DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2024.02.007

石海龙,张林星,甘凤玲,等.喀斯特槽谷区侵蚀坡面的土壤质量评价及障碍因子[J].水土保持学报,2024,38(2);126-135.

SHI Hailong, ZHANG Linxing, GAN Fengling, et al. Soil quality evaluation and obstacle factors of erosion slop in karst trough valley area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2):126-135.

# 喀斯特槽谷区侵蚀坡面的土壤质量评价及障碍因子

石海龙<sup>1,2</sup>,张林星<sup>1,2</sup>,甘凤玲<sup>1,2</sup>,蒲俊兵<sup>1,2</sup>, 芮俊菲<sup>1,2</sup>,刘 涓<sup>1,2</sup>

(1.重庆师范大学三峡库区地表过程与环境遥感重庆市重点实验室,重庆市山地生态系统碳循环与碳调控重点实验室, 地理与旅游学院,重庆师范大学,重庆401331;2.三峡库区地表生态过程重庆市野外科学观测研究站,重庆401331)

摘 要:[目的]为准确评价喀斯特槽谷区顺/逆层坡侵蚀坡面的土壤质量特征,筛选出适用于该地区的土壤质量评价方法,探析限制其土壤质量的障碍因子。[方法]以重庆市青木关喀斯特槽谷区顺/逆层坡面的5种典型土地利用类型(林地、草地、裸地、玉米地、辣椒地)为研究对象,利用主成分分析法结合 Norm 值建立评价指标最小数据集(minimum data set, MDS),并通过非线性土壤质量评价方法和隶属度函数对喀斯特槽谷区顺/逆层坡面的土壤质量进行评价。[结果](1)喀斯特槽谷区土壤质量评价指标最小数据集(MDS)包括毛管持水量、毛管孔隙度和全磷;(2)通过非线性土壤质量评价方法得出,逆层坡土壤质量(0.519)优于顺层坡(0.451),其中逆层坡林地土壤质量最优(0.653),辣椒地土壤质量最差(0.426);(3)非线性评价方法在顺/逆层坡的决定系数(R²)均高于隶属度函数,因此喀斯特槽谷区更适合采用非线性评分模型;(4)顺/逆层坡侵蚀坡面的土壤质量障碍因子差异显著,仅有全氮为共同的障碍因子。[结论]适当增加草地和乔木林的覆盖能提高喀斯特槽谷区土壤质量,研究结果可因地制宜地为喀斯特槽谷区顺/逆层坡侵蚀坡面的土壤质量调控和生态恢复提供依据。

关键词: 喀斯特槽谷区; 顺/逆层坡; 土壤质量评价; 最小数据集; 主成分分析

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242-(2024)02-0126-10

# Soil Quality Evaluation and Obstacle Factors of Erosion Slop in Karst Trough Valley Area

SHI Hailong<sup>1,2</sup>, ZHANG Linxing<sup>1,2</sup>, GAN Fengling<sup>1,2</sup>, PU Junbing<sup>1,2</sup>, GOU Junfei<sup>1,2</sup>, LIU Juan<sup>1,2</sup>

(1.Chongqing Key Laboratory of Surface Process and Environment Remote Sensing in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing Key Laboratory of Carbon Cycling and Carbon Regulating of Mountain Ecosystem, College of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China; 2. Three Gorges Reservoir Area Earth Surface Ecological Processes of Chongqing Observation and Research Station, Chongqing 401331, China)

Abstract: [Objective] In order to accurately evaluate the soil quality characteristics of the dip/anti-dip erosion slope in the karst trough valley screen out suitable soil quality evaluation methods and explore the obstacle factors limiting soil quality in this area. [Methods] Five typical land use types (forest land, grassland, bare land, corn land, pepper land) were selected as the research objects in Qingmuguan Karst trough Valley of Chongqing, and the minimum data set (MDS) was established by principal component analysis combined with Norm value. The nonlinear soil quality evaluation method and membership function were used to evaluate the soil quality of the diplanti-dip erosion Slope and down-slope in the karst trough valley. [Results] (1) MDS of soil quality evaluation indexes in karst troughs valleys included capillary water capacity, capillary porosity and total phosphorus. (2) According to the nonlinear soil quality evaluation method, the soil quality of anti-dip erosion slope (0.519) was better than that of dip erosion slope (0.451). The soil quality of anti-dip

**资助项目:**国家自然科学基金项目(42107355);国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项(2021YFE0107100);重庆市自然科学基金联合基金项目(CSTB2022NSCQ-LZX0022);重庆市科学技术委员会科学研究项目(CSTB2022NSCQ-MSX1053);重庆市教育委员会科技项目(KJQN202100518,KJQN202100542)

第一作者:石海龙(1999—),男,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: 2364543205@qq.com通信作者:甘凤玲(1989—),女,副教授,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: 359140315@qq.com

erosion slope forest land was the best (0.653), and that of pepper field was the worst (0.426). (3) The coefficient of determination  $(R^2)$  of the nonlinear evaluation method was higher than the membership function in the dip erosion slope and the anti-dip erosion slope, so the non-linear scoring model was more suitable for the karst trough valley. (4) There were significant differences in soil quality barrier factors, and only total nitrogen was the common barrier factor. [Conclusion] Appropriately increasing grassland and forest cover can improve soil quality in karst trough and valley area. The results of this study can provide basis for soil quality control and rational fertilization of slope erosion along/against slope in karst trough valley according to local conditions.

**Keywords:** karst valley area; dip/anti-dip erosion slope; soil quality evaluation; minimum data set; principal component analysis

**Received**: 2023-06-20 **Revised**: 2023-07-27 **Accepted**: 2023-09-06 **Online**(www.cnki,net): 2024-01-15

喀斯特地区地质构造复杂,极易发生水土流失和 石漠化,导致该地区土壤生产力下降,土地退化严 重[1]。喀斯特槽谷区是八大岩溶地貌类型之一,我国 西南喀斯特地区的喀斯特槽谷区石漠化严重,石漠化 面积占喀斯特地区的16.1%[2]。喀斯特槽谷区是出 露在背斜轴部的石灰岩在长期侵蚀作用下形成的以 纵向水运动为主,并且与褶皱轴向相同的槽谷地带, 其断面呈现"U"形,槽谷两翼岩层倾向与坡面相同或 者相反,形成典型的顺/逆层坡结构[3-5]。喀斯特槽谷 区侵蚀坡面的土壤以及土壤中的营养元素在降水作 用下极易发生地上/下流/漏失,其中大部分沉积在槽 谷洼地,这导致顺/逆层坡相对于槽谷区土层浅薄,岩 石裸露率更高,土壤贫瘠,土壤质量较差。土壤水分 是土壤中物质运移、转化等的重要影响因素,顺层坡 山体坡向和岩层倾向一致,岩层对土壤的阻挡作用 小,土壤易顺着岩层随降水流失,导致顺层坡裸岩出 露率较高。有研究[6]表明,裸岩含大量节理,能吸收 和吸附部分降雨,且裸岩的截留汇流作用降低地表径 流的速度,降雨期间雨水降落在裸岩上降雨资源化程 度较高,裸岩改变降水的再分配并汇集雨水补充周围 地区的土壤水分,这导致顺层坡的土壤水分含量明显 高于逆层坡。土壤水分越多、保持时间越久,越有利 于土壤中物质的淋溶,因此顺层坡土壤的淋溶发育较 强。与顺层坡相比,逆层坡土层较厚,表层土壤粗化, 根系分布也更深,同时氮磷等元素在逆层坡也更容易 释出[6-8]。上述原因使喀斯特槽谷区顺/逆层坡土壤 质量差异显著,需要进行进一步的区分。因此,为了 满足当地农民在侵蚀坡面耕作的农业生产需求,需要 因地制宜对喀斯特槽谷区侵蚀坡面的顺/逆层坡土壤 进行调研,为提高侵蚀坡面土壤质量提出建议,这不 仅可以缓解槽谷区洼地的作物生产压力,还能为打造 喀斯特槽谷区侵蚀—沉积坡面的立体农业提供理论 支撑,最终实现喀斯特地区经济效益与生态效益

