

DOI: 10.20103/j.stxb.202304280893

徐其静, 侯磊, 汪丽, 李奇奇, 王克勤. 等高反坡阶措施下坡耕地球囊霉素相关土壤蛋白对土壤碳氮储量的贡献. 生态学报, 2024, 44(7): 2919-2930.

Xu Q J, Hou L, Wang L, Li Q Q, Wang K Q. Contribution of glomalin-related soil protein to soil carbon and nitrogen storage in sloping farmland under contour reverse-slope terrace measures. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(7): 2919-2930.

## 等高反坡阶措施下坡耕地球囊霉素相关土壤蛋白对土壤碳氮储量的贡献

徐其静, 侯磊, 汪丽, 李奇奇, 王克勤\*

西南林业大学生态与环境学院, 昆明 650224

**摘要:** 为证实坡面微地形改造措施—等高反坡阶(CRT)对坡耕地的生态修复功能, 揭示 CRT 对球囊霉素相关土壤蛋白(GRSP)含量及土壤碳氮储量贡献的影响与机制至关重要。通过分析原状(CK)和 CRT 处理下旱季和雨季坡耕地 0—5、5—15、15—30 cm 土层中总 GRSP(T-GRSP)、易提取 GRSP(EE-GRSP)、土壤有机碳(SOC)与土壤全氮(TN)在 CRT 阶上和阶下及 CK 对应位置处的时空分布特征, 探讨 CRT 措施下 GRSP 对土壤碳氮储量的贡献, 揭示相关机制。结果表明: (1) CRT 坡耕地土壤 T-GRSP、EE-GRSP、SOC 和 TN 的含量较 CK 显著提高 ( $P < 0.05$ ), 增幅分别为 16.6%—189%、7.28%—102%、1%—68.3% 和 7.29%—79.7%。且 CRT 对坡耕地 GRSP 含量的提升效果总体表现为雨季强于旱季、表层(0—5 cm)土壤高于深层(15—30 cm)、阶下优于阶上。(2) 相比 CK, CRT 坡耕地旱季和雨季 SOC 储量分别提高 8.06% 和 13.5%, TN 储量提高 7.01% 和 12.1%。T-GRSP 对 SOC 和 TN 储量的贡献率较 CK 分别提高 8.5%—141% 和 2.58%—133%, EE-GRSP 对 SOC 和 TN 储量的贡献率较 CK 分别提高 1.38%—82% 和 5.25%—87.2%。且 CRT 对坡耕地 SOC 和 TN 储量提升效果雨季优于旱季, 对表层土壤 T-GRSP 对 SOC 和 TN 贡献率的提升效果表现为雨季强于旱季、阶下强于阶上。(3) CRT 极大提高了坡耕地 T-GRSP 与土壤孔隙度、SOC 和 TN 的正相关性。相比 CK, 相关系数( $R^2$ )分别由 0.17、0.26 和 0.29 增至 0.51、0.66 和 0.64。因此, CRT 措施不仅降低了坡耕地 SOC 和 TN 的流失, 还通过提高有机质含量改善土壤通气透水性, 进而提高坡耕地 GRSP 的分泌与累积, 同时提高 GRSP 对碳氮的贡献率, 促进了土壤碳氮的固持与封存。

**关键词:** 球囊霉素相关土壤蛋白(GRSP); 土壤有机碳; 土壤全氮; 等高反坡阶; 坡耕地

## Contribution of glomalin-related soil protein to soil carbon and nitrogen storage in sloping farmland under contour reverse-slope terrace measures

XU Qijing, HOU Lei, WANG Li, LI Qiqi, WANG Keqin\*

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

**Abstract:** In order to confirm the ecological restoration function of slope microtopographic modification measure—contour reverse-slope terrace (CRT) on sloping farmland, it is extremely critical to reveal the effects and mechanisms of CRT on the glomalin-related soil protein (GRSP) content and contribution to soil carbon and nitrogen storage. The total GRSP (T-GRSP), easily extractable GRSP (EE-GRSP), soil organic carbon (SOC), and total nitrogen (TN) contents were determined in the soil of two terrace positions (above and below the terrace) and three depths (0—10, 5—15 and 15—30 cm) of CRT and the corresponding positions of unmodified (CK) sloping farmland. The contribution of GRSP to soil carbon and nitrogen storage under CRT was explored, and the relevant mechanism was revealed. The results showed that:

**基金项目:** 云南省“十三五”重点研发专项课题(2018BB018); 云南省教育厅科学研究基金项目资助(2023Y0710, 2023Y0712); 云南省科技厅农业联合面上项目(202301BD070001-031)

**收稿日期:** 2023-04-28; **网络出版日期:** 2024-01-12

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangkeqin7389@sina.com

(1) comparing with CK, the contents of T-GRSP, EE-GRSP, SOC, and TN in CRT significantly increased by 16.6%—189%, 7.28%—102%, 1%—68.3%, and 7.29%—79.7%, respectively ( $P < 0.05$ ). In addition, the promotion of CRT on GRSP content in sloping farmland was generally better in the rainy season than that in the dry season, higher in the surface soil (0—5 cm) than that in the deep soil (5—15 cm), and better in the slope below the terrace than that above the terrace. (2) Comparing with CK, SOC and TN storage in CRT sloping farmland increased by 8.06% vs. 13.5% and 7.01% vs. 12.1% in the dry and rainy seasons, respectively. Comparing with CK, the contribution rate of T-GRSP to SOC and TN in CRT increased by 8.5%—141% and 2.58%—133%, meanwhile, the contribution rate of EE-GRSP to SOC and TN in CRT increased by 1.38%—82% and 5.25%—87.2%. Moreover, the enhancement of CRT on SOC and TN storage in the rainy season was better than that in the dry season, and the enhancement of CRT on the contribution rate of T-GRSP to SOC and TN in surface soil was stronger in the rainy season than that in the dry season, and stronger in the slope below the terrace than that above the terrace. (3) CRT measures greatly improved the positive correlations between T-GRSP and soil porosity, SOC, and TN comparing with CK, while the correlation coefficients ( $R^2$ ) increased from 0.17, 0.26, and 0.29 to 0.51, 0.66, and 0.64, respectively. The results indicated that CRT measures not only reduced the loss of SOC and TN in sloping farmland, but also improved the soil aeration and permeability by increasing the content of organic matter, thus increasing the secretion and accumulation of GRSP in sloping farmland. In addition, soil carbon and nitrogen retention and storage were promoted through increasing the contribution rate of GRSP to carbon and nitrogen by CRT measures.

**Key Words:** glomalin-related soil protein (GRSP); soil organic carbon; total nitrogen; contour reverse-slope terrace; sloping farmland

球囊霉素土壤相关蛋白 (Glomalin-related soil protein, GRSP) 由丛枝菌根真菌 (Arbuscular mycorrhizal fungi, AMF) 分泌<sup>[1]</sup>, 拥有 30%—40% 碳和 3%—5% 氮<sup>[2-3]</sup>, 通过粘结土壤矿物颗粒形成大团聚体 (粒径 > 0.25 mm) 从而提高土壤团粒结构的稳定性和抗侵蚀能力<sup>[4-5]</sup>。GRSP 还可稳定存在于环境中, 成为土壤有机碳 (Soil organic carbon, SOC) 和全氮 (Total nitrogen, TN) 库的重要组成部分<sup>[6-7]</sup>。在不同生态系统中 GRSP 对 SOC 的贡献率高达 5%—10%<sup>[8]</sup>, 对 TN 的贡献率高达 5%—13%<sup>[9-10]</sup>, 因而对碳氮在土壤中的固持作用突出。由此, 关注 GRSP 与 SOC 和 TN 三者土壤中的累积及其相互作用关系, 有助于深入了解土壤环境质量与抗蚀性能<sup>[11-12]</sup>。

