

马国斌, 覃星铭, 胡宝清, 等. 典型岩溶峰丛洼地土壤肥力空间分异及权衡/协同关系分析[J]. 中国岩溶, 2025, 44(3): 544-554.

DOI: 10.11932/karst2025y005

典型岩溶峰丛洼地土壤肥力空间分异 及权衡/协同关系分析

马国斌, 覃星铭, 胡宝清, 屈子涵, 孙 琪

(南宁师范大学北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室/广西地表过程与
智能模拟重点实验室, 广西南宁 530001)

摘要: 科学评价网格尺度下的岩溶峰丛洼地土壤肥力水平是实现区域土壤精细化施肥保肥的重要基础。文章基于平果市典型峰丛洼地实测采样与网格预测的土壤数据, 通过半方差函数模型、空间集聚模型以及斯皮尔曼相关系数等方法探析肥力指标的空间分布特征与权衡/协同关系。结果表明: 研究区全氮(TN)、全磷(TP)、有机质三项养分指标的空间分布总体呈自东北向西南降低的变化特点, 且其空间分异主要受人为活动等随机因素影响; 研究区土壤综合肥力为较缺乏水平, 三(中等)~五等(缺乏)肥力水平的土壤面积占比之和高达86.88%, 肥力空间大致呈东北高—西南低的分异格局; 五项肥力指标对土壤综合肥力的协同贡献大小为TP>TN>有机质>pH>土地利用, TK对于其余五项指标均表现出权衡损益效应, 土壤有机质、TN协同/权衡的主要空间类型为高一高协同增强型、低—低协同减弱型。平果市典型岩溶峰丛洼地土壤肥力状况总体一般, 各肥力元素权衡/协同效应显著, 可根据土壤肥力现状和农林生产需要, 通过水土保持、配方施肥、土地利用布局优化调整等方式改善岩溶峰丛洼地土壤肥力条件。

关键词: 岩溶峰丛洼地; 土壤肥力; 权衡/协同关系; 网格尺度; 空间分异

创新点: 基于典型岩溶峰丛洼地网格单元, 融合了地统计学模型、经济统计模型、克里金插值预测等多元方法, 开展网格尺度的土壤肥力评价, 并深刻剖析了不同等级土壤肥力与权衡/协同关系的空间格局, 为石漠化治理提供新思路。

中图分类号: S158 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2025)03-0544-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

土壤是农业生产、人类进步、社会发展最基本、最重要的自然资源之一^[1]。土壤肥力是土壤作为自然资源和农业生产资料的物质基础, 其肥力程度直接决定土地资源承载能力和植物生长发育潜力。近

二十年我国土壤肥力总体状况趋好, 但整体肥力偏低, 中低肥力土地面积占比高达86%, 有机质、氮、磷、钾等养分元素分布不平衡的窘况仍未改变^[2]。峰丛洼地作为一种典型的岩溶地貌, 在我国总面积高达16.69万km², 其中广西峰丛洼地面积为4.96万km², 约占全国峰丛洼地面积的29.72%、广西岩溶面

基金项目: 国家自然科学基金项目(42362031); 广西自然科学基金项目(2023GXNSFAA026440); 大学生创新训练项目(S202310603180, 202410603069)

第一作者简介: 马国斌(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩溶土壤质量影响研究。E-mail: mgbsdf@163.com。

通信作者: 覃星铭(1983—), 男, 博士, 硕士研究生导师, 主要从事岩溶水土资源过程研究。E-mail: qxm212@nnu.edu.cn。

收稿日期: 2024-01-01

积的59.54%，且普遍存在着基岩裸露、地力贫瘠、水肥流失等问题^[3-4]，严重影响区域农林生产效益。峰丛洼地石漠化综合治理与生态服务功能提升作为我国西南石漠化地区土壤生态改良的主抓手，亟待锚定峰丛洼地土壤造壤能力下降、养分含量降低的主要特点^[5]，开展土壤肥力评价并全面摸清峰丛洼地肥力空间分异特征及其权衡/协同关系，助推峰丛洼地生态重建及衍生生态农业发展。

众多学者在岩溶区土壤肥力的研究尺度、评价方法、肥力影响因素以及指标相关性、敏感性等方面取得了一定的研究成果。已有研究选取了土壤全量或有效态氮、磷、钾以及锌、铜、镉等土壤金属指标来构建综合评价肥力指标体系^[6-7]，从国家、省、市、县、乡五级作为基准尺度^[8-12]，广泛研究了农作物果园种植区、稻田、石漠化光伏区以及流域周边等不同地貌类型的典型区域土壤肥力质量状况，并通过综合评价法^[13]、主成分-相关系数分析法^[14-15]、内梅罗指数法^[16]等测算肥力水平并分析各肥力要素空间分布特征及其影响因素等多个方面。但基于网格尺度下岩溶峰丛洼地地区土壤肥力的空间分异特征及权衡/协同关系机制尚不清楚，不利于在岩溶峰丛洼地中开展土壤肥力精细化动态管理与土壤生态安全保障工程^[17]。

本文选取典型岩溶峰丛洼地土壤作为研究对象，以网格为评价单元，运用克里金插值科学分析pH、有机质、全氮、全磷、全钾等土壤养分指标的空间格局特征，将土地利用纳入可量化的肥力评价指标体系，综合评价研究区土壤肥力特征，利用空间集聚模型和斯皮尔曼相关系数研判各肥力指标间的空间集聚效应与权衡/协同关系，结合峰丛洼地土地利用现状剖析土壤肥力差异的原因，并提出针对性的施肥育土措施，对峰丛洼地土壤生态系统服务功能提升、岩溶生态系统保护和修复工作具有重要的实践意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西平果市太平镇西北部，地处太平镇向斜的东北翼、海城—坡造（龙怀）短轴背斜的西南翼，土地总面积约为28.01 km²，属于典型峰丛洼

地地貌，海拔223~647 m，总体地势东北高、西南低，地下水主要自东北向西南径流，并在研究区西南部边缘地区以岩溶泉或季节性岩溶泉的方式排出。地层岩性以二叠系白云质灰岩为主，土壤类型为碳酸盐岩类风化物发育的石灰土，质地较黏重。研究区气候属亚热带季风气候，年均降雨量约为1286 mm，年均气温约21.5℃，洼地底部及缓坡区主要土地利用类型为耕地和建设用地，坡地则以石山灌木为主，经济作物主要包括火龙果（*Hylocereus undatus* 'Foolon'）、砂糖橘（*Citrus reticulata* Blanco cv Shangtangju）和少量甘蔗（*Saccharum officinarum* L.）等。

