

典型工矿区小流域土壤 pH 值空间分布特征及其影响因素

马泉来^{1,2}, 万小强^{1,2}, 杨延伟^{1,2}, 项鑫^{1,2}, 田鹏州^{1,2}, 鞠铁男³, 冯朝晖⁴

[1.河南省资源环境调查一院, 河南 郑州 450007;

2.河南省自然资源科技创新中心(资源环境承载力评价与监测预警研究), 河南 郑州 450007;

3.中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 4.济源市农业科学院, 河南 济源 459000]

摘要: [目的] 揭示南太行典型工矿区土壤 pH 值的空间分布规律及影响过程, 为该典型工矿区复杂环境下土壤环境质量评估及污染防治提供科学支撑。[方法] 以南太行典型工矿区蟒河小流域为研究区, 采集 121 个土壤表层(0—20 cm)样品和部分辅助样品, 综合应用 3S 技术、地统计学及地理探测器等模型方法, 对研究区土壤表层 pH 值空间分布特征及影响因素展开研究。[结果] 研究区土壤 pH 值范围在 6.40~8.53 之间, 均值为 7.82, 低于黄河流域河南段背景值(背景值为 8.46), 与其他时期相比, 土壤 pH 均值下降, 存在土壤酸化趋势。土壤 pH 值呈弱空间变异, 受地形等因素影响大, 当间隔距离小于 1 905 m 时, 空间分布连续, 具有较强空间自相关性。基于经验贝叶斯克里金的土壤 pH 值空间插值效果更优, 土壤 pH 值空间上呈梯度分布, 由中西部向东北和南部递增。低值区主要在中部和西部的河谷及山前平原地带; 单个因子对 pH 值解释力不明显, 坡向、土地利用等叠加其他因子后对流域内土壤 pH 值空间分布解释程度显著增强。[结论] 自然条件及人类活动等多要素叠加作用是区域土壤 pH 值空间分布的主要驱动因素, 也是区域土壤环境评估与污染修复重点关注的内容。

关键词: 小流域; 土壤; pH 值; 空间分布; 影响因素; 典型工矿区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)04-0352-10

中图分类号: X87

文献参数: 马泉来, 万小强, 杨延伟, 等. 典型工矿区小流域土壤 pH 值空间分布特征及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2024, 44(4): 352-361. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.04.036; Ma Quanlai, Wan Xiaoqiang, Yangyan Wei, et al. Spatial distribution characteristics and factors influencing soil pH values in small watershed in typical industrial and mining area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(4): 352-361.

Spatial Distribution Characteristics and Factors Influencing Soil pH Values in Small Watershed in Typical Industrial and Mining Area

Ma Quanlai^{1,2}, Wan Xiaoqiang^{1,2}, Yangyan Wei^{1,2},

Xiang Xin^{1,2}, Tian Pengzhou^{1,2}, Ju Tienan³, Feng Zhaohui⁴

[1. The First Institute of Resources and Environment Investigation of Henan Province,

Zhengzhou, Henan 450007, China; 2. Science and Technology Innovation Centre of Nature

Resources of Henan Provinces (Evaluation Monitoring and Early Warning of Resource Environmental

Bearing Capacity), Zhengzhou, Henan 450007, China; 3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources

Research, CAS, Beijing 100101, China; 4. Jiyuan Academy of Agricultural Science, Jiyuan, Henan 459000, China]

Abstract: [Objective] The spatial distribution patterns and influencing processes of soil pH value in typical industrial and mining areas in the Southern Taihang Mountains were analyzed, to provide scientific support for soil environmental quality assessments and pollution prevention strategies in the complex environment of

收稿日期: 2024-03-06

修回日期: 2024-04-26

资助项目: 河南省科技攻关项目“南太行典型区土壤重金属污染空间异质性格局及其驱动机制研究”(232102321037); 国家自然科学基金项目“结合企业产排污动态变化的农用地 Cd 累积精准预测研究: 以河南省为例”(42307575); 河南省高等学校重点科研项目计划“生态文明建设背景下河南沿黄粮食主产区高质量发展研究”(24A630025)

第一作者: 马泉来(1992—), 男(汉族), 河南省禹州市人, 硕士, 工程师, 主要从事土壤环境质量评价方面的研究。Email: maquanlai0716@163.com.

通信作者: 万小强(1976—), 男(汉族), 河南省新郑市人, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事自然资源调查与评价研究。Email: chengzai-li6011@163.com.

this area, comprising typical industrial and mining activities. [Methods] Studying the Manghe watershed in industrial and mining areas of the Southern Taihang Mountains, 121 topsoil (0—20 cm) and auxiliary samples were collected. “3S” technology, geostatistics, geographical detectors, and other model methods were comprehensively applied to study the spatial distribution characteristics and factors influencing topsoil pH value in the research area. [Results] The soil pH value in the study area ranged from 6.40 to 8.53, with a mean value of 7.82, which was lower than the background value of the Henan section of the Yellow River basin (8.46). Compared with previous studies, the average soil pH value decreased, indicating a trend of soil acidification. Soil pH value showed weak spatial variation and was significantly influenced by factors such as terrain. When the interval distance between sites was less than 1 905 m, the spatial distribution was continuous and exhibited strong spatial autocorrelation. The spatial interpolation effect of soil pH value based on empirical Bayesian Kriging was better, and the spatial distribution of soil pH value showed an increasing gradient from the central and western regions to the northeast and south. Low-value areas were mainly located in the valleys and piedmont plains in the central and western regions. The explanatory power of individual factors on pH value was unclear; however, the superposition of slope direction, land use, and other factors significantly enhanced the explanation of the spatial distribution of soil pH value in the watershed. [Conclusion] The superposition of multiple factors, such as natural conditions and human activities, were the main drivers explaining the spatial distribution of regional soil pH value and should be the focus of regional soil environmental assessments and pollution remediation efforts.

