

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第1期

Vol.39 No.1

**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

2006~2015年北京市不同地区 O<sub>3</sub> 浓度变化 ..... 王占山, 李云婷, 安欣欣, 李倩, 孙乃迪, 王步英, 潘锦秀 ( 1 )

南京北郊黑碳气溶胶的来源解析 ..... 肖思晗, 于兴娜, 朱彬, 何镓祺, 吕睿, 沙丹丹 ( 9 )

电镀厂周边大气 PM<sub>10</sub> 中重金属季节性分布特征及生态风险评价 ..... 赵珍丽, 赵委托, 黄庭, 程胜高, 余葱葱, 尹伊梦 ( 18 )

广西玉林市大气 PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 中有机碳和元素碳污染特征分析 ..... 黄炯丽, 陈志明, 莫招育, 李宏姣, 杨俊超, 刘慧琳, 毛敬英, 梁桂云, 张达标, 吴熊平, 郝爽 ( 27 )

青岛近海及黄渤海大气气溶胶中不同形态氮磷质量浓度及组成特征 ..... 张瑞峰, 祁建华, 丁雪, 谢丹丹 ( 38 )

大气环境分区管理: 以广东省为例 ..... 杨柳林, 李敏辉, 廖程浩, 曾武涛, 张晖, 张永波 ( 49 )

基于高分影像的城市黑臭水体遥感识别: 以南京为例 ..... 温爽, 王桥, 李云梅, 朱利, 吕恒, 雷少华, 丁潇蕾, 苗松 ( 57 )

基于 SWAT 模型的流域河道硝酸盐 δ<sup>15</sup>N 和 δ<sup>18</sup>O 模拟 ..... 王康, 冉宁, 林忠兵, 周祖昊 ( 68 )

程河流域非点源污染负荷估算及其控制对策 ..... 陈学凯, 刘晓波, 彭文启, 董飞, 黄智华, 冯顺新, 王若男 ( 77 )

陆浑水库饮用水源地水体中金属元素分布特征及健康风险评价 ..... 余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 谢地, 马鹏途 ( 89 )

天津供水系统中抗生素分布变化特征与健康风险评价 ..... 张新波, 宋姿, 张丹, 刘楠楠, 李楠, 温海涛 ( 99 )

西南丘陵区村镇典型供水水源有机物分布特征及对饮水水质的影响 ..... 王琼, 李乃稳, 李磊, 李龙国, 苟思, 杨凌肖 ( 109 )

以 HKUST-1 为模板制备铜电极物活化过一硫酸氢钾降解罗丹明 B ..... 陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 ( 117 )

黄河岸边土壤中类二噁英类多氯联苯污染现状及风险 ..... 姚宏, 卢双, 张旭, 裴晋, 鲁垠涛 ( 123 )

淹水落干下三峡水库消落带土壤无机磷形态转化特征 ..... 周健, 李春辉, 张志永, 胡红青, 万成炎, 胡莲, 潘晓洁 ( 130 )

磷酸盐对铁锰复合氧化物膜去除地表水中氨氮的影响 ..... 卓瑞双, 黄廷林, 张瑞峰, 文刚 ( 137 )

K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub> 强化 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 薄膜光电催化降解 Cu(CN)<sub>2</sub> 并同步回收 Cu ..... 党聪哲, 李一兵, 王彦斌, 赵旭 ( 145 )

以 HKUST-1 为模板制备铜电极物活化过一硫酸氢钾降解罗丹明 B ..... 蒲嘉懿, 万金泉, 王艳, 马邕文, 武书彬 ( 152 )

氨化松香基交联聚合树脂对水中诺氟沙星的吸附性能 ..... 马亚红, 黄婉婷, 刁开盛, 李鹏飞, 谭学才, 董慧岭, 覃方夸, 雷福厚, 刘绍刚 ( 161 )

铁锰泥除砷颗粒吸附剂对 As(V) 的吸附去除 ..... 曾辉平, 吕赛赛, 杨航, 尹灿, 曹瑞华, 王艳菊, 李冬, 张杰 ( 170 )

水铁矿及其胶体对砷的吸附与吸附形态 ..... 马玉玲, 马杰, 陈雅丽, 雷梅, 郭华明, 翁莉萍, 李永涛 ( 179 )

阳(阴)离子复配修饰两性磁性膨润土的表面特征差异及对苯酚吸附的影响 ..... 任爽, 孟昭福, 王腾, 张洋, 田凯, 刘伟, 闫东旭 ( 187 )

典型城市污水中对羟基苯甲酸酯的污染特征 ..... 赵雪, 张子峰, 祝富杰, 李一凡, 马万里 ( 195 )

水力停留时间对活性炭生物转盘处理污水的影响 ..... 许雯佳, 戚小英 ( 202 )

环丙沙星对膜生物反应器运行效能的影响及其去除特性 ..... 戴琦, 刘锐, 舒小铭, 张永明, 陈吕军 ( 212 )

AAO 工艺低氧条件下的运行及其模拟 ..... 曹特特, 王林, 李咏梅 ( 219 )

磷酸盐对亚硝化系统的抑制及恢复 ..... 顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 张程锦 ( 227 )

碳源对污水处理厂 SAD 工艺小试的影响 ..... 李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 ( 232 )

容积负荷对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷性能的影响 ..... 吕亮, 尤雯, 韦佳敏, 吴鹏, 沈耀良 ( 239 )

DNBF-O<sub>3</sub>-GAC 组合工艺深度脱除氮磷及代谢产物 ..... 钟丽燕, 郝瑞霞, 王卫东, 万京京, 朱晓霞 ( 247 )

交替好氧/缺氧运行模式对生物脱氮效能及活性污泥胞外聚合物的影响 ..... 孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 ( 256 )

纳米零价铁对升流式颗粒污泥床反硝化性能的影响 ..... 周丰, 王翻翻, 钱飞跃, 黄慧敏, 沈耀良, 周建民 ( 263 )

高含固污泥厌氧消化中 Fe/S 及 pH 对原位抑硫效率影响及其交互作用 ..... 韩芸, 曹玉芹, 卓杨, 王晓飞, 韩雅婷, 彭党聪 ( 269 )

浑河流域贮存污泥成分特征及演变规律分析 ..... 刘甜甜, 崔崇威, 赫俊国, 唐建 ( 276 )

去除城市生活污水中有机络合态金属强化其厌氧生物制气 ..... 卢怡清, 许颖, 董滨, 戴晓虎 ( 284 )

污泥飞灰中重金属不同浸出方法比较及综合毒性评价 ..... 王丰, 李润东, 李彦龙, 赵云斌, 杨天华 ( 292 )

初冬时期闽江河口区养殖塘排水后的 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 通量日变化特征 ..... 杨平, 谭立山, 黄佳芳, 何清华, 全川 ( 300 )

3 种土壤改良剂对河套灌区玉米田温室气体排放的影响 ..... 武岩, 红梅, 林立龙, 刘梅, 刘宇杰 ( 310 )

有机替代比例对冬小麦/夏玉米轮作体系作物产量及 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 侯苗苗, 吕凤莲, 张弘毅, 周应田, 路国艳, Ayaz Muhammad, 黎青慧, 杨学云, 张树兰 ( 321 )

拔节期水稻光合碳输入的动态变化及其对施氮的响应: <sup>13</sup>C-CO<sub>2</sub> 脉冲标记 ..... 陈珊, 祝贞科, 袁红朝, 王久荣, 彭佩钦, 葛体达, 吴金水 ( 331 )

陕北黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤碳剖面分布特征 ..... 兰志龙, 赵英, 张建国, 李会杰, 司炳成, 焦瑞, Muhammad Numan Khan, Tanveer Ali Sial ( 339 )

不同地表条件下生物炭对土壤氮挥发的影响 ..... 邹娟, 胡学玉, 张阳阳, 陈窈君, 王向前, 刘扬 ( 348 )

秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响 ..... 徐国鑫, 王子芳, 高明, 田冬, 黄容, 刘江, 黎嘉成 ( 355 )

县域尺度土壤铜的有效性及相关影响因素评估 ..... 李锦芬, 瞿明凯, 刘刚, 黄标 ( 363 )

基于改进 LUR 模型的区域土壤重金属空间分布预测 ..... 曾菁菁, 沈春竹, 周生路, 陆春峰, 金志丰, 朱雁 ( 371 )

沈北新区土壤中多环芳烃污染特征及源解析 ..... 李嘉康, 宋雪英, 魏建兵, 王颖怡, 李玉双, 郑学昊 ( 379 )