1.2 采样与处理

依据网格及加密布点，采集研究区表层土壤（0~20 cm）样品（图1）。样品采集时，每个采样点按“S”或“X”形采集3~5个分样点样品并进行混合后装入干净结实的棉布土壤样品袋中，同时对采样点位置、土壤颜色与质地、地质地貌、土地利用类型及周边环境状况进行详细记录。所采集土壤样品经自然风干后，按照多目标地球化学调查规范和土壤农化的样品分析方法进行加工处理与测试分析^[18-19]，pH、有机质、TN、TP、TK的具体测试方法分别为离子选择性电极法、容量法、凯氏定氮法、荧光光谱法和等离子体光谱法^[20]。同时，为进一步细化研究区域尺度，提高肥力评价精度，借助ArcGIS 10.8“创建渔网”工具划定（500 m×500 m）单元网格作为基本评价单元，再利用44个已测样点数据，通过插值方法分别预测出所划分122个网格的TN、TP、TK、pH、有机

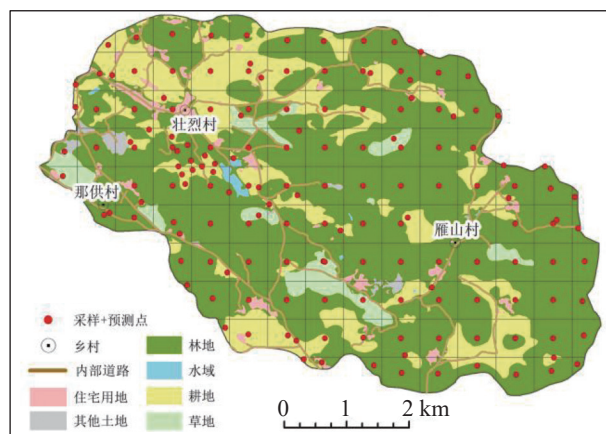


图1 研究区土壤样品采集预测与网格化处理

Fig. 1 Prediction and grid processing of soil sampling in the study area

质含量,插值结果与实际值间的相关系数为 0.782,说明插值预测精度较高。将每个网格面转为点,同时考虑到重复点或孤立点对评价分析结果的结构误差,采用探索性数据分析法(EDA)将异常点剔除^[21-22],最终获得 160 个有效点数据。

1.3 研究方法

1.3.1 土壤肥力综合评价模型

初始空段落

1.3.1.1 指标体系及其权重确定

参考《耕地质量等级》(GB/T33469)及相关文献^[23]设定土壤养分为一级类并选取土壤 pH、有机质、全量氮磷钾作为二级指标。由于不同土地利用类型的经营管理一定程度上会影响土壤肥力质量^[24],同时结合实地踏勘中个别采样点位于建设用地规划范围内(但尚无地上建筑物的土地),将耕地、草地、林地、其他土地与建设用地五大土地利用类型纳入指标体系并加以分级量化。

采用层次分析法(AHP)分析定量化指标数据的相对重要性权重向量,首先建立土壤肥力评价层次架构体系,在定量数据的基础上采用德尔菲法(Delphi)对评价过程的各项指标进行赋值,以此构造比较判断矩阵,最后对赋值结果进行一致性检验,若检验结果值<0.10,权重结果可取,反之,则需重新构造判断矩阵,直至通过一致性检验。同时,参照《农用地定级规程》(GB/T28405)、《广西农用地分等技术参数》以及耕地质量综合评价的文献^[25]对土壤有

机质、pH、全量氮磷钾设定分级标准,土地利用类型量化参考有关文献^[26],并结合 2022 年广西土地利用栅格数据(30 m×30 m)及实地调研取证情况,重设置量化分等指标(表 1)。

1.3.1.2 土壤肥力综合评价模型

基于指标量化结果,参考《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T0295)中的多因素综合评价法计算土壤综合肥力,并结合《耕地质量地球化学监测技术规范》,对评价结果进行等级划分(表 2),计算公式(1):

$$f_{\text{肥综}} = \sum_{i=1}^n k_i f_i \tag{1}$$

式中: $f_{\text{肥综}}$ 为六项肥力指标的总得分($1 \leq f_{\text{肥综}} \leq 5$); k_i 为各项指标的权重系数; f_i 为指标等级得分,等级越高得分越小,肥力水平越低。

1.3.2 半方差函数模型

半方差函数能够反映出各项养分元素在地理空间上的异质性,揭示预测各养分指标的空间分异特征^[21],计算公式(2):

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

式中: $\alpha(h)$ 是间距为 h 时的半方差; $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i+h)$ 分别对应变量在 x_i 和 x_i+h 的实测值; $N(h)$ 是间距为 h 时的观测点总对数。

1.3.3 权衡/协同分析方法

1.3.3.1 斯皮尔曼相关分析

采用斯皮尔曼相关系数研究土壤各项肥力指标

表 1 岩溶区土壤肥力综合评价指标体系及量化

Table 1 Index system and quantification of comprehensive evaluation of soil fertility in karst areas

一级指标	二级指标	评分分值					权重
		5	4	3	2	1	
土壤养分	pH	(6.5, 7.5]	(5.5, 6.5]或(7.5, 8.0]	(4.8, 5.5]或(8.0, 8.5]	(4.5, 5.0]	(0, 4.5]	0.030
	有机质	(30, 48]	(25, 30]	(20, 25]	(15, 20]	(10, 15]	0.073
	全氮	(2.2, 3.0]	(1.9, 2.2]	(1.6, 1.9]	(1.3, 1.6]	(1.0, 1.3]	0.439
	全磷	(1.2, 2.5]	(0.8, 1.2]	(0.4, 0.8]	(0.2, 0.4]	(0, 0.2]	0.291
	全钾	(20, 35]	(15, 20]	(10, 15]	(5, 10]	(0, 5]	0.152
立地条件	土地利用类型	耕地	草地	林地	其他土地	建设用地	0.016

表 2 土壤综合肥力等级划分表

Table 2 Grading of comprehensive soil fertility

等级	一等(丰富)	二等(较丰富)	三等(中等)	四等(较缺乏)	五等(缺乏)
$f_{\text{综肥}}$	≥ 4.0	4.0~3.5	3.5~3.0	3.0~2.5	< 2.5

间的权衡/协同关系,表征 pH、有机质、全量氮磷钾、土地利用类型间的单调作用关系,根据系数大小判断两两指标间的相关性强弱^[27],计算公式(3):

$$r_s(X_i, Y_i) = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n (P_i - Q_i)^2}{n(n^2 - 1)} \quad (3)$$

式中: P_i 指 X_i 在序列 $\{(X_i)\}$ 中第 k 个次序; k 为 X_i 的次序;同理, Q_i 为 Y_i 的次序。正(负)相关系数表示元素间存在协同(权衡)关系,不显著则表示两种元素存在独立关系。

