of second-hand houses in Beijing based on multi-scale geographically weighted regression: Scale law of spatial heterogeneity [J]. Economic Geography, 20, **40**(3): 75-83.
- [28] Liu K, Qiao Y R, Zhou Q. Analysis of China's industrial green development efficiency and driving factors: research based on MGWR[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, **18**(8), doi: 10.3390/ijerph18083960.
- [29] 李德成, 张甘霖, 王华. 中国土系志·安徽卷[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- Li D C, Zhang G L, Wang H. Soil series of China, Anhui[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [30] 吴克宁, 李玲, 鞠兵, 等. 中国土系志·河南卷[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- Wu K N, Li L, Ju B, *et al.* Soil series of China, Henan[M]. Beijing: Science Press, 2019.
- [31] 黄标, 潘剑君. 中国土系志·江苏卷[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- Huang B, Pan J J. Soil series of China, Jiangsu[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [32] 赵玉国, 宋付朋. 中国土系志·山东卷[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- Zhao Y G, Song F P. Soil series of China, Shandong[M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [33] Conrad O, Bechtel B, Bock M, *et al.* System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2. 1. 4 [J]. Geoscientific Model Development, 2015, **8**(7): 1991-2007.
- [34] Gallant J C, Dowling T I. A multiresolution index of valley bottom flatness for mapping depositional areas [J]. Water Resources Research, 2003, **39**(12), doi: 10.1029/2002WR001426.
- [35] 刘琼峰, 李明德, 段建南, 等. 农田土壤铅、镉含量影响因素地理加权回归模型分析[J]. 农业工程学报, 2013, **29**(3): 225-234.
- Liu Q F, Li M D, Duan J N, *et al.* Analysis on influence factors of soil Pb and Cd in agricultural soil of Changsha suburb based on geographically weighted regression model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, **29**(3): 225-234.
- [36] 陈彦光. 基于Moran统计量的空间自相关理论发展和方法改进[J]. 地理研究, 2009, **28**(6): 1459-1463.
- Chen Y G. Reconstructing the mathematical process of spatial autocorrelation based on Moran's statistics [J]. Geographical Research, 2009, **28**(6): 1459-1463.
- [37] 陈建宝, 丁军军. 分位数回归技术综述[J]. 统计与信息论坛, 2008, **23**(3): 89-96.
- Chen J B, Ding J J. A review of Technologies on quantile regression[J]. Statistics & Information Forum, 2008, **23**(3): 89-96.
- [38] 张连发. 基于流数据的地理加权回归建模方法的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2019.
- Zhang L F. Research on Geographically weighted regression modeling approach based on flow data [D]. Wuhan: Wuhan University, 2019.
- [39] 郭龙, 张海涛, 陈家赢, 等. 基于协同克里格插值和地理加权回归模型的土壤属性空间预测比较[J]. 土壤学报, 2012, **49**(5): 1037-1042.
- Guo L, Zhang H T, Chen J Y, *et al.* Comparison between Co-Kriging model and geographically weighted regression model in spatial prediction of soil attributes[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, **49**(5): 1037-1042.
- [40] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, *et al.* Significant acidification in Major Chinese croplands [J]. Science, 2010, **327**(5968): 1008-1010.

CONTENTS

Meteorological Impact Assessment of PM _{2.5} and O ₃ Complex Pollution in Key Regions of China Based on Meteorological Conditions Index	YANG Xin, YANG Yuan-qin, LI Hong, <i>et al.</i>	(6433)
Scale Dependence Between PM _{2.5} and Meteorological Factors and Its Influencing Factors in “2+26” Cities	WU Shu-qi, JIN Jian-nan, ZHENG Dong-yang, <i>et al.</i>	(6441)
Chemical Constituents and Sources of PM _{2.5} Around the Wuhan Military Games Period	LIU Shi-hao, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i>	(6452)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} Pollution During Winter in Handan City from 2016 to 2020	NIU Hong-ya, GAO Na-na, BAO Xiao-lei, <i>et al.</i>	(6463)
Chemical Compositions and Sources of PM _{2.5} in Weinan City	GUO Jing-ning, LI Xiao-fei, YU Feng, <i>et al.</i>	(6474)
Analysis of Formation Processes and Sources of PM _{2.5} Ammonium During Winter and Summer in Suburban Area of the Yangtze River Delta	XIANG Yan-kun, CAO Fang, ZHANG Wen-qi, <i>et al.</i>	(6486)
