

基于突变理论的土地质量地球化学评价方法研究

耿婷婷¹ 刘金巍¹ 宋 绵^{1,2} 边 超¹ 曹月婷¹ 刘江涛¹ 张 涛¹

(1. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 保定 071051;

2. 河北地质大学河北省水资源可持续利用与产业结构优化协同创新中心, 石家庄 050031)

摘要: 为实现土壤肥力和土壤环境质量相结合的土地质量地球化学综合评价结果的高精度量化, 依据赣南南康地区采集的 6 266 组表层土壤样品测试结果, 构建了以 As、Hg、Cd、Pb、Cr 含量等为基础的内梅罗指数和以有机质 (SOM)、P、N、K、Mo、Mn、B、Cu、Zn 含量等为基础的土壤综合肥力指数为控制因素的突变理论法土地质量地球化学综合评价方法, 将内梅罗指数 3.0 修订为 3.1, 通过突变理论对数据进行标准化和归一化分析, 比较原始内梅罗指数和修订内梅罗指数评价结果以及本文方法与 DZ/T 0295—2016《土地质量地球化学评价规范》方法的土地质量地球化学综合等级划分结果。结果表明: 研究区土壤综合肥力指数均值为 0.75, 总体综合肥力为Ⅲ等, 土壤肥力较低; 土壤综合内梅罗指数均值为 0.59, 总体尚清洁。采用修订后的内梅罗指数 3.1 计算的土壤肥力指数分界值基本呈等级等间距划分。与 DZ/T 0295—2016《土地质量地球化学评价规范》评价结果比较, 83.57% 的结果等级未发生变化, 近 16% 等级结果增加 1 个等级, 主要为 1 级和 2 级升为 3 级和 4 级, 未出现 2 个及以上等级的变化, 评价结果显示 3 级、4 级面积占比为 94.11%、5.30%。本文方法可用于土地质量地球化学综合等级评价, 评价结果更加数值化、精细化, 评价过程更简便, 是对已有土地质量地球化学综合评价方法的补充, 可为土地利用、农业生产和管理提供借鉴和参考。

关键词: 土地质量地球化学评价; 突变理论; 内梅罗指数; 土壤综合肥力指数

中图分类号: S159; P632

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)08-0374-08

OSID:



Land Quality Geochemical Evaluation Based on Catastrophe Theory

GENG Tingting¹ LIU Jinwei¹ SONG Mian^{1,2} BIAN Chao¹ CAO Yueting¹ LIU Jiangtao¹ ZHANG Tao¹

(1. Center for Hydrogeology and Environmental Geology, China Geological Survey, Baoding 071051, China

2. Hebei Province Collaborative Innovation Center for Sustainable Utilization of Water Resources and Optimization of Industrial Structure, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: According to the test results of 6 266 groups surface soil samples collected in Nankang area of southern Jiangxi, to achieve high-precision quantification of land quality geochemical evaluation coupling soil fertility and soil environmental quality, a cusp catastrophe model was established and applied to evaluate land quality geochemical evaluation. In this model, soil fertility index (P_f), including SOM, P, N, K, Mo, Mn, B, Cu, Zn in solid samples was the main variable, Nemerow index (P_n), including As, Hg, Cd, Pb, Cr in solid samples was the secondary variable, for values greater than 3 of P_f , P_f were revised to 3.1, and the influences of adjusting on the results were compared. The results showed that the average of P_f was 0.75 and the overall level of soil fertility was Ⅲ, the soil fertility was lower, the average of P_n was 0.59 and the overall level of soil contamination was cleaner. The linear relationship between the boundary value of soil fertility index calculated by the adjusting Nemerow index and the land quality grade was better. The results of comparing with DZ/T 0295—2016 showed that 83.57% of the evaluation grades were the same, and nearly 16% of the grade was increased by one grade, the range of grade increase or decrease did not exceed 1. The area of grade 2 was mainly distributed in the

收稿日期: 2023-11-30 修回日期: 2024-02-27

基金项目: 河北省水资源可持续利用与产业结构优化协同创新中心开放基金项目 (XTZX202109) 和中国地质调查局地质调查项目 (DD20179303)

作者简介: 耿婷婷 (1984—), 女, 高级工程师, 主要从事水文地质和水质研究, E-mail: 4574898@qq.com

通信作者: 宋绵 (1988—), 女, 高级工程师, 主要从事水文地质和水资源科学研究, E-mail: 906402436@qq.com

southeastern edge and the middle-northern part of the study area, the area of grade 3 was widely distributed, and the area of grade 4 was sporadically distributed. The research results showed that the method can be used for the comprehensive evaluation of land quality geochemistry, with more numerical and simpler evaluation process, it was a supplement to existing methods for comprehensive evaluation of land quality geochemistry which can provide effective reference.