1.3.3.2 双变量空间自相关

为进一步探究土壤肥力指标的空间差异特征,采用 GMI 宏观判断不同肥力指标的集聚效应,利用 LMI 反映各项肥力指标空间集聚或扩散的变化趋势,计算公式(4):

$$\begin{aligned} \text{GMI} &= \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})^2} \\ \text{LMI} &= \frac{n(x_i - \bar{x}) \sum_{i=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: n 为空间单元数; x_i 为样本属性值; $\bar{x}$ 为样本平均值; w_{ij} 为空间权重矩阵。

2 结果与分析

2.1 土壤养分指标描述性统计结果

由表 3 可知,研究区土壤 pH 在 4.00~8.14 之间,平均值为 6.37,土壤整体偏弱酸性,离散系数(CV)为 14.44%,表明土壤 pH 空间变异程度为中等。有机质含量平均值为 22.52×10^{-3} ,区域最高可达 46.90×10^{-3} ,岩溶区土壤有机质丰度较高,但 CV 值

为 31.56%,空间分布较为离散。整体分析可知,全量氮、磷、钾含量变化范围分别为 $1.00 \times 10^{-3} \sim 2.97 \times 10^{-3}$ 、 $0.13 \times 10^{-3} \sim 2.43 \times 10^{-3}$ 、 $1.30 \times 10^{-3} \sim 42.60 \times 10^{-3}$,平均值分别为 1.80×10^{-3} 、 0.54×10^{-3} 、 10.00×10^{-3} ,参考土壤养分分级标准可知, TN 处于二级($1.5 \times 10^{-3} \sim 2.0 \times 10^{-3}$)含量水平,而 TP、TK 含量总体处于中等偏低水平($0.4 \times 10^{-3} \sim 0.6 \times 10^{-3}$ 、 $10 \times 10^{-3} \sim 15 \times 10^{-3}$)。全量氮磷钾离散系数排序为 $\text{TN} < \text{TP} < \text{TK}$,均属于中等离散程度。采用 K-S 检验法对肥力指标进行单样本正态性检验,其渐近显著性值均 > 0.05 ,土壤各项养分元素均符合正态分布,满足统计 Kriging 分析的数据要求。

2.2 土壤养分指标空间分异特征

2.2.1 半方差模型结果

根据描述性统计及 GS+9.0 的半方差预测趋势结果,选取高斯模型(Gaussian)和指数模型(Exponential)作为五项土壤养分指标的最优参数模型(表 4),得出各指标可决系数均 > 0.65 ,表明各模型对指标的空间分布特征解释力较强。块金系数可衡量指标空间变异特征,当块金系数 $< 25\%$ 、 $25\% \sim 75\%$ 、 $> 75\%$ 时分别表示空间相关性较强、中等、较弱^[28], pH 的块金系数最小,其空间相关性最强,易受岩溶区结构性因素影响,余下四项指标块金系数均 $> 75\%$,呈现较弱的空间自相关性,主要受人类活动、施肥效率以及种植方式等随机因素的影响。

2.2.2 空间分布特征

由图 2 可知,土壤 TN 空间分布呈现“东高一中部一般—西低”分异特点。其中,东部的高含量集中分布区土地利用类型主要为火龙果种植地、林地等,农林活动相对频繁,施加氮肥较多,土壤全氮含量高,而西部 TN 低值区的土地利用类型主要为建设用地,外源施加氮肥的行为相对较少。TP 含量以弧形外

表 3 土壤养分指标描述性统计分析表

Table 3 Descriptive statistical analysis of soil nutrient index

指标	极小值	极大值	中值	均值	标准差	偏度	峰度	离散系数/%
pH	4.00	8.14	6.38	6.37	0.91	-0.18	-0.37	14.44
有机质/ $\times 10^{-3}$	10.60	46.90	20.40	22.52	7.06	0.98	0.69	31.56
TN/ $\times 10^{-3}$	1.00	2.97	1.79	1.80	0.28	0.382	1.708	15.82
TP/ $\times 10^{-3}$	0.13	2.43	0.43	0.54	0.38	2.117	5.286	69.83
TK/ $\times 10^{-3}$	1.30	42.60	7.82	10.00	7.02	0.22	5.50	70.00

表 4 土壤养分指标半方差统计结果表
Table 4 Semi-variance statistical results of soil nutrient indexes

指标	理论模型	块金值	基台值	块金系数	可决系数	残差平方
pH	Exponential	0.15	0.86	0.17	0.79	0.00
有机质	Gaussian	1.09	0.46	2.37	0.84	0.00
TN	Gaussian	1.13	0.19	5.95	0.87	0.00
TP	Gaussian	0.98	0.03	32.67	0.74	0.00
TK	Gaussian	0.85	0.14	6.07	0.68	0.00

扩的形式由东北向西南逐级下降,空间分布表现为“东北高一西南低”,含量高值主要地类为林地,而低含量区集中分布于中心城镇地带,呈现出较大范围的典型条环状分布。土壤 TK 呈现“西高—中部一般—东低”典型特征,与 TN 空间分布大体相反,各等级区以“板块状”由东向西不规则扩张,TK 含量东西方向差异较大,西部农用地区 TK 高值含量分布集中,东部林地缺钾,导致这一结果的原因可能是农用地频繁施钾肥所致。有机质含量空间特征大致为“北部高一东西两侧低”,与全量氮磷钾的含量高低密切相关,高有机质区域主要分布在水源充足的农用地和人类活动较少的林地,受到显著的地域结构性因素影响,坡度高、地形陡的耕地有机质含量较低。总体而言,土壤养分各指标高值含量区分布范围较小,低值区所占面积比超过 50%。土壤 TN、TP、

有机质的空间分布特征较为相似,大致呈现出“东北高一西南低”空间格局,与 TK 空间格局恰好相反,pH 的空间分布特点为“南高北低”,该现象说明研究区土壤各项养分具有独特的空间异质性,并与土地利用方式、岩溶地质背景条件存在一定关联性。

2.3 综合肥力评价结果分析

研究区土壤综合肥力评价分值为 1.66~4.52,平均分值为 2.93,整体肥力处于较缺乏水平。一等(丰富)~五等(缺乏)五个肥力等级网格数占比表现为四等(39.34%)>三等(25.41%)>五等(22.13%)>二等(9.84%)>一等(3.28%),肥力数量分布特征表现出典型的“头小尾大”的金字塔型数量结构。一等(丰富)等级的网格占比比二等(较丰富)少 6.56%,且一等、二等土壤肥力仅占网格数的 13.12%。三等、四