Chemical Composition and Characterization of Nitroaromatic Compounds in Urban Areas of Shanghai	YANG Lu, MA Ying-ge, YU Jian-zhen, <i>et al.</i>	(6495)
Source Analysis and Health Risk Assessment of PAHs in PM _{2.5} , Liliang City	MU Ling, LIU Zi-ye, LI Yang-yong, <i>et al.</i>	(6508)
Effect of Biomass Burning on Carbonaceous Aerosol Composition and Light Absorption in Guangxi Regional Background Site	WU Xing-qi, CAO Fang, HONG Yi-hang, <i>et al.</i>	(6518)
Characteristics of Light Absorption, Sources, and Seasonal Variation of Atmospheric Brown Carbon in Northern Nanjing	CHEN Xing-zhou, CUI Shi-jie, ZHANG Yun-jiang, <i>et al.</i>	(6529)
Health Benefit Assessment of Coal-to-electricity Policy on PM _{2.5} Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHANG Ru-ting, CHEN Chuan-min, LIU Song-tao, <i>et al.</i>	(6541)
Source Apportionment of Ambient VOCs in Qingdao Based on Photochemical Loss Correction	KONG Cui-li, WU Yu-tong, GU Yao, <i>et al.</i>	(6551)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of VOCs in Urban Areas of Liaocheng in Summer	LI Wan-yong, HUANG Hao-yu, WANG Yan-zhen, <i>et al.</i>	(6564)
Source Analysis of Ozone and Its Precursors in Zibo Based on 3-D Air Quality Model	ZHANG Xin-xin, ZHAO Xiu-ying, HUANG Ling, <i>et al.</i>	(6576)
Spatio-temporal Characteristics and Influencing Factors of Ozone Suppression Events Under High Temperature in China	OU Lin-chong, CHEN Wei-hua, WU Yong-kang, <i>et al.</i>	(6586)
Review of UAV-based Atmospheric Fine Particulate Matter and Ozone Pollution Detection and Source Localization	QU Ya-wei, WANG Ti-jian, YUAN Cheng, <i>et al.</i>	(6598)
Health Impact Analysis of Fine Particulate Pollution from Vehicles in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	HAO Yong-pei, SONG Xiao-wei, ZHU Xiao-dong, <i>et al.</i>	(6610)
Assessment of Emission Reduction Potential of CO ₂ Capture, Geological Utilization, and Storage in Cement Industry of China	WEI Ning, LIU Sheng-nan, WEI Feng, <i>et al.</i>	(6621)
Life Cycle Carbon Emission Accounting and Emission Reduction Potential Assessment of Steel Industry	SONG Xiao-cong, DU Shuai, DENG Chen-ning, <i>et al.</i>	(6630)
Evolution Characteristics and Driving Forces of Carbon Dioxide Emissions and Sinks in the Pearl River Delta Region, China	HU Jing-xin, SHA Qing-e, LIU Hui-lin, <i>et al.</i>	(6643)
Impact of Accelerated Electrification Under the Low Carbon Path in Dongguan City on the Coordinated Emission Reduction of CO ₂ and Pollutants	WU Le-min, CHEN Bing-yin, OU Lin-chong, <i>et al.</i>	(6653)
Relationship Between Urbanization and Carbon Emissions in the Chang-Zhu-Tan Region at the County Level	LIU Xian-zhao, LI Yang, <i>et al.</i>	(6664)
Characteristics and Influencing Factors of Greenhouse Fluxes from Urban Lawn	CHEN Li-han, LIU Shuo, LIN Yi, <i>et al.</i>	(6680)
Dual-Perspective Analysis of the Warming Effect of the Methane Emissions from Animal Husbandry in China	LIU Shu-le, YAN Wei, CAO Qing-xian, <i>et al.</i>	(6692)
Pollution Level and Risk Assessment of OPEs in Typical River Basins of China	ZHAO Jiang-lu, LU Hai-jian, LÜ Jia-pei, <i>et al.</i>	(6700)
Soil Heavy Metal Contamination, Sources, and Health Risk of Typical Drinking Water Sources in the Suspended Reach of the Lower Yellow River	PENG Chao-yue, REN Chong, SHEN Hao-xin, <i>et al.</i>	(6710)
Fraction Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of the Yellow River Mainstream	WANG Yi-di, OUYANG Wei, LIU Lian-hua, <i>et al.</i>	(6720)
Influence of Land Use Structure and Spatial Pattern on Water Quality of Small and Medium-sized Rivers in Poyang Lake Basin	WEN Jia-wei, WANG Peng, HUANG Gao-xiang, <i>et al.</i>	(6728)
Water Environment Characteristics and Water Quality Assessment of Typical Lakes in Inner Mongolia	WANG Xin-yuan, PAN Bao-zhu, WANG Li-xin, <i>et al.</i>	(6744)
Relationship Between Precipitation, River Water, and Groundwater Conversion in the Upper Reaches of Xilin River During the Rainy Season	SUN Jin, WANG Yi-xuan, YANG Lu, <i>et al.</i>	(6754)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in the Northwest Salt Lake Basin	YAN Yan, GAO Rui-zhong, LIU Ting-xi, <i>et al.</i>	(6767)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of Barkol-Yiwu Basin	LIU Yu, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i>	(6778)