Keywords: small watershed; soils; pH value; spatial distribution; influencing factors; typical industrial and mining areas

土壤是人类赖以生存的自然资源,是地球陆地生态系统的重要组成部分,土壤环境质量状况直接关系到农业生产的可持续性,土壤生态系统的稳定与健康等诸多问题^[1-3]。中国十分重视土壤环境质量及污染问题,并采取了系列举措开展土壤环境污染及修复治理,进一步保障土壤生态环境安全与人民身体健康^[4-5]。有关土壤环境质量、影响机制及修复保护的相关研究已经成为土壤、环境等学科领域研究的重点问题^[6-7]。

当前,许多学者^[8-10]对土壤理化性质、重金属污染及修复治理做了大量研究,为区域土壤改良及污染修复提供了科学支撑。土壤pH值是表征土壤酸碱程度等环境特征的重要指示性指标,也是农业生产、耕地保护利用、重金属污染治理等关注的重点内容^[11-12]。特别是针对高地质背景区、工矿业集聚区、土壤酸化以及不同种植模式下等区域的土壤pH值空间分布及变化特征研究,对地方采取工程措施缓解土壤酸化,改善土壤环境质量以及开展重金属污染修复治理等实际工作具有重大的实践指导价值^[9,13-15]。本研究区地处黄河北岸、太行山南麓,矿山开采、钢铁加工等历史悠久,有色金属冶炼、煤炭焦化、化工制造等产业快速发展,属于典型工矿集聚区,工矿业发展所带来的土壤环境恶化及重金属污染等问题已经引起社会广泛关注^[16-17]。同时,研究^[18-19]表明以流域为单元开展土壤理化指标研究更能有效揭示其空间

分布规律以及自然地理、人类活动等因素的影响过程。综合以上原因,开展典型工矿区蟒河小流域土壤pH值空间分异规律及影响因素研究意义重大,一方面可以准确掌握典型工矿区土壤环境质量现状并指导开展土壤环境质量保护与修复治理等实践工作,另一方面进一步丰富以流域为单元的相关研究内容,提高典型区环境治理与污染防控的科学性。为此,本研究在充分调研与采样分析的基础上,基于“3S”技术,应用经典统计学、地统计学及地理探测器等模型方法对典型工矿区蟒河小流域受人类活动影响大的土壤表层(0—20 cm)pH值空间分布及其影响因素展开研究,以揭示研究区土壤表层pH值空间分异规律特征,量化地形地貌等自然因素以及工矿企业分布等生产活动对土壤pH值空间分布的作用程度,识别主要影响因子,为研究区土壤环境质量改善与污染管控修复提供精准支撑。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区蟒河小流域位于河南省西北部,黄河北岸、太行山南麓,行政区划以济源市的承留、思礼和克井3个镇的70余个行政村为主,总人口约15万人,地理坐标为112°23′37″—112°33′2″E,35°3′4″—35°9′40″N,总面积约112.82 km²(图1)。研究区海拔高度149~745 m,地形地貌变化大,由西部低山丘陵向东部平

原过渡,地表植被类型多样,兼具工业、农业、林业相互交错的典型特征,土壤类型主要为潮土和褐土,类型较为单一。研究区气候类型为温带大陆性季风气候,四季分明,年均气温 14.5℃,年均降水量 567.9 mm,受特殊地形地貌特征影响,研究区地面风常年以西风和西北风为主。研究区一、二、三产业发展迅速,区域内有色金属冶炼和压延加工、煤炭焦化及矿山开采等工矿活动频繁,是河南省重要的有色金属冶炼基地,属典型工矿集中分布区,东部平原区是传统农业发展区,农业生产活动强度大且分布广,对研究区资源开发利用及生态环境影响显著。特别是近年来,研究区铅、锌等金属冶炼加工、煤炭焦化以及钢铁冶炼等产量持续增加,由此带来的大气、土壤等环境问题得到越来越多的关注。

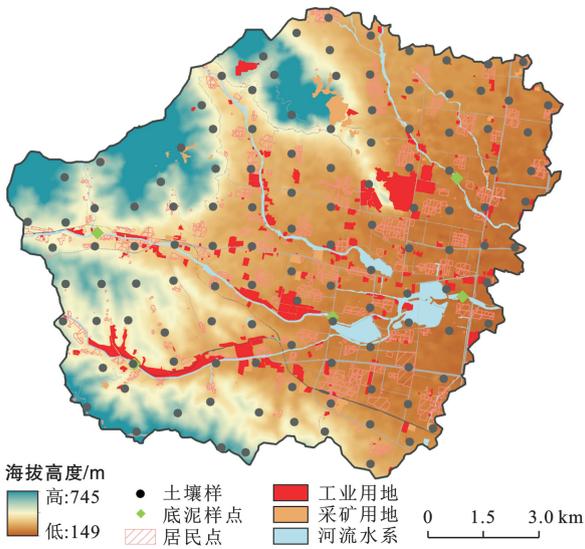


图 1 研究区地理位置及采样点分布示意图

Fig.1 Geography location for study area and distribution of sampling sites

1.2 数据采集及处理

1.2.1 样点布设与采集 基于优于 1 m 分辨率的卫星遥感影像及自然资源部门土地利用调查数据,按照 1 km×1 km 的网格在流域内进行采样点的室内预布设,同时结合地形地貌、交通水系、土地利用、居民点、工矿企业等基础资料以及外业调查情况进行采样点的优化调整,最终共布设 121 个土壤采样点和 15 个辅助采样点(本研究仅对 5 个底泥辅助样点进行 pH 值的测试与分析)。分别于 2 023 年的 1 月和 3 月分批次进行底泥(5 个)辅助样点和 121 个土壤表层样点的样品采集工作。外业采样通过手持 GPS 进行空间定位,尽可能与室内预布设的点位保持一致,其中,底泥样选取人为干扰小且水流特征明显的区域,按照梅花采样法等距离等量采集表层样品 5 份并

混合,取约 1 kg 带回实验室处理。土壤样品按照梅花采样点等距离采集土壤表层(0—20 cm)样品 5 份混合,用“四分法”取混合均匀的样品约 1 kg,留足试验用量,同时填写采样点属性信息表,用以记录采样点周边环境特征,采样完成后将土壤样品待会实验室处理。

1.2.2 样品测试与处理 土壤样品经实验室风干处理后,用木棒研碎,取过 0.25 mm 尼龙筛的土样 100 g,采用玻璃电极法测定 pH 值,每个样品重复 3 次后取平均值,辅助样点采用同样方法测定分析。采用格拉布斯(Grubbs)法对测试数据进行异常值的识别,剔除部分异常数据,最终保留 116 个土壤样品数据和 5 个底泥辅助样点数据。

1.3 研究方法

采用 SPSS 19.0 软件对土壤样点 pH 值开展极值、均值、标准差、变异系数以及 K-S 检验等经典统计学基础分析,并在此基础上采用以下模型方法进行深入研究分析。