GRSP 广泛存在于森林、草原、休耕地及撂荒地等土壤中<sup>[13-15]</sup>, 研究认为 GRSP 通过改善土壤物理性质、提高土壤微生物活性、增强土壤肥力、促进植物生长等, 可加速退化土壤的恢复过程<sup>[16]</sup>。研究土壤退化与恢复中主要胶结物质 GRSP 的含量, 可为土壤的恢复提供科学理论依据。土壤类型、土地利用方式、施肥、耕作等农田管理措施均会影响 GRSP 的含量及分布<sup>[7]</sup>, 前人对 GRSP 的研究大多集中于森林、草原和农田生态系统演替过程的变化, 对于农耕地土壤生态系统中 GRSP 的相关研究不足, 尤其对微地形改造措施下 GRSP 的变化及其与碳氮之间的关系研究鲜见报道。

坡耕地作为农耕地资源的重要组成部分, 可弥补基本农田不断减少带来的耕地不足。我国坡耕地面积占全国耕地总面积近 1/5<sup>[17]</sup>, 云南省地处我国西南山区, 坡耕地面积达 415.27 万  $\text{hm}^2$ , 占比达 76.96%<sup>[18]</sup>。然而, 坡耕地水土流失严重、土壤贫瘠、生产力低下等问题突出。据近 5 年报道, 云南省坡耕地水土流失面积占全省水土流失面积 43.29% 以上<sup>[19]</sup>, 土壤侵蚀总量 376.57 × 106 t/a, 占全省土壤侵蚀总量的 63.02%<sup>[20]</sup>。“坡改梯”是最有效的坡耕地治理措施, 但该措施费工耗时, 需较大财力支持。因此有针对性地开展云南省坡耕地简单易行且行之有效的水土保持措施研究, 以解燃眉之急很有必要性。省时省工、易实施、对生产影响低的人工干预微地形改造措施—等高反坡阶 (CRT), 可蓄水保墒<sup>[21]</sup>, 有效减少地表径流<sup>[22]</sup>及面源污染<sup>[23]</sup>, 尤其对土壤碳氮磷等养分的截留效果显著<sup>[24-26]</sup>。研究发现, 在云南昆明松花坝迤者小流域坡耕地布设 CRT 整地措施, 雨季前后小区土壤碳储量损失率 (4%) 低于原状坡面小区 (9.9%)<sup>[27]</sup>, 且随整地年限的增加, 土壤 TN 含

量提高 77.26%<sup>[28]</sup>。由此可见,CRT 能有效提高坡耕地土壤碳氮含量,但该措施能否影响坡耕地 GRSP 含量,进而改变 GRSP 对坡耕地土壤碳氮储量的贡献尚不明确。

为此,本研究以云南昆明松华坝迳者小流域内红壤坡耕地为对象,通过设置 CRT 生态干预措施和对照坡面,系统探究等高反坡阶措施下坡耕地 GRSP 的时空分布特征,并以 GRSP 为切入点分析 CRT 措施提升坡耕地土壤抗侵蚀性能,促进土壤碳氮固持的机制。研究结果可为坡耕地土壤生产力的恢复研究提供科学依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

本研究试验区位于云南省昆明市盘龙区松华坝水源区迳者小流域内。地理位置属北纬 25°12′48″—24°14′43″,东经 102°44′51″—102°48′37″。流域面积 13.26 km<sup>2</sup>,呈不规则纺锤形,南北长约 6.7 km,海拔高度为 2010—2590 m,平均海拔 2220 m。流域属低纬度高原山地季风气候,年均降雨量 979.2 mm,干湿季分明,3—5 月为旱季,7—9 月为雨季(降雨量占全年降雨量 85%以上),年蒸发量 1341 mm,年均气温 14.2℃。该流域地貌类型以高原低山为主,为松华坝水源区典型农业小流域。流域内土壤为地带性粘性红壤,偏酸性。流域内耕地面积约占 25%,以坡耕地为主,主要种植玉米(*Zea mays* L.)、大豆(*Glycine max* L.)、烤烟(*Nicotiana tabacum* L.)、马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)等。流域内水土流失严重,耕地土壤环境质量偏低、生产力长期较弱,造成区域性农业产值低、农民收入有限。

