

等高反坡阶对坡耕地土壤质量的改良效果评价

李奇奇¹, 徐其静¹, 李亦然¹, 王震¹, 侯磊², 汪丽¹, 王克勤¹

(1.西南林业大学水土保持学院,昆明 650224; 2.西南林业大学生态与环境学院,昆明 650224)

摘要: [目的] 等高反坡阶(CRT)是阻缓坡耕地水土流失的生态工程措施,探明并评价CRT措施对坡面红壤质量的改善效果,为该地区选择适宜的水土保持措施和改善坡耕地土壤质量提供参考依据。[方法] 以云南松华坝迳者流域坡耕地为研究对象,通过测定16项土壤指标,分析CK和CRT坡耕地土壤物理、化学和生物学性质的差异,并建立最小数据集评价坡耕地土壤质量。[结果] 1)与CK相比,CRT坡耕地土壤水分体积分数、几何平均直径、总团聚体分别提高79.30%、11.36%和11.43% ($p < 0.05$),土壤体积质量降低15.09% ($p < 0.05$)。2)相较于CK坡耕地,CRT坡耕地土壤全氮、硝态氮、全磷和总有机碳质量分数分别提高33.34%、112.58%、25.86%和66.14% ($p < 0.05$),坡耕地布设CRT有较好的截留养分效果。3)坡耕地布设CRT后,土壤总球囊霉素(T-GRSP)、易提取球囊霉素(EE-GRSP)、亮氨酸氨基肽酶(S-LAP)和 β -1,4-N-乙酰葡萄糖苷酶(S-NAG)分别提高17.45%、111.11%、92.57%和307.36% ($p < 0.05$)。4)土壤质量评价最小数据集由高活性易氧化有机碳(H-EOC),S-NAG和EE-GRSP构成。5)土壤质量整体表现为CRT > CK,CRT坡耕地土壤质量指数较CK提高146.28%~266.34% ($p < 0.05$)。[结论] CRT使坡耕地阶下土壤结构优于阶上,阶下土壤质量由较低水平提升为高水平。综上所述,坡耕地布设CRT措施后土壤质量改善效果显著,坡耕地生产力水平提升。

关键词: 坡耕地; 等高反坡阶; 土壤质量; 最小数据集; 土壤质量指数

中图分类号: S157.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)03-0352-09

Evaluation of the Improvement Effects of Contour Reverse-Slope Terraces on Soil Quality in Sloping Farmland

LI Qiqi¹, XU Qijing¹, LI Yiran¹, WANG Zhen¹, HOU Lei², WANG Li¹, WANG Keqin¹

(1.College of Soil and Water Conservation, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China;

2.College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

Abstract: [Objective] Contour Reverse-Slope Terraces (CRT) are ecological engineering measures designed to mitigate soil and water loss on sloping farmland. This study aimed to explore and evaluate the improvement effects of CRT on the quality of red soil on slopes, and to provide a reference for selecting suitable soil and water conservation measures and improving soil quality in sloping farmland in the region. [Methods] Using sloping farmland in the Yizhe watershed Songhua dam in Yunnan as the study area, 16 soil indicators were measured to analyze the differences in soil physical, chemical, and biological properties between control (CK) and CRT-treated sloping farmland. A minimum data set (MDS) was established to evaluate soil quality. [Results] 1) In sloping farmland with CRT measures, the soil water content, geometric mean diameter, and total aggregates increased by 79.30%, 11.36% and 11.43% ($p < 0.05$), while soil bulk density decreased by 15.09% compare to those in sloping farmland of CK ($p < 0.05$), respectively. 2) In sloping farmland with CRT measures, the soil total nitrogen, nitrate-nitrogen, total phosphorus, and total organic carbon contents increased by 33.34%,

收稿日期:2024-10-10

修回日期:2024-12-28

录用日期:2025-01-02

网络首发日期(www.cnki.net):2025-03-13

资助项目:国家重点研发计划项目(2022YFF1302904);云南省教育厅科学研究基金项目(2023Y0710,2023Y0712);云南省“十三五”重点研发项目(2018BB018)

第一作者:李奇奇(1996—),女,硕士研究生,主要从事坡耕地退化土壤生态修复研究。E-mail:erzxnji90321@163.com

通信作者:王克勤(1964—),男,博士,教授,主要从事山区小流域环境综合治理的理论与技术研究。E-mail:wangkeqin7389@sina.com

http://stbcbx.alljournal.com.cn

112.58%, 25.86% and 66.14% ($p < 0.05$) compare to those in sloping farmland of CK, respectively, indicating effective nutrient retention by CRT. 3) In sloping farmland with CRT measures, total glomalin (T-GRSP), easily extractable glomalin (EE-GRSP), leucine aminopeptidase (S-LAP), and β -1, 4-N-acetylglucosidase (S-NAG) increased by 17.45%, 111.11%, 92.57% and 307.36% compare to those in sloping farmland of CK ($p < 0.05$). 4) Three indicators, including high easily oxidizable carbon (H-EOC), S-NAG, and EE-GRSP, were identified as the main indicators for soil quality evaluation in the minimum data set. The verification of total data set suggested that the minimum data set reflected the effective information and accuracy evaluation for soil quality. (5) Overall soil quality I was ranked as CRT > CK, with the soil quality index of CRT sloping farmland increasing by 146.28%-266.34% ($p < 0.05$), compared to that of CK. [Conclusion] CRT measures make the soil quality of sloping farmland below the terrace better than that above the terrace, elevating the soil quality below the terrace from a relatively low level to a high level. In conclusion, the implementation of CRT measures significantly improves the soil quality and productivity of sloping farmland.