1.3.1 地统计学模型 地统计学模型是自然地理要素空间结构研究领域广泛应用的模型方法^[20-21]。本研究主要采用地统计学模型中的半方差函数模型和空间插值模型分别对研究区土壤表层 pH 值的空间变异规律及分布特征展开分析。半方差函数模型计算公式为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2 \quad (1)$$

式中: $\gamma(h)$ 为半方差函数模型; $N(h)$ 为分割距离为 h 时的样本点总数; $Z(x_i)$ 为在空间位置 x_i 处样点实测值; $Z(x_i+h)$ 为距离 x_i 处 h 远的样点实测值。

当前针对自然地理要素的空间插值方法较多,不同区域或者不同插值对象所采用的空间插值方法也具有一定的适用性^[21]。普通克里金插值法是适用范围最广也最为经典的插值方法,在诸多领域均有应用,同时基于普通克里金插值所衍生出来的 BP 神经网络、经验贝叶斯等系列插值在复杂环境下自然地理要素空间插值方面也取得不错效果,从而进一步得到推广与应用^[22-24]。本研究基于普通克里金空间插值法对研究区土壤表层 pH 值含量进行空间分布插值的同时,也采用基于经验贝叶斯克里金插值法(Empirical Bayesian Kriging, EBK)对研究区土壤表层 pH 值做空间分布插值预测研究,在比较 pH 值空间插值精度的同时,也进一步探索不同插值模型在该区域背景下的适用性和可推广性。

1.3.2 地理探测器模型 土壤理化性质受区域成土母质影响较大,同时受人类活动的干扰也变得愈加显

著,掌握不同要素对土壤理化性质演变的影响机制与过程对区域土壤环境保护与可持续利用意义重大^[25-26]。地理探测器是定量研究自然地理要素演变及其影响因素的统计学方法,通过计算各自变量方差之和与因变量方差之和的比值来量化自变量对因变量的影响程度^[3,27-28]。本研究主要采用地理探测器中的因子探测和交互探测,识别研究区影响土壤 pH 值空间分布的关键因子,因子探测器计算公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (2)$$

式中: q 为某探测因子对土壤 pH 值的影响程度,取值范围为 $[0, 1]$, q 值越大表示因子影响程度越大;

σ_h^2, σ^2 分别为分层 h 和全局土壤 pH 值方差; h 为分层数($h=1, 2 \dots L$); N_h, N 分别为分层 h 样点数和总样点数。

交互作用探测器:通过识别不同影响因子交互作用时的 q 值,来判断影响因子之间的交互作用对土壤 pH 值空间分布的影响程度是增加、减弱或者相互独立。

梳理研究区已有工作基础并参照相关研究成果^[11-14,25-28],本研究采用因子探测和交互探测分别研究地形坡度等自然因素以及工矿业分布等人类生产活动共 15 个因子对土壤 pH 值空间分布的影响程度及交互作用,并对各影响因子做预分级处理(表 1)。

表 1 各影响因子及分级依据

Table 1 Impact factors and grading criteria

影响因子	分级及依据
高程(X_1)	依据自然间断点分级法:低(1):149~236 m;中(2):236~344 m;高(3):>344 m
坡度(X_2)	依据常用坡度分级标准:缓坡(1): $0^\circ \sim 5^\circ$;中坡(2): $5^\circ \sim 15^\circ$;陡坡(3): $> 15^\circ$
坡向(X_3)	按照方位分类:阴坡(1):北($337.5^\circ \sim 22.5^\circ$)、东北($22.5^\circ \sim 67.5^\circ$);半阴坡(2):东($67.5^\circ \sim 112.5^\circ$)、西北($292.5^\circ \sim 337.5^\circ$);半阳坡(3):东南($112.5^\circ \sim 157.5^\circ$)、西($247.5^\circ \sim 292.5^\circ$);阳坡(4):南($157.5^\circ \sim 202.5^\circ$)、西南($202.5^\circ \sim 247.5^\circ$)
地质类型(X_4)	根据地质类别:(1)黏性、砂性等松散岩土类;(2)坚硬厚层灰岩、白云岩;(3)坚硬厚层砂岩、石英岩;(4)较坚硬的中厚层砂岩、泥岩、泥灰岩
土地利用(X_5)	土地利用类型分类:(1)小麦、(2)菜地、(3)乔木林地、(4)灌木林地、(5)果园
距矿山用地距离(X_6)	依据自然间断点分级法:(1)0~720 m;(2)720~1 608 m;(3):1 608~3 553 m
距工业用地距离(X_7)	依据自然间断点分级法:(1)48.38~414 m;(2)414~918 m;(3):918~2 034.35 m
距居民点距离(X_8)	依据自然间断点分级法:(1)0~246.70 m;(2)246.70~598.45 m;(3):598.45~1 209.55 m
距交通干道距离(X_9)	依据自然间断点分级法:(1)0~282.11 m;(2)282.11~692.72 m;(3):692.72~1 784.24 m
距水系距离(X_{10})	依据自然间断点分级法:(1)48~505 m;(2)505~1 190 m;(3):1 190~2 234 m
汞 Hg(X_{11})	根据自然间断点分级法:(1)0.00~0.15;(2)0.15~0.67;(3):0.67~2.54
镉 Cd(X_{12})	根据自然间断点分级法:(1)0.55~4.69;(2)4.69~16.16;(3):16.16~115.00
铬 Cr(X_{13})	根据自然间断点分级法:(1)21.18~48.07;(2)48.07~59.67;(3):59.67~87.03
砷 As(X_{14})	根据自然间断点分级法:(1)0.30~24.29;(2)24.29~43.63;(3):43.63~98.24
铅 Pb(X_{15})	根据自然间断点分级法:(1)0.00~158.64;(2)158.64~447.88;(3):447.88~923.70

以上半方差函数及理论模型的拟合等计算过程均采用地统计学软件 GS⁺ 9.0 进行,空间插值、因子提取、地质类型矢量化及地理探测等过程主要借助 ArcGIS 10.0 平台和 Geodetector 软件,相关绘图在 Origin 9.0 软件中完成。

2 结果与分析

2.1 土壤 pH 值描述性统计分析

应用 SPSS 19.0 对 116 个样点数据进行描述性统计分析。结果表明研究区土壤 pH 值在 6.40~8.53 之间,平均值为 7.82,略高于河南省均值(全省均值 7.72),低于黄河流域河南段背景值(背景值为