### 1.2 CRT 样地布设

于 2008 年选取 4 块立地条件一致、水平投影面积为 100 m<sup>2</sup>(20 m×5 m)的坡耕地为试验样地,坡度均为 15°,南北坡向。其中 2 块为无措施处理坡耕地,作为对照组(CK),其余 2 块分别布设 2 组 CRT 措施,作为实验组。CRT 样地内沿等高线自上而下、里切外垫修成一个反坡台面,反坡角 5°,阶长 5 m,阶宽 1.2 m,2 组反坡台阶之间距离 7.5 m。CRT 设计标准为 20 年一遇降雨,降雨后反坡阶内如有沉淀土壤影响蓄水及时清理至阶下坡面。实验样地布设平面图及 CRT 剖面示意图如图 1 所示。

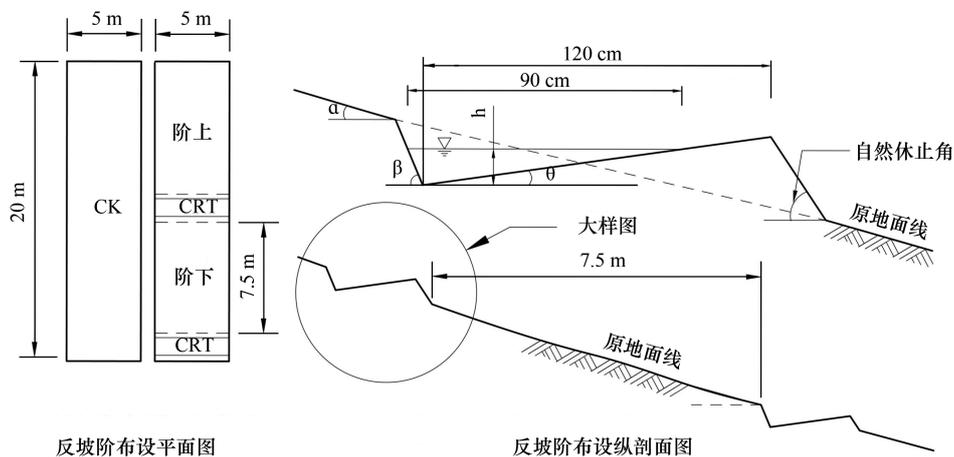


图 1 实验样地平面图及 CRT 剖面示意图

Fig.1 Plane graph of experimental plot and profile diagram of CRT

CK:原状/对照 Unmodified;CRT:等高反坡阶 Contour reverse-slope terrace

### 1.3 样品采集与前处理

在 CRT 上位反坡阶的阶上 1 m 以上和阶下 1 m 以下,以及 CK 相对应的位置,采用五点取样法于 2022 年 4 月中旬(旱季)和 8 月中旬(雨季),分 0—5、5—15 cm 及 15—30 cm 土层深度采集土壤样品。土样经去除石块、残根等杂质,自然风干后研磨过筛(0.25 mm 和 2 mm)至均匀粉体备用。每个样点现场采集 3 个环刀,测

定土壤容重和孔隙度,结果如表 1 所示。

表 1 土壤容重和孔隙度  
Table 1 Soil bulk density and porosity

指标 Index	阶位 Terrace position	季节 Season	0—5 cm		5—15 cm		15—30 cm	
			CK	CRT	CK	CRT	CK	CRT
土壤容重/(g/cm <sup>3</sup> )	阶上	旱季	1.27±0.01bc	1.25±0.07bc	1.3±0.04bc	1.29±0.08bc	1.37±0.07ab	1.27±0.09bc
Soil bulk density		雨季	1.44±0.05b	1.26±0.19b	1.44±0.02b	1.32±0.05b	1.38±0.14b	1.44±0.06b
	阶下	旱季	1.27±0.09bc	1.17±0.14c	1.33±0.04abc	1.2±0.04c	1.47±0.17a	1.33±0.07abc
		雨季	1.4±0.04b	1.39±0.13b	1.53±0.09b	1.33±0.15b	1.62±0.11a	1.32±0.05b
孔隙度/%	阶上	旱季	52.2±0.25ab	52.8±2.8ab	51.1±1.58ab	51.3±3.14ab	48.2±2.62bc	52±3.49ab
Porosity		雨季	45.7±0.9abc	52.3±7.19a	45.7±0.89abc	50.2±2.06a	48±5.18ab	45.7±2.25abc
	阶下	旱季	52±3.36ab	56±5.33a	49.6±1.45abc	54.8±1.36a	44.6±6.31c	49.9±2.61abc
		雨季	47±1.46ab	47.7±5ab	42.2±3.31bc	50±5.8a	38.8±4.32c	50.1±1.94a