相统一[9]。

土壤资源是人类赖以生存的物质基础,也是生态 环境的重要组成部分,土壤质量的优劣对农产品质 量、人类健康、经济社会的可持续发展具有重要影 响「10-11」。国内外对土壤质量的评价多建立最小数据 集并结合土壤质量指数(soil quality index, SQI)[12-13]。如李鹏飞等[14]使用线性评分模型(linear model, L)和非线性评分模型(non-linear model, NL)对黄土高原矿区复垦土壤质量进行评价;董茜 等[15] 采用聚类分析和主成分分析建立最小数据集研 究滇东喀斯特地区不同植被恢复措施的土壤质量,认 为马尾松针叶林对喀斯特地区生态恢复效果较好。 由于喀斯特地区顺/逆层坡土壤性质的差异,应当因 地制宜,选取合适的土壤质量评价方法对土壤质量进 行评价[16-19],同时,也考虑土壤质量改善的障碍因 子[20]。金慧芳等[21]采用障碍因子诊断模型界定红 壤坡耕地耕层质量主要障碍因素及障碍程度。岩层 倾向是导致喀斯特槽谷区土壤质量动态变化的重要 原因。贾洪杰[6]、覃自阳[3]、苟俊菲等[22]的研究表 明,不同岩层倾向下土壤的理化性质、淋溶作用、入渗 特征、氮磷元素流失特征等均不同。而上述特质势必 对顺/逆层坡的土壤质量产生影响。尽管目前有关于 喀斯特地区土壤质量的研究较多,但大多集中在同一 地区的不同土地利用类型下,针对不同岩层倾向下的 土壤质量研究较少。因此,揭示喀斯特槽谷区不同岩 层倾向下的土壤质量,探析制约其土壤质量的障碍因 子是科学恢复喀斯特槽谷区土壤质量的关键,也是使 喀斯特槽谷区作物增产、实现经济效益和生态效益相 统一的关键科学问题之一。

如何选取正确的评价方法和科学的评价指标是本文需要解决的另一个关键问题。土壤质量受物理、化学、生物等多种因素影响,因而使得评价土壤质量极其困难,尤其是不同岩层倾向下的土壤质量评价尤

为困难,虽然有相关研究建立了喀斯特地区土壤质量 的评价指标体系,但无法反映出不同岩层倾向下的土 壤质量优劣。建立适合喀斯特槽谷区不同岩层倾向 下的土壤评价指标,选取合适的评价方法是本文拟解 决的另一个科学问题。由于喀斯特槽谷区不同岩层 倾向下自然条件的差异导致土壤理化性质差异,在 顺/逆层坡同一海拔区,土壤的理化性质对土壤质量 的影响相较于生物因子和环境因子更加显著,并且土 壤养分含量与土壤理化性质有着极大的相关性。因 此,本研究结合喀斯特槽谷区的区域特征、气候差异 等条件,以重庆市青木关喀斯特槽谷区顺/逆层坡为 研究对象,通过非线性和隶属度函数土壤质量评价方 法衡量喀斯特槽谷区顺/逆层坡侵蚀坡面土壤质量的 可适性,并引入障碍因子诊断模型,分析制约土壤质 量的主要障碍因子,为提高和恢复喀斯特槽谷区顺/ 逆层坡的土壤质量调控和合理施肥提供依据,实现提 高经济效益和改善生态环境的双重目标。

## 1 材料与方法

#### 1.1 研究区概况

本研究区位于重庆市西南部沙坪坝区青木关喀



斯特槽谷区(29°40′—29°47′N,106°16′—106°20′E), 属亚热带湿润季风气候,年平均降水量 1100 mm,降 雨主要集中在夏秋两季,年平均气温 18 ℃,冬暖夏热 (图 1)。青木关喀斯特槽谷形成于川东平行岭谷缙 云山温塘峡背斜南段,由于长期的水蚀作用,形成典 型的"一山二岭一槽"喀斯特槽谷景观,槽谷区北侧为 顺层坡,南侧为逆层坡,槽谷流域面积约为11.36 km<sup>2</sup>。青木关喀斯特槽谷区土壤类型以地带性土壤 黄壤和非地带性土壤石灰土为主,土层厚度不均,坡 地土层厚度一般为 0.15~1.00 m。频繁的人类活动 和特殊的自然条件导致该地区水土流失严重,有研 究[23-24]表明,该区域内仅龙洞槽和劳动村洼地小流域 泥沙沉积总量达 3 754.09,2 424.79 t,流域产沙模数 分别为 137.21,50.28 t/(km<sup>2</sup> · a),而同样位于三峡库 区喀斯特洼地小流域的常家洼小流域泥沙沉积量为 557.00 t,流域产沙模数为 122.91 t/(km² • a)。区域主 要土地利用类型为草地、林地和耕地,分别占槽谷区总 面积的 19.62%,61.52%和 9.42%[25]。主要农作物有 黄豆(Glycine max)、玉米(Zea mays L.)、萝卜(Raphanus sativus)和辣椒(Capsicum annuum L.)等。

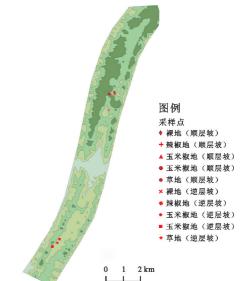


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

#### 1.2 样品采集与数据测定

本研究于 2021 年 5—12 月的农作物生长季开展,在青木关喀斯特槽谷区顺/逆层坡侵蚀坡面海拔一致的地点分别采集草地、林地、玉米地、辣椒地土壤样品,以裸地为对照样地。每个采样地按"S"形取样并选择 6 个采样点,采样点土层厚度见表 1。每个样点采用环刀(体积 100 cm³,直径 50.46 mm,高 50 mm)在坡上、坡中、坡下位置按照 0—5 cm,5—10 cm,10—20 cm 土层深度采集 3 个原状土样作为重

复,顺/逆层坡共计采集 180 个土样,并用密封袋密封后带回实验室用于测定土壤孔隙度和持水量。采集原状土采样点旁边的 1 kg 左右土壤,用于测定土壤团聚体和土壤机械组成。