Key words: land quality geochemical evaluation; catastrophe theory; Nemerow index; soil fertility index

0 引言

土地质量地球化学评价通过定量描述土壤化学指标与土壤质量的关系,为土地利用、农业生产和管理提供依据和支撑^[1],全面、精确地评价土地质量具有重要的现实意义。国内外对土地质量评价进行了深入研究,建立了土壤质量指数法、土壤质量模型法、多元线性回归法、多变量指标克立格法、层次分析法、模糊神经网络模型等方法,目前仍没有统一的评价方法,此外,评价方法中常忽略如重金属污染等环境问题,以致不能全面地反映土地质量^[2-4],土壤肥力质量、土壤环境质量和土壤健康质量评价的综合是现代土地质量评价中必须考虑的因素^[5-6],张汪寿等^[7]综合土壤肥力和土壤环境质量建立了针对农业生产需求的土壤质量指数法,进行了土壤质量综合评价,余慧敏等^[8]综合土壤健康的有益与不利因素,运用累加法进行了稻田土壤健康评价,李颖慧等^[9]采用逼近理想解排序法、李玉峰等^[10]采用分段函数法开展了基于土壤肥力和重金属污染风险的土壤质量综合评价;中国地质调查局在 2008—2017 年开始部署 1:50 000 土地质量地球化学调查,已取得高精度海量数据成果,广泛应用在农田划定、土地规划等土地管理中,在土地质量、生态综合管护和国家脱贫攻坚方面起到了重要作用^[11],赣州市 6 县在开展土地质量地球化学评估中划定了无公害、特色农业区域^[12-13],土地质量地球化学评价多以 DZ/T 0295—2016《土地质量地球化学评价规范》为评价依据,评价结果为描述性的等级,而非量化表达,总体上,将土壤肥力和土壤环境质量结合的综合土地质量评价量化研究仍较少。在评价结果运用上缺乏数据化、精细化,不便于土地质量地球化学的综合评价。RENE 提出的突变理论是研究自然界中突变现象的一种非线性数学方法^[14],以此为基础建立的突变级数法结合了层次分析法、模糊分析法的优点,弱化了确定权重困难的弊端,为综合评价提供一种新思路和方法^[15-16],并应用在生态系统健康^[17]、耕地复垦适宜性^[18]、土壤生态安全^[19]、水环境承载力^[20-21]等方面的评价和研究中。

本文以赣州市南康区土壤为研究对象,紧密围

绕民生工程与生态文明建设,开展土地质量地球化学调查与综合研究,形成适合土地肥力和土壤环境质量结合的综合土地质量评价方法,全面推进土地质量地球化学调查,提高土地质量综合评价研究水平。将土壤肥力和重金属污染结合,采用基于突变理论的土地地球化学评价方法进行土地质量地球化学综合评价与探究,以期使评价结果更加数值化、精细化,评价过程更简便,为该区土地利用和农业生产、土地管理提供依据和指导。

1 数据获取与评价方法

1.1 研究区概况

研究区位于赣州市西南部,总面积 1 049 km²,属典型的亚热带湿润季风气候,年平均气温 19.3℃,年平均降水量 1 443 mm。地貌类型以山地、丘陵、盆地为主,平均海拔 300~500 m,地势大体呈南北高,中东低,地表水系发育,受地势控制,地表水向中东部汇集。土壤类型以水稻土和红壤为主,此外还有分布在河流两岸阶地的潮土、中低丘陵地区的紫色土和少量山地黄壤。研究区内地层发育较全,第四系地层主要分布在河流两岸,砂页岩、砂砾岩、泥岩等交互分布在低山丘陵,下伏于第四系地层,板岩、页岩等分布在中高丘陵区,在低山区开始有大面积花岗岩出露(图 1)。

1.2 样品采集与分析

采用“网格+图斑”方式,农田优先的原则布设采样点,用 GPS 定位中心,在 20~30 m 范围内采集 4~6 个 0~20 cm 的表层土壤子样品,等份混合为 1 组混合样品,去除根系、碎石等杂物后自然阴干、破碎,过 20 目尼龙筛后送样测试,混合样品最终质量不低于 1 kg,共采集表层土壤样品 6 266 组。X 射线荧光光谱法测定 P、Pb、Cr、Zn、N、S、Co、Cu、Mn、K、Ni 含量,石墨炉原子吸收法测定 Cd 含量,发生光谱法测定 B 含量,原子荧光法测定 Hg、As、Se 含量,极谱法测定 Mo 含量,氧化还原容量法测定有机质(SOM)含量,样品测试按 DZ/T 0258—2014《多目标区域地球化学调查规范(1:25 万)》和 DD 2005—03《生态地球化学评价样品分析方法和技术要求》进行测试分析和质量控制,分析结果的准确性和精密