磷酸盐、腐殖酸与粉煤灰联合钝化模拟铅镉污染土壤 ..... 赵庆圆, 李小明, 杨麒, 陈灿, 钟振宇, 钟宇, 陈飞, 陈寻峰, 王祥 ( 389 )

控源及改良措施对稻田土壤和水稻镉累积的影响 ..... 封文利, 郭朝晖, 史磊, 肖细元, 韩晓晴, 冉洪珍, 薛清华 ( 399 )

典型土壤双季稻对 Cd 吸收累积差异 ..... 李欣阳, 龙坚, 王树兵, 陈齐, 董霞, 蒋凯, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 ( 406 )

松花江上游夹皮沟金矿开采区芦苇叶片汞分布特征 ..... 张曼胤, 李梦洁, 崔丽娟, 王贺年, 郭子良, 徐卫刚, 魏圆云, 杨思, 肖红叶 ( 415 )

硝酸盐对土壤反硝化活性及厌氧降解的影响 ..... 代军帅, 左小虎, 王明霞, 姚炎红, 周志峰 ( 422 )

长期施肥对稻田土壤微生物量、群落结构和活性的影响 ..... 王伟华, 刘毅, 唐海明, 孙志龙, 李宝珍, 葛体达, 吴金水 ( 430 )

海洋沉积物中硫酸盐还原菌和硫酸化菌群落分析方法的比较 ..... 张玉, 米铁柱, 甄毓, 陈焯, 付璐璐, 王勋功 ( 438 )

鄱阳湖微囊藻毒素时空分布格局及其与理化及生物因子的关系 ..... 袁丽娟, 廖且根, 张莉, 张大文, 罗林广, 刘聚涛 ( 450 )

畜禽粪便中多重耐药细菌及耐药基因分布特征 ..... 张昊, 王盼亮, 杨清香, 俞宁 ( 460 )

烟气净化工艺和焚烧炉类型对生活垃圾焚烧飞灰性质的影响 ..... 章骅, 于思源, 邵立明, 何晶晶 ( 467 )

《环境科学》征稿简则(17) 《环境科学》征订启事(26) 信息(160, 255, 338)

# 县域尺度土壤铜的有效性及相关影响因素评估

李锦芬<sup>1,2</sup>, 瞿明凯<sup>1\*</sup>, 刘刚<sup>2</sup>, 黄标<sup>1</sup>

(1. 中国科学院南京土壤研究所土壤环境与污染修复重点实验室, 南京 210008; 2. 南京信息工程大学环境科学与工程学  
院, 南京 210044)

**摘要:** 了解土壤重金属相关属性(如全量、有效态含量等)的空间分布状况及相关环境因子对其有效性的空间非平稳影响,对土壤重金属风险区域的划定和空间调控措施的制定具有重要作用. 本研究基于张家港市 357 个土壤样本数据,首先探讨了土壤类型和土地利用类型对土壤有效铜的影响. 然后采用普通克里格预测了该区域土壤全铜和有效铜的含量,计算得到其有效性比率(即有效铜/全铜)的空间分布状况,并结合有效铜及其有效性比率划定了土壤有效铜的风险调控区域. 最后,采用一种空间局部回归技术,地理加权回归(GWR)探索了土壤有效铜与 3 个主要土壤因子(即土壤全铜、pH 和 SOM)之间的空间局部回归关系. 结果表明,土壤类型和土地利用类型均对土壤有效铜含量存在一定程度的影响. 土壤铜的有效性比率具有较强的空间异质性,其变化范围在 13.56% ~ 29.15%. 模型对比结果显示,GWR 模型较传统的普通最小二乘回归(OLSR)模型具有更高的拟合精度(即较大的决定系数  $R^2$ , 较小的 AICc 信息准则和残差平方和). GWR 分析结果显示,各土壤因子对土壤有效铜的影响在空间上是非稳态的. GWR 模型能有效地揭示相关土壤属性对土壤有效铜的空间非平稳影响,其结果可解释局部区域土壤有效铜累积的原因. 基于上述分析结果,可以为该研究区域内土壤有效铜的调控提供具体的空间决策支持.

**关键词:** 土壤; 有效铜; 调控; 空间非平稳性; 地理加权回归

中图分类号: X171; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)01-0363-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201705182

## Assessment of the Availability of Soil Copper and Related Influencing Factors at a County Scale

LI Jin-fen<sup>1,2</sup>, QU Ming-kai<sup>1\*</sup>, LIU Gang<sup>2</sup>, HUANG Biao<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** Understanding the spatial distribution of total copper, available copper, and the spatial non-stationary relationships between available copper and relevant environmental factors is important for the delineation of soil risk areas and the development of related control measures. This study was conducted in Zhangjiagang County of Jiangsu Province, China. The risk status for soil copper was assessed based on 357 soil samples in the study area. The effects of soil type and land-use type on the concentration of available soil copper were discussed first. Then, ordinary kriging was adopted to map the spatial distribution patterns of the total soil copper and available soil copper, and the spatial distribution map of the copper availability ratio (i. e., available copper/total copper) was also developed for the study area. The risk areas for soil copper were delineated based on the spatial distribution patterns of available soil copper and the copper availability ratio. Finally, a new spatial local regression technique, geographic weighted regression (GWR), was used to explore the local spatial regression relationships between available copper and its three main impact factors (i. e., total soil copper, soil pH, and SOM). Results showed that both soil type and land-use type had some effect on the concentration of available soil copper. The copper availability ratio had a strong spatial heterogeneity, with the higher values mainly in the northeast, southeast, and northwest of the study area and the lower values mainly in the middle and southwest of the study area. The range of the copper availability ratio is 13.56% to 29.15%. The results of the comparison of the traditional ordinary least squares regression (OLSR) and GWR showed that the GWR model had higher fitting accuracy than the OLSR model [i. e., a larger decision coefficient  $R^2$ , and smaller corrected Akaike information criteria (AICc) and the sum of squares of residuals] in modeling the relationships between available copper and its three main impact factors. The GWR analysis showed that the effect of soil factors on the concentration of soil available copper was non-stationary. The GWR could effectively reveal the spatial non-stationary influence of the related soil factors on the concentration of available soil copper, and the results could explain the reasons for the accumulation of available soil copper in local areas. Potential risk areas for available soil copper were delineated based on the copper availability ratio and the concentration of available soil copper in the study area. The results should be crucial data for developing specific control measures for soil copper at a regional scale.

**Key words:** soil; available copper; regulation; spatial nonstationary; geographic weighted regression

收稿日期: 2017-05-18; 修订日期: 2017-07-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41401523); 江苏省自然科学基金项目(BK20141055); 南京土壤研究所“一三五”计划和领域前沿项目(ISSASIP1623)

作者简介: 李锦芬(1991 ~ ), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为区域土壤及环境风险评估, E-mail: jinfenli22@163.com

\* 通信作者, E-mail: qumingkai@issas.ac.cn

土壤中重金属元素的迁移、转化及其对植物的毒害和环境的影响程度,除了与土壤中重金属的含量有关外,还与重金属元素在土壤中的存在形态有很大关系<sup>[1]</sup>. 铜是植物生长必需的微量元素. 土壤中铜主要以固定态存在,仅有少量的铜以相对活动态存在<sup>[1,2]</sup>. 土壤有效铜可直接被植物吸收,是限制作物产量和品质的重要因子<sup>[3]</sup>. 摄入过量的铜元素会对人体健康产生一定危害. 过量的铜元素会对植物产生毒害作用<sup>[4]</sup>,也可能会通过食物链间接危害人类健康<sup>[5-7]</sup>. 土壤铜有效性比率(即有效铜/全铜)能在一定程度上反映土壤铜从固定态转换成有效态的比率<sup>[8]</sup>,结合土壤有效铜的空间分布信息,可以更有针对性地划定土壤有效铜的风险调控区域.

在土壤和农业生态系统中,土壤铜从固定态向有效态转化的比例不是恒定的<sup>[9]</sup>,其通常受到多种土壤因子的影响,如土壤全铜、土壤 pH 和土壤有机质(SOM)等<sup>[10-12]</sup>. 土壤 pH 通常会影响到土壤中重金属元素的形态变化<sup>[13-15]</sup>,pH 越低,有效态铜的含量越高. 而 SOM 作为与土壤生产力密切相关的指标<sup>[16]</sup>,它主要通过和土壤铜形成络合物,进而影响土壤铜的有效性<sup>[17]</sup>. 因此,本研究讨论了这 3 个主要影响因子(即土壤全铜、pH 和 SOM)对土壤有效铜的影响.