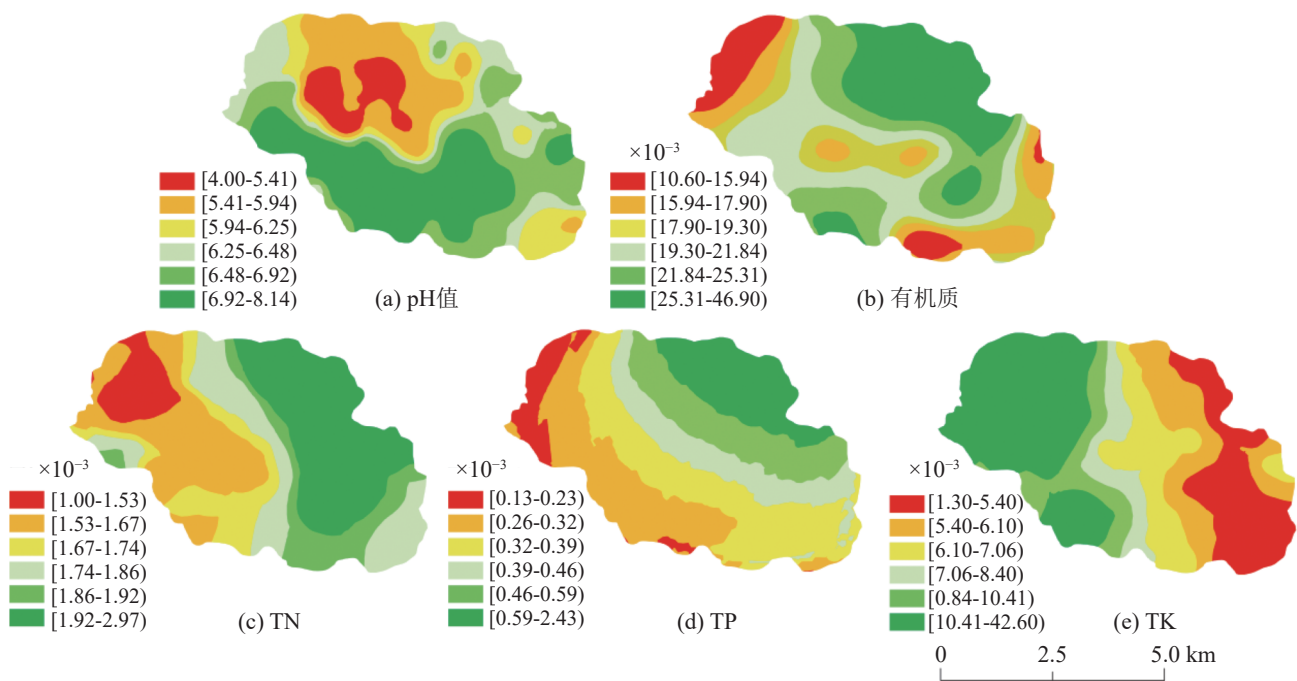


图 2 土壤各项养分指标空间分布特征图

Fig. 2 Spatial distribution characteristics of soil nutrient indexes

等、五等肥力水平网格占比之和高达 86.88%, 其中四等(较缺乏)肥力等级在这三个等级中比例最高, 说明研究区土壤肥力整体状况较差。

由图 3 空间分布格局可知, 研究区土壤肥力丰缺程度大致呈“东北高一西南低”的分布特点, 表明东北部土壤肥力状况较好, 西南部土壤肥力较差。一等、二等肥力区分布较为集中, 主要位于研究区东北部, 区域石山灌木林覆被度较高, 洼地底部耕地的人类活动强度较弱使得该区土壤肥力趋优; 三、四等肥力区分散, 各区域均有分布; 五等肥力缺乏区集中于西北部的坡耕地、住宅用地与陡坡林地, 该区域建设用地分布较广, 坡度大、农林活动较强, 导致土壤肥力趋劣。不同肥力等级间的空间差异特征较为明显, 具体表现为人口密集的建设用地区与坡度较高的林地和耕地区, 其土壤肥力属于缺乏或较缺乏状态; 坡度较缓的耕地、林地的土壤肥力位于一至三等, 肥力状况较好。

2.4 权衡/协同关系分析

运用斯皮尔曼相关系数开展权衡/协同分析, 量化各项肥力指标间相互作用强度。由表 5 可知, 有机质与 TN、TP 与 TN 的相关系数为 0.613、0.459, 说明 TN、TP 对有机质形成具有较强的协同促进效应, 较显著地推动土壤综合肥力的提升, 反观 TK 分别与 TN、TP、有机质、pH 的相关系数均小于 0, 呈较显著的权衡关系, 权衡关系强度为 TN>TP>有机质>pH, 说明 TK 对综合肥力的提升可能产生减效弱化的影响。产生上述现象的机理在于 K 元素被土壤颗粒吸附或固定在矿物晶格中, 主要参与植物体内的渗透调节、光合作用等生理过程, 而这些过程对土壤有机质积累和氮、磷循环的直接影响有限; 而有机质分解过程中释放的氮、磷可以被植物吸收利用, 促进植物的生长和发育, 同时植物的生长和发育又进一

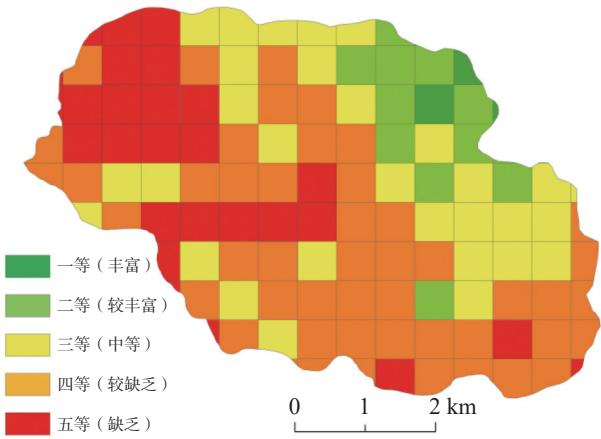


图 3 土壤肥力综合评价结果空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution of comprehensive evaluation of soil fertility

步促进有机质的积累和分解。另一方面, 由于岩溶峰丛山区土壤较为浅薄、土壤理化性质区域差异较明显, 源于外部作用的土地利用与各项养分指标间均存在一定的正或负相关作用, 具体表现为土地利用与 TP、TK、有机质间的相关性表现出中等协同增益关系, 对 TN 及 pH 则呈现中等权衡损益效应, 因此不同的土地利用方式可通过土地利用正负外部性直接影响到土壤养分水平, 以此促进或阻控土壤肥力的转化供应。

分析研究区土壤肥力指标权衡/协同在空间上的关联性, 有机质、TN、TK、TP 四项要素 Moran's I 指数分别为 0.842、0.815、0.747、0.571、0.475, p 值均为 0, Moran's I 指数均大于 0.40, 说明该五项指标受到的区域空间异质性影响较大, 空间集聚特征明显, 具备较为显著的空间协同效应; 而土壤 pH、土地利用的 Moran's I 指数值为 0.347、0.361, p 值为 0.05、0.10, 表明土壤 pH、土地利用并不具备显著的空间集聚特征, 其空间分布离散性大于有机质、TN、TK、TP。

