

吴雨珩, 曾发明, 魏兴琥, 等. 粤北岩溶区土壤酸化的空间分异特征研究[J]. 中国岩溶, 2022, 41(5): 784-795.

DOI: 10.11932/karst20220510

粤北岩溶区土壤酸化的空间分异特征研究

吴雨珩, 曾发明, 魏兴琥, 刘淑娟, 黄金国

(佛山科学技术学院环境与化学工程学院, 广东 佛山 528000)

摘要: 为了解粤北岩溶区土壤酸化的空间分异特征, 选择华南酸雨区的岩溶槽谷地貌和峰丛洼地地貌土壤为研究对象, 对土壤 pH 数据进行空间插值预测, 采用参数最优地理探测器分析岩溶槽谷地貌与峰丛洼地地貌中土壤酸化的空间特征及关键驱动力。结果表明: (1) 区内土壤 pH 范围为 4.62~8.19, 主要以弱酸性 ($5.5 \leq \text{pH} < 6.5$) 和酸性 ($4.5 \leq \text{pH} < 5.5$) 为主。在不同地貌类型中, $\text{pH} < 6.5$ 的土壤样品占比顺序为: 岩溶槽谷 (61.0%) < 峰丛洼地 (69.2%) < 非岩溶区 (75.0%); (2) 岩溶区小生境复杂多样, 在酸雨影响下, 成土母质可能是研究区内控制土壤 pH 的关键因子, 而土壤 pH 空间分异格局可能是多因子共同作用的结果; (3) 坡度对土壤 pH 空间分异的影响仅次于成土母质, 表现为土壤 pH 随坡度的增加而升高, 且其与成土母质的交互作用对研究区内土壤 pH 空间分异的解释力最大。区内土壤酸化防治建议: (1) 根据成土母质和坡度因子进行分区分类, 并在岩溶槽谷和非岩溶区内设定土壤酸化重点监测区, 进行精准防治; (2) 除了对酸雨的防控外, 还应该重视诸如氮肥使用、工业和矿业活动等外源性因素对土壤的影响。

关键词: 土壤酸化; 土壤 pH; 峰丛洼地; 岩溶槽谷; 地理探测器

中图分类号: S153.4 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810 (2022) 05-0784-12 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

自然条件下, 土壤酸化的过程非常缓慢, 一般需要经历数十年甚至数百年^[1]。工业革命以来, 人类活动极大地加大了酸雨的发生频率和影响范围, 加速了土壤酸化的进程。我国出现土壤酸化的土地面积也在日趋扩大^[2]。在酸雨的影响下, 土壤酸化已成为华南地区农业面临的重要生态环境问题^[3]。土壤酸化会导致土壤贫瘠、土壤质量下降、重金属活性增强等问题, 影响了土壤微生物活动和植物的生长发育^[4-6], 甚至影响整个区域的生态环境质量^[7], 威胁到人类食品安全与人体健康^[8]。准确掌握土壤酸碱度 (pH) 的变化趋势是合理制定农业管理措施和土壤酸

化防治措施的基本前提。1980 年以来, 酸沉降愈加严重, 尽管土壤中的有机质、盐基离子和碳酸钙、黏粒等组分具有一定缓冲土壤酸化的能力^[9], 但是在长期酸雨的影响下, 广东省土壤 pH 呈现酸化趋势明显, 其中强酸性 ($\text{pH} < 4.5$) 和酸性 $4.5 \leq \text{pH} < 5.5$ 土壤的耕地面积分别占广东省总耕地面积的 3.6% 和 27.5%^[4]。广东北部区域 (粤北) 分布着连片的岩溶区^[10], 岩溶土壤中含有较高的碳酸钙成分, 可在一定范围内提高土壤的 pH^[11], 对因酸沉降和化肥施用等外源酸 (硫酸和硝酸) 造成的土壤酸化具有一定的缓冲作用。因此, 研究粤北岩溶区土壤 pH 空间分异和驱动因素可为土地可持续利用 (如酸性土壤改良)、石漠化生态修复和碳酸盐岩风化的碳汇研究提供理论基础,

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42007177, 41571091); 广东省哲学社会科学规划项目 (GD19CGL02)

第一作者简介: 吴雨珩 (2001—), 男, 从事人文地理与城乡规划。E-mail: wuyuheng0322@126.com。

通信作者: 曾发明 (1987—), 男, 博士, 讲师, 从事岩溶环境钙碳循环研究。E-mail: famingzeng@fosu.edu.cn。

收稿日期: 2022-03-20

具有一定的科学价值。

目前,针对土壤 pH 空间异质性的研究较为广泛,从研究的空间尺度上,省域尺度^[12]、市县尺度^[3,6,13]和流域尺度^[14]都有涉及,特别是有关流域或者小流域尺度的土壤 pH 异质性的研究已得到学者的重点关注;从研究的方法模型上,GIS 插值和地统计学方法应用比较成熟^[15];从影响因子上,植被覆盖^[16]、土壤类型^[17]、气候条件^[18]、水文条件^[19]、地形地貌和人类活动^[20]等都是影响土壤 pH 空间分异的关键因素;但是,针对岩溶区土壤 pH 的影响因素和驱动因子的研究,学者尚存不同的观点^[5,18,21]。在非岩溶区的平原区、丘陵区等土壤分布均匀、地形变化较小,且人口分布集中,土壤 pH 异质性的主控因素多为外源性因素^[20,22];而岩溶区地质背景脆弱,水文结构复杂,影响土壤 pH 空间异质性的因素及其交互作用难以确定^[6,14,23-25],需要分情况讨论。为了更好地探究粤北岩溶区土壤 pH 的异质性和主控因素,本文在粤北连江流域内选取了成土母质和气候条件极其相似的两种典型岩溶地貌区作为研究对象,采用地理探测器构建了以成土母质、归一化植被指数(NDVI)、归一化水分指数(NDWI)、归一化建筑指数(NDBI)、坡向和坡度等因素为指标的分析方法,对峰丛洼地和岩溶槽谷区土壤 pH 值异质性的驱动机理进行实证分析,以期回答以下科学问题:(1)不同岩溶地貌下土壤 pH 空间异质性特征及其主要影响因素;(2)岩溶区土壤酸化的驱动因子及其交互作用。

1 研究区概况

研究区主要分布在粤北的清远市内,包括阳山县的岭北镇、江英镇、青莲镇和英德市的黄花镇,面积约为 677 km²,坐标位置介于 112°38'00"~113°03'00"E, 24°09'00"~24°47'00"N 之间(图 1),属亚热带季风气候区,年均气温在 19~20℃ 之间,多年平均降雨量为 1 770 mm^[16]。研究区地形复杂,海拔范围为-21~1 071 m,地势为南北高、中间低。从研究区地质图(图 1d)来看,区内主要为岩溶地层,分布着两种典型的岩溶地貌,即岩溶槽谷和峰丛洼地(图 1c),两种岩溶地貌以连江为界,北部为地质构造作用形成的岩溶槽谷地貌,南部主要为峰丛洼地地貌;两种岩溶地貌之间因连江的溶蚀,形成了宽度约为 8 km 的非岩溶带。连江河道右侧出露震

旦纪的砂岩地层,宽度约为 7 km;连江河道左侧阶段分布着第四系沉积层,宽度约为 1 km(图 1d)。据水文地质资料和现场调研得知,研究区主要以灰岩、白云岩、白云质灰岩等碳酸盐岩类为主,其余为砂岩、砂砾岩和花岗岩;研究区的岩溶山地植被资源得到了有效的保护,其中南部的峰丛洼地区有广东清新白湾省级自然保护区(未能采集土壤样品)和广东英德国家森林公园(黄花镇区域);北部岩溶槽谷区分布着大面积国家公益性生态林。