Keywords: sloping farmland; contour reverse-slope terrace; soil quality; minimum data set; soil quality index

Received: 2024-10-10

Revised: 2024-12-28

Accepted: 2025-01-02

Online(www.cnki.net): 2025-03-13

坡耕地是云南省主要的耕地类型,占省内耕地总面积的56%^[1],为当地粮食安全和生态安全提供保障。同时,由于云南省特殊的地理与环境条件,加之长期粗放式的耕作管理模式导致坡耕地土壤养分流失和结构退化严重,成为制约当地农业经济可持续发展的重要因素^[2]。因此,针对性地开展云南省退化坡耕地土壤的生态修复成为当地农业和经济发展的迫切需求。

目前,关于坡耕地水土保持措施的研究多集中于耕作模式、培肥和农林复合技术等,较少关注整地措施对坡耕地土壤质量的综合评价。等高反坡阶(contour reverse-slope terrace, CRT)作为一种促进坡面水分循环再分配的生态干预工程措施,通过改变坡面微地形促进水分循环与再分配,进而阻缓坡面水土流失的发生^[3]。已有研究^[4-6]表明,CRT措施可减少坡面产流产沙率,阻止养分流失并改善土壤结构。然而,缺乏一个根据土壤物理、化学和生物学特性指标进行综合评估的方法,全面评价CRT措施对坡耕地土壤质量的改善效果。土壤质量指数(soil quality index, SQI)是基于最小数据集的土壤质量评价方法,由于指标选取客观全面、数据冗余小等特点^[7-8],被广泛运用于土壤质量的综合评价,其值越大代表土壤质量越好。近年来,国内外学者对土壤质量评价进行大量研究,程彩云等^[7]在贵州省喀斯特山地、彭珏等^[8]在东北黑土区侵蚀农田对土壤质量进行评价表明,SQI可以准确评价农田土壤质量的优劣。为减少数据冗余,通过建立最小数据集(minimum data set, MDS)综合分析坡耕地土壤侵蚀和修复前后土壤质量的变化,有利于深入评价水土保持措施对

退化土壤的修复效果,对于坡面退化红壤生态修复具有重要指导意义。

本研究以云南省松华坝迳者小流域为研究对象,通过设置CK和CRT坡耕地并测定16项土壤理化指标进行土壤质量评价,明确土壤改良效果,为CRT措施改善坡耕地水土流失效果、提高土地生产力的作用机理提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于云南省昆明市松华坝水源区(24°14'43"~25°12'48"N, 102°44'51"~102°48'37"E)水土保持监测站内,该地区气候类型是北亚热带低纬高原山地季风气候,无霜期长,干湿季节分明,5—9月为雨季,降水集中。该地区以山区为主要地形,坡耕地(6°~25°)土壤类型以红壤为主,土壤质地组成为砂粒46.38%,粉粒52.65%,黏粒0.97%^[6],pH为5.38,主要种植作物为玉米(*Zea mays*)、大豆(*Glycine max*)、芸豆(*Phaseolus vulgaris*)、烤烟(*Nicotiana tabacum*)、马铃薯(*Solanum tuberosum*)等。研究区2023年气象数据(年值)具体为:气压811.38 hPa,总云量36.48%,平均2 min风速2.20 m/s,降雨时间113 d,相对湿度66.30%,平均气温17.40 °C,平均降水量666.00 mm。

1.2 试验设计与土样采集

试验样地内共有4块立地条件(坡向:南北,坡度:15°,水平投影面积:100 m²)一致的坡耕地,其中2块为对照(CK),其余2块为试验组,布设CRT,于2008年修成,设计标准为20年一遇降雨,工程量小,简单可行,人工修建即可完成。CRT是分别在坡耕地中部和

底部,沿等高方向,里切外垫,形成反坡坡度为 5° 、宽度 $1\sim 1.2\text{ m}$ 的反坡台阶。该反坡阶拦截大部分降雨而不会被冲毁,降雨后需要将反坡阶内少量沉淀的土壤及时清理至阶下坡面,持续维护至今。使用期间进行统一的耕作与管理,每年5月进行农作物的种植,因此,取样前土壤情况基本一致。试验样地布设平面示意及CRT剖面示意图见图1。原状坡耕地与反坡阶样地均采用传统的农田耕作方式,在播种作物前翻耕土壤至少2次,翻耕深度为 20 cm ,2021—2024年种植芸豆(*Phaseolus vulgaris*),播种密度约为 $20\text{ 万株}/\text{hm}^2$ 。

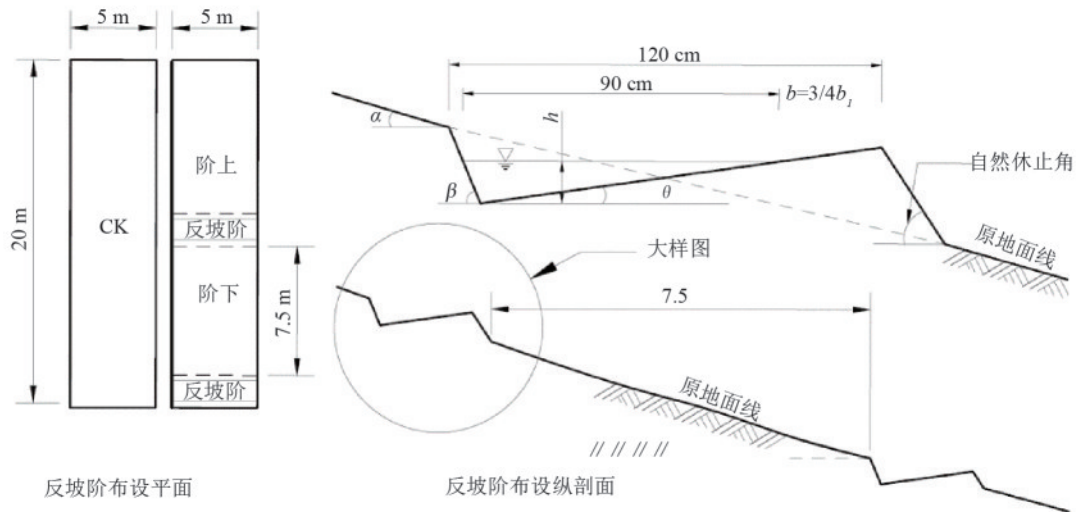


图1 试验样地平面示意及等高反坡阶剖面示意

Fig.1 Plane view of the experimental plot and schematic diagram of the contour reverse-slope terraces

1.3 样品指标测定

1.3.1 物理指标 土壤体积质量使用环刀法测定,土壤水分体积分数使用烘干法测定,土壤几何平均直径(geometric mean diameter, GMD)和总团聚体(total aggregates, A_1)的计算公式参照文献[3]。

$$\text{GMD} = \exp \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (w_i \ln x_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \right\} \quad (1)$$