土壤各项肥力指标局部空间自相关 LISA 集聚

表 5 土壤肥力指标斯皮尔曼相关系数
Table 5 Spearman correlation coefficient of soil fertility indexes

指标	TN	TP	TK	有机质	pH	土地利用	综合肥力
TN	1.00	——	——	——	——	——	——
TP	0.459**	1.00	——	——	——	——	——
TK	-0.426**	-0.332**	1.00	——	——	——	——
有机质	0.613**	0.389**	-0.299**	1.00	——	——	——
pH	0.249	-0.252	-0.208**	-0.02	1.00	——	——
土地利用	-0.127	0.227**	0.344	0.249	-0.163*	1.00	——

的结果显示,集聚类型中的不显著类型分布最为广泛,“高一高”集聚区大体都位于研究区东、西部,“高一低”集聚类型分布最少,零星分布在 pH、TP、TK、土地利用类型四项指标中(图 4)。总体上研究区除了无显著类型外,“低—低”集聚类型是最主要的空间集聚特征,而有机质、TN 主要空间集聚类型为高一高集聚、低—低集聚。土壤有机质、TN、TP 的“高一高”集聚协同增强区大致位于研究区东北部,土壤 TK 的 LISA 空间分布大致呈“西北高—东北低”,说明西北地区 TK 的协同集聚增效作用较为显著。土壤有机质、TN、TP、TK 以及土地利

用类型的“高一高”协同增强类型主要分布在农用地,“低—低”集聚协同减弱区主要属于建设用地,还零星分布于坡度较高的林地区域。土壤 pH 与综合肥力空间“高一高”集聚分布在建设用地、林地区域,“低—低”集聚协同减弱区集中分布在农田地区。不同用地类型下的集聚状态存在差异的主要原因是人类活动强度与自然环境禀赋间的冲突激化,区域各肥力要素间的互促耦合未实现协调,同时受地域自然环境质量贫瘠、农业生产条件发展滞后等制约,引致其余地区空间集聚的权衡/协同效应并不显著。

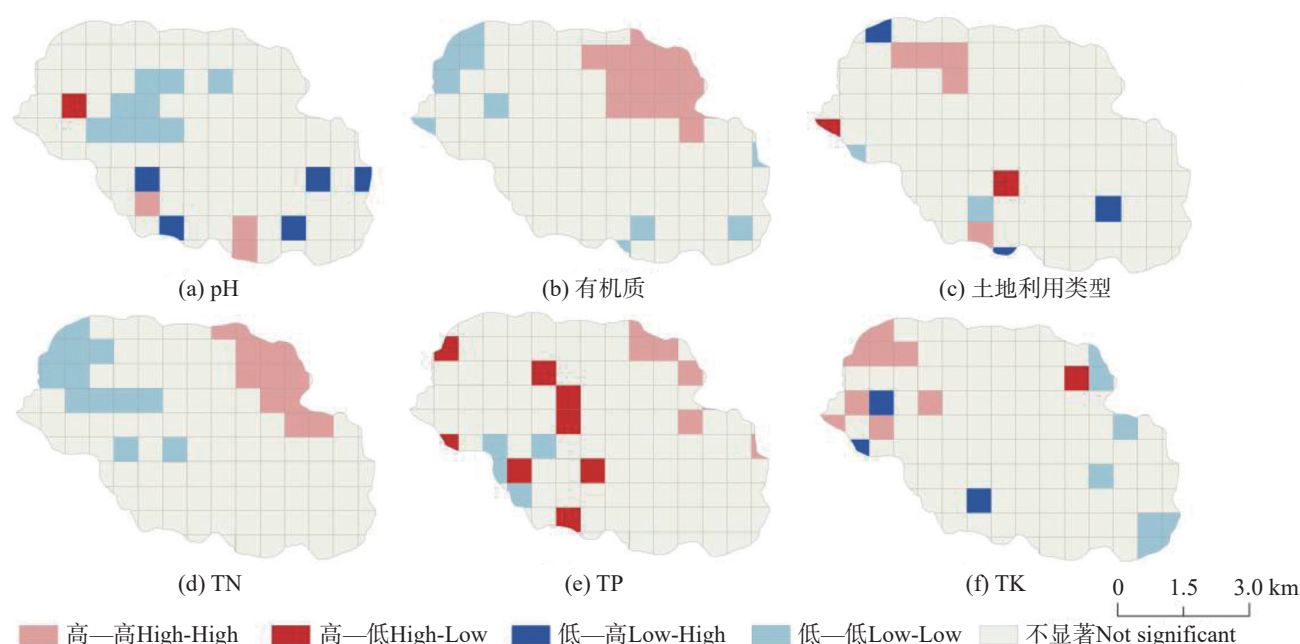


图 4 各土壤肥力指标 LISA 聚集图

Fig. 4 LISA aggregation diagram of each soil fertility index

3 讨论

3.1 指标体系及权重确定

土壤肥力指标的选取是科学测定区域土壤肥力的重要环节。根据《耕地质量等级》(GB/T33469)中明确的土壤肥力五项基本指标,土壤全量氮、磷、钾与有机质的主要来源是肥料、成土母质和植被腐质的浸润,pH 影响着土壤肥力有效态的转化进程。而随着岩溶区土壤质量管控趋于精细化,土地利用方式的转化与调整可有效改善、优化土壤质量结构^[29],因此,考虑到指标冗余度过高不利于数据结果

分析的这一问题^[30],基于土壤全量氮磷钾、有机质、pH、土地利用类型等构建指标体系。各项肥力指标间较为显著的权衡/协同关系与典型黄土残塬区的土壤理化指标相关性强弱接近^[31],有效验证了指标选取的合理性,可全面反映土壤养分供给能力。指标权重方面,按照五种土地利用类型分别对土壤肥力的影响程度及耕地质量评价指标量化方法对六项肥力指标进行量化赋值,通过层次分析法对量化指标计算权重,权重结果大致符合土壤肥力水平对耕地质量的权重敏感性^[32],进一步结合权衡/协同关系可知,指标权重与各项指标对土壤综合肥力的空间作用强弱关系基本一致。