2 研究方法

2.1 数据来源与处理

在网格布点的基础上,结合研究区岩溶地貌类型、成土母质和土地利用类型共采集土样样品 66 个(图 1)。样品采集时间为 2020 年 7 月和 2021 年 11 月,采样深度为 0~20 cm,利用 GPS(Garmin, GPSMAP639SC)记录样点的经纬度坐标和海拔,并记录样地的土壤类型、母岩类型、土地利用类型等信息,带回土壤实验室,参照《土壤 pH 值的测定》NY/T1377-2007 标准进行室内风干、研磨和过筛处理后,测定土壤 pH。

研究区 Landsat 8 遥感影像数据(2018 年)和 ASTER GDEM 数据来源于地理数据云网站(<http://www.gscloud.cn>),其空间分辨率均为 30 m;研究区的水文地质图(1:20 万)来源于中国地质调查局地质云网站(<https://geocloud.cgs.gov.cn/>)。运用 ENVI5.3 软件对遥感影像进行几何校正,在 ArcMap10.5 软件平台中将遥感影像数据、ASTER GDEM 数据和水文地质图进行配准,配准误差控制在 0.5 个像元内。归一化植被指数(NDVI)、归一化水分指数(NDWI)和归一化建筑指数(NDBI)等三个指标是由 2018 年遥感数据在 ENVI 软件中栅格计算获得;坡度和坡向指标是在 ArcMap10.5 软件平台中从 DEM 数据中提取获得。土壤 pH 的空间插值是通过 ArcMap 10.5 地统计模块实现的;另外,在研究区进行采样间距为 300 m 的网格分析,共提取 6 258 个网格点,作为地理探测器的运行数据,进行因子分析与交互作用分析。数据描述性统计分析采用的是 SPSS25.0 软件;遥感数据的处理采用 ENVI 5.3 软件;DEM 数据处理和空间分析采用 ArcGIS 10.5;数据的主导因子分析与交互作用分析是采用的地理探测器程序包^[26]。

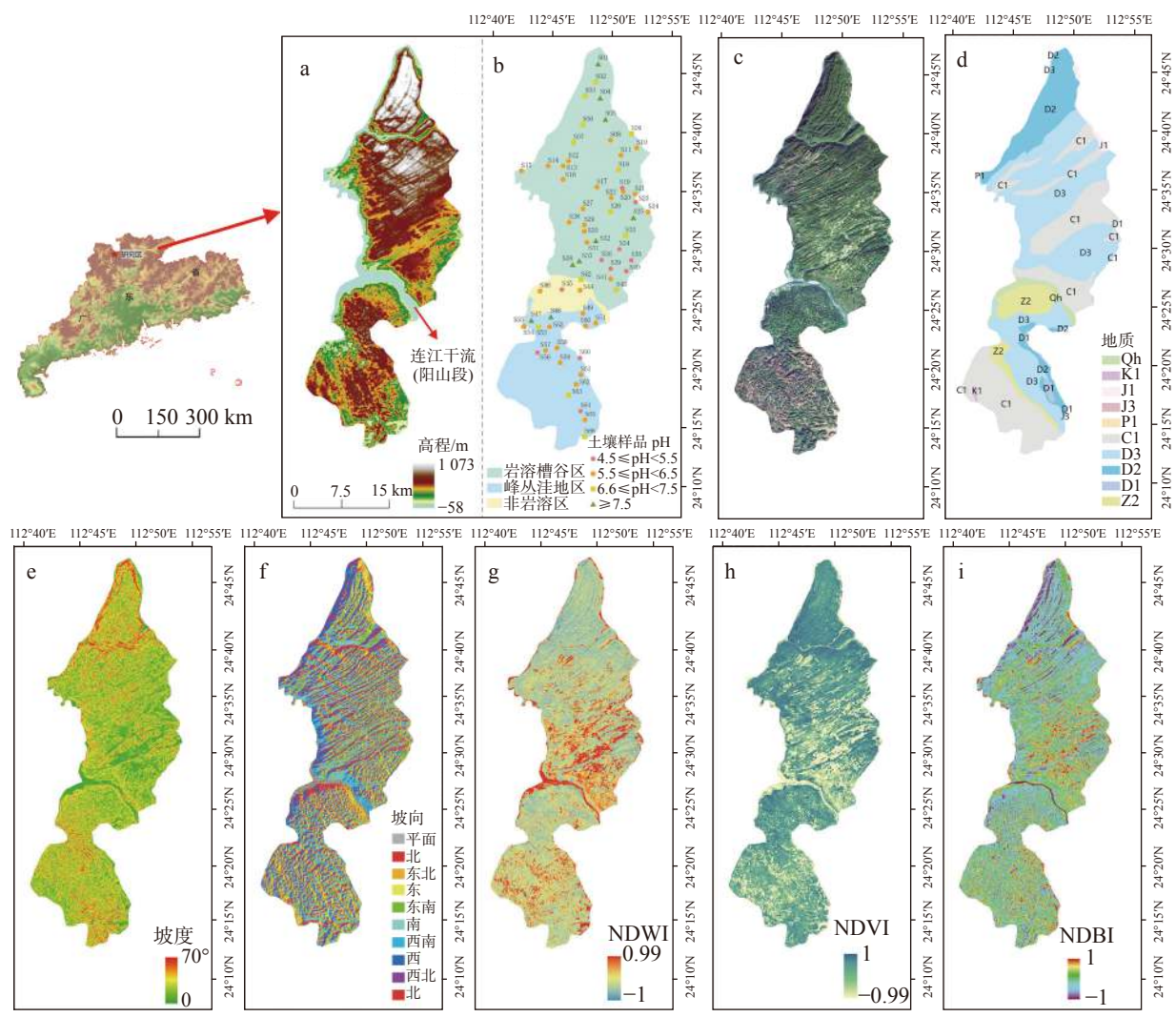


图 1 研究区概况图

a.研究区 DEM 分布图 b.样点分布图 c.研究区的遥感影像 d.研究区的水文地质图,其地层代码分别为: Q_h 为第四纪, K₁ 为白垩纪下统, J₁ 为侏罗纪下统, J₂ 为侏罗纪上统, P₁ 二叠纪下统, C₁ 石炭纪下统, D₃ 泥盆纪上统, D₂ 泥盆纪中统, D₁ 为泥盆纪下统, Z₂ 震旦纪中统 e,f. 由 DEM 提取的坡度和坡向图 g,h,i.通过遥感图提取的归一化水体指数(NDWI)、归一化植被指数(NDVI)和归一化建筑指数(NDBI)等指数的空间分布图

Fig. 1 Overview map of the study area

a. DEM map b. Distribution of sampling points c. Remote sensing images of the study area d. Hydrogeology map of the study area e. Gradient map by DEM f. Aspect map by DEM g. Distribution map of NDWI based on remote sensing images h. Distribution map of NDVI remote sensing images i. Distribution map of NDBI remote sensing images

2.2 地理探测器

地理探测器是探测要素的空间分异性,揭示其背后驱动力的一组统计学方法^[26]。地理探测器通过分别计算和比较各单因子 q 值及两因子叠加后的 q 值,判断两因子是否存在交互作用,以及交互作用的强弱、方向、线性还是非线性等,其主要应用于空间分异性的影响因素识别与作用机制的研究。地理探测器共包括 4 部分,本文主要采用因子探测器和交互探测器来分析不同影响因子对土壤 pH 空间分

异的影响。

(1)因子探测器模型:

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{i=1}^L N_i \sigma_i^2 \tag{1}$$

式中:把研究区的影响因素分为 L 层,用 $i=1, 2, \dots, L$ 来表示, N_i 和 N 为层 i 内和区域内的单元数; σ_i^2 和 σ^2 分别是土壤 pH 在层 i 和全区的方差; $q \in [0, 1]$, q 值越接近于 1,表示该影响因子对土壤 pH 的解释力越强,根据 q 值大小可识别土壤酸碱度空间分异的