以往针对土壤重金属有效态与影响因素之间关系的研究通常基于传统的全局回归模型,如普通最小二乘回归(OLSR)<sup>[18-21]</sup>. 但土壤环境因子都是空间变量,且具有一定的空间变异性. 这种总体回归模型,没有考虑地理坐标<sup>[22]</sup>,所估计的回归系数难以反映局部空间区域内土壤重金属有效态与其影响因子之间的空间局部回归关系. 地理加权回归(GWR)是一种空间局部回归技术,该模型通过将数

据的地理位置嵌入到线性回归模型中,并采用核函数为每个空间位置处的解释变量分配不同的权重,以此来估计因变量和解释变量之间的空间局部回归关系.

本研究以张家港市为研究区域,主要目的在于:①探讨该区域土壤类型和土地利用类型对土壤有效铜的影响;②采用普通克里格预测土壤有效铜及其有效性比率的空间分布状况,并据此划定土壤有效铜的风险调控区域;③采用 GWR 模型探索研究区内相关影响因子(即,土壤全铜、pH 和 SOM)对土壤有效铜的空间非平稳影响,以期为区域土壤有效铜的精确调控提供空间决策支持.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

研究区域位于江苏省南部的张家港市(120°22'~120°49'E, 31°43'~32°01'N)(图 1). 该市地处长江三角洲冲积平原,地势平坦. 张家港市隶属于北亚热带季风气候,四季分明,雨水充沛,年均降雨量和年均气温分别为 1 039 mm 和 15.5°C. 全市的土壤类型南北分异明显,北部沿江的圩田地区主要为潮土,由长江冲积物母质发育而成;南部的平田地区主要为水稻土,由泻湖相沉积母质发育而成. 另外其他类型,如黄棕壤、堆叠土和园田土等在该市亦有零星分布. 经调查发现张家港市的土地利用类型主要有水田、旱地和城乡聚落(包括城镇建设用地和农村聚落). 全市总占地面积为 999 km<sup>2</sup>,其中耕地面积约 410 km<sup>2</sup>,主要以稻-麦或稻-油轮作为主要的种植模式.

### 1.2 样品采集与分析

采样点是根据张家港市的土壤类型、土地利用现状及采样点在研究区分布均匀性原则布设的. 全

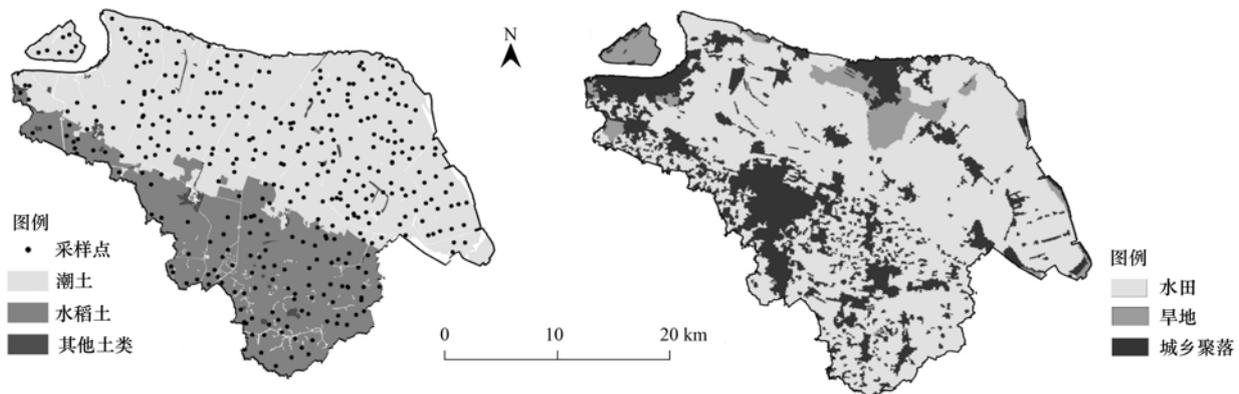


图 1 土壤和土地利用的空间分布示意

Fig. 1 Soil sample locations, soil type, and land-use type

市共采集了 357 个土壤样点(图 1),用 GPS 详细记录每个采样点的经纬度,以及采样点周围的环境信息. 在每个采样点 400 m<sup>2</sup> 范围内,采集 5~6 处耕作层(0~15 cm)土壤,混合均匀后再缩分至 1~2 kg. 所有的土样在室温下风干,用木棒捣碎后过 10 目筛,另再取部分土样(约 50 g),用玛瑙研钵研磨使其通过 100 目筛. 然后将处理好的样品存于聚乙烯瓶中,以备后续使用. 主要测定土壤有机质、pH、全铜和有效铜. 土壤有机质采用重铬酸钾外加热法测定,土壤 pH 值采用玻璃电极法在土:水=1:2.5 时测定,土壤全铜含量用反王水消化后用原子吸收分光光度法测定,土壤有效铜的含量在用 DPTA 浸提后用原子吸收光谱法测定(3510,安捷伦-上海分析仪器有限公司),具体的测定方法参见文献[23].

### 1.3 普通克里格

普通克里格(OK)是一种对区域化变量进行空间预测的方法. 该方法利用已知土壤样本值并考虑样本点的空间相关性来预测未采样位置处的土壤属性<sup>[24]</sup>,具有无偏、最优的特点<sup>[25]</sup>. 用 OK 来预测土壤属性的空间分布,可以有效减小估计误差和调查成本<sup>[26]</sup>. OK 模型的公式如下:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (1)$$

且满足:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (2)$$

式中,其中  $Z^*(x_0)$  是位置  $x_0$  处的预测值;  $Z(x_i)$  是位置  $x_i$  处的观测值;  $\lambda_i$  是从普通克里格系统中位置  $x_0$  邻域范围内的第  $i$  个样本点对应的权重;  $n$  是  $x_0$  邻域范围内用于插值的样点数目.

### 1.4 地理加权回归

传统的 OLSR 模型假定观测变量具有随机性并具有相同的频率分布,其因变量是自变量的多元线性函数,可表示为:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^p \beta_i x_i + \varepsilon \quad (3)$$

式中, $y$  为因变量, $x_i$  为第  $i$  个自变量, $\beta_0$  为模型截距, $\beta_i$  为区域内第  $i$  个自变量的回归系数, $p$  为回归项的个数, $\varepsilon$  为高斯误差项. 这类模型具有完备的理论体系和统计推断方法,可以用来分析目标变量和解释变量之间的关系<sup>[27]</sup>. 然而,这种类型的回归模型是非空间的,也就是说,这类回归模型在对回归参数估计时不考虑地理坐标<sup>[22,28]</sup>. 因此,所估计的回归参数无法直观地反映因变量和自变量之间的局

部空间回归关系.

地理加权回归(GWR)模型是对 OLSR 模型的一种扩展,它将数据的地理位置嵌入到回归参数中,通过每个空间位置处的变量分配不同的权重,在探索空间数据之间非平稳关系时具有明显的优越性<sup>[29,30]</sup>. 其公式为:

$$y(\mu) = \beta_0(\mu) + \sum_{i=1}^p \beta_i(\mu) x_i(\mu) + \varepsilon(\mu) \quad (4)$$

式中, $\mu$  为区域内不同的空间位置, $y(\mu)$  为位置  $\mu$  处因变量的值, $x_i(\mu)$  为位置  $\mu$  处第  $i$  个自变量的值, $\beta_0(\mu)$  为位置  $\mu$  处的模型截距, $\beta_i(\mu)$  是位置  $\mu$  处第  $i$  个自变量的回归系数, $p$  是回归项的个数, $\varepsilon(\mu)$  是位置  $\mu$  处的随机误差项. 其位置  $\mu$  处的回归系数的估值公式为:

$$\hat{\beta}(\mu) = [X^T W(\mu) X]^{-1} X^T W(\mu) Y \quad (5)$$

式中, $X$  是自变量的一个  $m \times (n+1)$  矩阵,其中  $m$  是观测数据的数量, $n$  是自变量的数量; $Y$  是因变量的一个  $m \times 1$  的矩阵; $W(\mu)$  是一个  $m \times m$  对角矩阵,它是通过对空间上更接近校准位置的数据位置分配更多权重来计算的核函数. 本研究采用自适应核函数进行权重估计. 基于更正后的 Akaike 信息准则(AICc)选择最优自适应带宽,并且最终使用 71 个周围数据点来校准每个位置处的 GWR 模型. 关于 GWR 模型更多的介绍参见文献[29].

### 1.5 数据统计与空间插值

本研究采用 ArcGIS 9.2 对空间数据进行数字化、空间插值和制图等. 土壤基本理化性质的描述性统计分析在 SPSS 19.0 中完成. 土壤有效铜与其相关控制因子的 GWR 分析在 GWR 4.0 中完成.