式中: x_i 为*i*粒级团聚体的平均直径,mm; w_i 为 x_i 相对应的粒级团聚体占总团聚体重量的百分含量。

土壤总团聚体($A_1, \%$)指一定质量土壤中各粒级团聚体(粒径 $0.053\sim 5\text{ mm}$)的总重量所占的百分比。计算公式为:

$$A_1 = M_1 / M \times 100 \quad (2)$$

式中: M_1 为粒径 $0.053\sim 5\text{ mm}$ 团聚体的重量,g; M 为筛分土壤的总质量,g。

1.3.2 化学指标 土壤全氮(total nitrogen, TN)采用浓硫酸—过氧化氢($\text{H}_2\text{SO}_4\text{—H}_2\text{O}_2$)消解法[6]测定。铵态氮(ammonium nitrogen, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$)和硝态氮(nitrate nitrogen, $\text{NO}_3^- - \text{N}$)采用 1 mol/L 氯化钾提取可见分光光度计测定[9]。土壤全磷(total

以中部反坡台阶为界,在其 1 m 以上(阶上, CRT-A)和 1 m 以下(阶下, CRT-B)2个位置,按对角线法设置取样点5个,并以CK相应位置做对照,于2023年8月底进行土壤采样。采样前去除地表枯落物和植物根系,使用直径 5 cm 的原状取土钻采集 $0\sim 20\text{ cm}$ 土层的原状土壤,同时在剖面上采集环刀和铝盒土样,用于测定土壤体积质量和水分体积分数。一部分土样带回实验室风干后测定土壤理化性质及筛分土壤团聚体,其余部分放在 4°C 冰箱内进行保存,用于测定酶活性。

phosphorus, TP)采用浓硫酸—高氯酸($\text{H}_2\text{SO}_4\text{—HClO}_4$)消煮钼锑抗比色法[6]测定。总有机碳(total organic carbon, TOC)使用总有机碳分析仪(Elementar Vario TOC, 德国)测定,土壤高、中、低活性易氧化有机碳分别使用 $333, 167, 33\text{ mmol/L}$ 的高锰酸钾氧化比色法[3]测定。

1.3.3 生物指标 土壤亮氨酸氨基肽酶(S-LAP)采用对硝基苯胺比色法测定。 β -1,4-N-乙酰葡萄糖苷酶(S-NAG)采用对硝基苯酚法[3,10]测定。总球囊霉素土壤相关蛋白(total glomalin-related soil protein, T-GRSP)和易提取球囊霉素土壤相关蛋白(easily extractable glomalin-related soil protein, EE-GRSP)采用考马斯亮蓝法[11-12]测定。

1.4 总数据集与最小数据集的构建

选取对CRT措施引起的土壤过程较为敏感的指标进行土壤质量评价。对所选取的16个指标进行单因素方差分析(one-way analysis of variance, ANOVA),在CK与CRT坡耕地之间存在显著差异($p < 0.05$)的指标纳入总数据集(total data set, TDS),用于计算SQI。计算步骤为:1)构建MDS;

2)通过隶属度函数对土壤指标进行标准化处理;
3)对MDS中的指标进行打分,得到SQI。

1.4.1 构建最小数据集 将所有土壤结构指标进行标准化处理,随后进行主成分分析。根据Norm值筛选分组后的指标进入MDS, Norm值计算公式为:

$$N_{jy} = \sqrt{\sum_{j=1}^y (u_{jy}^2 e_y)} \quad (3)$$

式中: u_{jy} 为第 j 个土壤结构指标在第 y 个主成分上的载荷值; e_y 为第 y 个主成分旋转后的特征值。

1.4.2 建立评分函数 根据土壤结构指标影响土壤结构的正负效应,本文选择升型和降型2种隶属度函数,将土壤指标的数值标准化为0~1的无量纲值,并选择指标的最大值 X_1 和最小值 X_2 作为函数的转折点^[3]。

1.4.3 土壤质量指数计算

$$SQI = \sum_{i=1}^n W_i \times F_i \quad (4)$$

式中: W_i 为第 i 个土壤结构指标的权重; F_i 为第 i 个指标的隶属度值。

表1 CRT措施下坡耕地土壤物理性质的变化

Table 1 Variation of soil physical properties of sloping farmlands under CRT measures

阶位	土壤体积质量/(g·cm ⁻³)	土壤水分体积分数/%	GMD	A _i /%
CK-A	1.44±0.07b	10.49±0.01c	0.81±0.01c	73.10±0.03b
CRT-A	1.35±0.07c	15.05±0.01b	0.81±0.02bc	71.91±0.01b
CK-B	1.53±0.08a	14.90±0.01b	0.83±0.01b	70.66±0.02b
CRT-B	1.30±0.04c	18.81±0.01a	0.90±0.01a	78.74±0.03a

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同阶位间差异显著($p<0.05$)。下同。

2.1.2 土壤化学性质变化 由表2可知,布设CRT后,坡耕地TN和TP质量分数提升显著($p<0.05$),阶上和阶下提升幅度分别为17.28%、14.11%和20.67%、21.80%。与CK相比,布设CRT后使NH₄⁺-N质量分数阶上降低24.19%($p<0.05$),阶下增加3.12%。不同阶位NO₃⁻-N质量分数差异显著($p<0.05$),布设CRT后NO₃⁻-N质量分数在阶上和阶下的增加幅度分别为88.38%和68.60%。与CK坡耕地相比,

表2 CRT措施下坡耕地土壤化学性质的变化

Table 2 Variation of soil chemical properties of sloping farmlands under CRT measures