本研究共测定 12 项土壤物理化学指标,容重、土壤孔隙度、持水量采用环刀法与烘干法测定,pH 采用水土比1:1 电极法测定,有机质含量采用重铬酸钾容量法测定,全氮采用全自动开氏定氮法测定,全磷采用钼锑抗比色法测定[14,26]。

表 1 采样点基本信息

Table 1 Basic information of sampling points

土地利用类型	岩层倾向	海拔/m	土层厚度/cm
草地	顺层坡	462.5	50—80
早地	逆层坡	442.3	60—80
44-14	顺层坡	526.3	50—70
林地	逆层坡	453.7	50—80
T W III	顺层坡	452.6	50-60
玉米地	逆层坡	431.5	50-60
辣椒地	顺层坡	405.2	30-40
	逆层坡	433.1	40-50
裸地	顺层坡	462.7	20-50
	逆层坡	427.6	30—60

#### 1.3 土壤质量评价方法

1.3.1 基于主成分分析的评价指标最小数据集的构建 土壤质量指标是一个复杂的概念,主要包含维持动 植物生产力、维持和提高环境质量、促进动植物健康 的能力的相关指标,主要分为物理、化学、生物、环境 4 类。相较于喀斯特槽谷区生物和环境对农作物生 长的影响,顺/逆层坡土壤理化性质的影响更为显著。

本研究根据当地土壤实际情况,结合喀斯特槽谷区的区域特征、气候差异等条件选取表征土壤理化性质的 12 个典型指标来诠释该地区的土壤质量。选取的指标中,土壤通气度反映土壤的气体交换毛管持水量和孔隙度等物理指标,对土壤质量有重要影响,而有机质、全氮、全磷等植物生长的营养元素,是土壤质量的重要组成部分。对顺/逆层坡选取的土壤理化指

标分别进行主成分分析,提取特征值 $\geq 1$  的主成分,指标载荷> 0.5 的设为 1 组。如果某种指标在不同主成分中的载荷均大于 0.5,则将其并入与其他指标相关性较低的 1 组。分别计算各组指标的 Norm 值,选择该组中最大 Norm 值的指标进入最小数据集。

当 1 个主成分中有多个高因子载荷指标时,则进行指标间的相关性分析,若相关性较低(r<0.5),则各指标均可纳入最小数据集[27-28]。Norm值计算公式[15]为:

$$N_{ik} = \sqrt{\sum_{i=1}^{k} (u_{ik}^{2} e_{k})}$$
 (1)

式中: $N_{ik}$ 为第i 个指标在特征值大于 1 的前 k 个主成分的 Norm 值; $U_{ik}$ 为第i 个指标在第k 个主成分的载荷; $e_k$ 为第k 个主成分的特征值。

1.3.2 土壤质量评分模型 土壤质量非线性评分模型将土壤指标实测值转换为 0~1 的分值,模型[14]为:

$$S_{NL} = \frac{a}{1 + (x/x_0)^b} \tag{2}$$

式中: $S_{NL}$ 为非线性得分值,取值为  $0\sim1$ ;a 为最大得分 1;x 为指标实测值; $x_0$  为指标平均值;b 为方程斜率,若该指标"越大越好",则取-2.5,"越小越好"则取  $2.5^{[15.27]}$ 。

隶属度由评价指标所属的隶属度函数确定。隶属度函数一般分为"S"形、反"S"形和抛物线型<sup>[29]</sup>。 土壤质量隶属度函数计算公式见表 2。

表 2 土壤评价指标隶属度函数[29]

Table 2 Subordinate function of soil quality evaluation index

	Tuble 2 Su	sorumuce runction o	son quanty evaluation maca	
函数类型	计算名	/式	评价指标	隶属度函数含义
"S"形隶属度函数 <sup>[29]</sup>	$S(x) = \begin{cases} \frac{1}{x - a_1} \\ a_2 - a_1 \\ 0 \end{cases}$	$x \geqslant a_2$ $a_1 < x < a_2$ $x \leqslant a_1$	饱和持水量、毛管持水量、田间 持水量、毛管孔隙度、为总孔隙 度、土壤通气度;有机质、全氮、 全磷	一定范围内评价指标与 土壤功能呈正相关
反"S"形隶属度 函数 <sup>[29]</sup>	$S(x) = \begin{cases} \frac{1}{x - a_2} \\ \frac{1}{a_1 - a_2} \\ 0 \end{cases}$	$x \leqslant a_1$ $a_1 < x < a_2$ $x \geqslant a_2$	容重、非毛管孔隙度	一定范围内评价指标与 土壤功能呈负相关
抛物线型隶属度 函数 <sup>[29]</sup>	$S(x) = \begin{cases} \frac{1}{x - a_1} \\ \frac{1}{b_1 - a_1} \\ \frac{x - a_2}{b_2 - a_2} \\ 0 \end{cases}$	$b_2 \geqslant x \geqslant b_1$ $a_1 < x < b_1$ $a_2 > x > b_2$ $x \leqslant a_1, x \geqslant a_2$	рН	评价指标值对土壤功能 有最佳适宜范围,偏离 程度越大,对土壤功能 的影响越小

注; x 为每个点位下每个指标的平均值; a1、a2 分别为测得指标的最小值和最大值; b1、b2 分别为最适值的上下界点。

1.3.3 土壤质量指数的计算 将各个指标通过主成分分析得到指标权重,结合指标得分计算土壤质量指数(soil quality index, SQI),计算公式[14]为:

$$SQI = \sum_{i=1}^{n} W_i S_i$$
 (3)

式中:SQI 为土壤质量指数,其值越高,代表土壤质量

越好;n 为指标数量; $W_i$ 为指标权重; $S_i$ 为指标得分。 1.3.4 障碍因子诊断模型 明确土壤质量的障碍因子,对全面了解土壤质量具有重要意义 $^{[20-21]}$ 。本研究引入障碍因子诊断模型 $^{[20-21]}$ ,具体公式为:

$$M_{ij} = \frac{P_{ij} W_i}{\sum_{j=1}^{n} P_{ij} W_i}$$
 (4)

式中: $M_{ij}$ 为指标障碍度; $P_{ij}$ 为土壤单项指标与隶属度值 1 的差距, $P_{ij}$ =1 $-S_{ij}$ ; $S_i$ 为第 i 个指标的得分; $W_i$ 为指标权重。按照等距法将指标障碍度分为 4 个等级:无障碍(0)、轻度障碍(0~0.1)、中度障碍(0.1~0.2)和重度障碍(>0.2)。

## 2 结果与分析

#### 2.1 不同岩层倾向下的土壤质量评价指标统计量

青木关喀斯特槽谷区不同岩层倾向下的土壤质

量评价指标统计量见表 3。顺层坡和逆层坡土壤理化性质差异显著(p < 0.05),顺层坡仅有田间持水量、土壤通气度、pH、有机质含量高于逆层坡。顺/逆层坡各评价指标大多都处于中低度敏感水平(CV < 1),变异较弱,但总体来看,逆层坡理化性质优于顺层坡。2.1.1 顺层坡土壤质量评价指标统计量 在顺层坡各样地中,草地的有机质、全氮含量显著高于除林地外的其他样地(p < 0.05)。饱和持水量、毛管持水量、田间持水量均表现为草地最高,玉米地最低,其余样地之间差异不显著(p > 0.05)。土壤通气度在裸地最优,是林地的 2.81 倍,并与除辣椒地外的其他样地差异显著(p < 0.05)。全磷含量林地最高,辣椒地最低,林