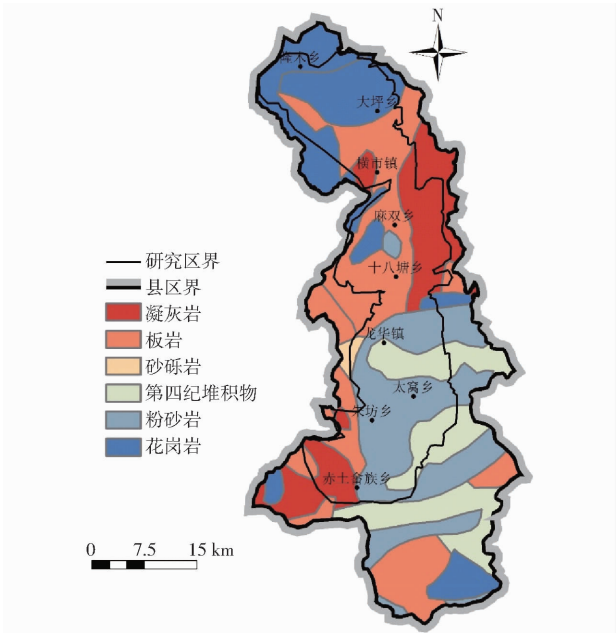


图1 研究区成土母质简图

Fig.1 Schematic of soil parent material in study area

度以及方法灵敏度均满足以上规范要求。

1.3 评价过程与方法

1.3.1 数据处理

为了定量表达土壤肥力和土壤环境质量,参考 NY/T 1749—2009《南方地区耕地土壤肥力诊断与评价》^[22]进行土壤肥力单项指数和土壤肥力综合指数计算,评价标准值为有机质(SOM)含量 1.25%、氮(N)含量 1 000 mg/kg、磷(P)含量 590 mg/kg、钾(K)含量 1.6%、硼(B)含量 64 mg/kg、钼(Mo)含量 1.0 mg/kg、铜(Cu)含量 36 mg/kg、锌(Zn)含量 80 mg/kg、锰(Mn)含量 530 mg/kg;参考 HJ/T 166—2004《土壤环境监测技术规范》^[23]进行土壤单项重金属污染指数和内梅罗指数计算,评价标准值依据土壤 pH 值采用 GB 15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》表 1 中较严格风险筛选值^[24]。各指标转换计算公式为

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \tag{1}$$

式中 P_i ——指标 i 转换值
 C_i ——指标 i 测试结果
 S_i ——指标 i 评价标准值

土壤综合肥力指数 P_f 和内梅罗指数 P_n 计算公式分别为

$$P_f = \frac{N-1}{N} \sqrt{\frac{\min P_i^2 + \overline{P_i^2}}{2}} \tag{2}$$

$$P_n = \sqrt{\frac{\max P_i^2 + \overline{P_i^2}}{2}} \tag{3}$$

式中 $\overline{P_i}$ ——指标 i 转换值均值
 N ——指标数量

1.3.2 指标排序

CRITIC 赋权法是一种优于熵权法的客观赋权法,其兼顾指标间的变异性和相关性,更有利于与土地质量评价指标的多维性、非线性^[25-26],故采用 CRITIC 赋权法确定评价体系中指标的重要程度次序。权重计算公式为

$$W_j = \frac{P_j}{\sum_{j=1}^N P_j} \tag{4}$$

其中 $P_j = S_j \sum_{i=1}^N (1 - r_{ij})$

式中 P_j ——指标 j 信息量
 S_j ——指标 j 标准差
 r_{ij} ——指标 i 和指标 j 相关系数

1.3.3 指标标准化

由于不同指标间经常存在量级或趋势性差异,导致不同标准化方法的评价结果不同,甚至出现显著差异,适当的标准化方法是综合评价的关键^[27-28]。极差正规化法可以实现正/逆向指标的正向转化^[29],并很好地保留指标内部特征信息,可适用于正态或非正态数据^[30],能够满足土壤中组分含量常为非正态分布的特性要求^[31]。在基于突变理论的地下水环境风险评价^[32-33]、河流健康评价^[34]、区域生态风险评价^[35]、土壤肥力恢复评价^[16]等研究中采用该方法进行指标标准化,本研究采用极差正规化法进行指标标准化,其计算公式为

$$X = \begin{cases} \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} & (\text{土壤综合肥力指数}) \\ \frac{x_{\max} - x}{x_{\max} - x_{\min}} & (\text{内梅罗指数}) \end{cases} \tag{5}$$

式中 X ——指标标准化值
 x ——指标值 $x_{\min}$ ——指标最小值
 $x_{\max}$ ——指标最大值

1.3.4 突变评价模型构建

由于一般突变理论系统中控制变量数量的制约,结合评价目的,将底层指标分解为 2 组,即代表土壤环境质量的内梅罗指数和代表土壤肥力的土壤综合肥力指数,通过 CRITIC 赋权法计算内梅罗指数和综合肥力指数权重为 0.514、0.486,结合实际需要确定内梅罗指数为主要因素。依据指标相对重要程度进行排序,最终建立的评价指标体系见图 2,指标重要性从左到右依次减小,采用的突变函数^[33]为