土壤指标	CK-A	CRT-A	CK-B	CRT-B
TP/(g·kg ⁻¹)	0.28±0.01c	0.32±0.01b	0.29±0.01c	0.35±0.01a
TN/(g·kg ⁻¹)	0.63±0.05c	0.74±0.04b	0.70±0.02b	0.84±0.02a
NH ₄ ⁺ -N/(mg·kg ⁻¹)	11.06±0.90a	8.40±0.54b	8.13±0.28b	8.38±0.09b
NO ₃ ⁻ -N/(mg·kg ⁻¹)	12.59±0.09d	23.72±1.16b	15.87±0.70c	26.76±0.58a
TOC/(g·kg ⁻¹)	9.13±0.53d	13.08±1.07b	10.40±0.47c	15.16±0.37a
L-EOC/(g·kg ⁻¹)	12.34±0.78b	10.09±0.44c	12.66±0.51b	14.30±0.89a
M-EOC/(g·kg ⁻¹)	5.04±0.44d	6.86±0.13b	6.32±0.35c	8.53±0.33a
H-EOC/(g·kg ⁻¹)	3.62±0.16b	3.98±0.16b	3.83±0.27b	5.98±0.54a

注:同行不同小写字母表示不同阶位间差异显著($p<0.05$)。

1.5 统计学分析

使用SPSS 26.0软件中的ANOVA和Duncan检验进行差异分析, $p<0.05$ 为差异显著;采用Origin 2021(Correlation Plot)软件进行相关性分析并制图;数据采用平均值±标准差表示;采用Origin 2021软件绘图。

2 结果与分析

2.1 布设CRT后土壤性质变化

2.1.1 土壤物理性质变化 由表1可知,与CK坡耕地相比,CRT坡耕地土壤体积质量显著降低($p<0.05$),阶上和阶下分别降低6.74%和15.09%;土壤水分体积分数显著增加($p<0.05$),阶上和阶下分别增加43.46%和26.26%。布设CRT后,坡耕地GMD和A_i的变化情况相似,均表现为阶下提升效果最佳,与CK-B相比,CRT-B分别提高7.90%和11.43%($p<0.05$)。表明CRT措施可以显著改善坡耕地土壤结构,有利于土壤团聚体的形成,进而减少坡面土壤流失。

CRT措施使阶上和阶下TOC、M-EOC质量分数分别提高43.29%、36.28%和45.77%、34.97%($p<0.05$),阶上和阶下提升效果相近。相较于CK坡耕地,布设CRT后使L-EOC质量分数阶上降低18.26%,阶下增加13.03%。与CK-B相比,CRT-B坡耕地H-EOC质量分数增加55.86%($p<0.05$),为阶上的5.56倍。表明布设CRT后,可有效阻缓坡耕地土壤养分的流失,增加土壤有机碳,进而提高土壤肥力。

2.1.3 土壤生物学性质变化 由表3可知,坡耕地布设 CRT 后 T-GRSP、EE-GRSP、S-NAG 和 S-LAP 质量分数增加,阶上提升幅度分别为 6.97%、63.47%、55.67% 和 57.08%,阶下提升幅度分别为 10.25%、27.28%、63.43% 和 80.24% ($p < 0.05$)。EE-

GRSP 质量分数阶上提升效果为阶下的 2.33 倍, T-GRSP、S-NAG 和 S-LAP 质量分数阶下提升效果最佳。表明布设 CRT 后,反坡台阶有效截留上坡淋流的表土及所携带养分和微生物等,有利于土壤大团聚体的形成,进而阻缓坡面水土流失的发生。

表 3 CRT 措施下坡耕地土壤生物学性质的变化

Table 3 Variation of soil biological properties of sloping farmlands under CRT measures

阶位	T-GRSP/(mg·g ⁻¹)	EE-GRSP/(mg·g ⁻¹)	S-NAG/(μmol·d ⁻¹ ·g ⁻¹)	S-LAP/(nmol·min ⁻¹ ·g ⁻¹)
CK-A	0.26±0.01b	0.14±0.01c	0.94±0.01d	1.68±0.01d
CRT-A	0.28±0.01b	0.23±0.01b	1.47±0.01b	2.64±0.26c
CK-B	0.28±0.01b	0.23±0.01b	1.11±0.04c	3.81±0.30b
CRT-B	0.31±0.03a	0.29±0.01a	1.81±0.02a	6.86±0.44a

2.2 主成分分析

在主成分分析之前进行 KMO 和巴特利特检验, KMO=0.757>0.5,近似卡方=459.00,df=120,sig.=0<0.01,表明可以基于所选取的指标进行主成分分析。主成分分析结果(表4)显示,特征值>1的主成分共3个,累积贡献率为89.69%,说明主成分分析所选取的3个主成分可以解释所选取所有理化指标的大部分信息,用于坡耕地布设 CRT 后土壤质量综合评价的结果是可靠的。

表 4 CRT 措施下土壤评价指标主成分分析

Table 4 Principal component analysis of soil evaluation indicators under CRT measures

指标	载荷矩阵			分组	Norm
	PC1	PC2	PC3		
S-NAG	<u>0.921</u>	0.324	0.180	1	2.60
TP	0.914	0.274	0.103	1	2.54
TOC	0.910	0.253	0.215	1	2.54
土壤体积质量	-0.864	0.051	0.345	1	2.41
M-EOC	0.833	0.430	0.284	1	2.47
TN	0.793	0.418	0.274	1	2.36
土壤水分体积分数	0.700	0.487	0.427	1	2.26
T-GRSP	0.528	0.472	0.261	1	1.78
S-LAP	0.574	0.764	0.249	1	2.26
GMD	0.543	0.733	0.112	1	2.12
H-EOC	0.712	<u>0.649</u>	-0.022	2	2.35
L-EOC	-0.015	0.954	-0.148	2	1.99
A _i	0.488	0.660	-0.352	2	1.99
EE-GRSP	0.658	0.489	<u>0.552</u>	3	2.24
NO ₃ ⁻ -N	-0.090	-0.280	0.929	3	1.66
NH ₄ ⁺ -N	-0.390	-0.156	-0.859	3	1.80
特征值	7.313	4.296	2.740		
贡献率/%	45.709	26.851	17.126		
累积贡献率/%	45.709	72.559	89.686		