地是辣椒地的 2.09 倍。顺层坡各评价指标均处于中低度敏感水平(CV<1),其中非毛管孔隙度的 CV 系数相对较大,表现为玉米地>林地>辣椒地>裸地>草地。pH 的 CV 相对较小,表现为林地>玉米地>裸地>辣椒地>草地,且草地仅为 0.06,属于不敏感(CV<0.1)。综上所述,顺层坡草地土壤理化性质最优。

2.1.2 逆层坡土壤质量评价指标统计量 在逆层坡各样地中,林地的毛管持水量、田间持水量和毛管孔隙度均显著高于其他样地(p<0.05)。林地的饱和持水量显著高于除裸地外的其他样地(p<0.05)。裸地的非毛管孔隙度显著高于其他样地(p<0.05),是草地的2.01倍,草地最低。林地的总孔隙度最大,表现为林地>裸地>玉米地>辣椒地>草地。全氮含量草地显著高于除林地外的其他样地(p<0.05),玉米地最低。草地的全磷含量显著高于除裸地外的其他样地(p<0.05),表现为草地>裸地>辣椒地>玉米地>树地(p<0.05),表现为草地>裸地>辣椒地>玉米地>村地。逆层坡各项指标的CV系数处于中低敏感水平,仅草地的土壤通气度CV系数达到1.22,属于强变异(CV>1)。综上所述,逆层坡林地的理化指标高于其他样地,且变异性敏感性较低,其土壤理化性质最优。

表 3 不同岩层倾向下的土壤质量评价指标统计量

Table 3 Statistics of soil quality evaluation indicators under different bedrock stratr

岩层倾向	指标	 草地	CV	林地	CV	裸地	CV	玉米地	CV	辣椒地	CV
	<i>X</i> 1	1.20±0.22b	0.18	1.37±0.19ab	0.14	1.24±0.12ab	0.10	1.48±0.22a	0.15	1.32±0.14ab	0.10
	X2	431.46±131.10a	0.30	337.68±77.91ab	0.23	$431.25 \pm 67.23a$	0.16	$301.53 \pm 92.34b$	0.31	388.42±61.09ab	0.16
	X3	$273.39 \pm 68.02a$	0.25	$249.79 \pm 50.15a$	0.20	$271.93 \pm 24.84$ ab	0.09	$201.18 \pm 29.37 \mathrm{b}$	0.15	$265.00 \pm 19.88 ab$	0.08
	X4	$236.23 \pm 57.80a$	0.24	$228.52 \pm 48.56$ a	0.21	$208.97 \pm 25.88 ab$	0.12	$163.55 \pm 25.99 \mathrm{b}$	0.16	$199.82 \pm 13.21 ab$	0.07
	X5	$17.78 \pm 4.30a$	0.24	$11.42 \pm 5.39a$	0.47	$19.07 \pm 5.43$ a	0.28	$13.70 \pm 7.41a$	0.54	$15.69 \pm 6.48a$	0.41
順日神	X6	$31.61 \pm 2.67 ab$	0.08	$33.79 \pm 5.40 ab$	0.16	$33.53 \pm 3.98 ab$	0.12	$29.37 \pm 2.15 \mathrm{b}$	0.07	$34.86 \pm 3.54 a$	0.10
顺层坡	X7	$49.38 \pm 6.03 abc$	0.12	$45.20 \pm 7.08 \mathrm{bc}$	0.16	$52.60 \pm 2.51a$	0.05	$43.07 \pm 6.65c$	0.15	$50.55 \pm 4.05 ab$	0.08
	X8	$26.63 \pm 4.83 \mathrm{bc}$	0.18	$13.67 \pm 7.44d$	0.54	$38.37 \pm 7.62a$	0.20	$23.22 \pm 14.07 cd$	0.61	$35.81 \pm 4.90 ab$	0.14
	X9	$7.91 \pm 0.45a$	0.06	$6.13 \pm 0.94 \mathrm{b}$	0.15	$7.72 \pm 0.53$ a	0.07	$6.25 \pm 0.70 \mathrm{b}$	0.11	$7.80 \pm 0.53a$	0.07
	X10	$49.64 \pm 22.18a$	0.45	$40.35 \pm 8.12a$	0.20	$27.54 \pm 1.57 \mathrm{b}$	0.06	$26.88 \pm 1.68 \mathrm{b}$	0.06	$19.30 \pm 4.24 \mathrm{b}$	0.22
	X11	$\textbf{2.66} \pm \textbf{1.27} a$	0.48	$2.04 \pm 0.47 ab$	0.23	$1.51 \pm 0.09 \mathrm{bc}$	0.06	$1.34 \pm 0.08 \mathrm{bc}$	0.06	$0.82 \pm 0.18c$	0.22
	X12	$\textbf{0.56} \!\pm\! \textbf{0.21ab}$	0.38	$0.67 \pm 0.06a$	0.09	$0.49 \pm 0.08 \mathrm{b}$	0.16	$\textbf{0.54} \!\pm\! \textbf{0.13ab}$	0.24	$0.32 \pm 0.05c$	0.15
	X1	$1.40 \pm 0.06a$	0.04	$1.18 \pm 0.08c$	0.07	$1.24 \pm 0.11 \mathrm{bc}$	0.09	$1.35 \pm 0.12 ab$	0.09	$1.41 \pm 0.13a$	0.09
	X2	$328.32 \pm 24.69c$	0.08	$454.01 \pm 49.81a$	0.11	$417.33 \pm 59.04ab$	0.14	$366.17 \pm 53.93 \mathrm{bc}$	0.15	$331.98 \pm 62.25c$	0.19
	X3	$261.66 \!\pm\! 22.01b$	0.08	$354.03 \pm 52.39a$	0.15	$263.77 \pm 24.03 \mathrm{b}$	0.09	$257.42 \pm 33.11 bc$	0.13	$225.09 \pm 18.65c$	0.08
	X4	$239.12\!\pm\!18.89\mathrm{b}$	0.08	$319.44 \pm 51.25a$	0.16	$228.92 \pm 16.63 \mathrm{bc}$	0.07	$190.37 \pm 24.47 d$	0.13	$199.63 \pm 14.35 cd$	0.07
	X5	$9.26 \pm 2.36\mathrm{c}$	0.25	$11.77 \pm 2.64 \mathrm{bc}$	0.22	$18.65 \pm 4.21a$	0.23	$14.42 \pm 3.61 \mathrm{ab}$	0.25	$14.60 \pm 4.96 ab$	0.34
逆层坡	X6	$36.58 \pm 2.86 \mathrm{b}$	0.08	$41.74 \pm 5.27a$	0.13	$32.45 \pm 1.97c$	0.06	$34.46 \pm 2.39 \mathrm{bc}$	0.07	$31.57 \pm 1.75c$	0.06
进压机	X7	$45.84 \pm 1.91c$	0.04	$53.50 \pm 3.51a$	0.07	$51.10 \pm 4.26 ab$	0.08	$48.88 \pm 3.13 \mathrm{bc}$	0.06	$46.17 \pm 4.77c$	0.10
	X8	$6.90 \pm 8.40 c$	1.22	$15.43 \pm 6.07 \mathrm{bc}$	0.39	$38.24 \pm 10.76a$	0.28	$33.02 \pm 5.08a$	0.15	$23.42 \pm 10.39 \mathrm{b}$	0.44
	X9	$6.52 \pm 0.21 \mathrm{b}$	0.03	$7.54 \pm 0.53$ a	0.07	$6.47 \pm 0.13 \mathrm{b}$	0.02	$6.41 \pm 0.58 \mathrm{b}$	0.09	$6.32 \pm 0.57 \mathrm{b}$	0.09
	X10	$47.04 \pm 5.501 ab$	0.12	$60.09 \pm 25.49a$	0.42	$21.15 \pm 3.13c$	0.15	$40.10 \pm 12.44 \mathrm{b}$	0.31	$33.52 \pm 2.71  \mathrm{bc}$	0.08
	X11	$3.80 \pm 0.89a$	0.23	$3.02 \pm 1.25 ab$	0.42	$2.36 \pm 0.74 \mathrm{bc}$	0.32	$1.15 \pm 0.12d$	0.10	$1.73 \pm 0.11cd$	0.07
	X12	$\textbf{0.44} \!\pm\! \textbf{0.06a}$	0.13	$0.21 \pm 0.04 d$	0.20	$\textbf{0.39} \pm \textbf{0.06ab}$	0.16	$0.34 \pm 0.05c$	0.13	$0.38 \pm 0.02 \mathrm{bc}$	0.07