3.2 肥力分布状况、影响因素及权衡/协同关系

岩溶区土壤中的有机质、全量氮磷钾等指标含量总体偏低,这可能与峰丛洼地岩石裸露度较高、成土培肥较缓等因素有关^[33]。虽然不同的用地类型、坡度、土壤肥力的空间分布特征具有异质性,但分析结果与前人得出的农用地、低坡林地土壤养分高的结果大体相近^[34-35],这可能与农业肥料增施、水土流失状况等有关。权衡/协同关系作为当前生态系统服务、土地利用功能领域的前沿热点,将其引用至土壤质量评价领域,能够科学研判峰丛洼地区土壤肥力指标间的权衡减效或协同增益关系。结果表明,研究区土壤受 TN、TP、有机质的协同增效影响最大,而 pH、土地利用两项指标对土壤肥力的协同促进效应一般,TK 与其余肥力指标间存在较弱的权衡损益关系,这一结果与在柑橘区、水稻区等所测定的土壤肥力指标的相关性结果相似^[36-37],验证了 pH 作为土壤肥力指标有效态形成的催化剂功能,以及土地利用转型优化是提升土壤肥力水平的外源驱动这一定论^[38]。因此,针对肥力缺乏等别的缓坡耕地、林地区域,可考虑通过科学施肥实现肥沃耕层土壤;处于肥力较缺乏水平的陡坡林地与耕地区域,则需要通过水土保持、水肥施配平衡、土地利用方式优化调整等多途径来解决岩溶区所面临的土壤浅薄、水肥流失问题,协调土壤养分的供给与利用。

4 结 论

(1)研究区土壤有机质、TN、TP、TK 四项指标呈现较弱的空间相关性,主要受人为活动等随机因素影响,土壤 pH 块金系数最小,易受岩溶区地质背景和结构性因素影响。土壤 pH、TK 的空间分布格局与 TN、TP、有机质的空间分布大体相反,土壤各项养分指标高值含量分布范围较小,低值区所占面积超 50%。

(2)研究区土壤肥力综合评分为 2.93,处于较缺乏水平,各肥力等级网格数量占比为四等>三等>五等>二等>一等,三一五等肥力水平网格占比之和高达 86.88%,总体肥力水平为较缺乏。空间上,各肥力等级空间分布大体呈东北高西南低的特点,一、二等级肥力集中分布于研究区东北部的低坡林地、农用地,肥力缺乏区主要位于西北部的坡耕地、住宅

用地与陡坡林地。

(3)除 TK 对各项肥力指标呈较弱的权衡关系外,有机质、TN、TP 两两间的协同互促效应较为显著,土地利用则与其余指标权衡/协同关系强度一般。而除 pH、土地利用的空间格局分布离散外,各项肥力指标 Moran's I 指数均>0.47,空间集聚性较强,但高一高集聚区较少,剔除无显著区后低—低集聚类型成为研究区最主要的空间集聚特征。土壤有机质、TN 协同/权衡的主要空间类型为高一高集聚协同增强以及低—低集聚协同减弱,且两种类型分别集中分布于农用地、建设用地与陡坡林地。

参考文献

- [1] Creamer R E, Barel J M, Bongiorno G, Zwetsloot M J. The life of soils: Integrating the who and how of multifunctionality[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2022, 166: 19-27.
- [2] 汤颖颖, 吴秀芹. 广西岩溶碳汇对气候变化和石漠化治理措施的响应[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2023, 59(2): 189-196. TANG Yingying, WU Xiuqin. Response of Karst Carbon Sink to Climate Change and Rocky Desertification Control Measures in Guangxi Zhuang Autonomous Region[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2023, 59(2): 189-196.
- [3] JIANG Zhongcheng, LIANG Yanqing, QIN Xiaoqun. Rocky desertification in South west China: Impacts, causes, and restoration[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 132: 1-12.
- [4] CUI Naxin, CAI Min, ZHANG Xu, Ahmed A Abdelhafez, ZHOU Li, SUN Huifeng, CHEN Guifa, ZOU Guoyan, ZHOU Sheng. Run off loss of nitrogen and phosphorus from a rice paddy field in the east of China: Effects of long-term chemical N fertilizer and organic manure applications[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 22: e01011.
- [5] 姜冰, 王松涛, 孙增兵, 张海瑞, 王建, 刘阳. 基于隶属度函数和主成分分析的耕地土壤肥力评价[J]. *中国农学通报*, 2023, 39(2): 22-27. JIANG Bing, WANG Songtao, SUN Zengbing, ZHANG Hairui, WANG Jian, LIU Yang. Evaluation of Cultivated Land Soil Fertility Based on Membership Function and Principal Component Analysis[J]. *China Agricultural Science Bulletin*, 2023, 39(2): 22-27.
- [6] LIU Jianguo, GOU Xiaohua, ZHANG Fen, BIAN Rui, YIN Dingcai. Spatial patterns in the C: N: P stoichiometry in Qinghai spruce and the soil across the Qilian Mountains, China[J]. *Catena*, 2021, 196: 104814-104829.
- [7] 裴小龙, 韩小龙, 钱建利, 陈文, 秦天, 李翻. 自然资源综合观测视角下的土壤肥力评价指标[J]. *资源科学*, 2020, 42(10): 1953-1964. PEI Xiaolong, HAN Xiaolong, QIAN Jianli, CHEN Wen, QIN Tian, LI Xuan. Soil fertility assessment indicators from the per-