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤有效铜与其影响因子的描述性统计

张家港市 2 种土壤类型(潮土和水稻土)和 3 种土地利用类型(水田、旱地和城乡聚落)下土壤有效铜、全铜、pH 和 SOM 的描述性统计量见表 1、2. 可以看出,张家港市有 80% 土壤样品的全铜含量超过了江苏省土壤背景值 23.4 mg·kg<sup>-1</sup><sup>[30]</sup>,说明土壤铜积累广泛存在于研究区域的农田土壤中. 根据中国土壤环境质量的二级标准<sup>[31]</sup>,仅有一个土样的全铜含量超过了其阈值,这表明研究区大多数农田土壤铜低于污染水平,但仍存在潜在污染的风险,应重点加强监测.

研究区域内,潮土中土壤全铜和有效铜的平均值分别为 31.76 mg·kg<sup>-1</sup> 和 5.91 mg·kg<sup>-1</sup>,水稻土

中土壤全铜和有效铜的平均值分别为  $31.61 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $6.65 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  (表 1). 水稻土中全铜的含量与潮土中的含量相当,但有效铜的含量要高于

潮土. 其原因可能在于,相对潮土,研究区域内的水稻土具有更低的土壤 pH 和更高的 SOM 含量(表 1).

表 1 不同土壤类型下土壤有效铜与其影响因子的描述性统计量

Table 1 Descriptive statistics for available copper and its impact factors for different soil types

| 项目   | 潮土 ( $n=247$ ) |  |   |  | 水稻土 ( $n=112$ ) |  |   |  |
|------|----------------|--|---|--|-----------------|--|---|--|
|      | pH             | SOM<br>/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ | 有效铜<br>/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ | 全铜<br>/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ | pH              | SOM<br>/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ | 有效铜<br>/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ | 全铜<br>/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ |
| 极小值  | 4.40           | 11.00                                  | 2.00                                    | 13.90                                  | 4.03            | 10.60                                  | 2.29                                    | 7.55                                   |
| 极大值  | 8.35           | 31.00                                  | 19.00                                   | 68.90                                  | 8.25            | 34.40                                  | 17.51                                   | 226                                    |
| 均值   | 8.05           | 19.11                                  | 5.91                                    | 31.76                                  | 6.37            | 25.10                                  | 6.65                                    | 31.61                                  |
| 标准差  | 0.29           | 3.61                                   | 1.64                                    | 7.73                                   | 0.85            | 4.33                                   | 1.95                                    | 20.36                                  |
| 变异系数 | 0.04           | 0.19                                   | 0.28                                    | 0.24                                   | 0.13            | 0.17                                   | 0.29                                    | 0.64                                   |

表 2 不同土地利用类型土壤有效铜与其影响因子的描述性统计量

Table 2 Descriptive statistics of available copper and its impact factors for different land-use types

| 项目              | 极小值                                 | 极大值   | 均值     | 标准差   | 变异系数  |
|-----------------|-------------------------------------|-------|--------|-------|-------|
| 水田 ( $n=272$ )  | pH                                  | 4.03  | 8.35   | 6.62  | 0.88  |
|                 | SOM/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  | 11.00 | 34.00  | 20.58 | 4.59  |
|                 | 有效铜/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ | 2.00  | 19.00  | 6.09  | 1.77  |
|                 | 全铜/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  | 13.90 | 226.00 | 32.59 | 14.35 |
| 旱地 ( $n=59$ )   | pH                                  | 5.36  | 8.24   | 7.35  | 1.02  |
|                 | SOM/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  | 11.00 | 31.00  | 21.68 | 4.76  |
|                 | 有效铜/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ | 3.00  | 18.00  | 6.52  | 1.97  |
|                 | 全铜/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  | 7.55  | 47.50  | 28.63 | 7.13  |
| 城乡聚落 ( $n=26$ ) | pH                                  | 4.40  | 8.25   | 7.85  | 1.14  |
|                 | SOM/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  | 11.00 | 31.00  | 23.87 | 5.27  |
|                 | 有效铜/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ | 4.00  | 8.00   | 5.95  | 1.18  |
|                 | 全铜/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  | 20.54 | 42.90  | 30.11 | 6.41  |

表 2 分析了不同土地利用类型(水田、旱地和城乡聚落)下土壤 pH、SOM 和全铜对土壤有效铜的影响. 研究区域内,水田和旱地中土壤有效铜的平均含量分别为  $6.09 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $6.52 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,均高于城乡聚落 ( $5.95 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),这可能与研究区域内水田和旱地中较低的土壤 pH 有关(表 2). 另外,农田土壤(水田和旱地)的有效铜含量要高于城乡聚落(表 2),这可能与农田土壤较大的人为活动有关<sup>[32]</sup>,也可能与具体的土壤性质有关. 因此,本研究区域内,土壤类型和土地利用可能通过对其它土壤属性,如土壤 pH、SOM 等,也一定程度上影响了土壤铜从固定态到有效态的转化.

## 2.2 土壤全铜、有效铜和有效性比率的空间分布

普通克里格(OK)预测的土壤全铜和有效铜的空间分布如图 2(a)和 2(b)所示. 土壤全铜的高值区主要集中在研究区域的中部和西北部,低值区主要集中在研究区的东北部和西南部. 土壤有效铜与全铜有相似的空间分布. 这表明土壤全铜是影响土壤有效铜含量的一个重要因子. 然而,在局部区域

两指标的空间分布模式也存在一定的差别,如在土壤全铜含量较高的中部,有效铜的含量却较低. 这表明土壤有效铜还受到其它一些因素的影响,比如中部地区多样的土地利用类型. 另外,土壤有效铜在研究区内呈现出一种南高北低的空间分布规律,这与土壤类型的空间分布相一致(图 1),说明土壤类型也会对该地土壤有效铜的空间分布存在一定的影响. 本研究区域内,土壤铜的有效性比率在空间上并不是恒定的[图 2(c)],存在明显的空间非平稳性. 其高值区主要集中在研究区的东北、东南和西北部,低值主要集中在研究区的中部和西南部. 土壤铜有效性比率的变化范围为  $13.56\% \sim 29.15\%$ .

## 2.3 土壤有效铜的风险区域划定

较高的土壤有效铜和有效性比率,说明研究区域存在较大程度的土壤铜污染风险. 本研究以土壤有效铜和有效性比率的平均值(分别为  $5.91 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $19\%$ )为阈值,结合张家港市的土壤有效铜和有效性比率的空间分布图[图 2(b)、2(c)],划

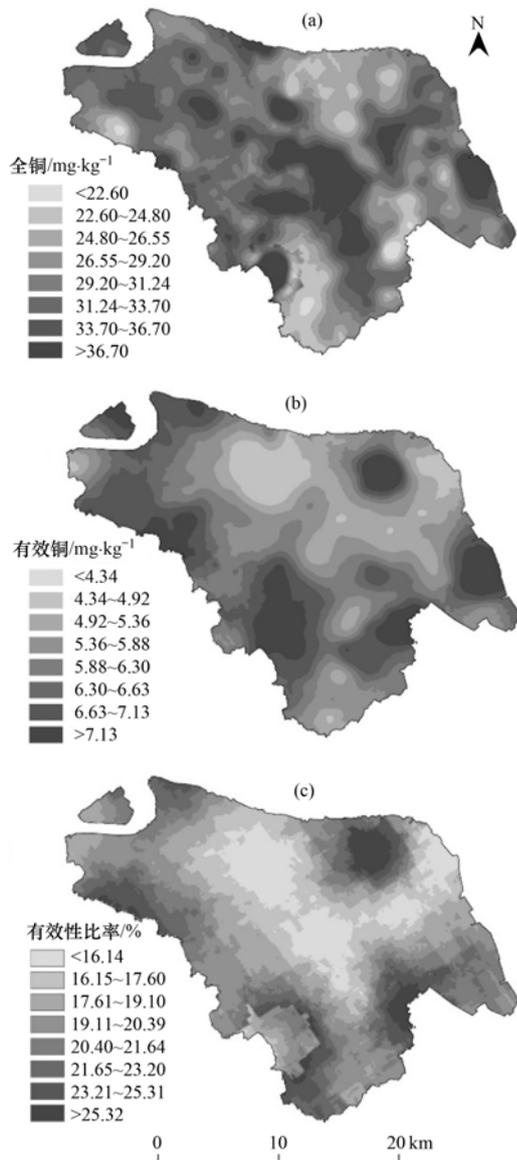


图2 土壤全铜、有效铜和有效性比率的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of total copper, available copper, and copper available ratio

定了该市土壤有效铜的风险调控区域如图3所示,其分别代表有效铜含量高于 $5.91 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 且有效性比率大于19%的子区域1和有效铜含量高于 $5.91 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 且有效性比率小于或等于19%的子区域2. 对于子区域1,可以通过改变有效性转化比率来降低该子区域内土壤有效铜的含量;而对于子区域2[图3(b)],由于有效性比率较低( $\leq 19\%$ ),则不容易通过降低土壤铜转化比率来降低土壤有效铜含量. 为了对本研究区内的土壤有效铜进行精确调控,有必要调查相关土壤因子(即土壤全铜、pH和SOM)对土壤有效铜含量的影响程度.