Bisulfite Promoted Minute Fe ²⁺ -Activated Peroxydisulfate for Paracetamol Degradation	MO Xi-ting, NIE Shu-hua, YAN Cai-xia, <i>et al.</i>	(6790)
Degradation of Ciprofloxacin by Activating Peroxymonosulfate with Sludge Biochar	ZHENG Da-yang, ZOU Jia-li, XU Hao, <i>et al.</i>	(6801)
Adsorption of Iopamidol by NaHCO ₃ -activated Buckwheat Biochar	WEI Hong, ZHAO Jiang-juan, JING Li-ming, <i>et al.</i>	(6811)
Preparation of Bamboo-based N, P Co-doped Activated Carbon and Its Lanthanum Ion Adsorption Performance	WANG Gui-long, LIU Yan-yan, JIANG Rong-yuan, <i>et al.</i>	(6823)
Analysis of Vegetation Change and Influencing Factors in Southwest Alpine Canyon Area	LAI Jin-lin, QI Shi, CUI Ran-ran, <i>et al.</i>	(6833)
Effect of Biochar on Agricultural Soil Aggregates and Organic Carbon: A Meta-analysis	MENG Yan, SHEN Ya-wen, MENG Wei-wei, <i>et al.</i>	(6847)
Carbon Cycling Processes in Croplands and Their Quantification Methods	SUN Zhao-an, ZHU Biao, <i>et al.</i>	(6857)
Effects of Biochar Application on Soil Organic Carbon Component in <i>Eucalyptus</i> Plantations After Five Years in Northern Guangxi	MOU Zhi-yi, SHEN Yu-yi, CAO Yang, <i>et al.</i>	(6869)
Evolution Characteristics of Soil Active Organic Carbon and Carbon Pool Management Index Under Vegetation Restoration in Karst Area	CAI Hua, SHU Ying-ge, WANG Chang-min, <i>et al.</i>	(6880)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Typical Antibiotics in Environmental Media in China	CHEN Li-hong, CAO Ying, LI Qiang, <i>et al.</i>	(6894)
Spatial Prediction Modeling for Soil pH Based on Multiscale Geographical Weighted Regression(MGWR) and Its Influencing Factors	ZHAO Ming-song, CHEN Xuan-qiang, XU Shao-jie, <i>et al.</i>	(6909)
Characteristics and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Farmland Around a Coal-fired Power Plant	ZHANG Jun, LI Xu, LIU Lei-yu, <i>et al.</i>	(6921)
Characteristics of Soil Pollution and Source Analysis of Typical Pollutants in the Petrochemical Site	ZHANG Yu-rong, LUO Shuai, CHEN Yuan, <i>et al.</i>	(6933)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes Distribution in Different Types of Agricultural Land Soils in Highly Cultivated Hilly Areas	CHEN Rui, CHENG Jian-hua, TANG Xiang-yu, <i>et al.</i>	(6947)
Effects of Organic Fertilizer Combined with Biochar on Denitrifying Microorganisms and Enzyme Activities in Orchard Soil	DENG Zheng-xin, GAO Ming, XIONG Zi-yi, <i>et al.</i>	(6955)
Effects of Organic Fertilization on Bacterial Community and Maize Productivity in Dryland Red Soil	LIN Ting-ting, ZHENG Jie, ZHU Guo-fan, <i>et al.</i>	(6965)
Effects of Combined Pollution of Microplastics and Cadmium on Microbial Community Structure and Function of <i>Pennisetum hybridum</i> Rhizosphere Soil	DUAN Li-yang, ZHANG Yu, REN Xue-min, <i>et al.</i>	(6973)
Effects of Tomato Planting Years on Soil Physical and Chemical Properties and Microbial Communities	ZHAO Yang-yang, LIU Yin-shuang, SONG Yao, <i>et al.</i>	(6982)
Remediation of Three Oxidants on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Coking Contaminated Soil and Its Response to Indigenous Microorganisms	LI Wei, WANG Hua-wei, MENG Xiang-yu, <i>et al.</i>	(6992)
Microbial Diversity and Population Structure of Different Salinized Soil Types in Hebei Province	LIU Yin-shuang, NIU Hong-jin, ZHAO Yang-yang, <i>et al.</i>	(7004)
Functional Genomics Analysis of Nitrogen and Phosphorus Transformation in Maize Rhizosphere Microorganisms	WANG Xiang-jun, JIANG Mei-tong, LI Sen, <i>et al.</i>	(7014)
Remediation of Soil Cadmium Contamination by <i>Solanum nigrum</i> L. Enhanced by the Combination of Exogenous Bacteria and Citric Acid	WANG Kai, WANG Li, WANG Yi-kun, <i>et al.</i>	(7024)
Effect of Combined Application of an <i>Enterobacter</i> and Sulfur Fertilizer on Cadmium and Arsenic Accumulation in Rice	ZHANG Pu-xin, YAO Jun-fan, LIU Yu-ling, <i>et al.</i>	(7036)