- spective of natural resources comprehensive observation[J]. *Resource Science*, 2020, 42(10): 1953-1964.
- [8] 张江周, 刘亚男, 高伟, 王蓓蓓, 阮云泽. 我国香蕉园土壤肥力现状的整合分析[J]. *热带作物学报*, 2022, 43(7): 1401-1410. ZHANG Jiangzhou, LIU Yanan, GAO Wei, WANG Beibei, YUAN Yunzhe. Integrated analysis of soil fertility status in banana orchards in China[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2022, 43(7): 1401-1410.
- [9] 赵刚, 吴会军, 张永清, 武雪萍, 宋霄君, 姚宇卿, 吕军杰, 李生平, 刘晓彤, 韩紫璇. 豫西长期不同耕作下土壤肥力质量评价[J]. *中国土壤与肥料*, 2023(6): 1-11. ZHAO Gang, WU Huijun, ZHANG Yongqing, WU Xueping, SUN Xiaojun, YAO Yuqing, LV Junjie, LI Shenping, LIU Xiaotong, HAN Zixuan. Evaluation of soil fertility quality under long-term different tillage measures in western Henan[J]. *China Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(6): 1-11.
- [10] 彭健健, 徐坚, 王晓晓, 傅伟军, 张申, 彭欣怡, 徐懿, 姜霓雯, 方嘉, 吴家森. 杨梅主产区土壤肥力空间异质性及其影响因素: 以浙江仙居和临海为例[J]. *果树学报*, 2023, 40(7): 1421-1433. PENG Jianjian, XU Jian, WANG Xiaoxiao, FU Weijun, ZHANG Shen, PENG Xinyi, XU Yi, JIANG Niwen, FANG Jia, WU Jiasen. Spatial variation of soil fertility and its influencing factors in *Myrica rubra* region: A case study in Xianju county and Linhai city[J]. *Journal of Fruit Science*, 2023, 40(7): 1421-1433.
- [11] 陆欣春, 范欣欣, 邹文秀, 严君, 陈旭, 韩晓增, 邓维娜. 肥沃耕层构建对白浆土土壤肥力和玉米产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(4): 883-891. LU Xinchun, FAN Xinxin, ZOU Wenxiu, YAN Jun, HAN Xiaozeng, DENG Weina. Effects of the construction of fertile and cultivated soil layer on soil fertility and maize yield in Albic *Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(4): 883-891.
- [12] 王潇璇, 何诗杨, 叶子豪, 胡颖槟, 傅伟军, 吴家森. 村域尺度山核桃林地土壤肥力空间变异特征及影响因素[J]. *浙江农林大学学报*, 2023, 40(4): 811-819. WANG Xiaoxuan, HE Shiyang, YE Zihao, HU Yingbing, FU Weijun, WU Jiasen. Spatial variability and affecting factors of soil fertility in Chinese hickory stands at village scale[J]. *Journal of Zhejiang A & F University*, 2023, 40(4): 811-819.
- [13] 唐佐芯, 冯俊娜, 阮亚男, 陆庆华, 吴甜, 夏体渊, 李栢锦. 红河州植烟土壤养分和土壤肥力变化特征研究[J]. *西南农业学报*, 2022, 35(8): 1862-1869. TANG Zuoxin, FENG Junna, RUAN Yanan, LU Qinghua, WU Tian, XIATiyuan, LI Zhemian. Change characteristics of soil nutrient and fertility in tobacco-growing soil of Honghe prefecture[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 35(8): 1862-1869.
- [14] 刘娟, 张乃明, 邓洪. 勐海县茶园土壤养分状况及肥力质量评价[J]. *农业资源与环境学报*, 2021, 38(1): 79-86. LIU Juan, ZHANG Naiming, DENG Hong. Soil nutrient status and fertility evaluation of tea gardens in Menghai County[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(1): 79-86.
- [15] 叶少萍, 李铤, 张俊涛, 曹芳怡. 基于主成分分析的古树土壤肥力综合评价[J]. *生态科学*, 2022, 41(1): 196-205. YE Shaoping, LI Ting, ZHANG Juntao, WU Fangyi. Comprehensive evaluation of soil fertility for ancient trees based on principal component analysis[J]. *Ecological Science*, 2022, 41(1): 196-205.
- [16] 闫素云, 周先艳, 杜玉霞, 赖新朴, 李丹萍, 李进学, 岳建强. 云南省柠檬主产区土壤肥力特征与评价[J]. *中国南方果树*, 2022, 51(1): 28-33. YAN Suyun, ZHOU Xianyan, DU Yuxia, LAI Xinpu, LI Danping, LI Jinxue, YU Jianqiang. Characteristics and Evaluation of the Soil Fertility in Main Lemon Production Areas of Yunnan Province[J]. *South China Fruit*, 2022, 51(1): 28-33.
- [17] 姜霓雯, 童根平, 叶正钱, 程樟峰, 吕永强, 傅伟军. 浙江清凉峰自然保护区土壤肥力指标空间变异及其影响因素[J]. *生态学报*, 2022, 42(6): 2430-2441. JIANG Niwen, TONG Genping, YE Zhengqian, CHEN Zhangfeng, LV Yungqiang, FU Weijun. Spatial variability of soil fertility properties and its affecting factors of Qingliangfeng Nature Reserve, Zhejiang[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(6): 2430-2441.
- [18] 中国地质调查局. DZ/T0258-2014 多目标区域地球化学调查规范 (1: 250 000)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.
- [21] FU Weijun, ZHAO Keli, JIANG Peikun, YE Zhengqian, Hubert Tunney, ZHANG Chaosheng. Field-scale variability of soil test phosphorus and other nutrients in grasslands under long-term agricultural managements[J]. *Soil Research*, 2013, 51(6): 503-511.
- [22] Hair J F, Black W C, Babin B J, et al. *Multivariate Data Analysis*[M]. London: Prentice Hall, 2008.
- [23] 叶云, 赵小娟, 胡月明. 基于 GA-BP 神经网络的珠三角耕地质量评价[J]. *生态环境学报*, 2018, 27(5): 964-973. YE Yun, ZHAO Xiaojuan, HU Yueming. Evaluation of Cultivated Land Quality in Pearl River Delta Based on GA-BP Neural Network[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(5): 964-973.
- [24] LIU Yuanyuan, CHEN Guangjie, Carsten Meyer-Jacob, HUANG Linpei, LIU Xiaolong, HUANG Guangcai, Anna-Marie Klamt, John P Smol. Land-use and climate controls on aquatic carbon cycling and photo-trophs in karst lakes of southwest China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 751(18): 141738-141749.
- [25] 钱凤魁, 王秋兵, 边振兴, 董秀茹, 郑刘平. 凌源市耕地质量评价与立地条件分析[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(11): 325-329. QIAN Fengkui, WANG Qiubing, BIAN Zhenxing, DONG Xiuru, ZHENG Liuping. Farmland quality evaluation and site assessment in Lingyuan city[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(11): 325-329.