2.4 土壤有效铜与其影响因子的相关性分析

为了调查了3个主要影响因子(即土壤全铜、pH和SOM)对土壤有效铜含量的影响,首先计算了土壤有效铜与相关土壤因子之间的皮尔逊相关系数(表3). 结果表明,土壤有效铜与SOM呈极显著相关,相关系数为 $r=0.43$ . 相比以前的研究<sup>[33]</sup>,本研究中SOM和有效铜呈正相关,这可能是随着土壤全铜含量的增加,仅有少量铜与SOM发生了整合. 本研究中土壤pH与土壤有效铜呈显著负相关( $r=-0.13$ ),表明pH也是影响土壤有效铜的主要土壤因子之一. 与前人<sup>[8]</sup>研究所不同的是,土壤全铜和有效铜没有表现出相关性,这可能与研究区内土壤pH和SOM较大的空间变异性有关.

表3 土壤全铜和有效铜与相关土壤属性的皮尔逊相关系数<sup>1)</sup>

Table 3 Pearson correlation between total copper, available copper, and related soil properties

|     | pH       | SOM     | 全铜   | 有效铜 |
|-----|----------|---------|------|-----|
| pH  | 1        |         |      |     |
| SOM | -0.35 ** | 1       |      |     |
| 全铜  | 0.02     | -0.02   | 1    |     |
| 有效铜 | -0.13 *  | 0.43 ** | 0.04 | 1   |

1) \*表示 $P < 0.05$ , \*\*表示 $P < 0.01$

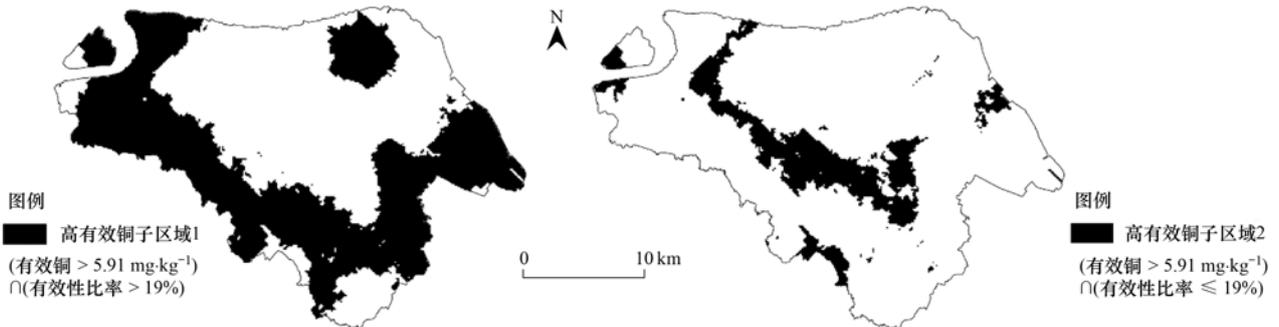


图3 张家港市土壤有效铜的风险调控区域

Fig. 3 Potential risk areas for available soil copper in Zhangjiagang City

### 2.5 相关土壤因子对土壤有效铜的空间非平稳影响

土壤有效铜(A<sub>Cu</sub>)和其3个主要的影响因子(即,土壤全铜(T<sub>Cu</sub>)、pH和SOM)之间的全局OLS关系如式(6)所示:

$$y_{A_{Cu}} = -1.52 + 0.04x_{T_{Cu}} - 0.31x_{pH} + 0.20x_{SOM} \quad (6)$$

其中  $R^2 = 0.20$ , 这意味着研究区域中约 20% 的土壤有效铜的变化可以通过这 3 个独立变量(即,土壤全铜、pH 和 SOM)来解释. OLSR 分析是非空间的,忽略了土壤有效铜和其 3 个影响因子之间关系的局部空间特征. 而土壤有效铜及其影响因子都是空间变量,往往具有一定的空间相关性和空间异质性. 传统 OLSR 方法的前提假设是样本观测之间彼此相互独立,因此 OLSR 模型无法对土壤有效铜与相关土壤因子之间的关系进行精确建模. 本研究对 OLSR 模型和 GWR 模型的拟合精度进行了对比,结果表明:GWR 有较大的  $R^2$ , 较小的 AICc 和残差平方和(表 4). 因此,相比传统的 OLSR 总体回归模型,GWR 模型能更好的拟合本研究区域中土壤有效铜和相关影响因子之间的回归关系.

表 4 普通最小二乘回归 (OLS) 模型和地理加权回归 (GWR) 模型比较<sup>1)</sup>

Table 4 Comparison between ordinary least squares regression (OLS) and geographically weighted regression (GWR) models

| 模型  | AICc     | R <sup>2</sup> | 残差的平方和   |
|-----|----------|----------------|----------|
| OLS | 1 394.37 | 0.20           | 1 009.45 |
| GWR | 1 359.87 | 0.47           | 706.25   |

1) AICc 表示更正后的 Akaike 信息准则; R<sup>2</sup> 表示决定系数

GWR 分析结果显示,土壤有效铜与其 3 个主要影响因子(即土壤全铜、pH 和 SOM)相关的土壤属性之间的关系在空间上是非平稳的,随着空间位置的变化而变化(图 4). 土壤全铜、pH 和 SOM 对土壤有效铜的影响可以通过它们相应的回归系数来解释. 通常,正的回归系数代表正的影响或相关,负的回归系数代表负的影响或相关<sup>[34]</sup>,而回归系数的绝对值的大小反映各属性因子对土壤有效铜影响的强烈程度. 本研究中土壤 pH 对土壤有效铜有负的影响,且其在研究区域南部对土壤有效铜的影响要高于北部. 土壤全铜和 SOM 对土壤有效铜的影响相似,高值区主要集中在研究区的西北和东南,而低值区主要集中在研究区域的东北和西南[图 4(b)、4(d)]. 这说明相对其它子区域,在研究区的西北和东南部地区减少土壤全铜和 SOM 可能会更有效地减小土壤有效铜的含量. 值得注意的是,本研究探