注:表中下划线所对应的载荷值为 MDS 指标。

2.3 最小数据集指标的选取

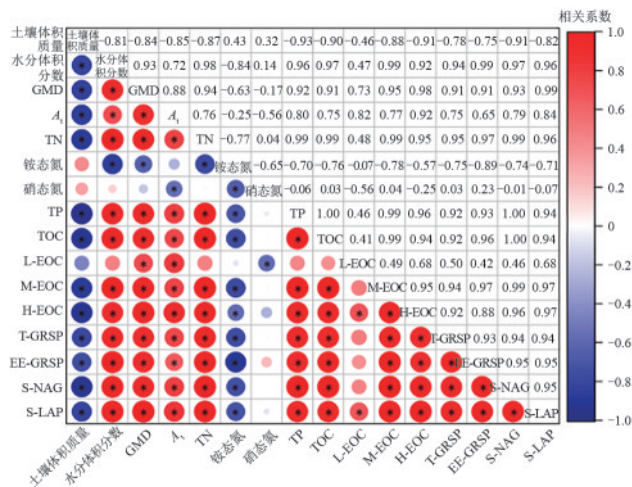
为减少试验数据冗余,需要从 TDS 内 16 个指标中筛选出数量最少且最敏感的土壤质量指标,建立土壤质量评价的 MDS。PC1 中载荷>0.5 的指标有 12 个,主要反映土壤的结构特性与养分。PC2 中载荷>0.5 的指标有 5 个,主要反映土壤的养分特征。PC3 中载荷>0.5 的指标有 3 个。继续对指标进行分组分析,结果表明,H-EOC 在 PC1 和 PC2 的载荷和 EE-GRSP 在 PC1 和 PC3 的载荷均>0.5。因此,需要分析 H-EOC 和 EE-GRSP 与其他指标的相关性。相关分析(图 2)表明,H-EOC 与第 1 组中指标的相关系数大于与第 2 组指标间的相关系数,归为第 2 组;EE-GRSP 与第 1 组中指标的相关系数大于与第 3 组指标间的相关系数,归为第 3 组。PC1 中主要为土壤养分含量相关的指标。PC2 中的指标分别为化学性质和物理性质的相关指标,且相互影响;土壤中 A_i 越多,对有机碳的保护能力越强;而有机碳作为胶结剂也可促进大团聚体的形成。PC3 中的 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 与 CRT 对氮元素的截留能力相关。

将进行主成分分析后的指标进行分组后,需要计算所有指标的 Norm 值,根据旋转后公因子方差和载荷值计算 Norm 值的大小,并将每个分组中 Norm 值最大值 10% 范围内的指标纳入 MDS。计算并得到 3 个 MDS 初选指标: S-NAG、H-EOC 和 EE-GRSP(表 4)。MDS 构建的准确性及合理性直接影响土壤质量评价结果的准确程度。因此,需要对比基于 TDS 计算的 SQI 和基于 MDS 计算的 SQI。根据各指标的隶属度值和权重,利用公式(4)计算获得 CRT 措施下基于 TDS 和 MDS 各指标的 SQI。

2.4 基于最小数据集的土壤质量评价

由图 3 可知,CK 坡耕地阶上和阶下基于 MDS 所计算的 SQI 分别为 0.14 和 0.37,CRT 坡耕地阶上和阶下基于 MDS 所计算的 SQI 分别为 0.50 和 0.92,均

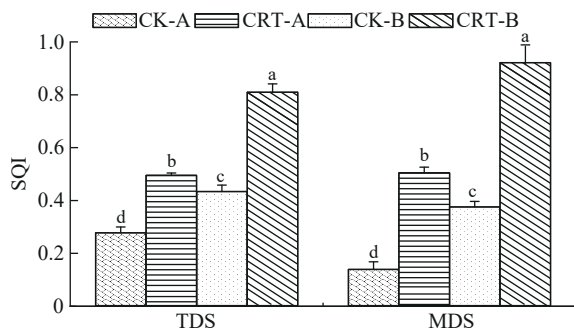
表现为阶下土壤质量优于阶上,坡耕地布设CRT后土壤质量改良效果显著。将SQI进行分级:低($0 < SSI \leq 0.2$)、较低($0.2 < SSI \leq 0.4$)、中($0.4 < SSI \leq 0.6$)、较高($0.6 < SSI \leq 0.8$)、高($0.8 < SSI < 1$)。结果表明,CRT坡耕地土壤质量高于CK坡耕地,且CRT使坡耕地阶上和阶下土壤质量分别由低和较低水平改善为中等和高水平。



注:GMD为几何平均直径;A₁为总团聚体;TN为全氮;TP为全磷;TOC为总有机碳;L-EOC为低活性易氧化有机碳;M-EOC为中活性易氧化有机碳;H-EOC为高活性易氧化有机碳;T-GRSP为总球囊霉素土壤相关蛋白;EE-GRSP为易提取球囊霉素土壤相关蛋白;S-NAG为β-1,4-N-乙酰葡萄糖苷酶;S-LAP为亮氨酸氨基肽酶;*表示 $p \leq 0.05$ 。

图2 土壤质量指标相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis of soil quality indicators



注:上方不同小写字母表示不同位置间差异显著($p < 0.05$)。

图3 基于TDS和MDS的土壤质量指数

Fig. 3 Soil quality index based on total data set (TDS) and minimum data set (MDS)

3 讨论

3.1 土壤质量评价方法的优势分析

CRT措施对土壤质量改良效果的评价对于坡耕地水土流失治理研究至关重要。基于MDS的土壤质量评价方法因指标选取客观、数据冗余小、操作性强等优点而广泛使用^[7-8]。目前,关于土壤质量评价的研究大多集中于不同人工林或不同用地类型,关

注水土保持措施对坡耕地土壤质量改良效果评价的研究较少。为此,本研究选取16个土壤指标构建TDS,综合评价CRT措施对坡耕地土壤质量提升效果,结果表明该措施可以显著提升坡面土壤质量。