8.46)^[29-30],按照第二次土壤普查分级标准^[11],研究区大部分土壤样点 pH 表现为中性和弱碱性。不同时期对比,研究区 pH 的均值仍呈下降趋势,这一点与河南省已有研究相一致^[30],因此,研究区土壤酸化问题应引起各方重视,开展土壤 pH 值空间分布特征及其影响因素研究具有重大现实意义。变异系数(coefficient variation, C_v)反映了指标参数的变异程度,常用于揭示区域化变量的离散程度,土壤 pH 值的 C_v 为 5.67%,按照一般的 C_v 评价标准(当 $C_v < 10.00\%$ 时,为弱变异程度,当 $10.00\% \leq C_v < 100.00\%$ 时,为中等变异程度,当 $C_v \geq 100.00\%$ 时,为强变异程度)^[18],研究区土壤 pH 值空间变异程度为弱变异

程度,空间变异特征不显著。同时,对 116 个土壤样品数据计算偏度和峰值,并进行 $K-S$ 检验,用于验证样品数据是否满足正态分布。土壤样品数据偏度值与峰度值分别为 -1.411 和 2.196 , $K-S$ 检验 p 值为 0.061 ,样点数据服从正态分布,满足地统计学研究需要。

2.2 土壤 pH 值空间分异特征分析

借助 GS+9.0 平台对研究区土壤 pH 值进行地统计学分析,得到研究区各向同性条件下的半方差函数模型(图 2a)及其拟合参数。研究区土壤 pH 值半方差函数拟合符合高斯(Gaussian)模型,决定系数(R^2)为 0.860 ,拟合残差为 5.909×10^{-3} ,拟合效果较好,块金值(C_0)和基台值($C_0 + C$)分别为 0.001 , 0.2020 ,变程为 1905 m,半方差函数拟合结果可以有效反映研究区土壤 pH 值的空间结构特征^[20-21]。一般研究认为土壤理化性质变化受随机性和结构性两种因子的影响较大^[3,10-11]。半方差函数模型中的块金值(C_0)常用来表示当前采样尺度下随机性影响因子对土壤理化性质空间分异规律的影响程度,基台值($C_0 + C$)则反映土壤理化性质的总变异程度^[10-11]。研究区块金值(C_0)和基台值($C_0 + C$)分别为 0.001 ,

0.2020 , $C/(C_0 + C)$ 为 0.995 ,表明当前采样尺度下研究区土壤 pH 值空间变异受地形、流域背景等结构性因子主导。变程常用于表征相似图斑空间上的连续范围,变程内具有较强的空间自相关性,反之则不存在。研究区土壤 pH 值变程为 1905 m,表明在此尺度范围内土壤 pH 值空间分布连续,具有空间自相关性。研究区地形地貌复杂、人类活动对土壤环境影响大。为更好揭示研究区土壤 pH 值空间分异特征,对研究区土壤 pH 值做各向异性分析,分别绘制 0° (南—北), 45° (东北—西南), 90° (东—西)和 135° (东南—西北)4 个方向上的半方差函数图(图 2b)。可以看出,研究区土壤 pH 值在各方向上呈现不同程度的变异特征,当间隔距离小于 2500 m 时,南—北方向上的变异占据主导地位,其他方向较为连续。随着间隔距离的增加, 0° (南—北)方向上变异函数值未发生较大变化,而 45° (东北—西南), 90° (东—西)和 135° (东南—西北)方向上的变异函数值呈增加趋势,当间隔距离等于 6000 m 时,各向变异逐步趋于统一。总的来说,随空间尺度增加,研究区土壤 pH 值空间变异表现为由小尺度的南—北(0°)方向为主导,向各向趋同的特征变化。

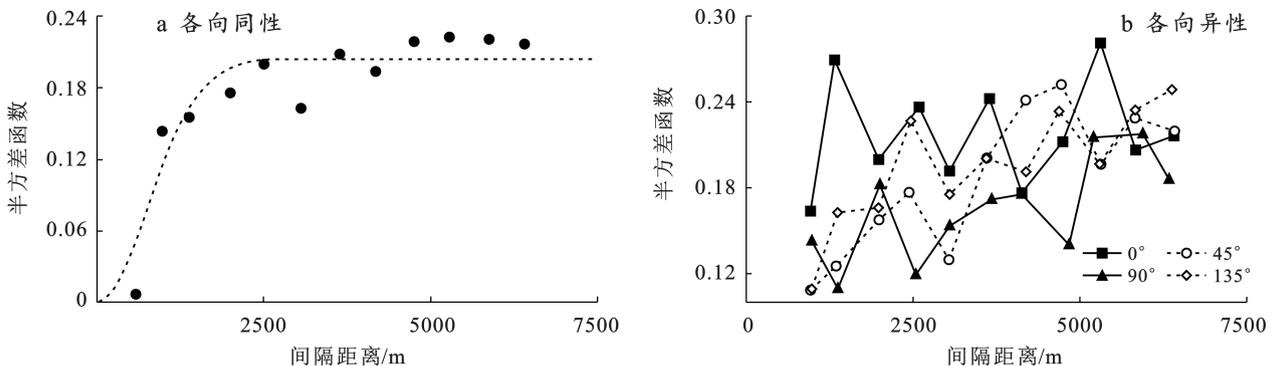


图 2 土壤 pH 值各向同性和各向异性半方差函数

Fig.2 Isotropic and anisotropic semi-variance function of soil pH value

基于半方差函数模型分析,采用普通克里金插值和经验贝叶斯克里金插值法分别得到研究区土壤 pH 值空间分布图,并采用交叉验证参数评价插值精度(图 3)。结果表明两种不同插值结果的标准平均值(MS)分别为 0.0404 和 0.00026 ,标准均方根预测误差(RMSSE)分别为 0.9755 和 0.9988 ,基于经验贝叶斯克里金的空间插值效果优于普通克里金插值法,能够准确反映该流域范围内土壤 pH 值空间分布特征。从图 3 可以看出,两种插值方法得到的研究区土壤 pH 值空间分布特征总体趋近,梯度效应显著。基于普通克里金插值的土壤 pH 值空间分布的平滑效

应十分明显,pH 值的范围主要在 $7.35 \sim 8.25$ 之间,与样点统计分析存在较大出入,难以准确反映研究区 pH 值的分布范围。基于经验贝叶斯克里金插值的土壤 pH 值空间分布局部特征明显,pH 值的范围在 $7.25 \sim 8.25$ 之间,区域南部小范围 pH 值大于 8.25 ,该结果与样点测试结果在空间上的分布更为接近,即呈现由中西部向东北和南部递增趋势。整体上,研究区土壤 pH 值空间分布的异质性特征较为显著,且与区域地形特征存在较大吻合,这一点与上文半方差函数模型分析一致。基于经验贝叶斯克里金插值的土壤 pH 值空间分布图更能精准表征区域土壤 pH 值空间

