Eco-Environmental Knowledge Web

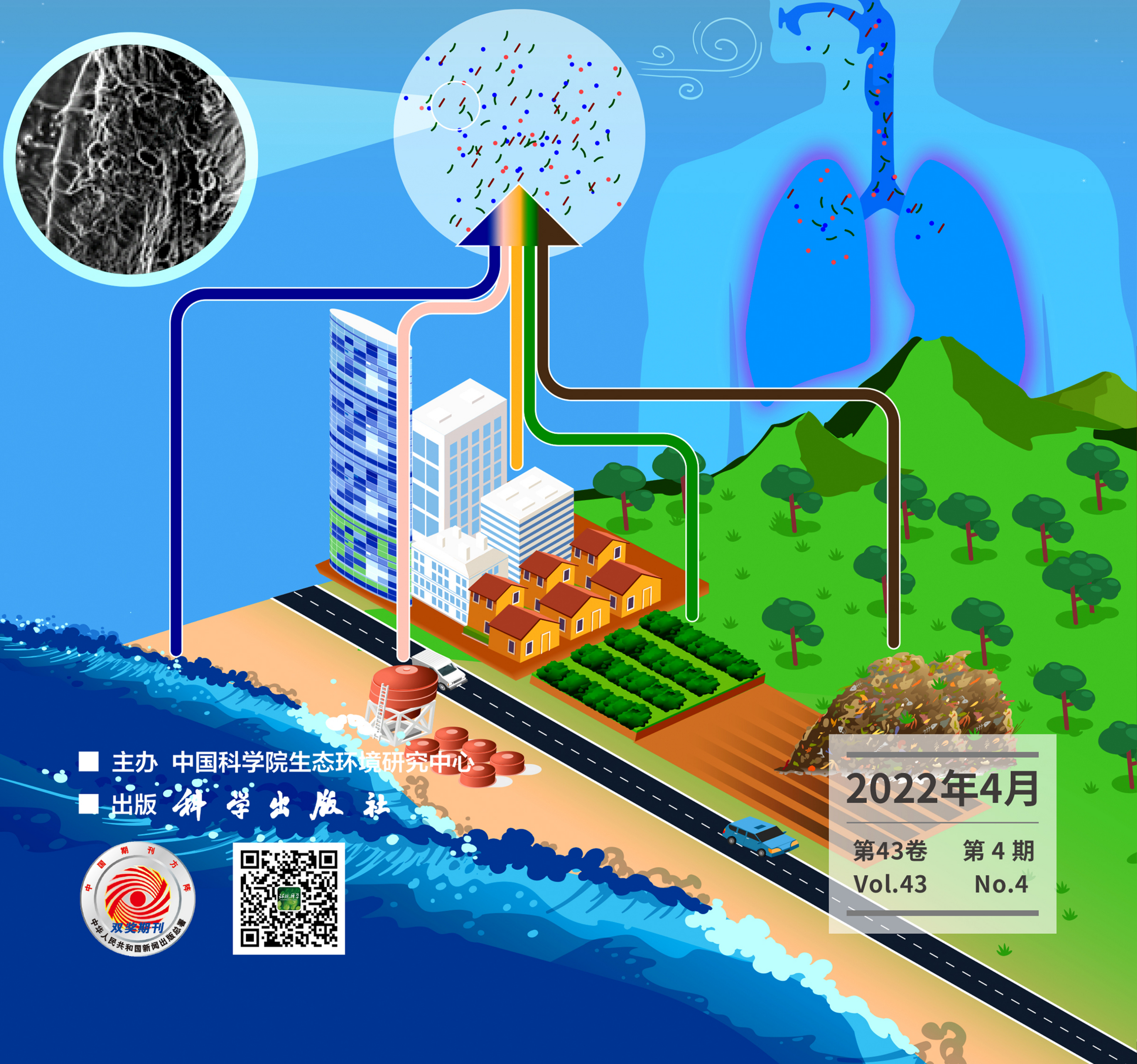
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性

涂晨，田媛，刘颖，张馨宁，骆永明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2022年4月
第43卷 第 4 期
Vol.43 No.4

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第43卷　第4期

2022年4月15日

目　次

生态环境知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环 境 科 学
Environmental Science

第43卷第4期 2022年4月
Vol.43,No.4 Apr.,2022

安顺市土壤 pH 空间变异及影响因素分析

陈清霞[1,2], 陆晓辉[1,2*], 涂成龙[3]
(1. 贵州师范大学地理与环境科学学院(喀斯特研究院),贵阳 550025; 2. 贵州省喀斯特山地生态环境国家重点实验室培育基地,贵阳 550025; 3. 贵州医科大学环境污染与疾病监控教育部重点实验室,贵阳 550025)

摘要:探究土壤 pH 的空间分布特征及其变异规律,分析环境因子对土壤 pH 空间分异的影响,对安顺市山地复杂环境下土壤 pH 的精准管理和土壤资源的可持续利用具有重要意义. 基于22 851个野外采样点,综合采用全局 Moran's *I* 指数、冷热点分析、半方差函数和克里金插值的方法,从不同角度揭示了安顺市土壤 pH 值的空间结构特征和分布规律,并借助地理探测器分析了环境因子对其空间分异的影响. 结果表明:①安顺市表层土壤 pH 值的变化范围在 3. 56 ~ 8. 61 之间,均值为 6. 28,变异系数为 16. 33%,具有中等程度的空间变异性; ②土壤 pH 在全局空间上呈聚集分布,在局部空间上以西部和西北部地区为热点聚集区,而东部和南部则为冷点聚集区; 块金系数(40. 19%)表明,土壤 pH 在空间上的这种变异性是由结构性因素和随机因素共同决定的,但结构性因素的作用更大; ③在空间分布上,土壤 pH 主要呈现斑块状的镶嵌分布格局,其中弱酸性土(57. 14%)集中分布在安顺市的东部、东北部和南部地区,中性土(30. 13%)以西部、西北部和东南部较为集中,强酸性土(6. 12%)和碱性土(6. 45%)则以块状结构分别镶嵌于弱酸性土和中性土之中. ④地理探测器分析表明各环境因子对土壤 pH 空间变异的解释力由大到小依次为:土壤类型(9. 4%) > 成土母岩(7. 9%) > 海拔(2. 1%) > 土地利用(1. 8%) > 坡度(0. 1%),并且土壤类型和成土母岩与其它各因子交互作用的 *q* 值均较大,因此土壤类型和成土母岩是引起安顺市土壤 pH 空间变异的主控因子.