注:表中数据为平均值士标准差;不同小写字母表示相同岩层倾向下不同土地利用方式之间的土壤理化指标差异显著(p < 0.05);X1 为容重;X2 为饱和持水量;X3 为毛管持水量;X4 为田间持水量;X5 为非毛管孔隙度;X6 为毛管孔隙度;X7 为总孔隙度;X8 为土壤通气度;X9 为 pH;X10 为有机质;X11 为全氮;X12 为全磷。下同。

#### 2.2 喀斯特槽谷区最小数据集的确立

基于主成分分析结果(表 4),顺/逆层坡土壤质量评价指标中含有 3 个特征值>1 的主成分,累计方差贡献率均 $\geq$ 80%,满足信息提取的要求。将同一主成分中载荷 $\geq$ 0.5 的土壤指标分为 1 组,共分为 3 组。 X1、 X2、X3、X4、X7、X10 进入第 1 组,其中 X3 与 X2、 X4、X7、X1 相关性显著(p<0.05),且其 Norm 值最高,因此将 X3 纳入最小数据集。 X5、X6、X8、X11 进入第 2 组,由于 X6 与 X5、X8、X11 相关性显著(p<0.05)且其 Norm 值最高,将 X6 纳入最小数据集(图2)。第 3 组中 X12 纳入最小数据集,最终确定 X3、 X6、X12 3 个指标纳入最小数据集。 土壤通气度影响土壤的气体交换、毛管持水量、孔隙度等物理指标,对土壤质量有重要影响,而土壤有机质、全氮、全磷等植物生长的营养元素是土壤质量的重要组成部分。

### 表 4 喀斯特槽谷区顺逆层坡土壤质量评价指标载荷矩阵和 Norm 值

Table 4 Load matrix and Norm value of soil quality evaluation indexes for dip/anti-dip erosion slope in the karst trough valley

指标	PC1	PC2	PC3	Norm	分组
X1	-0.846	-0.397	-0.210	2.095	1
X2	0.896	0.406	0.122	2.197	1
X3	0.967	-0.138	-0.138	2.253	1
X4	0.886	-0.373	-0.006	2.151	1
X5	0.221	0.900	0.311	1.731	2
X6	0.658	-0.506	-0.450	1.858	2
X7	0.870	0.404	-0.157	2.143	1
X8	0.082	0.905	-0.172	1.640	2
X9	0.507	0.159	-0.285	1.258	1
X10	0.567	-0.539	0.392	1.700	1
X11	0.508	-0.572	0.475	1.669	2
X12	-0.104	0.100	0.857	1.134	3
特征值	5.331	3.182	1.628		
解释方差百分比/%	44.421	26.514	13.563		
累计解释百分比/%	44.421	70.935	84.499		

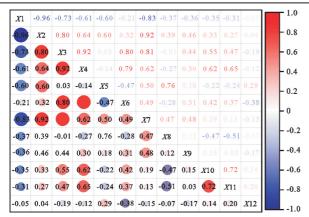


图 2 土壤理化指标相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis of soil physico-chemical indicators

## 2.3 基于 2 种评分模式下喀斯特槽谷顺/逆层坡的 土壤质量评价

对建立的 MDS 进行主成分分析,得到各个指标 的公因子方差,从而计算各指标权重(表5)。通过非 线性评分方法和隶属度函数将最小数据集指标转换 为0~1的分数。本研究中将非线性评分方法将指标 分为2种函数:一种越大越好的函数,如土壤有机质、 全氮等与土壤质量呈正相关的指标;一种越小越好的 函数,如土壤容重、非毛管孔隙度等对土壤质量呈负 相关的指标。结合指标权重,计算出土壤质量指数。 从图 3 可以看出, 喀斯特槽谷区不同岩层倾向下, 基 于最小数据集的非线性土壤质量指数顺层坡为草地 (0.494) > 林地(0.479) > 裸地(0.477) > 辣椒地 (0.447)>玉米地(0.359)。逆层坡林地(0.654)最高, 分别是草地(0.565)的 1.158 倍,裸地(0.496)的 1.319 倍,玉米地(0.451)的1.450倍,辣椒地(0.426)的 1.535倍。基于最小数据集的隶属度函数评价方法的 土壤质量指数(图 4)由高到低顺层坡依次为草地 (0.410) > 裸 地 (0.407) > 林 地 (0.394) > 玉 米 地 (0.385)>辣椒地(0.166)。逆层坡林地(0.720)最高, 辣椒地(0.232)最低。2种评价方式下,土壤质量指数 在不同岩层倾向下的分布情况基本一致,主要表现为 顺层坡草地和逆层坡林地的土壤质量指数高于其他土 地利用类型。按照土壤质量等级划分方法[26],青木关 喀斯特槽谷区土壤质量以中等为主(0.4~0.6),其中逆 层坡土壤质量总体上优于顺层坡,而逆层坡中又以林 地土壤质量最优。

表 5 土壤质量评价最小数据集和总数据集的公因子方差和权重 Table 5 Communality and weight of minimum data set and total data set for soil quality assessment