主导因子。

(2)交互作用探测器是地理探测器相对于其他统计方法的最大优势,可用于探测影响因素间是独立作用还是交互作用,通过对比单因子的 q 值与双因子的 q 值大小可以判断两因子间的交互作用方式及方向,交互作用方式的判断公式见表 1。

3 结果与分析

3.1 土壤pH 统计分析

土壤 pH 等级按照碱性($\text{pH} \geq 7.5$)、中性($6.5 \leq \text{pH} < 7.5$)、弱酸性($5.5 \leq \text{pH} < 6.5$)、酸性($4.5 \leq \text{pH} < 5.5$)和强酸性($\text{pH} < 4.5$)的标准进行划分^[27]。不同岩溶地貌的土壤 pH 描述性统计结果见表 2。研究区土壤全部样品的 pH 范围为 4.62~8.19,平均值为 6.29 ± 0.92 ,方差为 0.85;岩溶槽谷区土壤 pH 范围为 4.62~8.19,平均值为 6.38 ± 0.95 ,方差为 0.91;峰丛洼地区的土壤 pH 范围为 5.29~8.03,平均值为 6.31 ± 0.90 ,方差为 0.81;非岩溶区土壤 pH 范围为 4.71~7.75,平均值为 5.99 ± 0.92 ,方差为 0.73。总体来看,研究区内土壤 pH 均值呈现弱酸性水平,未检出强酸性土壤样品($\text{pH} < 4.5$),检出部分碱性土壤样品($\text{pH} \geq 7.5$),表

表 1 交互作用判断公式	
Table 1 Judgment formula of interaction	
交互作用	判据
加强	$q(x_1 \cap x_2) > q(x_1)$ 或 $q(x_2)$
加强,双线性	$q(x_1 \cap x_2) > q(x_1)$ 和 $q(x_2)$
加强,非线性	$q(x_1 \cap x_2) > q(x_1) + q(x_2)$
减弱	$q(x_1 \cap x_2) < q(x_1) + q(x_2)$
减弱,单线性	$q(x_1 \cap x_2) < q(x_1)$ 或 $q(x_2)$
减弱,非线性	$q(x_1 \cap x_2) < q(x_1)$ 和 $q(x_2)$
独立	$q(x_1 \cap x_2) = q(x_1) + q(x_2)$

表 2 不同地貌类型土壤 pH 的统计表						
Table 2 Descriptive statistics of soil pH in different landforms						
统计分类	样本数/个	最小值	最大值	平均值	标准差	方差
岩溶槽谷区	41	4.62	8.19	6.38	0.95	0.91
峰丛洼地区	12	5.29	8.03	6.31	0.90	0.81
非岩溶区	13	4.71	7.75	5.99	0.85	0.73
研究区	66	4.62	8.19	6.29	0.92	0.85

明酸雨对区内土壤的 pH 已产生了实质性的影响,存在土壤被酸化的风险。

从土壤样品 pH 分布频率图(图 2)来看,研究区土壤 pH 等级以弱酸性为主,岩溶槽谷区、峰丛洼地区和非岩溶区分别占比为 43.9%, 53.8% 和 58.3%;从酸化土壤的频率占比来看, $\text{pH} < 6.5$ (弱酸性和酸性)的土壤样品按占比为:岩溶槽谷(61.0%)<峰丛洼地(69.2%)<非岩溶区(75.0%),占比均已超过 60%,说明研究区土壤酸化现象已经很普遍了,土壤酸化的防治工作刻不容缓。研究区碱性土壤样品($\text{pH} \geq 7.5$)虽有检出,但是占比较少,顺序为:岩溶槽谷(17%)>峰丛洼地(15.4%)>非岩溶区(8.3%)。峰丛洼地和岩溶槽谷区的碱性土壤占比是非岩溶区的近两倍,揭示出研究区内岩溶区土壤 pH 一般高于非岩溶区的土壤 pH,说明研究区内岩溶土壤对酸雨的缓冲作用可能大于非岩溶区的土壤。

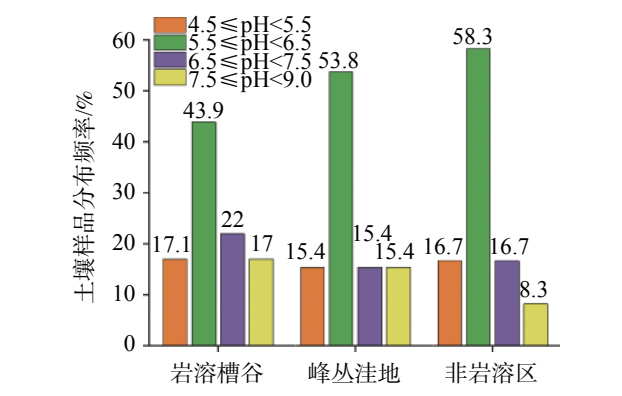


图 2 不同地貌类型下土壤样品 pH 百分比
Fig. 2 pH percentage of soil samples in different landforms

3.2 土壤pH 空间分布格局

根据粤北岩溶区取样点的实测数据,在不同半变异函数模型综合判别的基础上,采用普通 Kriging 方法插值得到研究区域的土壤 pH 空间插值预测分布图(图 3)。从土壤 pH 空间插值预测分布图可以看出,非岩溶区和峰丛洼地区的土壤 pH 主要分布在 $5.5 \leq \text{pH} < 6.5$ 区间,其中,峰丛洼地中,除北部有少部分中性土壤区域分布外,其余都以酸性和弱酸性或碱性土壤为主;而岩溶槽谷区土壤 pH 等级分布较广,其中,酸性土壤($\text{pH} < 5.5$)主要分布在岩溶槽谷区的南端;碱性土壤分布在槽谷区的东北角,但面积较小;中性土壤在北部、中部和南部区域都有分布。总体

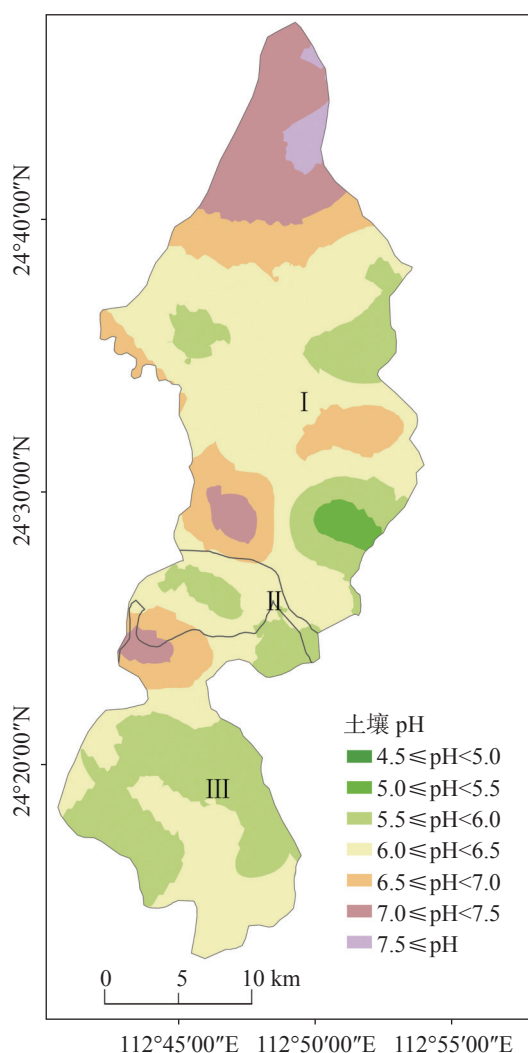


图3 研究区土壤 pH 克里金空间插值预测分布图

I. 岩溶槽谷区 II. 非岩溶区 III. 峰丛洼地区

Fig. 3 Distribution map of soil pH kriging spatial interpolation in the study area

I. Landform of karst trough valley II. Non-karst landform
III. Landform of cluster-peak depression

来看,研究区内碱性土壤占比偏低,这与其他相关调查研究结果一致,表明在酸雨的影响下,粤北地区土壤 pH 等级已处于弱酸性和酸性等级水平。

不同因子影响下,土壤 pH 的空间分异特征明显(图 4)。分析图 4 可发现:

(1)不同成土母质的土壤 pH 均值呈现出非碳酸盐岩 < 白云质灰岩 < 白云岩 < 灰岩的分布规律(图 4b),说明不同的成土母质直接影响着土壤酸化的过程,其中碳酸盐岩的缓冲能力强于非碳酸盐岩;

(2)岩溶槽谷区不同土地利用类型土壤 pH 的均值表现为:林地 > 草地 > 耕地(图 4c),说明土地利用

类型对土壤 pH 的空间分异格局具有一定的影响作用;

(3)研究区内土壤 pH 随坡度的增加而升高(图 4d),而坡向因子对土壤 pH 的分布影响不太明显(图 4a),说明在研究区内坡度因子的影响力强于坡向因子。

3.3 地理探测器因子分析

地理探测器分析得出的各因子 q 值(q 值越大,其解释力越大)结果(图 5)显示:

(1)非岩溶区中各单因子的 q 值排序为:成土母质 > 坡度 > NDVI > 坡向 > NDBI > NDWI; 峰丛洼地区的 q 值排序依次为:成土母质 > 坡度 > NDVI > NDWI > 坡向 > NDBI; 而岩溶槽谷区的 q 值排序依次为:成土母质 > 坡度 > NDWI > NDVI > NDBI > 坡向。从整个研究区来看,各单因子的 q 值表现为:成土母质 > 坡度 > NDVI > NDWI > NDBI > 坡向。各因子对土壤 pH 的解释力大小排序不一致,表明出不同地貌类型对土壤 pH 的影响存在差异,且成土母质因子的 q 值最大,说明成土母质可能是研究区内控制土壤 pH 空间分异的主控单因子。

(2)非岩溶区和峰丛洼地地貌的各因子间交互作用主要以非线性增强关系(即交互作用后的 q 值大于各单因子之和)为主,两区域中对土壤 pH 空间分异解释力最大的一组双因子均为“成土母质与 NDVI”;在岩溶槽谷区,双因子之间的交互作用多为双因子线性增强关系(即交互作用后的 q 值均大于各单因子),其对土壤 pH 空间分异解释力最大的双因子组合是“成土母质与 NDWI”;而总体上来看,研究区中双因子之间的交互作用主要表现为双因子线性增强,但解释力最大的双因子组合则是“成土母质与坡度”。所以,不同地貌类型中影响土壤 pH 空间分异的主控双因子存在差异,说明研究区内土壤 pH 空间分异格局不是由单因子(成土母质)决定的,可能是多因子共同作用的结果,具体情形仍需进一步探究。

4 讨 论

4.1 成土母质与土壤酸化

相关统计资料研究表明,2010-2015 年广东省降雨及酸雨频率呈现以清远、阳江为中心,向周围逐渐

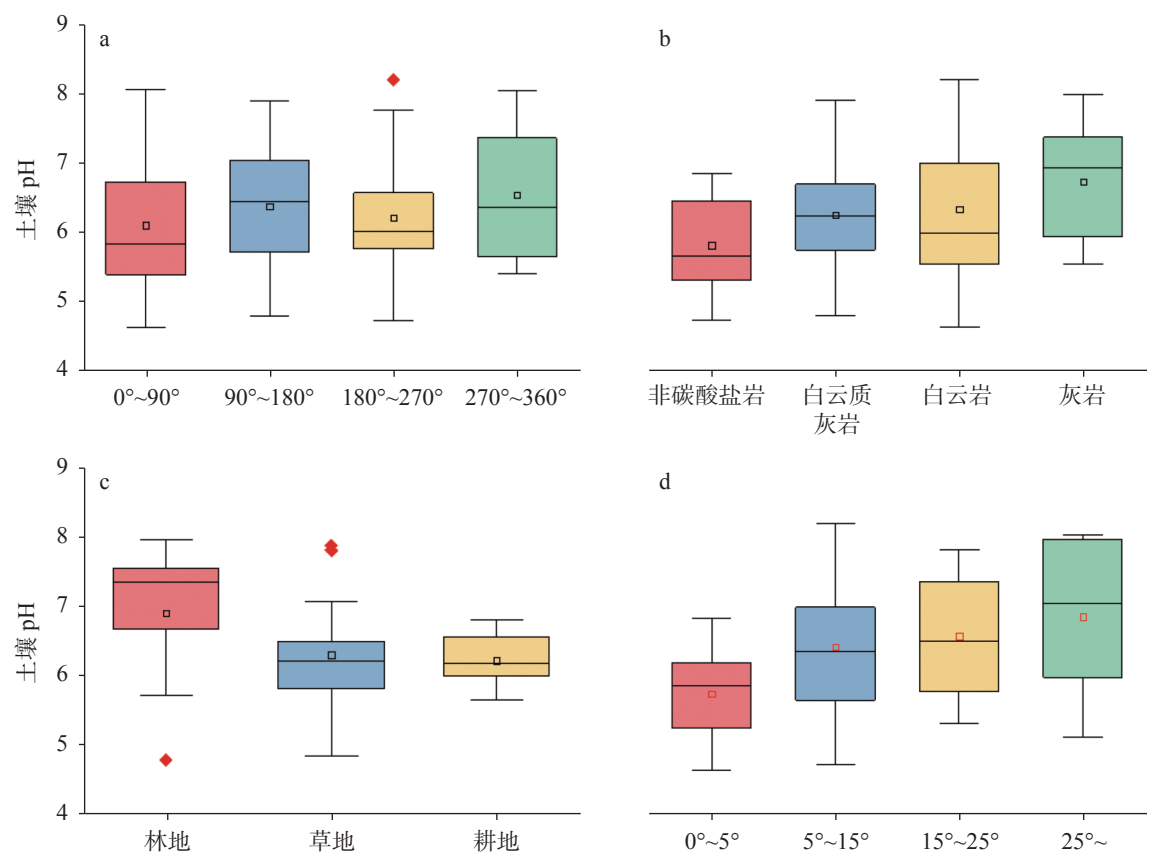


图 4 不同影响因子下土壤 pH 的箱形图

a.不同坡向条件下土壤 pH 的箱形图, b.不同成土母质的土壤 pH 的箱形图,
c.岩溶槽谷中不同土地利用类型土壤 pH 的箱形图, d.坡度条件下土壤 pH 的箱形图

Fig. 4 Bar-plot of soil pH in different factors

a.Aspects, b.Soil parent materials, c.Land types in the karst trough valley, d.Gradients