关键词:土壤 pH; 空间分异; 空间分布; 环境因子; 安顺市
中图分类号: X53 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2022)04-2124-09 **DOI**: 10. 13227/j. hjkx. 202108126

Spatial Variation and Influencing Factors of Soil pH in Anshun City

CHEN Qing-xia[1,2], LU Xiao-hui[1,2*], TU Cheng-long[3]
(1. School of Geography and Environmental Science (Institute of Karst Science), Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China; 2. State Key Laboratory Incubation Base for Karst Mountain Ecology Environment of Guizhou Province, Guiyang 550025, China; 3. Key Laboratory of Environmental Pollution Monitoring and Disease Control, Ministry of Education, Guizhou Medical University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Exploring the spatial distribution characteristics and variation law of soil pH and analyzing the impact of environmental factors on the spatial differentiation of soil pH are of great significance to the accurate management of soil pH and the sustainable utilization of soil resources in the complex mountainous environment of Anshun City. Based on 22 851 field sampling points, using the methods of global Moran's *I* index, cold and hot spot analysis, semi-variance function, and Kriging interpolation, the spatial structure characteristics and distribution law of soil pH in Anshun City were revealed from different angles, and the influence of environmental factors on its spatial differentiation was analyzed with the help of geographic detectors. The results showed that: ① the variation range of topsoil pH value in Anshun City was 3. 56-8. 61, the mean value was 6. 28, and the coefficient of variation was 16. 33%. ② In the global space, soil pH showed aggregation distribution; in the local space, the west and northwest were hot spots, whereas the east and south were cold spots. The nugget coefficient (40. 19%) showed that the spatial variability in soil pH was determined by both structural and random factors, but the role of structural factors was greater. ③ In terms of spatial distribution, soil pH mainly presented a patchy mosaic distribution pattern, in which slightly acidic soil (57. 14%) was concentrated in the east, northeast, and south of Anshun City; neutral soil (30. 13%) was concentrated in the west, northwest, and southeast; and strongly acidic soil (6. 12%) and alkaline soil (6. 45%) were embedded in slightly acidic soil and neutral soil, respectively, in a block structure. ④ The geo-detector analysis showed that the explanatory power of various environmental factors to the spatial variation in soil pH was ranked as soil type (9. 4%) > soil forming parent rock (7. 9%) > altitude (2. 1%) > land use (1. 8%) > slope (0. 1%), in which the *q* value of the interaction between soil type and parent rock type and other factors was large. Therefore, soil type and parent rock type were the main controlling factors of soil pH spatial variation in Anshun City.

Key words: soil pH; spatial differentiation; space distribution; environmental factor; Anshun City

土壤酸碱度(pH)是评价土壤肥力质量的一个关键指标,在土壤理化性质、养分存在的形态和有效性、微生物活性、植物生长以及碳和氮的生物地球化学循环中发挥着重要作用,同时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[1,2].

土壤 pH 值是土壤在其形成过程中受成土母质、地形地貌、气候条件以及生物活动和耕作历史等因素综合作用产生的重要属性,因而其在空间分布上具有显著的区域性特征[3,4]. 近年来,国内外众多学者采用不同方法对城区[5]、高原[6]、平原[7]、

收稿日期: 2021-08-12; **修订日期**: 2021-09-25
基金项目: 国家自然科学基金项目(41867001); 自然资源部喀斯特环境与地质灾害重点实验室开放基金项目(2018K02); 贵州师范大学博士科研项目(GZNUD[2017]7 号); 贵州师范大学学术新苗培养及创新探索专项项目(黔科合平台人才[2018]5769-23)
作者简介: 陈清霞(1995 ~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤属性空间分异,E-mail: 2237481706@qq.com
* 通信作者,E-mail: lu_xiaohui@126.com

山区[8]、丘陵[1]以及不同流域[9,10]和土地利用方式[11,12]等不同环境背景下土壤 pH 的空间分异及其影响因素进行了研究,研究尺度在全国[11,13]→省[14]→市[5]→县[15]→村[16]等空间尺度和时空尺度[7,12,17]两方面均有涉及,还有学者对土壤 pH 与土壤养分之间的相关关系[18]及其对微量元素的影响[19]等方面开展了研究,且均取得了丰硕的成果.有研究表明,不同环境背景和时空尺度下,土壤 pH 值的空间分异特征明显不同,地形地貌、土壤类型、成土母岩、土地利用方式以及耕作施肥等结构性因素和随机因素均会对土壤 pH 值的空间变异产生不同程度的影响,即使在同一地区,随着时间的推移,土壤 pH 值的空间分异程度和主要影响因素也会随之发生变化[17,20].因此,探究区域性土壤 pH 的空间分异特征及其变化规律,分析不同环境因素对土壤 pH 空间分异的影响,对于增强区域土壤 pH 值的精准管理,科学认识土壤肥力水平、提升土壤环境质量和可持续利用土壤资源具有重要意义.

安顺市地处西南喀斯特地貌中心,区内地质地貌复杂,地表和地下河流纵横交错,特殊的水文地貌必然带来土壤属性在空间分布上的差异.目前,有关安顺市土壤理化性质的研究多集中在全氮、全磷和有效钾等养分方面[21,22],在大样本基础上对土壤 pH 值空间分异的研究还相对较少,且以往研究多采用单一的地统计学方法.地统计学中的半方差函数和插值技术在定量化地表征土壤 pH 值的空间结构特征及其分布规律方面具有一定的优势,但其无法揭示区域内部土壤 pH 值空间自相关程度的高低,无法定量描述土壤 pH 值在局部空间内的聚集情况.基于此,本文综合采用全局 Moran's I 指数、冷热点分析、半方差函数和克里金插值的方法,从不同角度揭示安顺市土壤 pH 值的空间结构特征和分布规律,并通过方差分析和地理探测器深入探讨土壤类型、成土母岩、地形和土地利用方式等单一影响因子及两种影响因子交互作用对土壤 pH 值空间分异的影响,以期为安顺市山地土壤的科学认识、合理利用和治理改良提供依据.