指标	总数据集	(TDS)	最小数据集(MDS)		
1日 7小	公因子方差	权重	公因子方差	权重	
X1	0.917	0.090			
X2	0.983	0.097			
X3	0.973	0.096	0.784	0.397	
X4	0.925	0.091			
X5	0.956	0.094			
X6	0.891	0.088	0.890	0.451	
X7	0.944	0.093			
X8	0.855	0.084			
X9	0.363	0.035			
X10	0.765	0.075			
X11	0.811	0.080			
X12	0.756	0.075	0.300	0.152	

## 2.4 基于最小数据集的喀斯特槽谷区顺/逆层坡土 壤质量评价合理性验证

最小数据集评价指标体系的合理性验证是土壤 质量评价的重要环节,影响着土壤质量评价的准确 性。通过主成分分析获取总数据集各指标公因子方差 来计算总数据集各指标权重,将各指标标准化后代人 SQI函数计算,对基于总数据集的土壤质量进行分析。

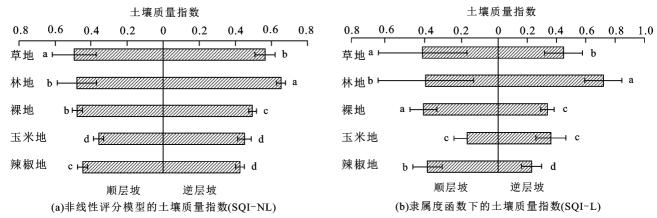


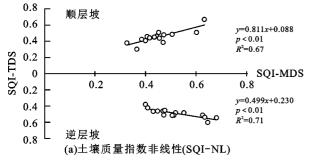
图 3 基于最小数据集的 2 种评分模型在不同植被类型下的土壤质量指数

Fig. 3 Soil quality indices of two scoring models based on minimum data set under different vegetation types

由图 4 可知,2 种土壤质量评价方法下 MDS-SQI 和 TDS-SQI 相关性较高。顺层非线性评价方法回归方程和隶属度函数评价方法回归方程分别为:

$$y = 0.811x + 0.088(R^2 = 0.67, p < 0.01)$$
  
 $y = 0.729x + 0.174(R^2 = 0.52, p < 0.01)$ 

式中:x 为最小数据集;y 为总数据集。从线性回归分析结果来看,在非线性评价方法和隶属度函数 2 种评价方法下,TDS 与 MDS 均呈极显著正相关(p<0.01),但顺层坡非线性评价方法和隶属度函数 2 种评价方法下的决定系数( $R^2$ )分别为 0.67 和 0.52,因此顺层坡通过非线性评价方法得到的拟合效果更优。



逆层坡非线性评价方法回归方程和隶属度函数 评价方法回归方程分别为:

$$y = 0.499x + 0.230(R^2 = 0.71, p < 0.01)$$
  
 $y = 0.451x + 0.260(R^2 = 0.62, p < 0.01)$ 

式中:x 为最小数据集;y 为总数据集。从拟合效果看,逆层坡非线性评价方法和隶属度函数 2 种评价方法下决定系数( $R^2$ )分别为 0.71 和 0.62,同时 MDS和 TDS 也呈显著正相关(p<0.01),说明逆层坡更适合通过非线性评价方法进行土壤质量评价。综上说明,最小数据集(MDS)具有较高的准确性,能够替代总数据集(TDS)进行土壤质量评价。

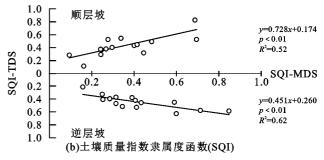


图 4 2 种评价方式下最小数据集和总数据集的关系

Fig. 4 Relationship between minimum data set (MDS) and total data set (TDS) under two evaluation methods

#### 2.5 土壤质量障碍因素分析

本研究运用障碍诊断模型对顺/逆层坡的理化指标进行障碍度分析(图 5)发现,在顺层坡 5 种土地利用类型中均为轻度障碍因子的指标是容重、毛管持水量、田间持水量、总孔隙度和 pH。制约草地的障碍因子主要是非毛管孔隙度(0.12)和毛管孔隙度(0.10),均为中度障碍因子;制约玉米地的障碍因子;制约辣椒地的障碍因子主要是土壤有机质、全氮和全磷,均为中度障碍因子。与顺层坡相比,逆层坡障碍因子具有明显差异,制约逆层坡草地的障碍因子主要为饱和持水量(0.11)和土壤通气度(0.15),均属中度障碍,而林地和草地具有相同的障碍因子土壤通气度,裸地的障碍因子主要为田间持水量。制约玉米地

和辣椒地的障碍因子均有全氮。

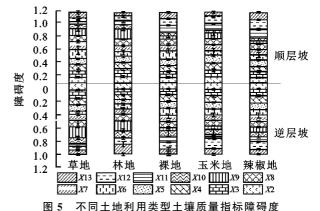


Fig. 5 Barriers to soil quality indicators for different land use types

综上可知,制约喀斯特槽谷区顺/逆层坡的土壤 质量障碍因子具有明显差异,但均为轻度和中度障碍 因子。

## 3 讨论

本研究在建立土壤质量评价最小数据集时,采用 主成分分析和 Norm 值相结合的方法,尽可能多地表 达评价指标所包含的土壤质量信息[27,29]。基于国内 外研究成果,在建立最小数据集时,土壤容重、pH 和 MWD、有机质、全氮、钠吸附比有机黏粒、土壤有效 含水量、有效磷和有机碳等指标使用频率较高[29]。 本研究中建立的最小数据集为毛管持水量、毛管孔隙 度和全磷。从 MDS 筛选出的指标来看,土壤孔隙度 是土壤结构的重要指标,在喀斯特地区土壤中的营养 元素容易随着孔隙发生地下流/漏失,土壤孔隙度也 对土壤的水分含量和保水性能具有重要影响。在本 研究区,农民大量施用磷肥改善土壤肥力,同时磷元 素也是该地区重要的营养盐,因此磷元素对该地区土 壤质量贡献度较大。持水量直接关系土壤的持水性 能,水分影响该地区的土壤理化性质,进而影响其土 壤质量,同时也有研究[30]表明,水分是喀斯特地区生 态重建的主要限制因子。上述指标对土壤综合质量 具有较大的贡献度,因此本研究选出的指标对喀斯特 槽谷区土壤质量评价具有一定的实用意义。土壤有 机质是评价土壤质量的重要指标,本研究中有机质并 没有被纳入最小数据集,可能是由于青木关位于喀斯 特地区,土壤比较贫瘠,有机质含量最高为 60.09 g/ kg,远低于非喀斯特地区(祁连山南坡地区林地最高 为 336.29 g/kg)土壤有机质含量处于较低水平。因 此该地区土壤有机质对土壤质量的诠释相较于水分 等其他指标可能更差。