$$\begin{cases} x_a = a^{1/2} \\ x_b = b^{1/3} \end{cases} \tag{6}$$

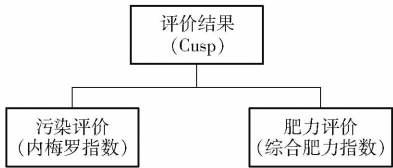


图 2 突变指标体系

Fig.2 Assessment index system

式中 x_a 、 x_b ——指标 a 、 b 的归一化值

式(6)中尖点突变(Cusp)函数的控制变量为 2 个。

由于控制变量间无互补性,采用依照“大中取小”的原则进行递归。

2 结果与分析

2.1 肥力指数统计分析与空间分布

参考 NY/T 1749—2009《南方地区耕地土壤肥力诊断与评价》^[22] 对土壤肥力指数进行计算和分

表 1 肥力指数统计结果

Tab.1 Statistical results of fertility index

项目	SOM	K	N	B	Zn	Mo	P	Cu	Mn	Pf
肥力指数均值	1.58	1.21	1.15	0.97	0.88	0.75	0.74	0.68	0.57	0.75
比例/%	I 等	44.3	15.7	19.1	7.9	1.1	6.6	2.5	0.8	1.0
	II 等	30.3	57.5	43.9	43.1	42.0	15.0	24.5	16.2	12.7
	III 等	25.4	26.8	37.0	49.0	56.9	78.4	73.0	83.0	86.3

2.2 内梅罗指数统计分析与空间分布

依据土壤 pH 值采用 GB 15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》^[24] 中含量限值标准,参考 HJ/T 166—2004《土壤环境监测技术规范》^[23] 将污染指数分为 5 级。各指标污染指数的变异系数为 0.47~1.42,均值为 0.83,为中等~强变异程度,其中 As、Hg 变异系数为 1.43、1.03,达到强变异程度,其他指标变异系数为 0.47~0.75,为中等变异程度。各指标污染指数均值为 0.20~0.54,属于清洁等级,清洁和尚清洁的比例为 93%~100%,除 Cd 为 93%外,其他元素清洁和尚清洁的比例超过 95%。Cd 为主要的污染因子,其次为 Pb,其他元素清洁比例均超过 90%,这与周墨等^[36] 研究结果类似。综合内梅罗指数均值为 0.59,污染等级为尚清洁, I~V 级比例依次为 83.0%、10.0%、5.3%、1.4% 和 0.3%,内梅罗指数变异系数为 0.63,为中等变异程度(表 2)。小面积中度及以上污染程度区域主要分布在西南部和中东部一带,清洁区域在该区广泛分布。

2.3 土壤综合质量指数结果分析与空间分布

将各组样品中内梅罗指数超过 3.0 的修订替换为 3.1,突变级数法计算的土壤综合质量指数均值为 0.714,依据内梅罗指数将土壤综合质量指数分

级^[22]。综合肥力指数均值为 0.75, I~III 等比例分别为 0、19.3%、80.7%,整体土壤肥力低,农作物处于缺肥状态,大部分肥力缺乏甚至严重缺乏。SOM 肥力较高, I 等和 II 等肥力比例超过 70%, N、K、B 肥力一般, I 等和 II 等肥力比例为 50%~60%,其他包括 P 和微量元素的肥力较差, I 等和 II 等肥力比例不足 50%(表 1)。研究区主要为土壤养分含量较低的红层地区,加以长期耕作等人类活动导致 P 损失,这可能是 P 肥力较差的重要原因^[12]。80% 的样品综合肥力指数低于 0.9,综合肥力为 III 等,这与江西省耕地等级比例^[36-37] 近似。各指标肥力指数的变异系数为 0.33~0.76,均值为 0.51,均为中等变异程度,综合肥力指标变异系数为 0.23,为中等变异程度。II 等肥力区域主要分布在研究区东南边缘和散片状分布在中-中北部, III 等区域在该区广泛分布。

表 2 污染指数统计结果

Tab.2 Statistical results of pollution index

项目	As	Hg	Cd	Pb	Cr	Pn
污染指数均值	0.31	0.20	0.53	0.54	0.35	0.59
比例/%	I 级(清洁)	91.4	97.3	81.8	84.7	98.5
	II 级(尚清洁)	4.1	1.5	11.3	12.1	1.5
	III 级(轻度污染)	3.4	1.0	5.5	2.7	5.3
	IV 级(中度污染)	0.7	0.1	1.1	0.3	1.4
	V 级(重污染)	0.5		0.5	0.2	0.3

为 5 个等级,分级区间如表 3 表示。1 级~5 级点位比例依次为 0.5%、5.7%、79.8%、13.85%、0.3%,按面积统计, 3 级、4 级面积占比为 94.11%、5.30%, 3 级区域在该区广泛分布, 4 级区域呈分散在朱坊-太窝以及龙华一带,均为农业活动强烈地区,综合评价结果为 3 级(图 3)。

表 3 综合质量指数分级区间划分

Tab.3 Classification interval for soil comprehensive quality

级别	内梅罗指数	综合评价结果
1 级	[0,0.7]	[0.900,1.000]
2 级	(0.7,1]	[0.840,0.900)
3 级	(1,2]	[0.600,0.840)
4 级	(2,3]	[0.160,0.600)
5 级	(3,+∞]	[0,0.160)