1　材料与方法

1.1　研究区概况

安顺市位于贵州省中西部(图 1),地理位置为 105°13′～106°34′E、25°21′～26°38′N,是世界上典

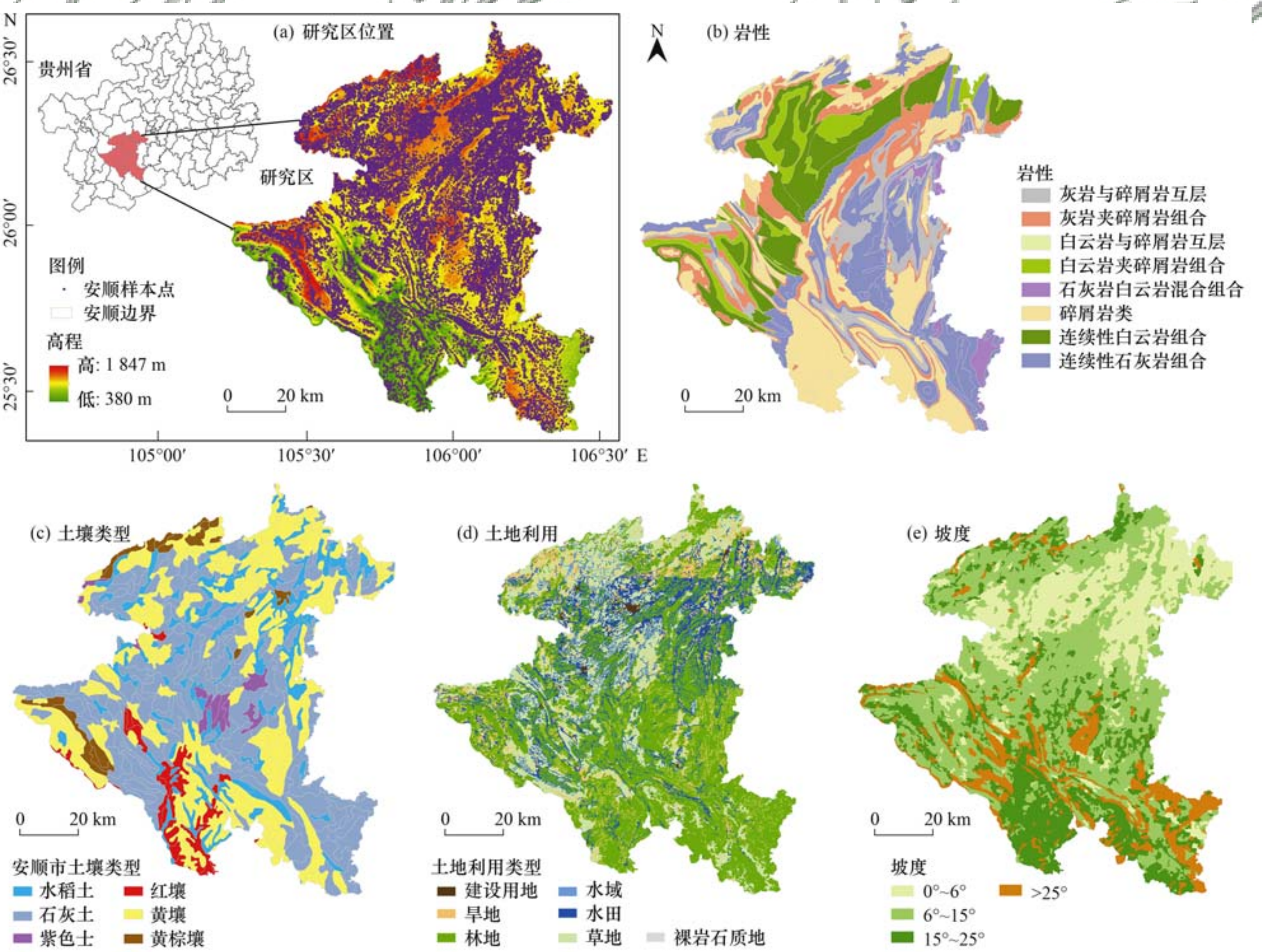


图 1　研究区位置和环境因子空间分布情况

Fig. 1　Location and spatial distribution of environmental factors in the study area

型的喀斯特地貌集中地区，国土面积为9 267 km^2，其中喀斯特面积占了77.5%. 地势总体北高南低、地貌以山地和丘陵为主，海拔在560 ~ 1 500 m之间，属典型的高原型湿润亚热带季风气候，四季分明、雨量充沛，年平均降雨量1 360 mm，年平均气温在13.2 ~ 15.0℃，冬无严寒，夏无酷暑，气候温和宜人[23]. 由于地处长江水系乌江流域和珠江水系北盘江流域的分水岭地带，境内河流纵横，落差大，水能资源丰富，土地利用类型多样. 境内出露的岩石有白云岩、石灰岩和碎屑岩（砂岩、页岩、泥页岩、玄武岩等），发育的土壤主要有红壤、黄壤、黄棕壤、石灰土、水稻土和紫色土.

1.2 研究方法

1.2.1 空间自相关分析

（1）全局 Moran's I 指数 土壤 pH 在空间上的自相关程度可采用全局 Moran's I 指数来度量. 全局 Moran's I 指数是在定量的基础上，从全局尺度对地理空间要素是否存在聚集特征进行描述的一种统计量，其取值范围通常在[−1,1]之间，取值为正表示土壤 pH 在空间上呈聚集分布，反之则为孤立（分散）分布，且 Moran's I 指数的绝对值越大表明空间相关程度越高，越趋向于 0 则越偏向于随机分布. 在进行全局 Moran's I 指数分析时通常将 I 标准化为 Z，以判断相关性显著程度，当 $|Z| > 1.96$，则为显著的空间自相关，反之则不相关. 全局 Moran's I 指数的计算公式见文献[24].

（2）冷热点分析（Getis-Ord G_i^*） 该分析方法是在全局空间相关分析的基础上，进一步采用 $G_i^*(d)$ 值来表征局部区域内土壤 pH 的高值簇区（热点）和低值簇区（冷点），并将其在空间上展现出来，揭示土壤 pH 在空间上的分异情况，其计算公式为[25]：

$$G_i^*(d) = \sum_{j=1}^{n} W_{ij}(d)X_j \Big/ \sum_{j=1}^{n} X_j \qquad (1)$$

对 $G_i^*(d)$ 检验的标准化统计量为：

$$Z(G_i^*) = [G_i^* - EG_i^*] / \sqrt{\mathrm{VAR}(G_i^*)} \qquad (2)$$

式中，X_j 为某一坐标点的土壤 pH 值；W_{ij} 为区域内 i 点和 j 点之间的权重；EG_i^* 和 $\mathrm{VAR}(G_i^*)$ 分别表示 $G_i^*(d)$ 的数学期望和变异系数. 若 $Z(G_i^*)$ 为显著正值，则表明 i 地区是土壤 pH 高值聚集区，属于热点区域，反之则为冷点区.