变异特征,从图 3 可知,研究区土壤 pH 值整体低于区域背景值,个别区域酸化问题突出。低值区主要分布在中部和西部的河谷地带,该区域南北两侧海拔较高,地表覆盖以林草为主,中部为河谷,农业生产活动、金属冶炼等工矿企业沿河流两岸集中连片分布,对区域土壤环境产生较大影响,也是研究区土壤环境监测和重点关注的区域。高值区则主要分布在研究区东北部的农业主产区和南部的低山丘陵地带,地表

覆盖等影响较为稳定,土壤环境受外部干扰较为单一。结合实地调研情况,土壤 pH 低值区也是区域金属冶炼、工业企业等生产活动分布区,表明研究区地形等结构性因子对土壤 pH 值影响的同时,工矿企业分布等生产活动对流域内土壤 pH 值空间分布特征的影响也存在较为明显的干扰,进一步揭示研究区土壤 pH 值以及重金属空间分布的外部环境较以往研究更具交错复杂性和区域典型性。

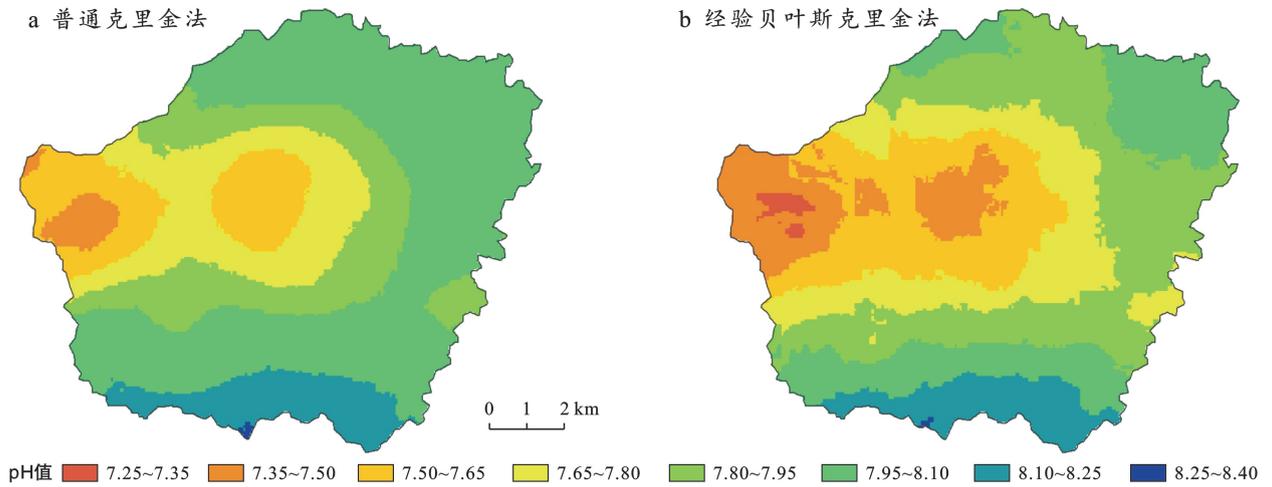


图 3 不同空间插值方法下土壤 pH 值空间分布特征

Fig.3 Distribution of soil pH value in different spatial interpolation models

2.3 土壤 pH 值空间分布影响因素分析

大量研究表明地形地貌、成图母质等因素对区域 pH 值等理化指标特征起主要作用,同时农业生产、金属冶炼等活动也与土壤环境变化密切相关。因此,本研究基于地理探测器模型和辅助样品测试结果对地形地貌、土地利用、工矿企业以及重金属含量等 15 个指标进行土壤 pH 值分布的影响因素分析。

2.3.1 因子探测 本研究将 15 个指标因子作为因变量,利用因子探测器探测 15 个因子对土壤 pH 值分布的影响力(表 2)。

由表 2 可以看出,不同类型影响因子对研究区土壤 pH 值空间分布均存在一定的独立解释力,其中土地利用(X_5)、距离水系距离(X_{10})、铬 Cr(X_{13})和坡向(X_3)等因素对土壤 pH 值分布有较强解释力, q 值分别达到 0.075 6,0.062 9,0.061 1 和 0.043 2,但未达到显著性水平。结合已有研究成果^[16-17],考虑到研究区地形变化复杂以及工矿业生产等现实情况,认为仍需深入开展不同尺度或模型下的研究区土壤 pH 值空间分布的多因素交叉研究,以准确掌握研究区土壤理化特征演变机制过程。

表 2 不同因子对土壤 pH 值空间分布的解释力 q 值

Table 2 Interpretation q of spatial distribution of soil pH value by different factors

高程(X_1)	坡度(X_2)	坡向(X_3)	地质类型(X_4)	土地利用(X_5)
0.015 1	0.028 2	0.043 2	0.025 9	0.075 6
距矿山距离(X_6)	距工业距离(X_7)	距居民点距离(X_8)	距交通距离(X_9)	距水系距离(X_{10})
0.011 4	0.040 3	0.022 2	0.024 1	0.062 9
汞 Hg(X_{11})	镉 Cd(X_{12})	铬 Cr(X_{13})	砷 As(X_{14})	铅 Pb(X_{15})
0.001 3	0.037 2	0.061 1	0.047 7	0.027 3

2.3.2 交互作用探测 土壤理化性质变化及空间分布受自然条件、人类活动干扰的等多种要素及过程的独立或交叉作用影响^[3,11-12]。本研究在因子探测分析

的基础上,进一步采用交互作用探测器分析 15 种因子对蟒河小流域土壤 pH 值空间分布的交互影响程度,从而精准判断复杂环境下土壤 pH 值空间分布的

影响过程(图 4)。从图 4 可以看出,蟒河小流域任意两种因子的交互作用对土壤 pH 值影响的解释程度均高于单个因子的解释程度,其中坡向(X_3)与铬(X_{13})、土地利用(X_5)与距交通距离(X_9)、距水系距离(X_{10})与砷(X_{14})等因子组合对研究区土壤 pH 值的交叉影响作用更为显著。整体来看,坡向(X_3)、土地利用(X_5)、铬 Cr(X_{13})以及砷(X_{14})等因子同其他因子的交互作用表现均比较突出,也说明了自然地理和土地利用等人类活动对土壤 pH 值空间分布影响的主导作用,而研究区土壤重金属含量又与区域内矿产开采以及有色金属冶炼等活动密切相关,不同因子叠加后,其相关性也大大增加,相关影响机制研究也变得更加复杂,该结论也表明未来开展区域土壤重金属空间分布及来源解析的现实必要性。