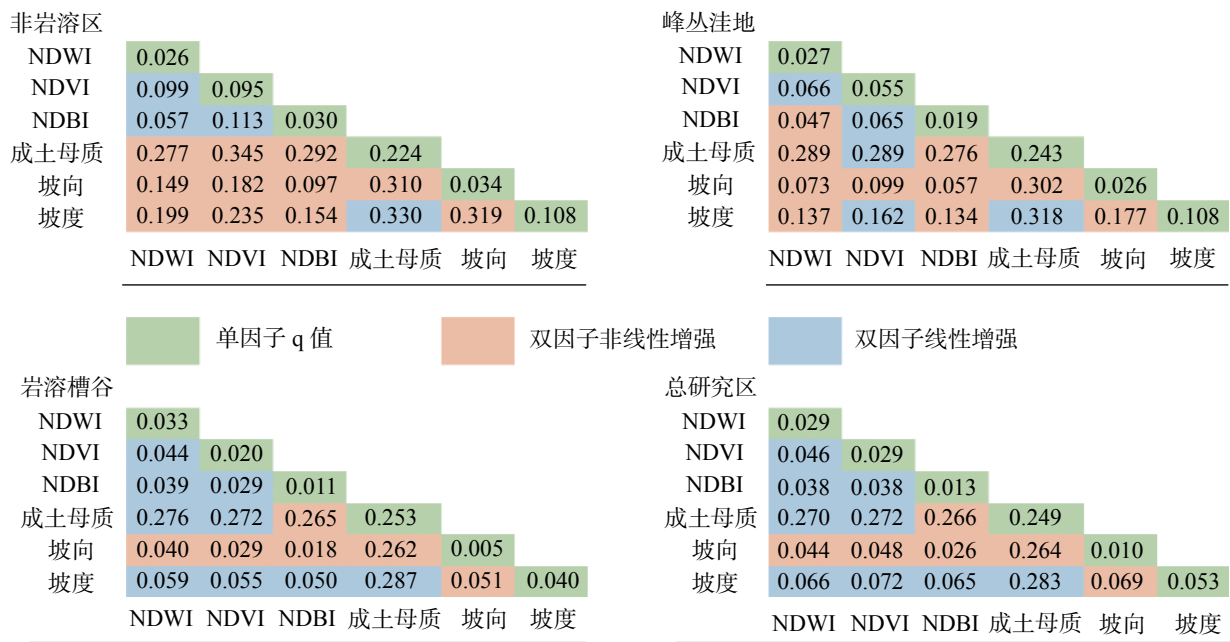


图 5 研究区不同地貌类型下因子交互探测的 q 值结果

Fig. 5 q values of interactive detection in different landforms

减弱的趋势^[28],而研究区正处于清远的酸雨中心。研究区内岩溶槽谷地貌和峰丛洼地地貌边缘相距最远仅有 8 km,且在同一气候环境中,则可假设峰丛洼地区和岩溶槽谷区单位面积上酸雨的 pH 和降雨量都相同。这样,在不同地貌单元内,酸雨对土壤 pH 的影响程度主要由其所处的环境条件(如成土母质、植被覆盖、土壤水分、土地利用等)决定。在因子探测结果(图 5)中成土母质对土壤 pH 空间分异的解释力均大于其他因子,说明成土母质是决定研究区土壤酸化程度的主控因子。

研究区水文地质图(图 1d)显示,区内的地层年代主要为泥盆纪(下统 D_1 、中统 D_2 、上统 D_3)和石炭纪(下统 C_1)的碳酸盐岩地层(图 1d)。据水文地质资料得知,泥盆纪下统 D_1 主要为桂头群,包括杨溪组和老虎头组,其上部为灰岩,下部为砾岩,砂砾岩夹砂岩;泥盆纪中统 D_2 ,主要为棋子桥组和东岗岭组,以巨厚—厚层状灰岩为主,夹白云岩;上统 D_3 主要为融县组和巴漆组与融县组并层,以中厚—厚层白云质灰岩为主;石炭纪下统 C_1 主要为石磴子组和连县组,以中厚—厚层白云质灰岩和白云岩为主。非岩溶区沿连江河谷分布,其河谷段右岸经过剥蚀作用已显露出震旦纪地层(Z_2 ,主要为乐昌峡群,岩性以浅变质的长石石英砂岩和砂岩为主),左岸有些许第四纪沉积阶地(以砂、砂砾夹亚砂土为主);在地质构造作用下部分侏罗纪和白垩纪的花岗岩侵入,分布在岩溶槽谷区,其岩性以粗粒、中粒、细粒(或斑状)黑云母花岗岩为主。成土母质为碳酸盐岩的区域容易发育形成石灰土,而石灰土的土壤 pH 一般较高^[28],其原因主要是土壤中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和碳酸钙可提高土壤 pH^[11,29-30]。所以,研究区内岩溶土壤 pH 会高于非岩溶土壤,其对酸雨的缓冲能力也更强。而岩溶区内部土壤 pH 呈现白云质灰岩 < 白云岩 < 灰岩的分布规律,可能与土壤中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和游离态的碳酸钙比例相关。另外,土壤 pH 空间插值预测图(图 3)显示,研究区内土壤 pH 等级总体以弱酸性为主,说明粤北岩溶区土壤酸化现象已经凸显,当地政府需采取措施阻止土壤进一步酸化。

4.2 地形因子对岩溶土壤 pH 空间分布格局的影响

从不同岩溶地貌单元来看,岩溶槽谷区与峰丛洼地区都具有特征明显的正负地形:粤北岩溶槽谷区受地质构造的影响,区内槽谷呈 NE 向背斜/向斜

构造发育,岩层构造倾角变化大,受多种岩性控制^[31],在地形空间上以山坡—槽坝的组合交替出现;而在峰丛洼地区,不均匀溶蚀导致区域内遍布峰丛-洼地的地貌组合。一方面,由于坡度因子与水土流失量成正相关关系^[32],在雨水侵蚀下,正地形区域中坡度越高,其水土流失现象越严重,土壤向负地形区域迁移直至基岩裸露为止,部分峰丛(或槽坝)的山体由此呈现石漠化现象,加之海拔较高处裸露的碳酸盐岩可进一步缓冲酸雨的影响,并增加较低处土壤中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量,会一定程度上提高采样区土壤 pH;另一方面,负地形的谷地和洼地一般堆积着较多土壤,但两地貌单元中土壤分布存有差异:在岩溶槽谷区,土壤呈并列的长条状连片分布;而在峰丛洼地区,因地下管道系统十分发育,洼地区的土壤流失加剧,导致整个峰丛洼地区的地块较为破碎,这也就是岩溶槽谷区(成土母质与 NDWI)与峰丛洼地区(成土母质与 NDVI)中双因子交互解释力组存在差别的原因。另外,研究区内坡度因子对土壤 pH 空间分异的解释力仅次于成土母质(图 5),土壤 pH 均值存在随坡度的增加而升高的趋势(图 4d),表明坡度因子对区内土壤 pH 的空间分布格局的影响较大,建议在土壤酸化防治规划时,可将坡度因子作为划分土壤酸化治理重点区的指标之一。

4.3 土壤 pH 空间分布格局的决定性因素

图 5 显示不同岩溶地貌类型中土壤 pH 空间分异主控双因子的变化,究其原因可能与岩溶小生境有关。峰丛洼地区相对岩溶槽谷区来说,地下岩溶更发育,二元水文结构更显著,地表土壤与地下空间的高连通性,产生了特殊的土壤—岩石环境,形成复杂多变的峰丛洼地生态系统和类型多样的小生境^[33]。一方面,是由于小生境中的植被对酸雨具有一定的缓冲能力^[34]。该现象在研究区也可找到例证,比如,在图 3 中 I 区(岩溶槽谷区)北部出现连片的中性和碱性土壤区域($pH > 7.5$),该区域为国家公益性林地,其山体植被覆盖状况较好,以灌木为主,谷地区还有乔木分布。图 4c 显示岩溶槽谷区内不同土地利用类型土壤 pH 均值从大到小呈现:林地 > 草地 > 耕地的分布特征,也可间接证明这一点。另一方面原因可能是小生境的水文过程存在差异。酸雨过程中,雨水在峰丛洼地区会快速通过表层岩溶带渗透进入地下,历时较短^[35];而岩溶槽谷区仅在

地下管道发育处,雨水渗漏才会加强^[36],其排泄时间可能相对更长,蓄积量更多,这也增加了岩溶槽谷区土壤酸化的风险。此外,人类活动(诸如土地利用类型、肥料使用、工业和矿业活动等)的影响又增加了小生境的复杂性。