根据土地类型、自然气候、植物类型的不同,不同研究所选取的指标及最终构建MDS中的指标有所差异。国内外已有研究中选取频率较高的指标包括土壤体积质量、土壤水分体积分数、pH、AP、TN等^[13-14],生物学指标的选取频率较低。本研究结合坡耕地土壤侵蚀现状、CRT截流蓄渗的特殊性及土壤生物学性质对环境变化的敏感性,选取土壤物理、化学和生物学性质等16个指标,通过主成分分析法并结合Norm值筛选出H-EOC、EE-GRSP和S-NAG构建MDS,评价结果与试验地已有研究^[3,9]结果一致。本研究MDS所选取的指标中,H-EOC是可以被微生物直接分解利用、有效提供植物养分的有机碳组分^[15],对土壤的有效养分质量分数有重要影响;S-NAG是土壤碳氮循环过程的重要参与者^[16];GRSP由丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)分泌,具有增加团聚体稳定性,有助于碳固存、保护菌丝、提高AMF存活率等优点,但其质量分数受到土壤非生物因子的影响^[17]。有研究^[18]发现,GRSP可通过改善土壤结构和提高土壤微生物活性加速退化土壤的恢复过程。因此,本研究选取酶活性等生物学指标纳入TDS,最终EE-GRSP和S-NAG被纳入MDS,所构建的评价指标体系客观、全面地评价土壤质量。

3.2 CRT改良土壤质量的机制探讨

地表径流是坡面侵蚀产沙的直接动力,因此,坡面水土流失防治的关键则是地表水文循环和坡面径流运动时间、速度等调控方式^[19]。下垫面和降雨条件是影响坡面产流产沙特征的主要因素,水土保持措施的不同,也导致径流起始时间、入渗性能和土壤抗冲性能的差异^[20-21]。李奇奇等^[3]研究发现,CRT措施能显著提高坡耕地土壤结构水平。相较于CK坡耕地,CRT通过对微地形的改造,拦截径流并增加水分入渗,增加土壤水分体积分数,进而减小土壤体积质量^[22],坡面径流有效转换为壤中水。坡面径流量的减少有效缓解雨水对坡面土壤的冲刷,保护土壤结构不被破坏,从而提高土壤中团聚体的总量和团聚体稳定性。

土壤TN、TP和TOC质量分数是土壤养分状况的重要体现。本研究中,相较于CK坡耕地,CRT措施对土壤养分的截留效果显著,土壤TN、TP和TOC质量分数分别增加20.67%、21.80%和45.77%($p < 0.05$),与

徐其静等^[9]研究结果一致。同时,TOC 质量分数的增加促进土壤中氮磷的固持。 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 是土壤中被黏土矿物吸附的交换性铵及可溶性矿物质态氮,有研究^[23]表明,土壤对氮元素的截流能力与其存在形态相关,土壤对下渗的 NH_4^+ -N 的截留能力较强, NO_3^- -N 和 TN 在土壤中随径流迁移的能力更强,极易淋溶损失。本研究中,CRT-B 坡耕地 NO_3^- -N 质量分数高于 NH_4^+ -N,说明该措施有效地阻缓土壤中 NO_3^- -N 随径流的迁移,提高土壤的氮素供应能力。EOC 是土壤有机碳组分中活性和动态性更高,并易于被微生物分解利用的不稳定碳^[24],且对环境条件的改变较为敏感,可以快速反映 TOC 质量分数的变化情况^[25]。CRT 措施显著提高阶下 EOC 质量分数,可能由于 CRT 措施促进植物的光合作用和生长,导致更多的易分解碳向深层转移,随着土壤内微生物对其的分解,EOC 质量分数有所增加^[26-27]。

土壤的生物学性质对环境的变化更加敏感,同时直接影响土壤质量。坡耕地在布设 CRT 后,土壤微生物群落迅速产生变化,进而影响微生物活动。土壤酶的变化是生物活性和土壤生物化学过程的重要体现,并有助于维持土壤结构的稳定;同时这些因素也反过来影响土壤酶的活性和产量^[9,28]。本研究中,布设 CRT 后,坡耕地 S-LAP 和 S-NAG 活性分别显著提高 63.43% 和 80.24%,进而加快有机养分的转化,促进作物生长发育,与刘晓微等^[6]、徐其静等^[9]研究结果一致;另一方面,反坡台阶的有效拦截提升土壤养分质量分数并增加土壤微生物量,微生物的生长繁殖活动促进酶活性的提高。GRSP 在维持 TOC 平衡和土壤团聚体稳定性方面具有重要作用^[17-18]。其中 T-GRSP 是指较长时间产生的相对稳定的 GRSP,在 TOC 储存中起着重要作用;EE-GRSP 表示新生成或接近分解的部分,反映土壤中新生成的 GRSP 质量分数,有助于提高土壤团聚体的稳定性^[29]。唐利等^[29]研究发现,喀斯特山区农田退耕后植被恢复可以有效提高 GRSP 质量分数,进而促进土壤质量的改善。本研究中,CRT 措施显著提高阶下土壤 T-GRSP 和 EE-GRSP 质量分数,可能由于坡耕地布设 CRT 后土壤 GMD 和 A_1 分别提高 11.36% 和 11.43% ($p < 0.05$),土壤结构的改善导致土壤中 AMF 的数量和侵染能力增强,进而促进 GRSP 的分泌。

3.3 CRT 对土壤质量改良效果的评价

基于最小数据集,采用隶属度函数计算的 CK 坡耕地阶上和阶下 SQI 分别为 0.14 和 0.37,分别处于低和较低水平;CRT 坡耕地阶上和阶下 SQI 分别为 0.50 和 0.92,处于中等和较高水平。CRT 坡耕地 SQI

显著高于 CK 坡耕地,说明 CRT 措施对坡耕地土壤质量水平改良效果显著。由表 5 可知,CRT 措施可显著提升芸豆千粒重和产量,且阶下提升幅度分别为阶上的 3.06、4.04 倍。前期研究^[21]发现,坡地水土保持效果和改善土壤养分流失效率因水土保持措施的不同而有所差异,横垄耕作、坡式梯田、果树台田等水土保持措施可以有效抑制养分的流失。本研究坡耕地布设 CRT 后,地表水分入渗的增加阻缓表土所携带养分的流失,并为植物根系的生长创造更加稳定的条件。土壤质量评价结果与芸豆产量结果一致,均表现为 CRT 坡耕地阶下土壤质量与作物产量最高,说明 CRT 措施不仅能促进作物生长,还能提高作物光合特性、作物水分利用效率及作物产量,土壤质量的改善显著提升 CRT 坡耕地的生产力,与试验样地前期研究^[6,27,30]结果一致。