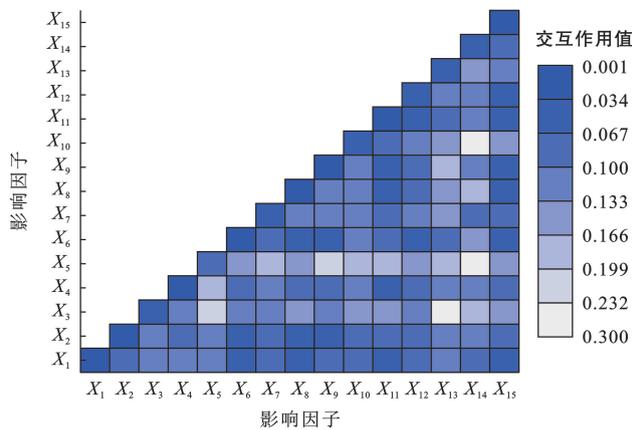


图 4 不同影响因子对土壤 pH 值影响的交互作用

Fig.4 Interaction of different influence factors on pH value in soil

2.3.3 其他分析 本研究于不同时间节点(2023 年 1 月)采集河流底泥样品 5 个(相关点位分布如图 1 所示),用于研究区土壤 pH 值影响因子的辅助性探索研究,底泥样品测试结果显示:最高值出现在西南部河谷地带,pH 值为 8.71,河流穿过采矿区和有色金属冶炼集中分布区后,在下游水库入口处采集底泥样点 pH 值为 8.08,下游河流底泥 pH 值低于上游,结合研究区特殊地形及常年风向,即研究区“马蹄形”特殊地形导致研究区春、秋、冬季地面风常年以西风和西北风为主,有色金属加工冶炼等粉尘随大气沉降过程在下游累积,对流域土壤 pH 值空间分布格局产生影响,即研究区土壤 pH 受地形变化及人类活动叠加作用影响。为进一步阐述流域内土壤 pH 值与各自然以及人为因子的相关性,利用 SPSS 19.0 对土壤 pH 值与地形、人类活动以及重金属指标做相关性分析,结果表明研究区土壤 pH 值与高程、坡度、距离矿山距离、砷、铅等要素存在较显著的负相关性,相关性

系数分别为 -0.192 、 -0.194 、 -0.214 、 -0.217 和 -0.194 ,其他指标相关性较弱。该结果也证明了研究区土壤 pH 值空间分布与地形地貌以及矿产开采等因素密切相关,同时砷、铅含量与 pH 值显著负相关。

3 讨论

土壤酸化、盐碱化等问题研究一直是土壤学以及农业科学等领域研究的重点,关乎土壤生态系统健康及粮食生产安全等重大问题。开展土壤 pH 值空间分布特征及影响因素研究对区域农业生产、土壤环境质量改善意义重大。学者围绕农田 pH 值变化及土壤酸化成因做了大量研究,并明确了酸雨、土地利用以及过量的氮肥投入均会造成或加剧土壤酸化问题^[11-12]。同时,研究表明土壤 pH 值的变化也会影响土壤微生物活性并改变土壤中重金属赋存状态,使得土壤中重金属含量超标,从而加剧重金属污染等问题^[13-14],如土壤 pH 值下降会降低表层土壤对镉、汞等重金属离子的吸附作用,从而加速重金属迁移及污染风险^[31-32],因此,加强典型工矿集中区土壤 pH 值等环境指标研究对开展区域生态环境保护与修复治理显得十分必要。研究区位于太行山南麓典型工矿集中布区,区域内矿山开采、煤炭焦化、有色金属冶炼历史悠久,针对土壤环境保护及重金属污染修复等内容开展了大量工作。本研究结合实地调查及土壤样品采集测试等过程,对工矿集中分布区土壤 pH 值空间特征开展了研究,研究区 pH 均值为 7.82,高于张驭航等人相关研究中河南省的历史平均值(均值 7.72),但远低于盛奇等^[29]黄河流域河南段相关研究中的背景值(背景值为 8.46),表明研究区范围内存在土壤酸化的趋势,同时需要结合区域产业发展加强时间序列上的持续监测,以准确揭示区域土壤环境质量变化特征。研究区土壤 pH 值空间分布受地形、土地利用等多因素叠加影响,与砷、铅等重金属存在相关性,在实地调研过程中,研究区还存在大量畜禽养殖活动,也对区域土壤 pH 值产生一定影响。研究区工矿企业分布集中、类型复杂,在此背景下,结合研究区工矿企业类型及布局,量化研究复杂环境下研究区土壤 pH 值及相关重金属空间分布与影响过程,明确主要影响因子及作用程度具有较强的现实必要性,可以进一步提高土壤污染源监测与管控精准性,进而推动区域产业布局优化调整。该研究揭示了南太行典型工矿集中区土壤环境的复杂性及其代表性,为进一步丰富工矿集中区土壤环境问题研究、创新污染治理方法提供更多实践参考。同时,土壤属性数字制图技术及其应用一直是地学领域研究的热点,从现有研究来

看,不同制图模型均存在适应性不足的问题,本研究采用的基于经验贝叶斯克里金插值法在研究区取得了较好的结果,但在不同区域条件下的应用尚需验证,特别是随着影响因素的增加以及新模型的出现,借助更高精度外部环境数据的土壤数字制图仍有很大的提升空间,也是未来研究的一个重要方向。

4 结论

(1) 蟒河小流域土壤 pH 值范围在 6.40~8.53 之间,平均值为 7.82,与不同时期研究成果对比,研究区土壤 pH 均值有所下降,存在土壤酸化趋势。土壤 pH 值空间变异程度为弱变异程度,空间变异受区域地形、坡向等结构性因子影响较大,随空间尺度增加,土壤 pH 值空间变异由南—北(0°)方向主导,逐步演变为向各向趋同特征。