1.2.2 半方差函数

为量化结构性因素和随机因素对土壤 pH 空间分异的影响，采用半方差函数对其空间变异结构进行描述. 半方差参数中的块基值表示随机变异，基台值表示总变异，变程表示空间变异的尺度范围，块基比表示随机变异的占比，反映土壤 pH 空间自相关程度的高低. 当块基比≤25% 时为强空间自相关性，介于25%~75% 之间为中等程度的空间自相关性，≥75% 时则表明弱的空间相关性，且当块基比 <50% 时表明变量的空间变异主要由结构性因素（自然因素）主导. 其计算公式见文献[26].

1.2.3 地理探测器

地理探测器是探测空间分异，并揭示某种地理属性与其解释因子之间关系的一种空间分析模型，能够探测单因子以及双因子交互作用对因变量空间分异的影响，并对其显著性进行统计学检验[27]. 本文采用因子探测和因子交互作用探测功能来分析各影响因子对安顺市土壤 pH 空间分异的影响.

因子探测的计算公式如下[28]：

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2}{N\sigma^2} \qquad (3)$$

式中，N_h 为子类型区 h 的单元数，N 为全区的单元数；σ_h^2 为土壤 pH 在子类型 h 区的方差，σ^2 为土壤 pH 在全区的方差.

q 值为某因子对土壤 pH 空间分异的解释程度，其取值范围为[0,1]，值越大表示该因子对土壤 pH 空间分异的解释力越强，反之则越弱.

交互探测是在因子探测的基础上，分别叠加两个因子图层，并计算 $X_1 \cap X_2$ 的 q 值，最后对数值 $q(X_1)$、$q(X_2)$ 和 $q(X_1 \cap X_2)$ 进行比较分析，判断其交互作用[28]，见表 1.

表 1 双因子交互作用

Table 1 Two-factor interactions

判断依据	交互作用	判断依据	交互作用
$q(X_1 \cap X_2) < \mathrm{Min}[q(X_1), q(X_2)]$	非线性减弱	$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立
$\mathrm{Min}[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \mathrm{Max}[q(X_1), q(X_2)]$	单因子非线性减弱	$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强
$q(X_1 \cap X_2) > \mathrm{Max}[q(X_1), q(X_2)]$	双因子增强		

1.3 数据来源与处理

1.3.1 数据来源

于 2017 ~ 2019 年（土壤系统具有相对稳定性，其在短时间内处于一定的动态平衡状态），结合安顺市土壤分布，按照 500 m × 500 m 的网格在全市（除建设用地、水域和裸岩石质地）共采取22 851个土样数据，采样深度为 0 ~ 20 cm，同时在采样时用 GPS 工具箱记录样点的经纬度坐标、土壤类型、母

岩类型、土地利用方式以及海拔和坡度等信息，然后在室内对土样进行风干、研磨和过筛处理后，采用电极法测定土壤 pH 值（水土比 2.5∶1）[29].

1.3.2　数据处理

对研究区样本数据采用“3 倍标准差法”剔除异常值后，最终得到22 399个有效样本数据. 描述性统计、正态转换和比较环境因子对土壤 pH 空间分异的影响的方差分析（ANOVA）均在 SPSS 22 中完成. 全局空间自相关分析和地理探测器的因子分析分别在 GeoDa1.14 和 GeoDetector 中完成. 冷热点聚类分析和 Kriging 插值分析均在 ArcGIS10.6 中完成. 常规统计分析和绘图处理分别在 Excel 2016 和 Origin 2017 中进行.

2　结果与分析

2.1　土壤 pH 的描述性统计特征

由表 2 可知，安顺市表层土壤 pH 的变幅在 3.56 ~ 8.61 之间，均值为 6.28 呈弱酸性特征，同时由样本分布频率可看出安顺市土壤主要以酸性土（pH < 6.5）为主，中碱性土（pH > 6.5）占比不到 40%. 根据 Nielsen 等[30] 分级标准，安顺市土壤 pH 呈现中等程度的空间变异. 为满足统计分析和 Kriging 插值的要求，对土壤 pH 进行开平方根（square root）的正态转换，使其符合正态分布.

表 2　土壤 pH 的描述性统计1)

Table 2　Descriptive statistics of soil pH

项目	平均值	范围	标准偏差	变异系数/%	正态转换	样本分布频率/%			
						26.42	33.87	23.60	16.11
pH	6.28	3.56 ~ 8.61	1.02	16.33	SQRT	3.5 ~ 5.5	5.5 ~ 6.5	6.5 ~ 7.5	7.5 ~ 9.0

1）土壤采样深度为 0 ~ 20 cm，样品数为 22 399 个

2.2　土壤 pH 的空间结构特征及分布规律分析

2.2.1　全局空间自相关分析

对土壤 pH 进行全局空间自相关分析发现［图 2（a）］，安顺市表层土壤 pH 的全局 Moran's I 指数为 0.399，Z 值为104.103 0 > 1.96，P 值为 0.001，表明土壤 pH 在空间分布上存在显著的空间正相关（Moran's I 接近于 1），呈聚集分布，即某一小区域土壤 pH 值的高低会受周围区域土壤 pH 值大小的正影响.

2.2.2　局部冷热点聚类分析

在全局自相关分析的基础上，进一步采用冷热点聚类分析探究土壤 pH 在局部空间上的聚集情况. 由［图 2（b）］可知，安顺市土壤 pH 高值（热点）区集中分布在西部和西北部地区，低值区（冷点）以东部和南部较为集中，而东北部则表现出不显著的空间分布格局.

2.2.3　半变异函数分析

参照半方差函数理论模型的选取标准（决定系数 R^2 接近于 1、残差 RSS 趋向于 0），对比分析表 3 中各模型的参数后发现指数模型的 R^2 最大、残差较小，说明采用指数模型来预测土壤 pH 在空间上的分布效果最好. 块金系数和变程表明安顺市表层土壤 pH 具有小范围、中等程度的空间相关性，说明土壤 pH 的空间变异是由结构性因素和随机因素共同决定的，块金系数 < 50%，表明结构性因素的作用更大.