- [26] 熊昌盛, 谭荣, 岳文泽. 基于局部空间自相关的高标准基本农田建设分区[J]. 农业工程学报, 2015, 31(22): 276-284.
XIONG Changsheng, TAN Rong, YUE Wenze. Zoning of high standard farmland construction based on local indicators of spatial association[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(22): 276-284.
- [27] Spearman C. The proof and measurement of association between two things[J]. *The American Journal of Psychology*, 1904, 15(1): 72-101.
- [28] 覃星铭, 马国斌, 蒋忠诚, 胡宝清, 谢薇薇, 谭帅, 曹雨薇. 典型石漠化峰丛洼地土壤重金属的空间分异特征及其影响因素[J]. 地质科技通报, 2022, 41(5): 283-292.
QIN Xingming, MA Guobin, JIANG Zhongxin, HU Baoqing, XIE Weiwei, TANG Suai, CAO Yuwei. Spatial variations and influencing factors analysis of heavy metals in the soil of typical rocky desertification peak cluster depression[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(5): 283-292.
- [29] DAI Zhaohua, LIU Yunxia, WANG Xingjun, ZHAO Dianwu. Changes in pH, CEC and exchangeable acidity of some forest soils in Southern China during the last 32–35 years[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1998, 108(3–4): 377-390.
- [30] 王杰, 张春燕, 卢加文, 陈书, 王棋. 广安区柑橘土壤养分状况及综合肥力评价[J]. 土壤通报, 2021, 52(6): 1360-1367.
WANG Jie, ZHANG Chunyan, LU Jiawen, CHEN Shu, WANG Qi. Nutrient Status and Comprehensive Frilityt Evaluation of the Citrus Soil in Guang'an District[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52(6): 1360-1367.
- [31] 于航, 冯天骄, 卫伟, 王平. 晋西黄土区土壤理化特征对长期植被恢复的响应[J]. 生态学报, 2024, 44(7): 2873-2885.
YU Hang, FENG Tianjiao, WEI Wei, WANG Ping. Response of soil physicochemical characteristics to long-term vegetation restoration in loess region of western Shanxi province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(7): 2873-2885.
- [32] 赵小娟, 叶云, 周晋皓, 刘洛, 戴文举, 王秋香, 胡月明. 珠三角丘陵区耕地质量综合评价及指标权重敏感性分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8): 226-235.
ZHAO Xiaojuan, YE Yun, ZHOU Jinhao, LIU Luo, DAI Wenju, WANG Qiuxiang, HU Yueming. Comprehensive evaluation of cultivated land quality and sensitivity analysis of index weight in hilly region of Pearl River Delta[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(8): 226-235.
- [33] Ohana-Levi N, Ben-Gal A, Peeters A, Termin D, Paz-Kagan T. A comparison between spatial clustering models for determining N-fertilization management zones in orchards[J]. *Precision Agriculture*, 2020, 79(3): 105-118.
- [34] 李颖慧, 姜小三. 黄淮海平原农区农用地土壤肥力评价及时空变化特征: 以山东省博兴县为例[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(3): 602-612.
LI Yinghui, JIANG Xiaosan. Spatiotemporal characteristics of soil nutrients and fertility evaluation of agricultural land in the HuangHuai-Hai Plain agricultural area: A case study of Boxing County, Shandong Province[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(3): 602-612.
- [35] LIU Yu, ZHANG Ruiqi, HUANG Ze, CHENG Zhen, Manuel López-Vicente, MA XiaoRong, WU GaoLin. Solar photovoltaic panels significantly promote vegetation recovery by modifying the soil surface microhabitats in an arid sandy ecosystem[J]. *Land Degradation & Development*, 2019, 30(8): 2177-2186.
- [36] 张海琳, 张雨, 王顶, 谢军, 张跃强, 张宇亭, 王洁, 石孝均. 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, XIE Jun, ZHANG Yueqiang, ZHANG Yuting, WANG Jie, SHI Xiaojun. 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.
- [37] Gustavo Pereira Valani, Fabiane Machado Vezzani, Karina Maria Vieira Cavalieri-Polizeli. Soil quality: Evaluation of on-farm assessments in relation to analytical index[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 198: 104565-104577.
- [38] 陈亚男, 庄媛, 闫瑞瑞, 秦琪, 金晶炜, 杨培志, 刘洋, 熊军波, 辛晓平. 南方长期不同土地利用方式下土壤肥力变化特征: 以湖北省长阳县火烧坪乡为例[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(1): 188-200.
CHEN Yanan, ZHUANG Yuan, YAN Ruirui, QIN Qi, JIN Jingwei, YANG Peizhi, LIU Yang, XIONG Junbo, XIN Xiaoping. Characteristics of soil fertility under different long-term land-use patterns in south China: A case study in Huoshaoping Township, Changyang County, Hubei Province[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2023, 29(1): 188-200.

Spatial differentiation and trade-off /synergy relationship of soil fertility in typical karst peak-cluster depressions

MA Guobin, QIN Xingming, HU Baoqing, QU Zihan, SUN Qi

(Key Laboratory of Environment Change and Resources Use in Beibu Gulf, Ministry of Education/Guangxi Key Laboratory of Earth Surface Processes and Intelligent Simulation, Nanning Normal University, Nanning, Guangxi 530001, China)

Abstract A scientific evaluation of soil fertility levels in karst peak-cluster depressions at a grid scale is essential for

implementing precise fertilization and conservation strategies at the regional level. To provide targeted support for the effective management and cultivation of soil fertility in these depressions, this study selected typical peak-cluster depressions in Pingguo City, Guangxi, as the research object. A 500 m×500 m grid was employed as the evaluation unit, and soil data were collected through a combination of field sampling and Kriging interpolation. An index system was developed, incorporating pH, organic matter (OM), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), total potassium (TK) and land use types. The Analytic Hierarchy Process (AHP) was utilized to determine the weights of these indicators, and a multi-factor comprehensive evaluation method was applied to assess the overall soil fertility. Furthermore, semi-variance functions, spatial clustering models (including global and local Moran's I), and Spearman's correlation coefficients were employed to systematically analyze the spatial differentiation characteristics of soil fertility and the trade-off/synergy relationships among the indicators.

The results indicate that: (1) spatial differentiation is significant: TN, TP and OM contents generally exhibit a decreasing pattern from the northeast to the southwest, with weak spatial correlation (nugget coefficient>75%). This pattern is mainly influenced by anthropogenic stochastic activities, such as fertilizer application and planting methods. In contrast, pH value demonstrates the strongest spatial correlation with a nugget coefficient of 17%, which is predominantly governed by the structural factors of the karst geological background. Additionally, the spatial distribution of TK is largely opposite to that of TN, TP and OM. (2) The overall soil fertility is characterized by a relatively deficient level, with an average value of 2.93. Grid cells classified as moderate (Grade 3), relatively deficient (Grade 4), and deficient (Grade 5) account for 86.88% of the total area. Spatially, soil fertility exhibits a differentiation pattern of being higher in the northeast and lower in the southwest. High-fertility zones are concentrated in low-slope forestlands and agricultural lands in the northeastern region, while low-fertility zones are found in sloping farmlands, construction sites, and steep-slope forestlands in the northwestern area. (3) Significant trade-off/synergistic effects exist among indicators: TP, TN and OM show significant synergy effects in enhancing comprehensive fertility (Spearman's correlation coefficient>0.389), with contribution rankings as TP>TN>OM. However, TK exhibits a significant trade-off relationship (negative correlation) with the other four indicators (TN, TP, OM and pH), particularly showing the strongest trade-off effect with TN. Spatial agglomeration analysis indicates that OM, TN, TP, and TK exhibit strong spatial autocorrelation (Moran's I>0.47), with predominant agglomeration type being "low-low" synergy-weakening patterns, while "high-high" synergy-enhancing patterns are mainly distributed in the northeastern agricultural land area. The relationship between land use and spatial synergy/trade-off effects of OM and TN is generally moderate.

In conclusion, soil fertility in typical karst peak-cluster depressions is relatively low and exhibits significant spatial heterogeneity, with complex trade-offs and synergies among nutrients. Accordingly, it is proposed that differentiated measures targeting different fertility grades and spatial areas should be implemented, including soil and water conservation, optimization of fertilization structures (with a focus on phosphorus and nitrogen synergy supplementation, as well as potassium balance), and adjustments to land-use planning to achieve effective enhancement and sustainable management of soil fertility.

Key words karst peak-cluster depression, soil fertility, trade-off/synergies relationship, grid scale, spatial differentiation

(编辑 张玲)