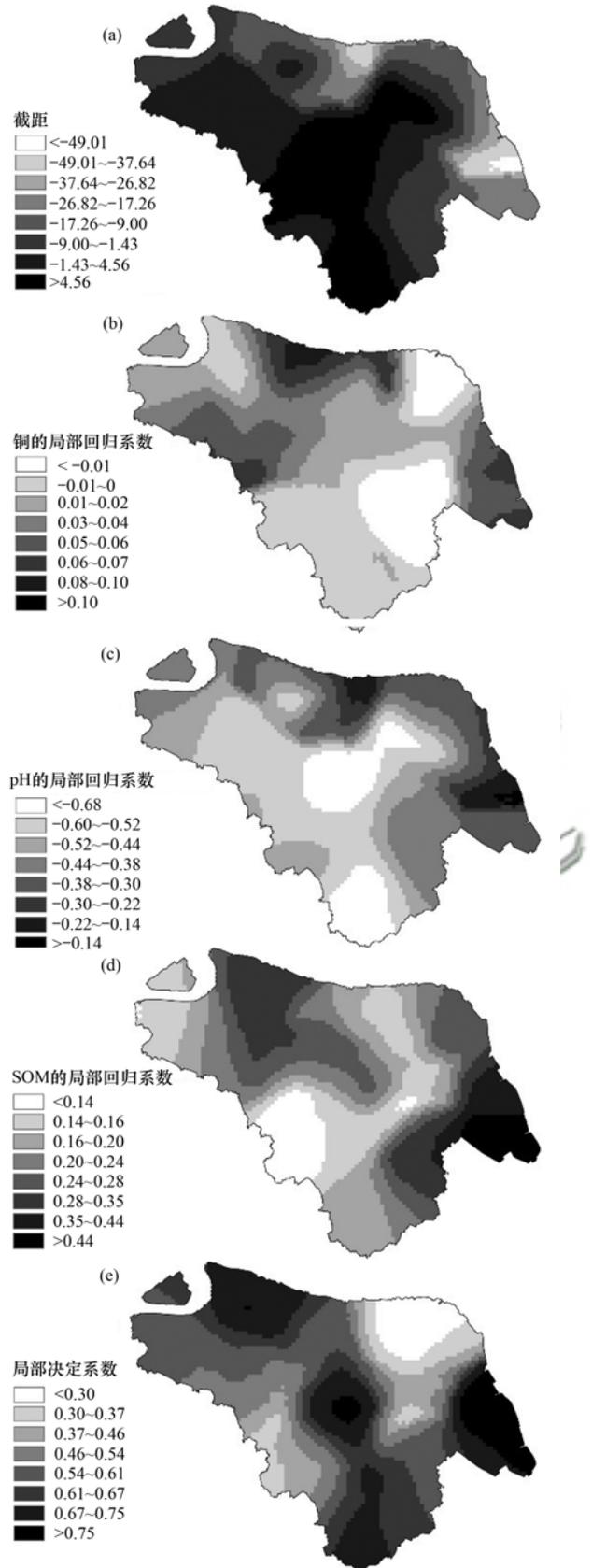


图 4 土壤有效铜与 3 个主要的土壤因子之间的 GWR 回归系数分布

Fig. 4 Spatial distribution maps of the regression parameters from the geographically weighted regression analysis of available soil copper versus the three main impact factors

索了 3 个主要的土壤因子(即,土壤全铜、pH 和 SOM)对土壤有效铜的空间非平稳影响. 可能其它因子的影响并没考虑进回归模型,如土地利用类型、土壤类型、土壤阳离子交换量、土壤含水量等等. 然而,由于这些因子与本研究所涉及的相关因子往往具有一定的信息冗余,回归模型中过多的冗余信息容易产生多重共线性. 同时,考虑过多次要的其它土壤因子往往也会增加区域土壤及环境调查的成本. 相比传统的 OLSR 总体回归模型,GWR 模型具有更高的拟合精度,且揭示了区域尺度内主要的土壤因子(即土壤全铜、pH 和 SOM)对土壤有效铜的空间非平稳影响.

决定系数( $R^2$ )常用来反映各自变量对因变量的解释情况,由 GWR 产生的局部  $R^2$  的空间分布如图 4(e)所示. 从中可以看出,相对传统的 OLSR 回归模型,这 3 个主要土壤因子能更好地解释土壤有效铜累积的原因. 研究区域东北部局部决定系数相对偏低( $R^2 < 0.30$ ),其可能与该区域土壤有效铜及相关环境因子具有较大的人为扰动有关,应重点加以监测.

GWR 回归分析结果显示,各主要因子对土壤有效铜的影响存在一定的空间非平稳性. 根据各土壤属性因子对土壤有效铜的空间非平稳影响(图 4),结合划定的土壤有效铜的风险调控区域(图 3),可为研究区内土壤有效铜调控措施的制定提供相应的空间决策支持. 如在研究区的中部和南部提高土壤 pH 较研究区的北部会更容易降低土壤有效铜的含量;SOM 在研究区的东南部对土壤有效铜的影响要明显高于其他子区域[图 4(d)],因此在东南部减小 SOM 会较其它子区域更容易降低土壤有效铜的含量;土壤全铜在研究区域的东北对有效铜的影响较其它子区域大,抑制该子区域全铜含量的增加,能够更有效地控制土壤有效铜含量.

### 3 结论

(1)张家港市有 80% 土样土壤铜含量超过当地背景值,土壤铜积累广泛存在于研究区域的农田土壤中;土壤类型和土地利用类型可能通过土壤 pH 和 SOM 间接影响土壤有效铜的含量. OK 预测的土壤全铜的高值位于研究区的中部和西北部,低值区主要集中在研究区的东北和西南;通常,土壤有效铜含量较高的区域有效性比率也较大,如研究区的东南、东北. 但局部地区又存在一定差异,如研究区的西南. 土壤铜有效性比率的变化范围在

13.56% ~ 29.15%. 根据土壤有效铜和有效性比率划定相应的风险区域,可以更有针对性地调控土壤有效铜的含量.

(2)相比传统的 OLSR 模型,GWR 模型具有更好的拟合效果(即较大的决定系数  $R^2$ ,较小的 AICc 和残差平方和),且能更有效揭示相关土壤属性(即土壤全铜、pH 和 SOM)对土壤有效铜的空间非平稳影响. 根据划定的土壤有效铜的风险调控区域,结合 GWR 回归系数空间分布图,可以在土壤有效铜含量较高的区域,如受 pH 影响较明显的东北部,受 SOM 影响较显著的东南部以及受全铜影响较大的西南部,通过向土壤中施加碱性肥料、减少含铜肥料和含铜杀菌剂等农艺措施来调控各子区域土壤有效铜的含量.

(3)本研究不仅划定了区域农田土壤重金属有效性风险区域,而且定量解释了相关因子对其有效性的空间非稳态影响,所得结果可以为区域农田土壤重金属有效态含量的调控提供空间决策依据.

### 参考文献:

- [1] Adrees M, Ali S, Rizwan M, *et al.* The effect of excess copper on growth and physiology of important food crops: a review[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(11): 8148-8162.
- [2] 廖琴, 南忠仁, 王胜利, 等. 黑河流域中部土壤微量元素有效态含量的空间变异及丰缺评价[J]. *干旱区资源与环境*, 2012, **26**(2): 108-113.
- [3] Liao Q, Nan Z R, Wang S L, *et al.* Spatial variability and abundance evaluation of available microelements in the middle reaches of Heihe River[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012, **26**(2): 108-113.
- [4] Kopittke P M, Menzies N W. Effect of Cu toxicity on growth of Cowpea (*Vigna unguiculata*) [J]. *Plant and Soil*, 2006, **279**(1-2): 287-296.
- [5] Yruela I. Copper in plants: acquisition, transport and interactions[J]. *Functional Plant Biology*, 2009, **36**(5): 409-430.
- [6] Wightwick A M, Salzman S A, Reichman S M, *et al.* Effects of copper fungicide residues on the microbial function of vineyard soils[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, **20**(3): 1574-1585.
- [7] Wang H, Liu Y M, Qi Z M, *et al.* The estimation of soil trace elements distribution and soil-plant-animal continuum in relation to trace elements status of sheep in Huangcheng Area of Qilian Mountain Grassland, China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, **13**(1): 140-147.
- [8] 施亚星, 吴绍华, 周生路, 等. 基于环境效应的土壤重金属临界负荷制图[J]. *环境科学*, 2015, **36**(12): 4600-4608.
- [9] Shi Y X, Wu S H, Zhou S L, *et al.* Mapping critical loads of heavy metals for soil based on different environmental effects[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(12): 4600-4608.
- [10] Wu C F, Luo Y M, Zhang L M. Variability of copper availability in paddy fields in relation to selected soil properties in southeast