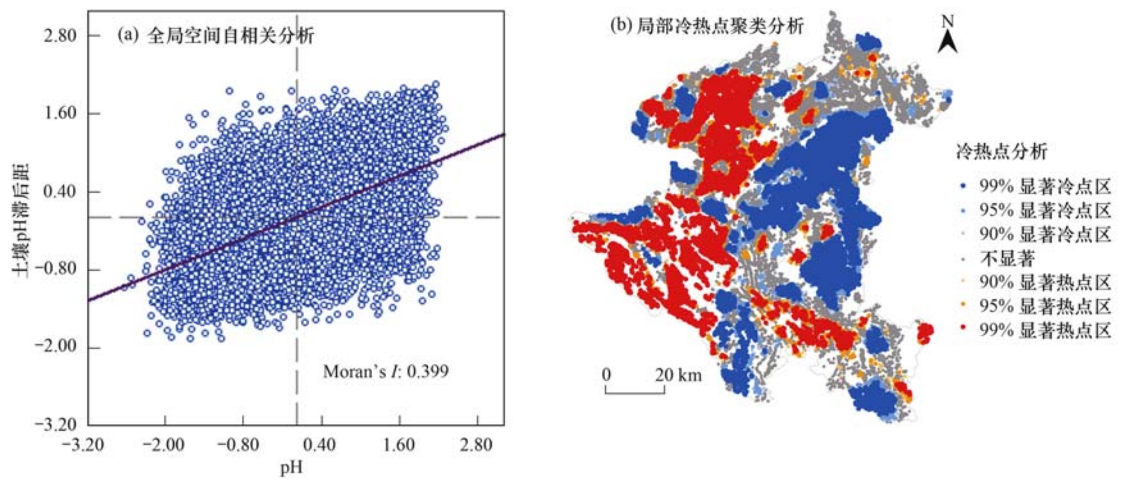


图 2　土壤 pH 的空间自相关特征

Fig. 2　Spatial autocorrelation characteristics of soil pH

表 3 安顺市表层土壤 pH 的半方差模型及参数

Table 3 Semi-cutting model and parameters of the surface soil pH in Anshun City

模型	块金值	基台值	块金系数/%	变程/m	拟合系数	残差
指数	0.010	0.024	40.185	33.299	0.923	3.555×10^{-4}
线性	0.022	0.030	74.712	65.207	0.878	1.05×10^{-5}
球状	0.001	0.027	2.855	5.100	0.393	5.209×10^{-5}
高斯	0.003	0.027	12.706	4.330	0.394	5.2×10^{-5}

2.2.4 空间分布特征

基于半方差模型参数，采用 Kriging 方法插值得到安顺市表层土壤 pH 的空间分布（图 3），空间分布图和统计参数表明，安顺市土壤主要以酸性土（pH < 6.5）为主，强酸性土（3.56 ~ 5.5）和弱酸性土（5.5 ~ 6.5）分别占了研究区土地总面积的 6.12% 和 57.14%，中性土（6.5 ~ 7.5）和碱性土（7.5 ~ 8.61）分别占了土地总面积的 30.13% 和 6.45%. 在空间上，土壤 pH 主要呈现斑块状的镶嵌分布格局，其中中性土以西部、西北部和东南部较为集中，而弱酸性土则以东部、东北部和南部最为集中连片，碱性土和强酸性土则以块状结构分别镶嵌于中性土和弱酸性土之中.

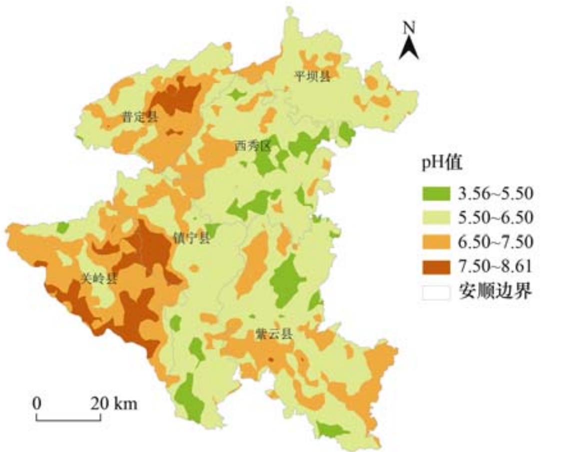


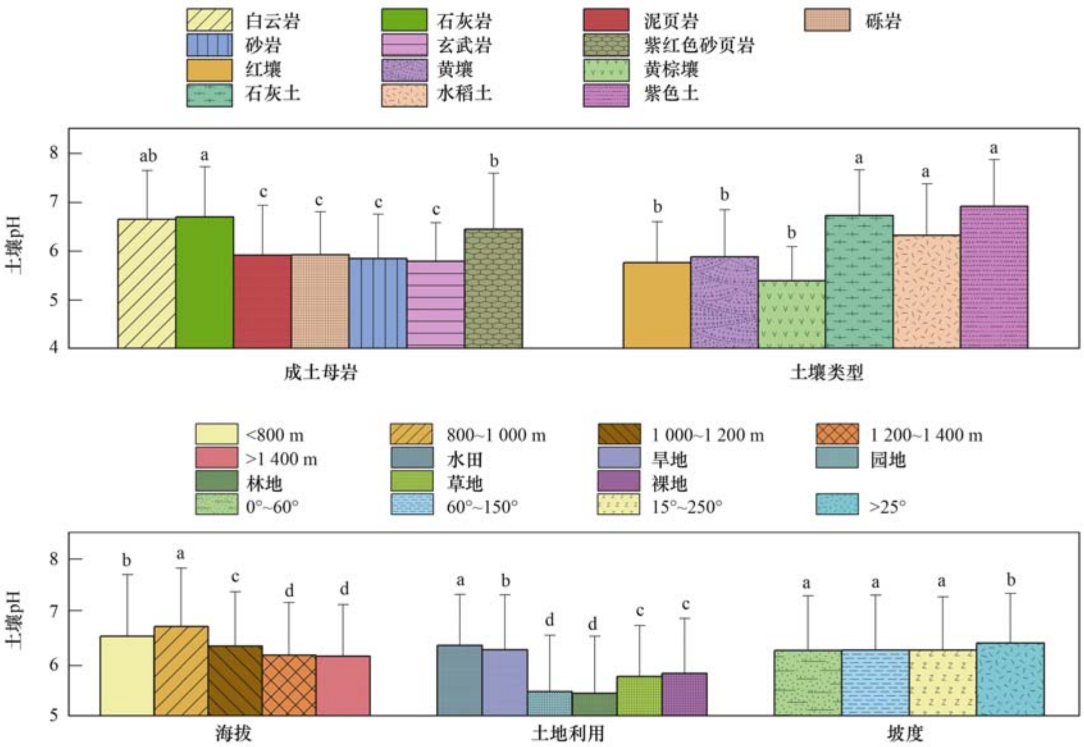
图 3 安顺市土壤 pH 的空间分布特征

Fig. 3 Spatial distribution characteristics of soil pH in Anshun City

2.3 土壤 pH 空间变异的影响因素分析

2.3.1 土壤 pH 空间变异的环境因子

方差分析表明（图 4），5 种环境因子均对土壤 pH 的空间变异具有不同程度的影响. 成土母岩中以白云岩、石灰岩和紫红色砂页岩发育的土壤 pH 值较高，均值均在 6.5 以上，呈中性特征，而其他母岩发育的土壤多呈现弱酸性特征. 土壤类型中，红壤、黄壤和黄棕壤的 pH 值要显著低于石灰土、水稻土和紫色土（$P < 0.05$）. 土壤 pH 随海拔增加表现出先