表 5 芸豆产量和千粒重

Table 5 Yield and TGW of kidney bean		
阶位	芸豆千粒重/g	芸豆产量/(kg·hm ⁻²)
CK-A	448.47±28.93b	20.00
CRT-A	487.11±14.17a	33.33
CK-B	375.94±4.29c	23.20
CRT-B	475.77±3.34ab	85.60

4 结论

1) 通过主成分分析和 Norm 值,优化筛选出 MDS 指标为 H-EOC、EE-GRSP 和 S-NAG,所计算的 SQI 对土壤质量的综合评价效果良好,与本研究坡耕地土壤生产力水平的实际表现相一致。

2) 坡耕地布设 CRT 后,GMD 和 A_1 分别提高 11.36% 和 11.43% ($p < 0.05$),TP 和 TOC 质量分数分别提高 33.34% 和 66.14% ($p < 0.05$),EE-GRSP 和 S-NAG 分别提高 111.11% 和 307.36% ($p < 0.05$)。相较于 CK 坡耕地,CRT 坡耕地土壤结构改善,土壤养分质量分数和酶活性提高。

3) 通过计算,CRT 坡耕地阶上和阶下基于 MDS 所计算的 SQI 分别为 0.50 和 0.92,相较于 CK 分别提高 146.28% 和 266.34% ($p < 0.05$),表明布设 CRT 能显著提高坡耕地土壤质量水平。CRT 的拦截径流和增加蓄渗的作用,使得 CRT 坡耕地土壤质量水平高于 CK 坡耕地,并表现为阶下土壤质量水平高于阶上。

参考文献:

[1] 陈正发,史东梅,何伟,等.1980—2015 年云南坡耕地资源时空分布及演变特征分析[J].农业工程学报,2019,35(15):256-265.

CHEN Z F, SHI D M, HE W, et al. Spatio-temporal distribution and evolution characteristics of slope farm-

- land resources in Yunnan from 1980 to 2015[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(15):256-265.
- [2] 王伟,贺莉莎.云南省坡耕地现状调查及分析[J].中国水土保持,2019(4):20-23.
WANG W, HE L S. Survey and analysis on current situation of slope farmland in Yunnan Province[J]. Soil and Water Conservation in China, 2019(4):20-23.
- [3] 李奇奇,徐其静,侯磊,等.基于团聚体性质的等高反坡阶改良土壤结构评价[J].中国水土保持科学(中英文), 2024, 22(4):93-101.
LI Q Q, XU Q J, HOU L, et al. Structure evaluation of the improved soil with contour reverse-slope terrace based on soil aggregates property[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2024, 22(4):93-101.
- [4] 陈敏全,王克勤,等.高反坡阶对坡耕地土壤碳库的影响[J].水土保持通报,2015, 35(6):41-46.
CHEN M Q, WANG K Q. Effects of reverse-slope level terrace on soil carbon stock of sloping farmland[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(6):41-46.
- [5] 王帅兵,王克勤,宋娅丽,等.等高反坡阶对昆明市松华坝水源区坡耕地氮、磷流失的影响[J].水土保持学报, 2017, 31(6):39-45.
WANG S B, WANG K Q, SONG Y L, et al. Effects of contour reverse-slope terrace on nitrogen and phosphorus loss in sloping farmland in the water resource area of Songhua Dam in Kunming City[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(6):39-45.
- [6] 刘晓微,赵洋毅,王克勤,等.坡耕地等高反坡阶整地年限对土壤改良和玉米产量的影响[J].水土保持学报, 2022, 36(1):307-315.
LIU X W, ZHAO Y Y, WANG K Q, et al. Effects of site preparation years of contour reverse-slope terrace on soil improvement and corn yield in sloping farmland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(1):307-315.
- [7] 程彩云,薛建辉,马洁.基于最小数据集的喀斯特不同类型人工林土壤质量评价[J].南京林业大学学报(自然科学版), 2024, 49(2):134-142.
CHENG C Y, XUE J H, MA J. Assessment of different karst plantation types of on soil quality based on a minimum data set[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2024, 49(2):134-142.
- [8] 彭珏,龙凌,郭忠录,等.东北黑土区侵蚀农田土壤质量指数构建及其空间分异[J].农业工程学报, 2024, 40(15):54-64.
PENG J, LONG L, GUO Z L, et al. Construction and spatial variation of soil quality index in eroded farmland mollisol of northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(15):54-64.
- [9] 徐其静,侯磊,李加豪,等.坡耕地土壤转化酶活性与芸豆产量对等高反坡阶措施的响应[J].中国水土保持科学(中英文), 2024, 22(5):105-114.
XU Q J, HOU L, LI J H, et al. Responses of soil conversion enzyme activities and kidney bean yield to contour reverse-slope terrace treatment in sloping farmland[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2024, 22(5):105-114.
- [10] 钱佳彤.不同轮作与施肥方式下土壤固碳特征及碳氮转化研究[D].重庆:西南大学,2021.
QIAN J T. Characteristics of soil carbon fixation and transformation of carbon and nitrogen under different rotation and fertilization methods[D]. Chongqing: Southwest University, 2021.
- [11] 邸涵悦,郝好鑫,孙兆祥,等.不同演替阶段下球囊霉素相关土壤蛋白对团聚体稳定性的影响[J].生态环境学报, 2021, 30(4):718-725.
DI H Y, HAO H X, SUN Z X, et al. Effects of glomalin-related soil protein on the stability of aggregates at different succession stages[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, 30(4):718-725.
- [12] JANOS D P, GARAMSZEGI S, BELTRAN B. Glomalin extraction and measurement[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(3):728-739.
- [13] 刘可意,杨佳,姜淑娜,等.基于最小数据集的典型黑土区不同林龄小黑杨土壤质量差异[J].生态学报, 2024, 44(9):3623-3635.
LIU K Y, YANG J, JIANG S N, et al. Evaluation of differences in soil quality of *Populus simonii* × *P. nigra* (*P. xiaohei*) of different stand ages in typical black soil areas based on a minimum data set[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(9):3623-3635.
- [14] 田英,许喆,王娅丽,等.宁夏银川平原沙化土地不同人工林土壤质量评价[J].生态学报, 2023, 43(4):1515-1525.
TIAN Y, XU Z, WANG Y L, et al. Soil quality evaluation for different forest plantation of sandy land in Yinchuan Plain, Ningxia[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(4):1515-1525.
- [15] 刘雅杰,张天娇,张向前,等.秸秆还田下耕作方式对黑土活性有机碳组分及碳库管理指数的影响[J].中国农业科学, 2024, 57(17):3408-3423.
LIU Y J, ZHANG T J, ZHANG X Q, et al. Effects of tillage methods under straw returning on the labile organic carbon fractions and carbon pool management index in black soil farmland[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2024, 57(17):3408-3423.
- [16] HOANG D T T, RAZAVI B S, KUZYAKOV Y, et al. Earthworm burrows: Kinetics and spatial distribution of enzymes of C-, N- and P- cycles[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 99:94-103.
- [17] 张佳佳,曾立雄,雷蕾,等.丛枝菌根途径的土壤有机碳固存机制研究进展[J].生态学报, 2024, 44(12):4945-4955.