本研究在进行土壤质量评价时对比验证了非线性和隶属度 2 种土壤质量评价方法在喀斯特槽谷的适用性,通过非线性评价方法计算 SQI-MDS,得到逆层坡土壤质量指数平均值(0.519)高于顺层坡平均值(0.451)。通过隶属度函数评价方法计算逆层坡 SQI-MDS,平均值(0.421)高于顺层坡(0.352)。总体来说,逆层坡的土壤质量优于顺层坡,导致这种结果的原因可能是岩层倾向影响土壤水分条件,进而影响土层厚度及土壤中的微生物含量。一般来说,顺层坡山体坡向和岩层倾向一致,岩石裸露率高于逆层坡,而裸岩改变降雨分配,补充岩石周围水分,因此顺层坡含水量高于逆层坡<sup>[6]</sup>。同时也有研究<sup>[3-6]</sup>表明,顺层坡以地表产流为主,土壤颗粒以及氮磷等营养元素容易流失,造成顺层坡土层厚度及微生物含量等均低于逆层坡,因此逆层坡土壤质量更好。本研究中顺

层坡草地土壤质量最优,逆层坡林地土壤质量最优。 这可能是由于顺层坡相对于逆层坡而言,土层更浅, 且草地植物根系发达种类多,且能适应喀斯特槽谷区 顺层坡独特的自然环境,草本植物根须能较好地与土 壤连接。而逆层坡林地土层较厚,生物量丰富,枯枝 落叶堆积地表,加之受人类活动影响较少,因此土壤 质量相对较好。土壤质量是自然条件和人为活动共 同作用的结果,土壤养分对土壤质量至关重要,因此 单一的理化指标很难准确反映土壤质量[31]。本研究 中,全磷含量、孔隙度、持水量均是该区域重要的土壤 质量评价指标。制约顺/逆层坡的土壤质量提升的障 碍因子差异显著,制约顺层坡的最大障碍因子为全 氮,这可能是由于全氮是作物生长所需要的营养元 素,对土壤质量影响较大。但逆层坡则主要为水分, 水分影响土壤的理化性质,进而制约土壤质量的提 升[6]。也有研究[31]表明,土壤有机质是土壤养分的 第1主成分因子,水分是喀斯特地区生态重建的主要 限制因子。在提高或者修复喀斯特槽谷地区的土壤 质量时应遵循植被分布规律,根据当地实际情况,充 分考虑影响土壤质量的各种因子。本研究在选择土 壤质量评价指标时,多为物理和化学指标,较少涉及 到生物指标,有研究[32]表明,土壤生物直接参与土壤 物质转化过程,因此在未来的研究中应当加强生物指 标对土壤质量的影响方面的研究。研究结果显示,顺 层坡草地土壤质量最优,逆层坡林地土壤质量最优, 因此本区域在顺层坡应该优先选择草本植物,逆层坡 优先选择乔木林来进行土壤质量提升或修复。

## 4 结论

- (1)研究区理化性质和土壤质量均为逆层坡优于顺层坡,其中逆层坡林地土壤质量最优(0.654),顺层坡玉米地土壤质量最差(0.359)。
- (2)基于最小数据集的非线性质量评价方法在顺/逆层坡的适用性均优于隶属度函数,顺层坡 TDS和 MDS的决定系数(R²)为 0.67,逆层坡为 0.71。
- (3)逆层坡障碍因子主要为饱和持水量(0.11)、 土壤通气度(0.15)、田间持水量(0.10)和全氮(0.11), 顺/逆层坡共同障碍因子为饱和持水量和全氮。
- (4)在顺层坡适当增加草地,逆层坡适当增加乔木林的覆盖更能提高喀斯特槽谷区土壤质量。

#### 参考文献:

[1] 蒋忠诚,曹建华,杨德生,等.西南岩溶石漠化区水土流 失现状与综合防治对策[J].中国水土保持科学,2008,6 (1):37-42.

JIANG Z C, CAO J H, YANG D S, et al. Current status and comprehensive countermeasures of soil

- erosion for Karst rocky desertification areas in the Southwestern China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6(1):37-42.
- [2] 甘凤玲.喀斯特槽谷区水土流/漏失过程与水动力学机制研究[D].重庆:西南大学,2019.
  - GAN F L. The process and characteristics of surface loss and underground leakage and hydrodynamic parameters in Typical Karst trough valley [D]. Chongqing: Southwest University, 2019.
- [3] 覃自阳,甘凤玲,何丙辉.岩层倾向对喀斯特槽谷区地表/地下产流过程的影响[J].水土保持学报,2020,34 (5):68-75,80.
  - QIN Z Y, GAN F L, HE B H. Effects of rock stratigraphic propensity on surface/underground flow processes in karst trough valley area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(5):68-75,80.
- [4] 裴曾莉,龙翼,张云奇,等.近 100 年喀斯特槽谷区洼地 沉积速率与流域产沙强度[J].水土保持学报,2020,34 (2):23-29.
  - PEI Z L, LONG Y, ZHANG Y Q, et al. Deposition rate of karst depression and sediment yield intensity of the watershed in karst trough-valley area in the past 100 years[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(2):23-29.
- [5] 甘风玲,何丙辉,覃自阳.喀斯特槽谷区的顺/逆层坡面对水动力学参数的影响[J].土壤学报,2019,56(4):825-837. GAN F L, HE B H, QIN Z Y. The influence of hydrodynamics parameters on downstream/inverse slope in karst trough valley[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019,56 (4):852-864.
- [6] 贾洪杰,甘凤玲,李振轮,等.岩层倾向对南方喀斯特地区坡耕地土壤理化性质的影响[J].生态学报,2019,39(16):6107-6113.
  - JIA H J, GAN F L, LIZ L, et al. Effects of rock strata dip on soil physicochemical properties of sloping farmland in a southern karst area. Acta[J]. Ecologica Sinica, 2019, 39(16):6107-6113.
- [7] BOU K R, ABDALLAH C, KHAWLIE M. Assessing soil erosion in Mediterranean Karst landscapes of Lebanon using remote sensing and GIS[J]. Engineering Geology, 2008, 99 (3/4);239-254.
- [8] 唐益群,张晓晖,周洁,等.喀斯特石漠化地区土壤地下漏失的机理研究:以贵州普定县陈旗小流域为例[J].中国岩溶,2010,29(2):121-127.
  - TANG Y Q, ZHANG X H, ZHOU J, et al. The mechanism of underground leakage of soil in Karst Rocky Desertification Areas: A case in Chenqi Small Watershed, Puding, Guizhou Province[J]. Carsologica Sinica, 2010, 29(2):121-127.
- [9] 赵其国,孙波,张桃林.土壤质量与持续环境I.土壤质量的

- 定义及评价方法[J].土壤,1997,29(3):113-120. ZHAO QG, SUN B, ZHANG T L. Soil quality and sustainable environment: I. The definition and evaluation method of soil quality[J].Soils,1997,29(3):113-120.
- [10] 陈美军,段增强,林先贵.中国土壤质量标准研究现状及展望[J].土壤学报,2011,48(5):1059-1071.

  CHEN M J, DUAN Z Q, LIN X G. Status quo and prospects of the study on soil quality standards in china
  [J].Acta Pedologica Sinica,2011,48(5):1059-1071.
- [11] 周立波.中国土壤质量研究发展脉络解析[J].中国水土保持科学,2018,16(3):142-152.
  ZHOU L B. Historical venation of researches on soil quality in China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018,16(3):142-152.
- [12] 娄义宝,史东梅,蒋光毅,等.基于最小数据集的紫色丘陵区坡耕地耕层土壤质量评价[J].中国水土保持科学,2019,17(5):75-85.