相同字母表示同一环境因子下不同子类型之间没有显著差异（$P > 0.05$）

图 4 土壤 pH 空间变异的影响因素

Fig. 4 Analysis of the influencing factors of the soil pH spatial variation

增加再减小的趋势,但总体上海拔 <1 200 m地区的土壤 pH 值要显著高于海拔 >1 200 m的地区($P<0.05$). 不同土地利用方式中,土壤 pH 值按大小依次排序为:水田 > 旱地 > 裸地 > 草地 > 园地 > 林地,说明耕作土壤在人为因素的影响下,其土壤 pH 值要高于自然发育的土壤. 不同坡度等级中,坡度 >25°地区的土壤 pH 值要显著高于 25°以下的地区($P<0.05$).

2.3.2 土壤 pH 空间变异的主控因子

因子探测结果显示(表 4),各单因子对土壤 pH 空间变异的解释力 q 值排序为:土壤类型 > 成土母岩 > 海拔 > 土地利用 > 坡度,其中仅坡度对土壤 pH 空间变异的影响不显著($P>0.05$). 因子间交互作用表明任意两种因子的共同作用均会增加对土壤 pH 空间变异的解释力,其中以成土母岩和海拔的交互作用解释力度最大(0.144),而以土地利用和坡度的交互作用解释程度最小(0.02).

表 4　安顺市土壤 pH 空间变异影响因素的地理探测1)

Table 4　Geographical detection of the factors affecting the soil pH spatial variation of Anshun City

因子类型	P	因子探测 q 值	交互探测 q 值				交互类型
			土壤类型	母岩类型	海拔	土地利用	
土壤类型	0.000	0.094	—	—	—	—	—
成土母岩	0.000	0.079	0.136	—	—	—	NE
海拔	0.000	0.021	0.134	0.144	—	—	NE
土地利用	0.000	0.018	0.128	0.102	0.046	—	NE
坡度	0.572	0.001	0.097	0.095	0.028	0.020	NE

1) NE 为非线性增强(即会产生 1 + 1 > 2 的效果)

3 讨论

3.1 土壤 pH 的空间结构特征及分布规律

中国土壤酸碱度在空间分布上总体呈现南酸北碱的态势,长江以南地区土壤多呈现酸性[31]. 安顺市地处中国西南地区,其表层土壤 pH 值的变化范围在 3.56 ~ 8.61 之间,均值为 6.28,呈弱酸性特征. 且从土壤样本分布频率(表 2)和土壤 pH 值的空间分布 (图 2)也可看出,安顺市土壤主要以酸性土(pH <6.5)为主,酸性土占了研究区土地总面积的 63.26%,中碱性土(pH >6.5)仅占土地总面积的 36.58%,因此安顺市土壤 pH 在空间上符合中国土壤酸度的地理分布规律.

土壤 pH 作为一个区域化变量,其在空间上的分异是多种自然和人为因素综合作用的结果. 本研究中土壤 pH 值的变异系数(16.33%)、全局 Moran's I (0.399)和块金系数(40.19%)均表明,安顺市土壤 pH 值具有中等程度的空间变异和自相关性,由于块金系数 <50%,因此土壤 pH 的空间变异主要由结构性因素占主导. 由于安顺市在地域尺度上跨度较小,因此受气候变化的影响较小,所以土壤 pH 主要受成土母岩、土壤类型、地形地貌以及土地利用方式等的影响,这与同为小尺度区域研究的湖北十堰市[20] 和福建建阳市[32] 的研究结果相一致.

3.2 成土环境对土壤 pH 空间分异的影响

成土母质是地壳表层的岩石矿物经过风化作用形成的风化产物,根据岩石风化产物对土壤肥力性状的影响可将本研究中的母岩风化产物分属于 3 种生态类型:①SiO_2 含量很高的硅质岩石风化物(砂岩、砾岩和泥页岩); ②SiO_2 含量很少的铁镁质岩石风化物(玄武岩风化物); ③富含 $CaCO_3$ 的钙质岩石风化物(白云岩、石灰岩和紫红色砂页岩). 由于成土母岩是土壤形成发育的物质基础,因此其矿物组成和理化性质的差异也会对土壤 pH 值产生直接影响[8,10],本研究方差分析表明,以钙质岩石风化物发育而来的土壤多呈中性特征,其 pH 值显著高于其他母岩发育的土壤($P<0.05$).

土壤是在气候、母质、生物、地形和时间综合作用下的产物. 安顺市地处西南喀斯特地区,独特的地形地貌和亚热带湿润季风气候为土壤的形成发育提供了复杂多变的自然环境条件,境内土壤在发生发育过程中,经历了不同程度的风化淋溶作用、富铝化作用、黏化作用和生物小循环作用等,使得土壤特性存在高度异质性,形成了多样化的土壤类型[33]. 本研究中,土壤 pH 显著性差异表现为:紫色土 > 石灰土 > 水稻土 > 黄壤 > 红壤 > 黄棕壤,其中地带性土壤(红壤、黄壤和黄棕壤) 受气候和生物(植被)的影响较大,在亚热带湿润季风气候作用下风化淋溶作用较强,盐基离子被强烈淋失,脱硅富铝化作用显著,土壤多呈酸性特征[34]. 石灰土和紫色土均为地方性土壤,在其形成过程中受成土母岩的影响较大,其中石灰土是由碳酸盐岩(石灰岩和白云岩等)残坡积物发育而来,在其发育过程中经历了碳酸岩淋溶作用、生物富钙作用和腐殖质的钙凝过程等,土体中钙、镁离子丰富,形成的土壤盐基饱

和度高[35],土壤多呈中性至微碱性特征;紫色土是以紫红色砂页岩风化物发育而成,在形成过程中经历了盐基物质的轻度淋失和易风化母质不断风化的快速补充作用,形成的土壤具有高盐基特征[34],所以其土壤也呈中性至微碱性反应.水稻土隶属人为土纲,是由多种地带性或非地带性土壤经过水耕熟化、氧化还原交替以及物质的淋溶和淀积作用形成的一类土壤[36].研究区水稻土多呈中性反应主要在于:一方面继承了自然土壤的酸碱性特征,另一方面与水耕熟化过程有关.