- China[J]. *Geoderma*, 2010, **156**(3-4): 200-206.
- [9] Shaheen S M, Tsadilas CD, Rinklebe J R. A review of the distribution coefficients of trace elements in soils: influence of sorption system, element characteristics, and soil colloidal properties[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2013, **201-202**: 43-56.
- [10] 章骅, 何晶晶, 吕凡, 等. 重金属在环境中的化学形态分析研究进展[J]. *环境化学*, 2011, **30**(1): 130-137.  
Zhang H, He P J, Lü F, *et al.* A review on the methods for investigating heavy metal speciation in environmental chemistry [J]. *Environmental Chemistry*, 2011, **30**(1): 130-137.
- [11] Bravin M N, Garnier C, Lenoble V, *et al.* Root-induced changes in pH and dissolved organic matter binding capacity affect copper dynamic speciation in the rhizosphere [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, **84**(1): 256-268.
- [12] 王小庆, 李菊梅, 韦东普, 等. 土壤中铜生态阈值的影响因素及其预测模型[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(2): 445-451.  
Wang X Q, Li J M, Wei D P, *et al.* Major soil factors affecting ecological threshold for copper and the predictable models [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(2): 445-451.
- [13] Bravo S, Amorós J A, Pérez-de-los-Reyes C, *et al.* Influence of the soil pH in the uptake and bioaccumulation of heavy metals (Fe, Zn, Cu, Pb and Mn) and other elements (Ca, K, Al, Sr and Ba) in vine leaves, Castilla-La Mancha (Spain) [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, **174**: 79-83.
- [14] Likar M, Vogel-Mikuš K, Potisek M, *et al.* Importance of soil and vineyard management in the determination of grapevine mineral composition [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **505**: 724-731.
- [15] Teng Y G, Feng D, Wu J, *et al.* Distribution, bioavailability, and potential ecological risk of Cu, Pb, and Zn in soil in a potential groundwater source area[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, **187**: 293.
- [16] Yang Q Y, Jiang Z C, Li W J, *et al.* Prediction of soil organic matter in peak-cluster depression region using kriging and terrain indices[J]. *Soil and Tillage Research*, 2014, **144**: 126-132.
- [17] Gómez-Armesto A, Carballeira-Díaz J, Pérez-Domínguez P, *et al.* Copper content and distribution in vineyard soils from Betanzos (A Coruña, Spain) [J]. *Spanish Journal of Soil Science*, 2015, **5**(1): 60-71.
- [18] 刘永红, 倪中应, 谢国雄, 等. 浙西北丘陵区农田土壤微量元素空间变异特征及影响因子[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, **22**(6): 1710-1718.  
Liu Y H, Ni Z Y, Xie G X, *et al.* Spatial variability and impacting factors of trace elements in hilly region of cropland in northwestern Zhejiang Province [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, **22**(6): 1710-1718.
- [19] 万红友, 周生路, 陈杰, 等. 苏南经济快速发展区昆山市土壤铅形态含量及其影响因素[J]. *中国生态农业学报*, 2012, **20**(1): 87-92.  
Wan H Y, Zhou S L, Chen J, *et al.* Quantitative analysis of factors influencing soil Pb content in the high economic development region of South Jiangsu Province: a case study in Kunshan City [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, **20**(1): 87-92.
- [20] Zhang Y, Cai Y, Wang C Q, *et al.* Characters and influencing factors of the distribution of cultivated available soil Fe, Mn, Cu and Zn in Xichang City, Sichuan Province, China [J]. *Journal of Geography and Geology*, 2012, **4**(2): 115-123.
- [21] Zhu H F, Hu W, Bi R, *et al.* Scale-and location-specific relationships between soil available micronutrients and environmental factors in the Fen River basin on the Chinese Loess Plateau [J]. *Catena*, 2016, **147**: 764-772.
- [22] Kumar S, Lal R, Liu D S. A geographically weighted regression kriging approach for mapping soil organic carbon stock [J]. *Geoderma*, 2012, **189-190**: 627-634.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [24] Qu M K, Li W D, Zhang C R, *et al.* Spatially nonstationary relationships between copper accumulation in rice grain and some related soil properties in paddy fields at a regional scale [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, **78**(5): 1765-1774.
- [25] 史舟, 李艳. 地统计学在土壤学中的应用[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [26] Lark R M, Webster R. Geostatistical mapping of geomorphic variables in the presence of trend [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2006, **31**(7): 862-874.
- [27] 瞿明凯, 李卫东, 张传荣, 等. 地理加权回归及其在土壤和环境科学上的应用前景[J]. *土壤*, 2014, **46**(1): 15-22.
- Qu M K, Li W D, Zhang C R, *et al.* Geographically weighted regression and its application prospect in soil and environmental sciences [J]. *Soils*, 2014, **46**(1): 15-22.
- [28] Tu J, Xia Z G. Examining spatially varying relationships between land use and water quality using geographically weighted regression I: model design and evaluation [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **407**(1): 358-378.
- [29] Fotheringham A S, Brunson C, Charlton M. Geographically weighted regression: the analysis of spatially varying relationships [M]. John Wiley & Sons, Chichester, UK. 2002.
- [30] 廖启林, 刘聪, 许艳, 等. 江苏省土壤元素地球化学基准值[J]. *中国地质*, 2011, **38**(5): 1363-1378.  
Liao Q L, Liu C, Xu Y, *et al.* Geochemical baseline values of elements in soil of Jiangsu Province [J]. *Geology in China*, 2011, **38**(5): 1363-1378.
- [31] GB 15618-1995, 中国环境土壤质量标准[S].
- [32] 徐丹, 刘昌华, 蔡太义, 等. 农田土壤有机质和全氮三维空间分布特征研究[J]. *农业机械学报*, 2015, **46**(12): 157-163.  
Xu D, Liu C H, Cai T Y, *et al.* 3D spatial distribution characteristics of soil organic matter and total nitrogen in farmland [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, **46**(12): 157-163.
- [33] Inaba S, Takenaka C. Changes in chemical species of copper added to brown forest soil in Japan [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2005, **162**(1-4): 285-293.
- [34] 李锦芬, 瞿明凯, 黄标, 等. 区域土壤 CEC 与相关控制因子的空间非平稳关系评估[J]. *土壤学报*, 2017, **54**(3): 639-647.  
Li J F, Qu M K, Huang B, *et al.* Spatially non-stationary relationships between cation exchange capacity and related control factors [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, **54**(3): 639-647.