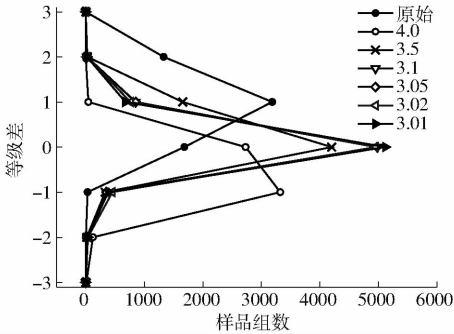


图3 修订内梅罗指数等级变化曲线

Fig.3 Grade difference of modified Nemero index

3 讨论

研究区内土壤综合肥力指数均值为 0.75,80% 的样品综合肥力指数低于 0.9,总体综合肥力为Ⅲ等,土壤肥力较低,施肥增产显著,建议增强 P 和微量元素的肥力,促进肥力平衡,增产增效。土壤综合内梅罗指数均值为 0.59,总体尚清洁,Ⅰ~Ⅴ级比例依次为 83.0%、10.0%、5.3%、1.4%和 0.3%,需关注 Cd、Pb 元素对土壤环境的不利影响。

与 DZ/T 0295—2016《土地质量地球化学评价规范》评价结果比较,83.57% 的结果等级未发生变化,近 16% 的等级结果增加 1 个等级,主要为 1 级和 2 级升为 3 级和 4 级,未出现 2 个或以上等级的变化,本文方法可用于土地质量地球化学综合等级评价。

HJ/T 166—2004《土壤环境监测技术规范》^[23] 中内梅罗指数评价上限值为 3.0,DZ/T 0295—2016《土地质量地球化学评价规范》中将污染指数大于 3 的统一划分为 5 等(劣等),因此只有污染指数不超过 3 的样品才具有进一步细化的意义。本研究中,共计 19 组样品的内梅罗指数超过 3.0,其范围为 3.14~5.18。由突变理论中数据标准化和归一化过程可知,因素中最大值的改变会影响最终评价结果,将内梅罗指数最大值修订下限依次设定为 4.0、3.5、3.1、3.05、3.02、3.01 进行突变理论评价并与 DZ/T 0295—2016《土地质量地球化学评价规范》比较,结果发现:评价等级差为-3~3 之间,当将内梅罗指数修订值为 3.1 和更小值时,评价等级差为-2~2 之间,评价结果更加稳定和一致(图 3),因此本方法将内梅罗指数大于 3.0 的样品修订为 3.1。按表 3 分级结果,1~4 级对应各级的肥力指数中位值依次为 1.18、1.04、0.76、0.49,基本上按等级等间距划分。

原始和修订内梅罗指数的评价结果比较表明:3.6% 样品评价价值由综合肥力指数归一化值改为内梅罗指数归一化值,这些样品的内梅罗指数均值为 1.26,评价主控因素改为内梅罗指数更加合理,

96.4% 样品评价价值归一化因素未改变。修订内梅罗指数评价结果中有 97.1% 样品由综合肥力指数归一化值控制,即该区域土壤综合质量的主要控制因素为土壤肥力,这与该区清洁区域广泛分布结果相符合。6.49% 样品修订内梅罗指数评价结果数值降低,并随着内梅罗指数的增加降低程度增大,扩大了 1 级、2 级土地质量的区间范围。18.32% 样品综合质量评价等级未改变,修订后有 72.65% 样品升高 1 个等级,分别由原始的 2~5 级升为 1~4 级;9.03% 样品升高 2 个等级,分别由原始的 2、4 级升为 1、3 级。当内梅罗指数小于 2 时,2 级和 3 级的比例更大,并且内梅罗指数越小,综合质量等级提升越明显,这更加符合实际情况。

DZ/T 0295—2016《土地质量地球化学评价规范》中土地质量地球化学综合等级评价结果与修订内梅罗指数的突变理论评价结果比较表明:83.56% 等级未发生变化,0.40% 等级由 2 级升为 1 级,8.60% 等级由 2 级降为 3 级,0.10% 等级由 3 级升为 2 级,7.10% 等级由 3 级降为 4 级,0.10% 等级由 4 级升为 3 级,0.30% 等级由 4 级降为 5 级。最终本文方法和规范方法确定的 1~5 级比例为 0.50% 和 0.10%、6.40% 和 15.40%、80.60% 和 79.10%、12.20% 和 5.10%、0.30% 和 0.30%。近 16% 等级降低 1 个等级,主要为 1 级和 2 级降为 3 级和 4 级,未出现 2 个或以上等级的变化,两种方法评价等级的斯皮尔曼双尾检验相关性系数为 0.825,相关性显著,这证明本文方法可用于土地质量地球化学综合等级评价,评价结果更加数值化、精细化。

依据突变理论的平衡曲面方程计算判别式^[37-38]Δ 值,当 Δ>0 时,系统状态稳定,当 Δ<0 时,系统状态失稳。经计算统计有 7.95% 点位 Δ<0,即土地质量处于不稳定状态。从图 4 可知,Δ<0 的点位主要集中在较高的肥力指数和较低的内梅罗指数区域,即土地质量地球化学等级优良的土壤具有不稳定特征,空间分布基本与 1 级和 2 级较吻合(图 5),同时不稳定区域集中在人口密度较