(2) 基于经验贝叶斯克里金的土壤 pH 值空间插值精度更高,能够准确反映流域内土壤 pH 值空间分布特征。研究区土壤 pH 值空间分布梯度效应明显,由中西部向东北和南部递增,低值区主要在研究区中部和西部的河谷和山前平原地带,也是人类活动集中分布区,是土壤环境监测和重点关注的区域。

(3) 土壤 pH 值空间分布受特殊地形、坡度、矿山等因子影响较大,单个因子对 pH 值解释力不显著,坡向、土地利用等叠加其他因子后对流域内土壤 pH 值空间分布解释程度明显增强,强化地形地貌等自然条件叠加人类生产活动等多要素复杂环境下土壤环境质量问题是未来土壤环境评估与污染修复的重要内容。

参考文献 (References)

- [1] 张桃林. 科学认识和防治耕地土壤重金属污染[J]. 土壤, 2015, 47(3): 435-439.
Zhang Taolin. More comprehensive understanding and effective control of heavy metal pollution of cultivated soils in China [J]. Soils, 2015, 47(3): 435-439.
- [2] 陈卫平, 杨阳, 谢天, 等. 中国农田土壤重金属污染防治挑战与对策[J]. 土壤学报, 2018, 55(2): 261-272.
Chen Weiping, Yang Yang, Xie Tian, et al. Challenges and countermeasures for heavy metal pollution control in farmlands of China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(2): 261-272.
- [3] 马泉来, 万小强, 杨崇科, 等. 南太行典型区小流域土壤铅含量空间分异及影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2023, 39(18): 226-233.
Ma Quanlai, Wan Xiaoqiang, Yang Chongke, et al. Spatial differentiation and influencing factors analysis of Pb in soils in the small watershed of typical area in the Southern Taihang Mountains [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(18): 226-233.
- [4] 中共中央国务院关于深入打好污染防治攻坚战的意见[R]. (2021-11-07)[2021-11-07]. http://www.gov.cn/zhengce/2021-11/07/content_5649656.htm.
Opinions of the Central Committee of the Communist Party of China and the State Council on Deepening the battle of pollution prevention and control [R]. (2021-11-07)[2021-11-07]. http://www.gov.cn/zhengce/2021-11/07/content_5649656.htm
- [5] 中华人民共和国生态环境部关于进一步加强重金属污染防治的意见[R]. (2022-03-07)[2022-03-07]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/202203/t20220315_971552.html.
Opinions of the Ministry of ecology and environment of the People's Republic of China on further strengthening the Prevention and control of heavy metal pollution [R]. (2022-03-07)[2022-03-07]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/202203/t20220315_971552.html
- [6] 沈仁芳, 颜晓元, 张甘霖, 等. 新时期中国土壤科学发展现状与战略思考[J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1051-1059.
Shen Renfang, Yan Xiaoyuan, Zhang Ganlin, et al. Status quo of and strategic thinking for the development of soil science in China in the new era [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(5): 1051-1059.
- [7] 胡文友, 陶婷婷, 田康, 等. 中国农田土壤环境质量管理现状与展望[J]. 土壤学报, 2021, 58(5): 1094-1109.
Hu Wenyu, Tao Tingting, Tian Kang, et al. Status and prospect of farmland soil environmental quality management in China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(5): 1094-1109.
- [8] 郭志娟, 周亚龙, 王乔林, 等. 雄安新区土壤重金属污染特征及健康风险[J]. 中国环境科学, 2021, 41(1): 431-441.
Guo Zhijuan, Zhou Yalong, Wang Qiaolin, et al. Characteristics of soil heavy metal pollution and health risk in Xiongan New District [J]. China Environmental Science, 2021, 41(1): 431-441.
- [9] 梁家辉, 田亦琦, 费杨, 等. 华北典型工矿城镇土壤重金属来源解析及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2023, 44(10): 5657-5665.
Liang Jiahui, Tian Yiqi, Fei Yang, et al. Source apportionment and potential ecological risk assessment of soil heavy metals in typical industrial and mining towns in North China [J]. Environmental Science, 2023, 44(10): 5657-5665.
- [10] 任频频, 黄峰, 李保国. 黄淮海平原旱作农田土壤有机质