## CONTENTS

|   |  |         |
|---|--|---------|
| Variation of O <sub>3</sub> Concentration in Different Regions of Beijing from 2006-2015  | WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, AN Xin-xin, <i>et al.</i>         | ( 1 )   |
| Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in the North Suburb of Nanjing   | XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i>                | ( 9 )   |
| Seasonal Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM <sub>10</sub> Around Electroplating Plants  | ZHAO Zhen-li, ZHAO Wei-tuo, HUANG Ting, <i>et al.</i>          | ( 18 )  |
| Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM <sub>10</sub> and PM <sub>2.5</sub> in Yulin City, Guangxi  | HUANG Jiong-li, CHEN Zhi-ming, MO Zhao-yu, <i>et al.</i>       | ( 27 )  |
| Concentrations and Compositions of Different Forms of Nitrogen and Phosphorus in Atmospheric Aerosols in the Qingdao Coastal Region and over the Yellow and Bohai Sea | ZHANG Rui-feng, QI Jian-hua, DING Xue, <i>et al.</i>           | ( 38 )  |
| Air Quality Subarea Management: A case study of Guangdong Province  | YANG Liu-lin, LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, <i>et al.</i>        | ( 49 )  |
| Remote Sensing Identification of Urban Black-Odor Water Bodies Based on High-Resolution Images; A Case Study in Nanjing   | WEN Shuang, WANG Qiao, LI Yun-mei, <i>et al.</i>               | ( 57 )  |
| Simulation of Nitrate Isotopic ( $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ ) by Coupling the Hydrology and Transport Processes Described by the SWAT Model      | WANG Kang, RAN Ning, LIN Zhong-bing, <i>et al.</i>             | ( 68 )  |
| Estimation of and Control Strategies for Pollution Loads from Non-point Sources in the Chenghai Watershed   | CHEN Xue-kai, LIU Xiao-bo, PENG Wen-qi, <i>et al.</i>          | ( 77 )  |
| Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metals in Drinking Water Sources from the Luhun Reservoir  | YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i>       | ( 89 )  |
| Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Antibiotics in the Water Supply System in Tianjin  | ZHANG Xin-bo, SONG Zi, ZHANG Dan, <i>et al.</i>                | ( 99 )  |
| Organic Distribution Characteristics and Influence on Drinking Water Quality in the Typical Water Sources for Towns in the Southwest Hilly Area of China              | WANG Qiong, LI Nai-wen, LI Lei, <i>et al.</i>                  | ( 109 ) |
| Health Risk Evaluation of Organochlorine and Organophosphorus Pesticides in Groundwater in Beijing  | CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i>        | ( 117 ) |
| Pollution Status and Risks of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in the Soil of the Yellow River   | YAO Hong, LU Shuang, ZHANG Xu, <i>et al.</i>                   | ( 123 ) |
| Effects of Flooding and Drying on the Transformation of Soil Inorganic Phosphorus in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir, China            | ZHOU Jian, LI Chun-hui, ZHANG Zhi-yong, <i>et al.</i>          | ( 130 ) |
| Effect of Phosphate on the Ammonium Removal Performance of Iron-Manganese Co-oxide Film in Surface Water Treatment  | ZHUO Rui-shuang, HUANG Ting-lin, ZHANG Rui-feng, <i>et al.</i> | ( 137 ) |
| Enhanced Photoelectrocatalytic Oxidation of Cu(CN) <sub>3</sub> <sup>2-</sup> and Synchronous Cathodic Deposition of Cu by Peroxydisulfate                            | DANG Cong-zhe, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i>         | ( 145 ) |
| Using HKUST-1 as a Template for Copper Oxides Preparation to Activate Peroxymonosulfate for RhB Degradation   | PU Jia-yi, WAN Jin-quan, WANG Yan, <i>et al.</i>               | ( 152 ) |
| Evaluation of Performance of an Aminated Rosin-based Resin for Adsorption of Norfloxacin from Aqueous Solutions   | MA Ya-hong, HUANG Wan-ting, DIAO Kai-sheng, <i>et al.</i>      | ( 161 ) |
| Arsenic(V) Removal by Granular Adsorbents Made from Backwashing Residuals from Biofilters for Iron and Manganese Removal  | ZENG Hui-ping, LÜ Sai-sai, YANG Hang, <i>et al.</i>            | ( 170 ) |
| Arsenic Adsorption and Its Species on Ferrihydrite and Ferrihydrite Colloid   | MA Yu-ling, MA Jie, CHEN Ya-li, <i>et al.</i>                  | ( 179 ) |
| Comparison of Amphoteric-Cationic and Amphoteric-Anionic Modified Magnetic Bentonites: Characterization and Sorption Capacity of Phenol                               | REN Shuang, MENG Zhao-fu, WANG Teng, <i>et al.</i>             | ( 187 ) |
| Pollution Characteristics of Parabens in Typical Sewage Wastewater  | ZHAO Xue, ZHANG Zi-feng, ZHU Fu-jie, <i>et al.</i>             | ( 195 ) |
| Influence of Hydraulic Retention Time on the Treatment of Polluted River Water by an Activated Carbon Rotating Biological Contactor                                   | XU Wen-jia, CHENG Xiao-ying, <i>et al.</i>                     | ( 202 ) |
| Removal and Influence of Ciprofloxacin in a Membrane Bioreactor   | DAI Qi, LIU Rui, SHU Xiao-ming, <i>et al.</i>                  | ( 212 ) |
| Operation of the AAO Process Under Low Dissolved Oxygen Conditions and Its Simulation   | CAO Te-te, WANG Lin, LI Yong-mei, <i>et al.</i>                | ( 219 ) |
| Inhibitory Effects of Phosphate and Recovery on a Nitrification System  | GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i>           | ( 227 ) |
| Effect of Carbon Source on Lab-scale SAD Process in a Wastewater Treatment Plant  | LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i>              | ( 232 ) |
| Effect of Volume Loading Rate (VLR) on Denitrifying Phosphorus Removal by the ABR-MBR Process   | LÜ Liang, YOU Wen, WEI Jia-min, <i>et al.</i>                  | ( 239 ) |
| Combined Process of DNBf-O <sub>3</sub> -GAC for Nitrogen and Phosphorus and Metabolite Advanced Removal  | ZHONG Li-yan, HAO Rui-xia, WANG Wei-dong, <i>et al.</i>        | ( 247 ) |
| Influence of Operating Modes for the Alternating Anoxic/Oxic Process on Biological Nitrogen Removal and Extracellular Polymeric Substances of Activated Sludge        | SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i>     | ( 256 ) |
| Effects of Nanoscale Zero-valent Iron (nZVI) on Denitrifying Performance of an Upflow Granular Sludge Bed Reactor   | ZHOU Feng, WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i>           | ( 263 ) |
| Influence on Desulfurization Efficiency and Interactions of Fe/S and pH During H <sub>2</sub> S in situ Depression of High Solid Anaerobic Digestion                  | HAN Yun, CAO Yu-qin, ZHUO Yang, <i>et al.</i>                  | ( 269 ) |
| Analysis of Storage Sludge Composition Characteristics and Evolutionary Regularity in the Hunhe River Basin   | LIU Tian-tian, CUI Chong-wei, HE Jun-guo, <i>et al.</i>        | ( 276 ) |
| Enhancement of Anaerobic Methane Production by Removal of Organic-bonding Metals from Sewage Sludge   | LU Yi-qing, XU Ying, DONG Bin, <i>et al.</i>                   | ( 284 ) |
| Comparison of Different Leaching Methods for Heavy Metals in Sludge Fly Ash and Comprehensive Toxicity Evaluation   | WANG Feng, LI Run-dong, LI Yan-long, <i>et al.</i>             | ( 292 ) |
| Diurnal Variations of CH <sub>4</sub> and N <sub>2</sub> O Fluxes from the Drained Aquaculture Pond in the Minjiang River Estuary During Early Winter                 | YANG Ping, TAN Li-shan, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i>          | ( 300 ) |
| Effects of Three Soil Amendments on Greenhouse Gas Emissions From Corn Fields in the Hetao Irrigation District  | WU Yan, HONG Mei, LIN Li-long, <i>et al.</i>                   | ( 310 ) |
| Effect of Organic Manure Substitution of Synthetic Nitrogen on Crop Yield and N <sub>2</sub> O Emission in the Winter Wheat-Summer Maize Rotation System              | HOU Miao-miao, LÜ Feng-lian, ZHANG Hong-tao, <i>et al.</i>     | ( 321 ) |
| Dynamics of Rice Photosynthesized Carbon Input and Its Response to Nitrogen Fertilization at the Jointing Stage: <sup>13</sup> C-CO <sub>2</sub> Pulse-labeling       | CHEN Shan, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i>          | ( 331 ) |
| Profile Distribution of Soil Organic and Inorganic Carbon Under Different Land Use Types in the Loess Plateau of Northern Shaanxi                                     | LAN Zhi-long, ZHAO Ying, ZHANG Jian-guo, <i>et al.</i>         | ( 339 ) |
| Effect of Biochar on Ammonia Volatilization from Soils of Different Surface Conditions  | ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i>            | ( 348 ) |
| Effects of Straw and Biochar Return in Soil on Soil Aggregate and Carbon Sequestration  | XU Guo-xin, WANG Zi-fang, GAO Ming, <i>et al.</i>              | ( 355 ) |
| Assessment of the Availability of Soil Copper and Related Influencing Factors at a County Scale   | LI Jin-fen, QU Ming-kai, LIU Gang, <i>et al.</i>               | ( 363 ) |
| Application of the LUR Model in the Prediction of Spatial Distributions of Soil Heavy Metals  | ZENG Jing-jing, SHEN Chun-zhu, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i>    | ( 371 ) |
| Pollution Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Shenyang North New Area  | LI Jia-kang, SONG Xue-ying, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>       | ( 379 ) |
| Passivation of Simulated Pb- and Cd-Contaminated Soil by Applying Combined Treatment of Phosphate, Humic Acid, and Fly Ash  | ZHAO Qing-yuan, LI Xiao-ming, YANG Qi, <i>et al.</i>           | ( 389 ) |
| Distribution and Accumulation of Cadmium in Paddy Soil and Rice Affected by Pollutant Sources Control and Improvement Measures  | FENG Wen-li, GUO Zhao-hui, SHI Lei, <i>et al.</i>              | ( 399 ) |
| Differences in Cd Accumulation in Typical Soils Under the Double Rice System  | LI Xin-yang, LONG Jian, WANG Shu-bing, <i>et al.</i>           | ( 406 ) |
| Distribution Characteristics of Mercury in Reed Leaves from the Jiapigou Gold Mine in the Songhua River Upstream  | ZHANG Man-yin, LI Meng-jie, CUI Li-juan, <i>et al.</i>         | ( 415 ) |
| Effect of Nitrate Amendment on Soil Denitrification Activity and Anthracene Anaerobic Degradation   | DAI Jun-shuai, ZUO Xiao-hu, WANG Ming-xia, <i>et al.</i>       | ( 422 ) |
| Effects of Long-term Fertilization Regimes on Microbial Biomass, Community Structure and Activity in a Paddy Soil   | WANG Wei-hua, LIU Yi, TANG Hai-ming, <i>et al.</i>             | ( 430 ) |
| Analysis of Sulfate-Reducing and Sulfur-Oxidizing Prokaryote Community Structures in Marine Sediments with Different Sequencing Technologies                          | ZHANG Yu, MI Tie-zhu, ZHEN Yu, <i>et al.</i>                   | ( 438 ) |
| Seasonal and Spatial Variations of Microcystins and Their Relationships with Physicochemical and Biological Factors in Poyang Lake                                    | YUAN Li-juan, LIAO Qie-gen, ZHANG Li, <i>et al.</i>            | ( 450 ) |
| Distribution of Multidrug-Resistant Bacteria and Antibiotic-Resistant Genes in Livestock Manures  | ZHANG Hao, WANG Pan-liang, YANG Qing-xiang, <i>et al.</i>      | ( 460 ) |
| Influence of Air Pollution Control (APC) Systems and Furnace Type on the Characteristics of APC Residues from Municipal Solid Waste Incinerators                      | ZHANG Hua, YU Si-yuan, SHAO Li-ming, <i>et al.</i>             | ( 467 ) |