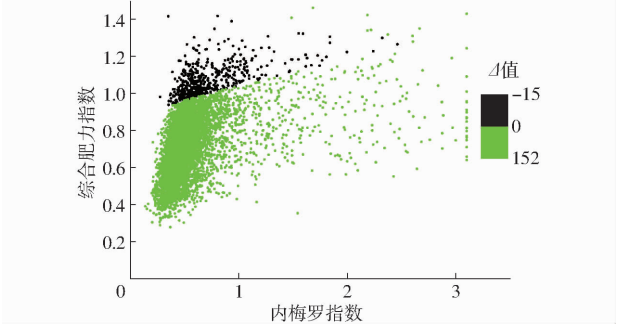


图4 内梅罗指数和综合肥力指数散点图

Fig.4 Scatter plot mapped by Δ of P_f and P_n

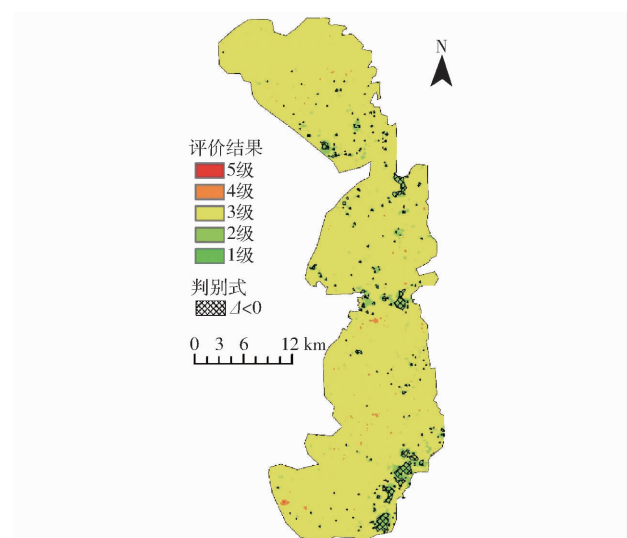


图 5 失稳区域和评价结果空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of evaluation result and unstable areas

大地区,与人为耕作方式、施肥结构等改变导致有机质(SOM)、总氮(TN)、总磷(TP)等含量增加有关^[39],由此推测,研究区质量等级较高的区域具有不稳定性,应关注其肥力对等级影响,保持足够肥力,防止土地质量退化。

4 结束语

本文土地质量地球化学评价方法可用于土地质量地球化学综合等级评价,评价结果更加数值化、精细化,评价过程更简便。对于研究区质量等级较高的区域具有不稳定性,应关注其肥力对等级的影响,防止土地质量退化。受土壤指标数据限制,此方法对不同的污染指数和综合肥力指数的适用性未能检验。

参 考 文 献

[1] 王大勇. 土壤质量地球化学评价模型研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
WANG Dayong. Study on the geochemical assessment model of soil quality [D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese)

[2] 熊东红, 贺秀斌, 周红艺. 土壤质量评价研究进展[J]. 世界科技研究与发展, 2005, 27(1): 71-75.
XIONG Donghong, HE Xiubin, ZHOU Hongyi. Current advance on soil quality evaluation[J]. World Sci-tech R & D, 2005, 27(1): 71-75. (in Chinese)

[3] 黄勇, 杨忠芳. 中国土地质量评价的研究现状及展望[J]. 地质通报, 2008, 27(2): 207-211.
HUANG Yong, YANG Zhongfang. Land quality evaluation in China: present status and prospect[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(2): 207-211. (in Chinese)

[4] 黄勇, 杨忠芳. 土壤质量评价国外研究进展[J]. 地质通报, 2009, 28(1): 130-136.
HUANG Yong, YANG Zhongfang. Recent research progress of overseas soil quality evaluation[J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(1): 130-136. (in Chinese)

[5] 严挺. 小区域土壤质量分析与评价[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
YAN Ting. Analysis and evaluation for soil quality on small area[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese)

[6] 武春林, 王瑞廷, 丁坤, 等. 中国土壤质量地球化学调查与评价的研究现状和进展[J]. 西北地质, 2018, 51(3): 240-252.
WU Chunlin, WANG Ruiting, DING Kun, et al. Geochemical survey and evaluation on soil quality in China: research status and advances[J]. Northwestern Geology, 2018, 51(3): 240-252. (in Chinese)

[7] 张汪寿, 李晓秀, 黄文江, 等. 不同土地利用条件下土壤质量综合评价方法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(12): 311-318.
ZHANG Wangshou, LI Xiaoxiu, HUANG Wenjiang, et al. Comprehensive assessment methodology of soil quality under different land use conditions[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(12): 311-318. (in Chinese)

[8] 余慧敏, 李婕, 韩逸, 等. 基于重金属和有益微量元素评价南方典型丘陵区稻田土壤健康质量——以奉新县为例[J]. 土壤, 2020, 52(2): 394-403.
YU Huimin, LI Jie, HAN Yi, et al. Evaluation of soil health quality in typical hilly areas of Southern China based on heavy metals and beneficial trace elements: a case studies in Fengxin County[J]. Soils, 2020, 52(2): 394-403. (in Chinese)