地形因子在土壤形成过程中虽然不提供任何新的物质,但其能够引起地表物质和能量的再分配,从而间接对土壤理化性质产生影响[20,37].本研究中海拔因子与土壤类型和成土母岩交互作用的 q 值均较大(分别为0.134, 0.144),说明海拔差异也对安顺市土壤 pH 值的空间分异产生了一定的影响.块金系数(40.19%)表明本研究中土壤 pH 值的空间分异主要由结构性因素占主导,但是由于植被类型、耕作管理和改良措施等利用方式的不同,土壤中植物凋落物和微生物活动也会出现显著差异[14,38],进而带来土壤属性的变化.不同土地利用方式中,土壤 pH 值按大小依次排序为:水田 > 旱地 > 裸地 > 草地 > 园地 > 林地,并且土地利用方式与土壤类型和成土母岩的因子交互 q 值分别为0.128 和0.102,说明作为随机因素的土地利用方式也会对安顺市土壤 pH 值的空间分异产生一定的影响.综上可知,安顺市土壤 pH 值的空间分异是土壤类型、成土母岩、地形因子和土地利用方式等多种因素综合作用的结果,由于土壤类型和成土母质对土壤 pH 的空间变异的解释力最大(分别为9.4%和7.9%),且二者与其他各因子交互作用的 q 值也较大,因此土壤类型和成土母岩是安顺市土壤 pH 空间变异的主控因子.

4 结论

(1)安顺市表层土壤 pH 值的变化范围在3.56 ~8.61之间,均值为6.28呈弱酸性特征,且在样本分布频率上也主要以酸性土为主,中碱性土占比不到40%.土壤 pH 值的变异系数为16.33%,具有中等程度的空间变异性.

(2)在空间相关性上,安顺市土壤 pH 在全局空间上存在显著的正相关,呈聚集分布,在局部空间上,热点区集中分布在西部和西北部地区,而冷点区则以东部和南部较为集中;在空间分布上,土壤 pH 主要呈现斑块状的镶嵌分布格局,其中弱酸性土占了研究区土地总面积的57.14%,集中分布在安顺市的东部、东北部和南部地区;中性土占了土地总面积的30.13%,以西部、西北部和东南部较为集中;强酸性土(6.12%)和碱性土(6.45%)则以块状结构分别镶嵌于弱酸性土和中性土之中.

(3)安顺市土壤 pH 值的空间变异是由结构性因素和随机因素共同决定的,但结构性因素的作用更大.不同影响因素对土壤 pH 空间变异的解释程度依次为土壤类型 > 成土母岩 > 海拔 > 土地利用 > 坡度,其中土壤类型和母岩类型与其他各因子交互作用的 q 值均较大,因此两者是安顺市土壤 pH 空间变异的主控因子.

参考文献:

[1] 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.

[2] 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.

[3] 向娇, 宋超, 石迎春, 等. 安徽省六安地区土壤 pH 空间变异特征及其影响因素[J]. 土壤通报, 2021, **52**(1): 34-41.
Xiang J, Song C, Shi Y C, *et al*. Spatial Variation Characteristics and Influencing Factors of Soil pH in the Lu'an Area of Anhui province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, **52**(1): 34-41.

[4] Russenes A L, Korsaeth A, Bakken L R, *et al*. Spatial variation in soil pH controls off-season N_2O emission in an agricultural soil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, **99**, doi: 10.1016/j.soilbio.2016.04.019.

[5] Mao Y M, Sang S X, Liu S Q, *et al*. Spatial distribution of pH and organic matter in urban soils and its implications on site-specific land uses in Xuzhou, China [J]. Comptes rendus biologies, 2014, **337**(5): 332-337.

[6] 魏孝荣, 邵明安. 黄土沟壑区小流域土壤 pH 值的空间分布及条件模拟[J]. 农业工程学报, 2009, **25**(5): 61-67.
Wei X R, Shao M A. Spatial distribution and conditional simulation of soil pH values in small watershed of loessial gully region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, **25**(5): 61-67.

[7] Li Q Q, Li A W, Yu X L, *et al*. Soil acidification of the soil profile across Chengdu Plain of China from the 1980s to 2010s [J]. Science of the Total Environment, 2020, **698**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134320.

[8] 邓小华, 蔡兴, 张明发, 等. 喀斯特地区湘西州植烟土壤 pH 分布特征及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2016, **30**(6): 308-313.
Deng X H, Cai X, Zhang M F, *et al*. Distribution characteristics of tobacco-growing soil pH and its influencing factors in karst region of Xiangxi[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, **30**(6): 308-313.

[9] 丛日环, 张智, 郑磊, 等. 基于 GIS 的长江中游油菜种植区土壤养分及 pH 状况[J]. 土壤学报, 2016, **53**(5): 1213-1224.
Cong R H, Zhang Z, Zheng L, *et al*. Soil nutrients and pH in rapeseed planting areas in the middle reaches of the Yangtze River based on GIS[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, **53**(5): 1213-1224.

[10] 马冉，刘洪斌，武伟. 三峡库区草堂河流域土壤 pH 空间分布预测制图[J]. 长江流域资源与环境，2019，**28**(3)：691-699.
Ma R, Liu H B, Wu W. Spatial distribution prediction and mapping of soil pH of Caotang river basin in the three gorges reservoir Area[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, **28**(3): 691-699.

[11] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, *et al*. significant acidification in major chinese croplands[J]. Science, 2010, **327**(5968): 1008-1010.

[12] Yang Y H, Ji C J, Ma W H, *et al*. Significant soil acidification across northern China's grasslands during 1980s-2000s[J]. Global Change Biology, 2012, **18**(7): 2292-2300.

[13] Minasny B, Hong S Y, Hartemink A E, *et al*. Soil pH increase under paddy in South Korea between 2000 and 2012[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2016, **221**: 205-213.

[14] Qi L, Wang S, Zhuang Q L, *et al*. Spatial-Temporal changes in soil organic carbon and pH in the liaoning province of China: a modeling analysis based on observational data[J]. Sustainability, 2019, **11**(13), doi: 10.3390/su11133569.

[15] 劳洁英，张军，李银富，等. 老挝奔怒县土壤 pH 和养分的空间异质性研究[J]. 土壤通报，2017，**48**(1)：45-52.
Lao J Y, Zhang J, Li Y F, *et al*. Study on spatial heterogeneity of Soil PH and nutrients in Bennu, Laos[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, **48**(1): 45-52.