图3显示研究区土壤pH的空间插值预测图块金效应明显,特别是中部的三处图斑(岩溶槽谷区南部和峰丛洼地北部各有一处 $7.0 < \text{pH} < 7.5$ 的中性图斑;岩溶槽谷区东南部还有一处为 $4.0 < \text{pH} < 5.0$ 酸性图斑),其控制因素可能与人类活动有关。相关研究表明,平原、丘陵等土壤分布均匀、地形变化较小,且人口分布集中的区域,土壤pH异质性的主控因素多为外源性因素^[20,22]。广东省影响耕地土壤pH变化的因素除了酸雨,还有农业活动和工业与矿业活动等外源性因素^[27],其中,氮肥的施用可降低土壤pH^[37]。岩溶槽谷区域内酸性土壤样品占比最高(图2),可能与氮肥施用有关,因为岩溶槽谷的谷地中分布着肥沃的、较厚的土壤^[38],地形较为平坦,适合发展农业种植,其氮肥使用较多。另外,工业活动和矿山开发,也可导致局部地区土壤的pH上升^[12]。图4中不同土地利用类型中,土壤pH的箱形图(图4c)显示草地存在异常值。其中,草地的最大异常值(S47)分布在废弃的选矿场附近,可能是该区域矿山开发过程中导致的碱性物质扩散的结果。综上所述,岩溶区小生境复杂多样,决定其土壤pH空间格局的不是单一的影响因子,而是多因子共同作用的结果。因此,针对区内土壤酸化问题,建议根据成土母质和坡度因子进行分区分类防治,并同时关注诸如氮肥、工业和矿业活动等外源性因素。

5 结 论

本文基于实地采样数据,结合GIS地统计方法,通过克里金普通插值得出了粤北研究区土壤pH空间预测图,在此基础上利用地理探测器方法揭示了岩溶槽谷与峰丛洼地两种不同地貌形态区域内土壤pH空间分异的驱动力及因子之间的交互作用,主要得到以下结论:

(1)粤北岩溶区内土壤酸化问题已经凸显,其中,土壤pH主要以弱酸性和酸性为主,不同地貌

类型的 $\text{pH} < 6.5$ 的土壤分布频率占比顺序为:岩溶槽谷(61.0%) < 峰丛洼地(69.2%) < 非岩溶区(75.0%),酸化土壤比均已超过60%,当地政府应予以关注;

(2)成土母质直接影响着土壤酸化的过程,其可能是研究区内控制土壤pH的关键因子,而土壤pH空间分异格局可能是多因子共同作用的结果,其中,坡度对土壤pH空间分异的影响仅次于成土母质。因此,针对区内土壤酸化防治问题,建议根据成土母质和坡度因子进行分区分类,在岩溶槽谷和非岩溶区内设定土壤酸化重点监测区进行精准防治。同时,也应重视诸如氮肥使用、工业和矿业活动等外源性因素的影响。

参考文献

- [1] 张玲玉,赵学强,沈仁芳.土壤酸化及其生态效应[J].生态学杂志,2019,38(06):1900-1908.
ZHANG Lingyu, ZHAO Xueqiang, SHEN Renfang. Soil acidification and its ecological effects[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(06): 1900-1908.
- [2] Else K. Bunemann, Giulia Bongiorno, BAI Zhanguo, Rachel E Creamer, Gerlinde De Deyn, Ron De Goede, Luuk Fleskens, Violette Geissen, Thom W. Kuyper, Paul Mader, Mirjam Pulleman, Wijnand Sukkel, Jan Willem van Groenigen, Lijbert Brussaard Soil quality: A critical review[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2018, 120: 105-125.
- [3] 薛跃,张忠启,沈玉叶,李景章.典型红壤区土壤pH时空变异特征:以鹰潭市余江区为例[J].土壤通报,2020,51(6):1323-1331.
XUE Yue, ZHANG Zhongqi, SHEN Yuye, LI Jingzhang. Spatio-temporal Variability of Soil pH in the Typical Red Soil Region-Take Yujiang District of Yingtan as an Example[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020, 51(6): 1323-1331.
- [4] 张晗,赵小敏,朱美青,欧阳真程,郭熙,匡丽花,叶英聪,黄聪,汪晓燕,李伟峰.近30年南方丘陵山区耕地土壤养分时空演变特征:以江西省为例[J].水土保持研究,2018,25(2):58-65,71,2.
ZHANG Han, ZHAO Xiaomin, ZHU Meiqing, OUYANG Zhencheng, GUO Xi, KUANG Lihua, YE Yingcong, HUANG Cong, WANG Xiaoyan, LI Weifeng. Characteristics of spatiotemporal variability of cultivated soil nutrients in the southern hilly area of China in the past 30 years: A case study of Jiangxi province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(2): 58-65, 71, 2.
- [5] 毛伟,李文西,高晖,陈欣,姜义,杭天文,龚鑫鑫,陈明,张月平.扬州市耕地土壤pH值30年演变及其驱动因子[J].植物营

- 养与肥料学报, 2017, 23(4): 883-893.
- MAO Wei, LI Wenxi, GAO Hui, CHEN Xin, JIANG Yi, HANG Tianwen, GONG Xinxin, CHEN Ming, ZHANG Yueping. pH variation and the driving factors of farmlands in Yangzhou for 30 years[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(4): 883-893.
- [6] 刘月娇, 张洋, 倪九派, 周川. 基于地统计学烟区土壤养分及pH值空间异质性分析: 以重庆市酉阳县岩溶区为例[J]. 中国岩溶, 2014, 33(3): 319-325.
- LIU Yuejiao, ZHANG Yang, NI Jiupai, ZHOU Chuan. Spatial heterogeneity of soil nutrients and pH in tobacco area based on geostatistics: A case study in a karst area of Youyang county, Chongqing[J]. Carsologica Sinica, 2014, 33(3): 319-325.
- [7] F Bastida, A Zsolnay, T Hernandez, C Garcia. Past, present and future of soil quality indices: A biological perspective[J]. *Geoderma*, 2008, 147(3-4): 159-171.
- [8] 王娇, 关欣, 黄苛, 朱睦楠, 宿秀江, 杨庆朋. 酸沉降对森林生态系统碳循环关键过程的影响研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2021, 27(3): 776-785.
- WANG Jiao, GUAN Xin, HUANG Ke, ZHU Munan, SU Xiujiang, YANG Qingpeng. Effect of acid deposition on the key processes in the carbon cycle of forest ecosystems: a review [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2021, 27 (3): 776-785.
- [9] 刘娇嫻, 崔骏, 刘洪宝, 潘琦, 何小松. 土壤改良剂改良酸化土壤的研究进展[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(1): 173-184.
- LIU Jiaoxian, CUI Jun, LIU Hongbao, PAN Qi, HE Xiaosong. Research progress of soil amelioration of acidified soil by soil amendments[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(1): 173-184.
- [10] 黄金国, 魏兴琥, 王兮之. 粤北岩溶山区土地石漠化成因及其生态经济治理模式[J]. 水土保持研究, 2013, 20(4): 105-109.
- HUANG Jinguo, WEI Xinghu, WANG Xizhi. The origin and eco-economics improvement model of the rock desertification in karst mountain area of northern Guangdong[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20(4): 105-109.
- [11] 贺婧, 赵亚平, 关连珠. 土壤中游离碳酸钙对土壤pH及酶活性的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2011, 42(5): 614-617.
- HE Jing, ZHAO Yaping, GUAN Lianzhu. Effect of free calcium carbonate on soil pH and enzyme activities[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2011, 42(5): 614-617.
- [12] 郭治兴, 王静, 柴敏, 陈泽鹏, 詹振寿, 郑武平, 魏秀国. 近30年来广东省土壤pH值的时空变化[J]. 应用生态学报, 2011, 22(2): 425-430.
- GUO Zhixing, WANG Jing, CAI Min, CHENG Zhepeng, ZHAN Zhensou, ZHEN Wuping, WEI Xiuguo. Spatiotemporal variation of soil pH in Guangdong province of China in past 30 years[J]. Chinese journal of applied ecology, 2011, 22(2): 425-430.
- [13] 王亚男, 徐梦洁, 代圆凤, 符德龙, 黄化刚, 陈雪, 庄舜尧. 毕节市耕地土壤pH的空间变异特征与影响因素[J]. 土壤, 2018, 50(2): 385-390.
- WANG Yanan, XU Mengjie, DAI Yuanfeng, FU Delong, HUANG Huagang, CHEN Xue, ZHUANG Shun Yao. Spatial Characteristics and Influential Factors of Arable Soil pH in Bijie, Guizhou[J]. Soils, 2018, 50(2): 385-390.
- [14] 蒋勇军. 流域尺度的岩溶区土壤pH值空间变异研究: 以云南小江流域为例[J]. 中国岩溶, 2009, 28 (1): 80-86.
- JIANG Yongjun. Spatial variability of karst soil pH on drainage basin scale: A case in Xiaojiang basin, Yunnan[J]. Carsologica Sinica, 2009, 28(1): 80-86.
- [15] 张维, 李启权, 王昌全, 袁大刚, 罗由林, 张新, 贾荔. 川中丘陵县域土壤pH空间变异及影响因素分析: 以四川仁寿县为例[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(7): 1192-1199.
- ZHANG Wei, LI Qiquan, WANG Cangquan, YUAN Dagang, LUO Youlin, ZHANG Xin, JIA Li. Spatial variability of soil pH and its influence factors at a county scale in hilly area of mid-Sichuan basin: A case study from Renshou in Sichuan[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24 (7): 1192-1199.
- [16] 王兮之, 甘春英, 梁钊雄, 高全洲. 粤北岩溶山区连江流域植被覆盖度动态变化研究[J]. 中国岩溶, 2010, 29(4): 425-433.
- WANG Xizhi, GAN Chunying, LIANG Zhaoxiong, GAO Quanzhou. Regime of vegetation coverage in Lianjiang watershed in North Guangdong karst mountain[J]. Carsologica Sinica, 2010, 29(4): 425-433.
- [17] 黄至颖, 刘鸿雁, 冉晓追, 王雪雯, 蒲利明. 贵州省土壤pH时空变化趋势分析[J]. 山地农业生物学报, 2020, 39(4): 21-29.
- HUANG Zhiying, LIU Hongyan, RAN Xiaozhui, WANG Xuewen, PU Liming. Spatial and Temporal Distribution of Soil pH in Guizhou Province[J]. Journal of mountain agriculture and biology, 2020, 39(4): 21-29.
- [18] 王洪, 曹婧, 毋俊华, 陈怡平. 近40年来陕西省耕层土壤pH的时空变化特征[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(6): 1117-1126.
- WANG Hong, CAO Jing, WU Junhua, CHEN Yiping. Spatial and temporal variability in soil pH of Shaanxi Province over the last 40 years[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(6): 1117-1126.
- [19] 康璇, 王雪梅, 赵枫. 干旱区绿洲土壤pH值与电导率的空间变异研究[J]. 西南农业学报, 2016, 29(11): 2660-2664.
- KANG Xuan, WANG Xuemei, ZHAO Feng. Study on spatial variability of soil pH value and conductivity in arid oases[J]. Southwest China journal of agricultural sciences, 2016, 29(11): 2660-2664.
- [20] 朱小琴, 孙维侠, 黄标, 王洪杰, 赵永存, 史学正, 于东升. 长江三角洲城乡交错区农业土壤pH特征及影响因素探: 以江苏省无锡市为例[J]. 土壤学报, 2009, 46(4): 594-602.