[9] 李颖慧, 姜小三, 王振华, 等. 基于土壤肥力和重金属污染风险的农用地土壤质量综合评价研究——以山东省博兴县为例[J]. 土壤通报, 2021, 52(5): 1052-1062.
LI Yinghui, JIANG Xiaosan, WANG Zhenhua, et al. Comprehensive evaluation of soil quality of agricultural land based on soil fertility and heavy metal pollution risk: a case study of Boxing County, Shandong Province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(5): 1052-1062. (in Chinese)

[10] 李玉峰, 赵中秋, 祝培甜, 等. 基于土壤重金属污染风险管控的土壤质量评价: 以某县级市为例[J]. 地学前缘, 2019, 26(6): 207-215.
LI Yufeng, ZHAO Zhongqiu, ZHU Peitian, et al. Soil quality assessment based on risk control of heavy metal pollution in soil: a case study of an industrial city in China[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(6): 207-215. (in Chinese)

[11] 李括, 彭敏, 赵传冬, 等. 全国土地质量地球化学调查二十年[J]. 地学前缘, 2019, 26(6): 128-158.

- LI Kuo,PENG Min,ZHAO Chuandong,et al. Vicennial implementation of geochemical survey of land quality in China[J]. Earth Science Frontiers,2019,26(6):128–158. (in Chinese)
- [12] 雍太健,张明,陈国光,等. 赣州市土地质量地球化学评估及其富硒特征研究[J]. 华东地质,2020,41(4):403–409.
YONG Taijian,ZHANG Ming,CHEN Guoguang,et al. Geochemical evaluation and selenium-rich characteristics of land quality in Ganzhou City[J]. Resources Survey & Environment,2020,41(4):403–409. (in Chinese)
- [13] 邹勇军,黄懿,李昌龙,等. 崇义县上堡梯田土地质量地球化学评估及开发建议[J]. 中国煤炭地质,2019,31(1):70–75.
ZOU Yongjun,HUANG Yi,LI Changlong et al. Fields land quality geochemical assessment and development proposal in Shangbao Township, Chongyi County[J]. Coal Geology of China,2019,31(1):70–75. (in Chinese)
- [14] 邹洋,彭立敏,张智勇,等. 基于突变理论的岩溶隧道拱顶安全厚度分析与失稳预测[J]. 铁道科学与工程学报,2021,18(10):2651–2659.
ZOU Yang,PENG Limin,ZHANG Zhiyong,et al. Safety thickness analysis and stability prediction of tunnel roof in karst region based on catastrophe theory[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(10):2651–2659. (in Chinese)
- [15] 何瑞婷. 基于突变级数法的福州市某区土壤重金属污染综合评价[J]. 云南民族大学学报(自然科学版),2015,24(3):176–179,183.
HE Ruiting. Application of the catastrophe progression method to the integrative evaluation of the heavy metal soil pollution in one district of Fuzhou[J]. Journal of Yunnan Minzu University(Natural Sciences Edition),2015,24(3):176–179,183. (in Chinese)
- [16] 白丽月. 基于突变理论的南方红壤侵蚀区土壤肥力恢复评价及实践应用[D]. 福州:福建师范大学,2015.
BAI Liye. Assessment and practical application of soil fertility restoration in eroded red soil region of South China based on catastrophe theory[D]. Fuzhou:Fujian Normal University,2015. (in Chinese)
- [17] XIE Wangying,LI Yi,ZHAO Yiqiu, et al. A county-scale assessment of ecosystem health in the Three Gorges Reservoir area based on catastrophe theory[J]. Frontiers in Environmental Science,2023(11):1073416.
- [18] LI Yinghui. Suitability evaluation of land reclamation as arable land in coal mining area based on catastrophe theory[J]. SN Applied Sciences,2023,5(5):1–10.
- [19] ZHOU Wei,MA Tingting,CHEN Like, et al. Application of catastrophe theory in comprehensive ecological security assessment of plastic greenhouse soil contaminated by phthalate esters[J]. PloS One,2018,13(10):e0205680.
- [20] XIN Huang, CHEN Haitao, GUAN Zhengying. Study on water environmental carrying capacity based on improved catastrophe theory[J]. Nature Environment & Pollution Technology,2017,16(4):1223–1228.
- [21] KEHINDE A M, HWEE S L. Development of a GIS-based catastrophe theory model (modified DRASTIC model) for groundwater vulnerability assessment[J]. Earth Science Informatics,2017,10(3):339–356.
- [22] 中华人民共和国农业部. NY/T 1749—2009 南方地区耕地土壤肥力诊断与评价[S]. 2009.
- [23] 国家环境保护总局. HJ/T 166—2004 土壤环境监测技术规范[S]. 2004.
- [24] 生态环境部,国家市场监督管理总局. GB 15618—2018 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S]. 2018.
- [25] 武岩,刘宏金,迟文峰,等. 基于 AHP–CRITIC 法的耕地质量等级评价方法研究与实证[J/OL]. 中国土壤与肥料. <https://link.cnki.net/urlid/11.5498.S.20230824.1427.002>.
WU Yan,LIU Hongjin,CHI Wenfeng, et al. Research and demonstration of cultivated land quality grade evaluation method based on AHP–CRITIC method and GIS[J/OL]. Soil and Fertilizer Sciences in China. <https://link.cnki.net/urlid/11.5498.S.20230824.1427.002>. (in Chinese)
- [26] 刘钊,韩磊,王丹月,等. 陕北黄土高原煤矿区土壤理化性质及质量评价[J]. 煤炭学报,2021,46(5):1555–1564.
LIU Zhao,HAN Lei,WANG Danyue, et al. Soil physicochemical properties and quality assessment in the coal mining area of Loess Plateau in Northern Shaanxi Province[J]. Journal of China Coal Society,2021,46(5):1555–1564. (in Chinese)
- [27] 李兴奇,高晓红. 无量纲化方法的有效性评价[J]. 统计与决策,2021,37(15):24–28.
LI Xingqi, GAO Xiaohong. Validity evaluation of dimensionless methods[J]. Statistics & Decision, 2021, 37(15):24–28. (in Chinese)
- [28] 李兴奇,高晓红. 服从不同分布数据的无量纲化方法研究[J]. 统计与决策,2022,38(10):31–36.
LI Xingqi, GAO Xiaohong. Study on dimensionless methods for data obeying different distributions[J]. Statistics & Decision, 2022,38(10):31–36. (in Chinese)
- [29] 李美娟,陈国宏,陈衍泰. 综合评价中指标标准化方法研究[J]. 中国管理科学,2004(12):45–48.
LI Meijuan, CHEN Guohong, CHEN Yantai. Study on target standardization method of comprehensive evaluation[J]. Management Science, 2004(12):45–48. (in Chinese)
- [30] 张罗漫,黄丽娟,贺佳,等. 综合评价中指标值标准化方法的探讨[J]. 中国卫生统计,1995(1):1–4.
ZHANG Louman,HUANG Lijuan,HE Jia, et al. An approach to the methods of standardization for the hospital statistical indexes in comprehensive evaluation[J]. Health Statistics,1995(1):1–4. (in Chinese)
- [31] 田嘉禹,刘俐,汪群慧,等. 中美土壤元素背景值调查研究中数理统计方法运用及影响[J]. 环境科学研究,2020,33(3):718–727.