  LOU Y B, SHI D M, JIANG G Y, et al. Evaluation of soil quality in the cultivated-layer of sloping farmland in purple hilly area based on minimum data set J]. Science of
- [13] 吴春生,刘高焕,黄翀,等.基于 MDS 和模糊逻辑的黄河三角洲土壤质量评估[J].资源科学,2016,38(7): 1275-1286.

Soil and Water Conservation, 2019, 17(5): 76-85.

- WU C S, LIU G H, HUANG C, et al. Soil quality assessment of the yellow river delta based on MDS and fuzzy logic model[J]. Resources Science, 2016, 38(7): 1275-1286.
- [14] 李鹏飞,张兴昌,郝明德,等.基于最小数据集的黄土高原矿区复垦土壤质量评价[J].农业工程学报,2019,35 (16):265-273.
  - LIPF, ZHANG X C, HAO M D, et al. Soil quality evaluation for reclamation of mining area on Loess Plateau based on minimum data set[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(16):265-273.
- [15] 董茜,王根柱,庞丹波,等.喀斯特区不同植被恢复措施 土壤质量评价[J].林业科学研究,2022,35(3):169-178. DONG X, WANG Y Z, PANG D B, et al. Evaluation of soil quality of different vegetation restoration measures in karst areas[J]. Forest Research, 2022, 35(3): 169-178.
- [16] SWANEPOE P A, du PREEZ C C, BOTHA P R, et al. Soil quality characteristics of kikuyu-ryegrass pastures in South Africa[J].Geoderma, 2014, 232/233/234:589-599.
- [17] GUO L L, SUN Z G, OUYANG Z, et al. A comparison of soil quality evaluation methods for Fluvisol along the lower Yellow River[J].Catena,2017,152;135-143.
- [18] LIU Z J, ZHOU W, SHEN J B, et al. Soil quality assessment of Albic soils with different productivities for

- Eastern China[J]. Soil and Tillage Research, 2014, 140: 74-81.
- [19] APARICIO V, COSTA J L. Soil quality indicators under continuous cropping systems in the Argentinean Pampas [J]. Soil and Tillage Research, 2007, 96(1/2):155-165.
- [20] 匡丽花,叶英聪,赵小敏,等.基于改进 TOPSIS 方法的 耕地系统安全评价及障碍因子诊断[J].自然资源学报,2018,33(9):1627-1641.
  - KUANG L H, YE Y C, ZHAO X M, et al. Evaluation and obstacle factor diagnosis of cultivated land system security in Yingtan city based on the improved TOPSIS method [J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(9):1627-1641.
- [21] 金慧芳,史东梅,钟义军,等.红壤坡耕地耕层土壤质量 退化特征及障碍因子诊断[J].农业工程学报,2019,35 (20):84-93.
  - JIN H F, SHI D M, ZHONG Y J, et al. Diagnosis of obstacle factors and degradation characteristics of cultivated-layer quality for red soil sloping farmland [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(20):84-93.
- [22] 苟俊菲,张林星,石海龙,等.喀斯特槽谷区岩层倾向对土壤入渗特性的影响[J].水土保持学报,2023,37(4):83-93,
  - GOU J F, ZHANG L X, SHI H L, et al. Effects of rock strata dip on soil infiltration characteristics in Karst trough valley area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(4):83-93.
- [23] 陈英,魏兴萍,肖成芳,等.<sup>137</sup> Cs、HCHs 测定岩溶洼地 沉积物年代及流域产沙强度[J].水土保持学报,2021, 35(3):30-37,45.
  - CHEN Y, WEI X P, XIAO C F, et al. Determination of sediment age and sediment yield intensity using <sup>137</sup>Cs and HCHs dating in Karst depressions[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(3):30-37,45.
- [24] 卢雪,张云奇,龙翼,等.三峡库区喀斯特洼地小流域产 沙强度 WaTEM/SEDEM 模拟:以巫山县常家洼洼地 流域为例[J].中国水土保持科学(中英文),2021,19 (2):92-97.
  - LU X, ZHANG Y Q, LONG Y, et al. Modeling sediment yield using WaTEM/SEDEM for a small catchment of karst depression in the Three Gorges Reservoir region: A case study of the Changjiawa depression catchment of Wushan county [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021, 19(2):92-97.
- [25] 陈英,魏兴萍,雷珊.青木关岩溶槽谷流域不同土地利 用类型土壤可蚀性分析[J].中国岩溶,2020,39(6): 836-844.

- CHEN Y, WEI X P, LEI S. Analysis on soil erodibility of different land use types in the Qingmuguan karst valley [J].Carsologica Sinica, 2020, 39(6):836-844.
- [26] 赵川,和丽萍,李贵祥,等.昆阳磷矿废弃地植被恢复对土壤质量的影响及评价[J].西部林业科学,2018,47 (2):106-111.
  - ZHAO C, HE L P, LI G X, et al. Effect and assessment of vegetation restoration on soil quality in Kunyang Phosphorite Mine area [J]. Journal of West China Forestry Science, 2018, 47(2):106-111.
- [27] 梅楠,谷岩,李德忠,等.基于最小数据集的吉林省黑土 耕层土壤质量评价[J].农业工程学报,2021,37(12):91-98.
  - MEI N, GU Y, LI D Z, et al. Soil quality evaluation in topsoil layer of black soil in Jilin Province based on minimum data set[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(12):91-98.
- [28] ZHANG C, XUE S, LIU G B, et al. A comparison of soil qualities of different revegetation types in the Loess Plateau, China[J].Plant and Soil, 2011, 347(1):163-178.
- [29] 金慧芳,史东梅,陈正发,等.基于聚类及 PCA 分析的 红壤坡耕地耕层土壤质量评价指标[J].农业工程学报,2018,34(7):155-164.
  - JIN H F, SHI D M, CHEN Z F, et al. Evaluation indicators of cultivated layer soil qualityfor red soil slope farmland based on cluster and PCA analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(7):155-164.
- [30] 庞世龙,欧芷阳,申文辉,等.广西喀斯特地区不同植被恢复模式土壤质量综合评价[J].中南林业科技大学学报(自然科学版),2016,36(7):60-66.
  - PANG S L, OU Z Y, SHEN W H, et al. Edaphic characteristics of different regeneration patterns in karst mountainous areas of Guangxi[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology(Natural Sciences Edition), 2016, 36(7):60-66.
- [31] 欧芷阳,申文辉,庞世龙,等.平果喀斯特山地不同植物群落的土壤质量评价[J].生态学杂志,2015,34(10):2771-2777.
  - OUZY, SHENWH, PANGSL, et al. Assessment of soil quality of different plant communities in the Karst mountains of Ping guo County, Guangxi[J].Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(10): 2771-2777.
- [32] RITZ K, BLACK H I J, CAMPBELL C D, et al. Selecting biological indicators for monitoring soils: A framework for balancing scientific and technical opinion to assist policy development[J]. Ecological Indicators, 2009,9(6):1212-1221.