- ZHU Xiaoqin, SUN Weixia, WANG Biao, WANG Hongjie, ZHAO Yongcun, SHI Xuezheng, YU Dongsheng. pH characters of agricultural soil in peri-urban areas of the Yangtze River Delta Region and their affecting factors: A case study of Wuxi City, China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(4): 594-602.
- [21] 张忠启, 茆彭, 于东升, 徐莉. 近25年来典型红壤区土壤pH变化特征: 以江西省余江县为例[J]. *土壤学报*, 2018, 55(6): 1545-1553.
- ZHANG Zhongqi, MAO Peng, YU Dongsheng, XU Li. Characteristics of Soil pH Variation in Typical Red Soil Region of South China in the Past 25 Years: A Case Study of Yujiang County, Jiangxi Province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(6): 1545-1553.
- [22] 孔德莉, 张海涛, 何迅, 任文海, 胡群中, 肖斯予, 武学妍. 基于PLSPM模型的鄂西南部分区域耕地土壤pH影响因素研究[J]. *土壤*, 2021, 53(4): 809-816.
- KONG Deli, ZHANG Haitao, HE Xun, REN Wenhui, HU Qunzhong, XIAO Siyu, WU Xueyan. Influencing Factors of Farmland Soil pH in Southwest Hubei Based on PLSPM Model[J]. *Soils*, 2021, 53(4): 809-816.
- [23] 尹辉, 蒋忠诚, 杨奇勇, 李晖. 典型岩溶区土壤pH值的空间异质性研究[J]. *广东农业科学*, 2013, 40(11): 48-51, 237.
- YIN Hui, JIANG Zhongcheng, YANG Qiyong, LI Hui. Study of spatial variability of soil pH in typical karst area[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2013, 40(11): 48-51, 237.
- [24] 陈清霞, 陆晓辉, 涂成龙. 安顺市土壤pH空间变异及影响因素分析[J]. *环境科学*, 2022, 43(4): 2124-2132.
- CHEN Qingxia, LU Xiaohui, TU Chenglong. Spatial variation and influencing factors of soil in Anshun city[J]. *Environmental science*, 2022, 43(4): 2124-2132.
- [25] CAO Feng, GE Yong, WANG Jingfeng. Optimal discretization for geographical detectors-based risk assessment[J]. *Giscience & Remote Sensing*, 2013, 50(1): 78-92.
- [26] 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 Jingfeng, XU Chengdong. Geodetector: Principle and prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134.
- [27] 张桥, 张育灿, 郑超, 袁宇志, 郭治兴, 梁雪映, 王帅, 郭颖. 广东粮食生产功能区土壤pH值的时空变化[J]. *土壤通报*, 2020, 51(4): 775-783.
- ZHANG Qiao, ZHANG Yucan, ZHENG Chao, YUAN Yuzhi, GUO Zhixing, LIANG Xueying, WANG Shuai, GUO Ying. Temporal-spatial Changes of Soil pH Value in the Grain Production Functional Areas of Guangdong Province[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, 51(4): 775-783.
- [28] 周峻宇, 李明德, 周旋, 唐珍琦, 谷雨, 吴海勇, 刘琼峰. 南方典型母质发育水稻土剖面酸化特征研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2022(3): 7-13.
- ZHOU Junyu, LI Mingde, ZHOU Xuan, TANG Zhenqi, GU Yu, WU Haiyong, LIU Qiongfeng. Study on acidification characteristics of paddy soils profiles developed from typical parent materials in south China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022(3): 7-13.
- [29] 张元培, 吴颖, 郑雄伟. 湖北省土壤酸碱度趋势分析及影响因素[J]. *资源环境与工程*, 2018, 32(S1): 30-34.
- ZHANG Yuanpei, WU Ying, ZHENG Xiongwei. Trend Analysis and Influencing Factors of Soil Acidity and Alkalinity in Hubei[J]. *Resources Environment & Engineering*, 2018, 32(S1): 30-34.
- [30] 蔡凯, 高维常, 潘文杰, 姜超英, 张恒, 李洪勋, 林叶春. 贵州烟田土壤pH、交换性钙镁和CaCO₃含量分布特征及其相互关系[J]. *土壤通报*, 2022, 53(3): 532-539.
- CAI Kai, GAO Weichang, PAN Wenjie, JIANG Chaoying, ZHANG Heng, LI Hongxun, LIN Yechun. Distribution Characteristics and Relationships of Soil pH, Exchangeable Ca²⁺, Mg²⁺ and CaCO₃ in Tobacco-planting Fields in Guizhou[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(3): 532-539.
- [31] 王权, 唐芳, 李阳兵, 黄娟, 白雪飘. 岩溶地区景观格局演变及其生态安全的时空分异: 以贵州省东北部槽谷为例[J]. *生态学报*, 2021, 41(18): 7273-7291.
- WANG Quan, TANG Fang, LI Yangbing, HUANG Juan, BAI Xuepiao. Spatio-temporal differentiation of landscape pattern evolution and its ecological security in karst areas: A case study of trough valley in northeast Guizhou Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(18): 7273-7291.
- [32] 邱扬, 傅伯杰, 王勇. 土壤侵蚀时空变异及其与环境因子的时空关系[J]. *水土保持学报*, 2002(1): 108-111.
- QIU Yang, FU Bojie, WANG Yong. Spatiotemporal variation in soil erosion and its relation to environmental factors[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002(1): 108-111.
- [33] 陈洪松, 付智勇, 张伟, 聂云鹏. 西南喀斯特地区水土过程与植被恢复重建[J]. *自然杂志*, 2018, 40(1): 41-46.
- CHEN Hongsong, FU Zhiyong, ZHANG Wei, NIE Yunpeng. Soil water processes and vegetation restoration in karst regions of southwest China[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2018, 40(1): 41-46.
- [34] 宋文龙, 杨胜天, 温志群, 蔡明勇, 白晓辉, 高芳. 贵州典型森林群落植被冠层的酸雨淋溶特征及缓冲作用[J]. *环境科学学报*, 2010, 30(1): 15-23.
- SONG Wenlong, YANG Shentian, WEN Zhiqun, CAI Mingyong, BAI Xiaohui, GAO Fang. Canopy buffering and leaching of a typical forest community under acid rain in Guizhou Province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(1): 15-23.
- [35] ZENG Faming, JIANG Zhongcheng, SHEN Lina, CHEN Wei, YANG Qiyong, ZHANG Cheng. Assessment of multiple and interacting modes of soil loss in the karst critical zone, Southwest China (SWC)[J]. *Geomorphology*, 2018, 322: 97-106.
- [36] 魏兴琥, 刘淑娟, 徐喜珍, 雷俐, 周红艳, 梁钊雄. 粤北岩溶山地