TIAN Jiayu,LIU Li,WANG Qunhui, et al. Application and impact of statistic methods on the soil background values in China and the United States[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(3): 718 – 727. (in Chinese)

[32] 张端梅,梁秀娟,李钦伟,等. 基于突变理论的吉林西部灌区地下水环境风险评价[J]. 农业机械学报,2013,44(1): 95 – 100.

ZHANG Duanmei, LIANG Xiujuan, LI Qinwei, et al. Risk assessment of groundwater environment for irrigation district in western Jilin Province based on catastrophe theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1): 95 – 100. (in Chinese)

[33] SINA S Y, YOUSEF H, ATA A N, et al. Localization of groundwater vulnerability assessment using catastrophe theory[J]. Water Resources Management,2016, 30(13): 4585 – 4601.

[34] 周向华,杨侃,蒋立伟,等. 基于突变级数法的中干河河流健康评价模型及应用[J]. 水电能源科学,2016,34(7): 28 – 31.

ZHOU Xianghua,YANG Kan,JIANG Liwei, et al. River health assessment model and its application based on catastrophe series method[J]. Water Resources and Power, 2016, 34(7): 28 – 31. (in Chinese)

[35] 左欢欢. 基于突变级数法的东洞庭湖区域生态风险评价[D]. 长沙:湖南大学,2012.

ZUO Huanhuan. Regional ecological risk assessment by the catastrophe progression method: a case in the East Dongting Lake [D]. Changsha: Hunan University, 2012. (in Chinese)

[36] 周墨,唐志敏,张明,等. 江西赣州地区-壤-水稻系统重金属含量特征及健康风险评价[J]. 地质通报,2021,40(12): 2149 – 2158.

ZHOU Mo,TANG Zhimin,ZHANG Ming, et al. Characteristics and health risk assessment of heavy metals in soil-rice system in the Ganzhou area, Jiangxi Province[J]. Geological Bulletin of China, 2021, 40(12): 2149 – 2158. (in Chinese)

[37] 张玉山,李继清,梅艳艳,等. 基于突变理论的天津市水资源安全阈值分析模型[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2013,32(4):562 – 567.

ZHANG Yushan, LI Jiqing, MEI Yanyan,et al. Model for water safety thresholds in Tianjin City based on catastrophe theory [J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2013,32(4):562 – 567. (in Chinese)

[38] 王健,李红民,闫凯. 基于能量法的空间钢结构稳定性分析[J/OL]. 应用力学学报:1 – 10[2024 – 01 – 11] <https://kns.cnki.net/kcms/detail//61.1112.03.20230227.1405.018.html>.

WANG Jian,LI Hongmin,YAN Kai. Stability analysis of spatial steel structure basedon energy method[J/OL]. Chinese Journal Of Applied Mechanics:1 – 10[2024 – 01 – 11] <https://kns.cnki.net/kcms/detai//161.1112.03.20230227.1405.018.html>. (in Chinese)

[39] 张晗,赵小敏,朱美青,等. 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.

ZHANG Han,ZHAO Xiaomin,ZHU Meiqing,et al. 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. (in Chinese)