- 含量的空间分异特征[J].土壤学报,2022,59(2):440-450.
- Ren Pinpin, Huang Feng, Li Baoguo. Spatial differentiation characteristics of soil organic matter in dry farmland in the Huang-Huai-Hai Plain [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022,59(2):440-450.
- [11] 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 Weifeng, Ye Yingcong, Zhu Anfan, 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.
- [12] 邓茜,方红艳,张元媛,等.四川盆地耕地土壤 pH 空间变异特征及影响因素[J].土壤,2022,54(6):1283-1290.
- Deng Qian, Fang Hongyan, Zhang Yuanyuan, et al. Spatial variability of cropland soil pH and its influencing factors in Sichuan Basin [J]. *Soils*, 2022,54(6):1283-1290.
- [13] 王芳婷,陈植华,包科,等.pH 值对海陆交互土壤镉纵向迁移转化的影响[J].中国环境科学,2021,41(1):335-341.
- Wang Fangting, Chen Zhihua, Bao Ke, et al. Effects of pH on vertical migration of cadmium in the sea land interaction zone [J]. *China Environmental Science*, 2021,41(1):335-341.
- [14] 胡鹏杰,詹娟,刘娟,等.土壤重金属地质高背景成因、风险与管控研究进展[J].土壤学报,2023,60(5):1363-1377.
- Hu Pengjie, Zhan Juan, Liu Juan, et al. Research progress on the causes, risks, and control of high geological background of heavy metals in soils [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023,60(5):1363-1377.
- [15] 赵学强,潘贤章,马海艺,等.中国酸性土壤利用的科学问题与策略[J].土壤学报,2023,60(5):1248-1263.
- Zhao Xueqiang, Pan Xianzhang, Ma Haiyi, et al. Scientific issues and strategies of acid soil use in China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023,60(5):1248-1263.
- [16] 李艳玲,陈卫平,杨阳,等.济源市平原区农田重金属污染特征及综合风险评估[J].环境科学学报,2020,40(6):2229-2236.
- Li Yanling, Chen Weiping, Yang Yang, et al. Heavy metal pollution characteristics and comprehensive risk evaluation of farmland across the eastern plain of Jiyuan city [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020,40(6):2229-2236.
- [17] 罗洁.河南省典型污染区环境重金属积累及健康风险研究[D].河南 郑州:河南工业大学,2022.
- Luo Jie. Environmental heavy metal accumulation and its health risk in typical areas in Henan Province [D]. Zhengzhou, Henan: Henan University of Technology, 2022.
- [18] 高凤杰,马泉来,韩文文,等.黑土丘陵区小流域土壤有机质空间变异及分布格局[J].环境科学,2016,37(5):1915-1922.
- Gao Fengjie, Ma Quanlai, Han Wenwen, et al. Spatial variability and distribution pattern of soil organic matter in a mollisol watershed of China [J]. *Environmental Science*, 2016,37(5):1915-1922.
- [19] 杨宇,郭婷婷,刘孝利,等.南方典型矿区农业小流域耕地土壤重金属空间分布特征及污染评价[J].环境科学,2023,44(3):1602-1610.
- Yang Yu, Guo Tingting, Liu Xiaoli, et al. Spatial distribution characteristics and assessment of heavy metal pollution in cultivated soil of agricultural small watershed in typical mining area in South China [J]. *Environmental Science*, 2023,44(3):1602-1610.
- [20] 史舟,周越.空间分析理论与实践空间数据分析教程[M].北京:科学出版社,2019.
- Shi Zhou, Zhou Yue. Theory and Practice of Spatial Analysis [M]. Beijing: Science Publishing Company, 2019.
- [21] 王劲峰,廖一兰,刘鑫.空间数据分析教程[M].北京:科学出版社,2010.
- Wang Jingfeng, Liao Yilan, Liu Xin. A Tutorial on Spatial Data Analysis [M]. Beijing: Science Publishing Company, 2010.
- [22] 马泉来,高凤杰,张志民,等.我国东北黑土丘陵区小流域土壤有机质空间分布模拟[J].环境科学研究,2016,29(3):382-390.
- Ma Quanlai, Gao Fengjie, Zhang Zhimin, et al. Simulation of spatial distribution of soil organic matter in a mollisol watershed in northeastern China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016,29(3):382-390.
- [23] 申哲,张认连,龙怀玉,等.基于 3 种空间预测方法的黄土区土壤颗粒组成空间分布研究:以宁夏海原县为例[J].中国农业科学,2020,53(18):3716-3728.
- Shen Zhe, Zhang Renlian, Long Huaiyu, et al. Research on spatial distribution of soil particle size distribution in loess region based on three spatial prediction methods: Taking Haiyuan County in Ningxia as an example [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020,53(18):3716-3728.
- [24] 高浩然,周勇,刘甲康,等.基于 EBK 插值预测和 GDM 模型的襄州区耕地土壤重金属时空分布及来源变化分析[J].环境科学,2022,43(11):5180-5191.
- Gao Haoran, Zhou Yong, Liu Jiakang, et al. Spatial

- and temporal distribution and source variation of heavy metals in cultivated land soil of Xiangzhou district based on EBK interpolation prediction and GDM model [J]. *Environmental Science*, 2022,43(11):5180-5191.
- [25] 张军,高煜,王国兰,等.典型河谷城市土壤重金属含量空间分异及其影响因素[J].*生态环境学报*,2021,30(6):1276-1285.
- Zhang Jun, Gao Yu, Wang Guolan, et al. Spatial differentiation and influencing factors of heavy metal content in soils of typical river valley city [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021,30(6):1276-1285.
- [26] 周怡,吴秋梅,樊亚男,等.江苏省典型高速公路沿线土壤重金属分布特征及影响因素研究[J].*土壤通报*,2023,54(1):161-170.
- Zhou Yi, Wu Qiumei, Fan Yanan, et al. Spatial distribution and influencing factors of heavy metals in soils around typical highways in Jiangsu Provinces [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2023,54(1):161-170.
- [27] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].*地理学报*,2017,72(1):116-134.
- Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017,72(1):116-134.
- [28] 戴倩倩,徐梦洁,庄舜尧,等.基于地理探测器的封丘县农田土壤重金属分布影响因素研究[J].*土壤*,2022,54(3):564-571.
- Dai Qianqian, Xu Mengjie, Zhuang Shun Yao, et al. Study on factors influencing heavy metal of farmland soils based on geographical detector in Fengqiu County [J]. *Soils*, 2022,54(3):564-571.
- [29] 盛奇,王恒旭,胡永华,等.黄河流域河南段土壤背景值与基准值研究[J].*安徽农业科学*,2009,37(18):8647-8650.
- Sheng Qi, Wang Hengxu, Hu Yonghua, et al. Study on soil background value and reference value in Henan section of Yellow River [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009,37(18):8647-8650.
- [30] 张驭航,李玲,王秀丽,等.河南省土壤 pH 值时空变化特征分析[J].*土壤通报*,2019,50(5):1091-1100.
- Zhang Yuhang, Li Ling, Wang Xiuli, et al. Temporal and spatial variation of soil pH in Henan [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019,50(5):1091-1100.
- [31] 窦韦强,安毅,秦莉,等.土壤 pH 对汞迁移转化的影响研究进展[J].*农业资源与环境学报*,2019,36(1):1-8.
- Dou Weiqiang, An Yi, Qin Li, et al. Research progress on effects of soil pH on migration and transformation of mercury [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019,36(1):1-8.
- [32] 张海琳,张雨,王顶,等.西南不同类型紫色土 pH 变化、重金属累积与潜在生态风险评估[J].*环境科学*,2024,45(4):2440-2449.
- Zhang Hailin, Zhang Yu, Wang Ding, et al. Heavy metal accumulation and assessment of potential ecological risk caused by soil pH changes in different types of purple soils in Southwest China [J]. *Environmental Science*, 2024,45(4):2440-2449.
- ~~~~~
- (上接第 351 页)
- [33] 刘永婷,杨钊,徐光来,等.基于四象限模型的生态系统服务与人类活动强度关联性分析:以皖南国际旅游文化示范区为例[J].*生态学报*,2022,42(13):5200-5210.
- Liu Yongting, Yang Zhao, Xu Guanglai, et al. Correlation between ecosystem services value and human activity intensity based on the four-quadrant model: A case study in the International Tourism and Culture Demonstration Area, the South Anhui Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022,42(13):5200-5210.
- [34] 韩增林,孟琦琦,闫晓露,等.近 30 年辽东湾北部区土地利用强度与生态系统服务价值的时空关系[J].*生态学报*,2020,40(8):2555-2566.
- Han Zenglin, Meng Qiqi, Yan Xiaolu, et al. Spatial and temporal relationships between land use intensity and the value of ecosystem services in Northern Liaodong bay over the past 30 years [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020,40(8):2555-2566.