- 土壤地下漏失程度评价指标构建探讨[J]. 热带地理, 2021, 41(5): 1000-1008.
- WEI Xinghu, LIU Shujuan, XU Xizhen, LEI Li, ZHOU Hongyan, LIANG Zhaoxiong. Grading Standard for Determining Underground Soil Leakage in a Mountain with Karst Topography in the North of Guangdong Province[J]. Tropical Geography, 2021, 41 (5): 1000-1008.
- [37] 周晓阳, 周世伟, 徐明岗, Colinet Gilles. 中国南方水稻土酸化演变特征及影响因素[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4811-4817.
- ZHOU Xiaoyang, ZHOU Shiwei, XU Minggang, Colinet Gilles. Evolution characteristics and influence factors of acidification in paddy soil of Southern China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(23): 4811-4817.
- [38] 曾发明, 吴泽燕, 章程, 杨奇勇. 峰丛洼地区石漠化治理的碳汇研究进展[J]. 中国岩溶, 2018, 37(1): 67-73.
- ZENG Faming, WU Zeyan, ZHANG Cheng, YANG Qiyong. Carbon sink in rocky desertification restoration, Southwest China: A case of the peak-cluster depression areas[J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(1): 67-73.

Spatial variation of soil acidification in the karst area of northern Guangdong: A case in peak cluster depression and karst trough valley landforms

WU Yuheng, ZENG Faming, WEI Xinghu, LIU Shujuan, HUANG Jinguo

(School of Environmental and Chemical Engineering Foshan University, Foshan, Guangzhou 528000, China)

Abstract The process of soil acidification is very slow under the natural conditions, which generally takes decades or even hundreds of years. However, since the Industrial Revolution, human activities have greatly accelerated the process of soil acidification. The effect of acid rain is one of the main reasons for the process. The problems caused by soil acidification, such as barren soil, soil quality decline, enhanced heavy metal activities and others will affect soil microbial activities and the growth of plants, and then affect the quality of ecological environment in the whole region, hence threatening the food safety and human health. Soil acidification has become an important ecological and environmental problem that has to be faced in the agriculture development of south China. Therefore, distribution of soil pH is the key to control measures for soil acidification in karst areas.

In order to study the spatial variation of soil acidification in karst areas, an investigation was conducted to assess the status of soil pH in the karst trough landform and cluster-peak depression landform in northern Guangdong located in the acid rain area of south China. Methods such as normalized vegetation index (NDVI), normalized moisture index (NDWI), normalized building index (NDBI), slope aspect and gradient were used to analyze the driving mechanism of soil pH heterogeneity in cluster-peak depression and karst trough valley. The research questions are listed as follows, (1) What are the characteristics of spatial variation of soil pH in different karst landforms and what are the main influencing factors of the variation? (2) What are the driving factors and interactive effects of soil acidification in karst areas?

The results show that pH values of the total soil samples range from 4.62 to 8.19 with the mean of 6.29 ± 0.92 and the variance of 0.85; the soil pH values in karst trough valley range from 4.62 to 8.19 with the mean of 6.38 ± 0.95 and the variance of 0.91; the pH values in cluster-peak depression range from 5.29 to 8.03 with the mean of 6.31 ± 0.90 and the variance of 0.81; the pH values in non-karst area range from 4.71 to 7.55 with the mean of 5.99 ± 0.92 and the variance of 0.73. Generally speaking, the average soil pH of total samples shows weak acidity, and no soil samples with strong acidity ($\text{pH} < 4.5$) are detected, but alkaline soil samples ($\text{pH} \geq 7.5$) in some landforms are detected. The results indicate a substantial impact of acid rain on the soil pH of karst areas and the risk of soil acidification. According to the distribution frequency of soil pH values, the soil pH in the whole study area is mainly weakly acid

and acid. The pH values (<6.5) of soil samples in different landforms are ranked as follows, karst trough valley (61.0%) $<$ cluster-peak depression (69.2%) $<$ non-karst area (75.0%), indicating that soil acidification in the study area has been widespread and its control is urgent.

Through the analysis of the spatial characteristics of soil pH, the variation of the mean value of soil pH presents the following rules, (1) Distribution of the soil pH shows that soil parent materials directly affect the process of soil acidification. Under the conditions of different soil parent materials, the mean values of soil pH are ranked as, non-carbonate $<$ dolomitic limestone $<$ dolomite $<$ limestone, indicating that the buffer capacity of carbonate rock is stronger than that of non-carbonate rock. (2) Soil pH values in the study area increase with the rise of gradient, but the factor of slope aspect does not show an obvious influence on distribution of soil pH. These results indicate that the influence of the gradient factor in the study area is stronger than that of the slope aspect. (3) In the karst trough valley, the mean values of soil pH in different land use types are ranked as, woodland $>$ grassland $>$ cultivated land, indicating that the land use type, in some degree, is influential in the spatial variation of soil pH.

The karst environment is very complex. With the effect of acid rain, the soil parent materials, which may be the key factor to control the soil pH in the study area, directly affect the process of soil acidification. But distribution of soil pH spatial variation may be caused by multiple factors. In general, soil pH values in the study area show an increase with the rise of gradient. The influence of gradient on soil pH spatial variation is followed by that of soil parent materials. The interactive effect of gradient and soil parent materials shows great explanatory power for the spatial variation of soil pH in the study area. Therefore, soil acidification control is advisably to be carried out in northern Guangdong, and the gradient factor should be taken as one of the indicators. Besides the influence of acid rain, other exogenous factors such as nitrogen fertilizer, and industrial and mining activities, should also be paid attention to.

With the integration of geostatistics, the geodetector is used to further analyze the driving factors of soil pH spatial variation and their interactive effects in the karst area in north Guangdong, based on the forecast of soil pH kriging spatial interpolation. However, the effect of rocky desertification and the scaling effects of different sizes of spatial statistical units on the geodetector model have not been fully explored. These limitations will be overcome in the future research.

Key words soil acidification, soil pH, cluster-peak depression, karst trough valley, geodetector

(编辑 张玲)