[16] 王小艳，冯跃华，李云，等. 黔中喀斯特山区村域稻田土壤理化特性的空间变异特征及空间自相关性[J]. 生态学报，2015，**35**(9)：2926-2936.
Wang X Y, Feng Y H, Li Y, *et al*. Spatial variability of soil physiochemical properties and their autocorrelations at village-region in karst mountainous area, Guizhou province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, **35**(9): 2926-2936.

[17] 李伟峰，叶英聪，朱安繁，等. 近 30a 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.

[18] 符云鹏，王小翠，陈雪，等. 毕节烟区土壤 pH 值分布状况及与土壤养分的关系[J]. 土壤，2013，**45**(1)：46-51.
Fu Y P, Wang X C, Chen X, *et al*. Distribution of Soil pH and its relationships with soil nutrients in Bijie tobacco-growing area[J]. Soils, 2013, **45**(1): 46-51.

[19] 孙慧珍，朱荫湄，许晓峰. 土壤 pH 和 Eh 对金属材料腐蚀的影响[J]. 土壤学报，1997，**34**(1)：107-112.
Sun H Z, Zhu Y M, Xu X F. Effect of soil pH and Eh on corrosion of metal materials[J]. Acta Pedologica Sinica, 1997, **34**(1): 107-112.

[20] 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, Amta M, *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.

[21] 陈志霞，喻阳华，吴银菇. 黔中石漠化区大理石矿山不同植被恢复对土壤养分及化学计量的影响[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版)，2021，**39**(1)：95-102.
Chen Z X, Yu Y H, Wu Y G. Effects of different vegetation restoration on soil nutrients and stoichiometry in marble mines in rocky desertification area in central Guizhou province[J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2021, **39**(1): 95-102.

[22] 李朝婵，李婕羚，全文选，等. 喀斯特地区无籽刺梨产地土壤理化特征与评价[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版)，2018，**36**(5)：12-15，23.
Li C C, Li J L, Quan W X, *et al*. Physicochemical characteristics and evaluation of Rosa sterilis soils in Karst regions[J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2018, **36**(5): 12-15, 23.

[23] 赵榕，熊康宁，陈起伟. 基于地理探测器的典型喀斯特地区贫困空间分异特征与影响因素分析[J]. 中国农业资源与区划，2021，**42**(8)：84-95.
Zhao R, Xiong K N, Chen Q W. Spatal distribution and its determinants of poverty in typicalkarst area based on geodetectors[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2021, **42**(8): 84-95.

[24] 杨静涵，刘梦云，张杰，等. 黄土高原沟壑区小流域土壤养分空间变异特征及其影响因素[J]. 自然资源学报，2020，**35**(3)：743-754.
Yang J H, Liu M Y, Zhang J, *et al*. Spatial variability of soil nutrients and its affecting factors at small watershed in gully region of the Loess Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2020, **35**(3): 743-754.

[25] 付慧，刘艳军，孙宏日，等. 京津冀地区耕地利用转型时空分异及驱动机制[J]. 地理科学进展，2020，**39**(12)：1985-1998.
Fu H, Liu Y J, Sun H R, *et al*. Spatiotemporal characteristics and dynamic mechanism of cultivated land use transition in the Bejing-Tianjin-Hebei region[J]. Progress in Geography, 2020, **39**(12): 1985-1998.

[26] 任加国，王彬，师华定，等. 沱江上源支流土壤重金属污染空间相关性及变异解析[J]. 农业环境科学学报，2020，**39**(3)：530-541.
Ren J G, Wang B, Shi H D, *et al*. Spatial correlation and variation analysis of soil heavy metals contamination in upper source tributary of Tuo-jiang River, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, **39**(3): 530-541.

[27] 张若琰，刘卫东，宋周莺. 基于地理探测器的中国国家级开发区时空演化过程及其驱动力研究[J]. 自然资源学报，2021，**36**(10)：2672-2683.
Zhang R Y, Liu W D, Song Z Y. Spatio-temporal evolution and driving factors of national development zones based on Geodetectors[J/OL]. Journal of Natural Resources, 2021, **36**(10): 2672-2683.

[28] 王琦，常庆瑞，黄勇，等. 基于 Geo-D 的陕西省 STN 空间变异影响因子交互影响[J]. 农业机械学报，2021，**52**(11)：161-169.
Wang Q, Chang Q R, Huang R, *et al*. Research on interaction factor interaction of STN spatial variation of Shanxi province based on Geo-D[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, **52**(11): 161-169.

[29] 鲍士旦. 土壤农化分析[M].（第三版）. 北京：中国农业出版社，2000.

[30] Nielsen D R, Bouma J. Soil spatial variability[M]. Wageningen: Pudoc, 1985.

[31] 赵其国，周健民，沈仁芳，等. 面向不断变化世界，创新未来土壤科学——第 19 届世界土壤学大会综合报道[J]. 土壤，2010，**42**(5)：681-695.
Zhao Q G, Zhou J M, Shen R F, *et al*. Orientating a changing

world, innovation soil science in the future-A summary report of the 19th world congress of soil science[J]. Soils, 2010, **42**(5): 681-695.

[32] 谭艳, 吴承祯, 洪伟, 等. 邓恩桉林地土壤 pH 空间变异分析[J]. 植物资源与环境学报, 2012, **21**(1): 14-19.
Tan Y, Wu C Z, Hong W, *et al*. Analysis on spatial variation of pH in soil of Eucalyptus dunnii forest[J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2012, **21**(1): 14-19.

[33] 黄会前, 何腾兵, 牟力. 贵州母岩(母质)对土壤类型及分布的影响[J]. 浙江农业科学, 2016, **57**(11): 1816-1820.

[34] 邹国础. 贵州土壤的发生特性及分布规律[J]. 土壤学报, 1981, **18**(1): 11-23.
Zou G C. The characteristics of soil genesis and the regularity of soil distribution in Guizhou province[J]. Acta Pedologica Sinica, 1981, **18**(1): 11-23.

[35] 贵州省土壤普查办公室. 贵州省土壤[M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 1994.

[36] 吴启堂. 环境土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011.

[37] Daniels W L. The nature and properties of soils, 15th Edition[J]. Soil Science Society of America Journal, 2016, **80**(5), doi: 10.2136/sssaj2016.0005br.

[38] Dai Z M, Zhang X J, Tang C, *et al*. Potential role of biochars in decreasing soil acidification-A critical review[J]. Science of the Total Environment, 2017, **581-582**: 601-611.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 43 No. 4

Apr. 15, 2022

CONTENTS