- ZHANG J J, ZENG L X, LEI L, et al. Research progress of soil organic carbon sequestration mechanism by arbuscular mycorrhizal pathway [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(12):4945-4955.
- [18] 仲召亮, 王文杰, 张文天, 等. 不同林分及农田土壤中球囊霉素蛋白组成特征差异研究[J]. *北京林业大学学报*, 2016, 38(4):107-115.
- ZHONG Z L, WANG W J, ZHANG W T, et al. Compositional variation of glomalin-related soil protein in different forest stands and farmland [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2016, 38(4):107-115.
- [19] 张乐涛, 董俊武, 袁琳, 等. 黄土区工程堆积体陡坡坡面径流调控工程措施的减沙效应[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(15):101-109.
- ZHANG L T, DONG J W, YUAN L, et al. Sediment-reducing benefits by runoff regulation under engineering measures in steep slope of abandoned soil deposits in Chinese loessial region [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(15):101-109.
- [20] 伍冰晨, 陈晓安, 汤崇军, 等. 红壤坡地果园产流产沙及氮磷流失对坡面水土保持措施响应[J]. *水利学报*, 2024, 55(7):802-814.
- WU B C, CHEN X A, TANG C J, et al. Response of runoff and sediment yield and nitrogen and phosphorus loss to soil and water conservation measures in orchards of red soil slope [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2024, 55(7):802-814.
- [21] 陶佳, 张帆, 周凤艳, 等. 辽西山地不同水土保持措施对坡面土壤养分流失的影响[J]. *生态学杂志*, 2024, 1-11. [EB/OL]. [2024-10-10]. <https://link.cnki.net/urlid/21.1148.Q.20240820.1521.024>.
- TAO J, ZHANG F, ZHOU F Y, et al. Effects of different soil and water conservation measures on soil nutrient loss on slope in mountainous region of western Liaoning [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 1-11. [EB/OL]. [2024-10-10]. <https://link.cnki.net/urlid/21.1148.Q.20240820.1521.024>.
- [22] BOHOUSSOU Y N, KOU Y H, YU W B, et al. Impacts of the components of conservation agriculture on soil organic carbon and total nitrogen storage: A global meta-analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 842:e156822.
- [23] 沈金钊, 滕云梅, 罗秋艳, 等. 间歇性降雨条件下施肥后红壤坡耕地氮磷迁移特征[J]. *生态与农村环境学报*, 2024, 40(12):1664-1673.
- SHEN J Z, TENG Y M, LUO Q Y, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus migration in red soil sloping farmland after fertilization under intermittent rainfall [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2024, 40(12):1664-1673.
- [24] 李映雪, 臧真凤, 张瑜, 等. 退耕还草对土壤碳库活度及团聚体活性有机碳组分分布的影响[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(5):241-249.
- LI Y X, ZANG Z F, ZHANG Y, et al. Changes in soil carbon pool activity and distribution of labile organic carbon composition in soil aggregates following conversion of farmland to grassland on the Loess Plateau [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(5):241-249.
- [25] LOU Y L, WANG J K, LIANG W J. Impacts of 22-year organic and inorganic N managements on soil organic C fractions in a maize field, northeast China [J]. *Catena*, 2011, 87(3):386-390.
- [26] CHEN J G, XIAO W, ZHENG C Y, et al. Nitrogen addition has contrasting effects on particulate and mineral-associated soil organic carbon in a subtropical forest [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 142:e107708.
- [27] 曾维军, 刘燕, 秦维, 等. 喀斯特地区不同海拔对油茶根际土壤丛枝菌根真菌物种群落的影响[J]. *山东农业科学*, 2024, 56(1):105-112.
- ZENG W J, LIU Y, QIN W, et al. Effects of different altitudes on diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in rhizosphere soil of *Camellia oleifera* in karst region [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2024, 56(1):105-112.
- [28] 杨佳乐, 赵洋毅, 王克勤, 等. 坡耕地等高反坡阶地措施对滇中典型流域土壤酸碱性和酶活性的影响[J]. *四川农业大学学报*, 2024, 42(2):405-413.
- YANG J L, ZHAO Y Y, WANG K Q, et al. Effects of site preparation contour reverse-slope terrace on soil acidity-alkalinity and enzyme activities in typical watershed of central Yunnan [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2024, 42(2):405-413.
- [29] 唐利, 李梦霞, 黄慧欣, 等. 桂北喀斯特植被恢复对球囊霉素相关土壤蛋白的影响[J]. *广西师范大学学报(自然科学版)*, 2025, 43(1):9-19.
- TANG L, LI M X, HUANG H X, et al. Effects of karst vegetation restoration on GRSP in northern Guangxi [J]. *Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2025, 43(1):9-19.
- [30] 王帅兵, 肖文贤, 夏鸾金玥, 等. 等高反坡阶地对红壤坡耕地作物生长发育的影响[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2024, 22(6):106-115.
- WANG S B, XIAO W X, XIA L J Y, et al. Effects of contour reverse-slope terrace on crop growth and development in red soil sloping farmland [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2024, 22(6):106-115.