表中数据为平均值±标准差(n=3),字母代表不同处理、不同土层及阶位下的土样分别在雨季或旱季的多重比较结果(P<0.05);CK:原状/对照 Unmodified; CRT:等高反坡阶 Contour reverse-slope terrace

#### 1.4 土壤碳氮及 GRSP 含量测定

过筛(0.25 mm)土样经 1 M HCl 去除无机碳,采用总有机碳分析仪(Elementar Vario TOC,德国)测定 SOC 含量,采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>—H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮法消解,凯氏定氮仪(Kjeltec 8400,中国)测定 TN 含量。总 GRSP(Total glomalin-related soil protein, T-GRSP)和易提取 GRSP(Easily extractable glomalin-related soil protein, EE-GRSP)的提取和定量分析参考文献方法<sup>[29-30]</sup>。具体为:土样经风干过筛(2 mm)后,分别采用 50 mmol/L 和 20 mmol/L 的柠檬酸钠溶液提取,考马斯亮蓝 G-250 染色后,于 595 nm 比色测定,以牛血清白蛋白 BSA 为标准物质,折算为每克干土含有的蛋白质毫克数(mg/g)。所有样品均设置 3 个重复,标准偏差<5%。

#### 1.5 土壤碳氮储量的计算

SOC 和 TN 储量的计算采用如下公式<sup>[31]</sup>:

$$S_{C/N} = \sum_{i=1}^n (X_i \times L_i \times BD_i \times 0.1)$$

式中, $S_{C/N}$ 为 0—30 cm 土层 SOC 或 TN 的储量(t/hm<sup>2</sup>), $X_i$ 为第  $i$  层土壤 SOC 或 TN 含量(g/kg), $L_i$ 为第  $i$  层土壤厚度(cm), $BD_i$ 为第  $i$  层土壤容重(g/cm<sup>3</sup>),0.1 为单位转换系数。

#### 1.6 数据分析

使用 SPSS 19.0 进行单因素方差分析(Duncan)、GraphPad Prism 9.5.1 软件制图,图表中不同字母表示数据间差异显著(P<0.05);采用 Origin 2021(Correlation Plot)进行相关性分析并制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 CRT 措施下坡耕地 GRSP 的含量及分布特征

坡耕地 T-GRSP 和 EE-GRSP 的季节、阶位和土层深度分布情况如图 2 所示。CK 和 CRT 坡耕地 T-GRSP 含量变化范围分别为 0.11—0.35 mg/g 和 0.23—0.47 mg/g,EE-GRSP 为 0.11—0.23 mg/g 和 0.21—0.31 mg/g。CRT 坡耕地 T-GRSP 含量显著高于 CK(P<0.05),旱季和雨季分别提高 16.6%—138%和 31.5%—189%。表层(0—5 cm)土壤,CRT 措施使坡耕地阶上和阶下 T-GRSP 含量在雨季分别提高 87.2%和 189%,为旱季的 1.92 倍和 1.37 倍;且对阶下 T-GRSP 含量的提升效果最佳,分别为阶上的 2.06(雨季)和 3.04(旱季)倍。5—15 cm 土层,CRT 措施对坡耕地阶上 T-GRSP 含量的提升效果雨季为旱季的 2.13 倍;且在旱季对阶下 T-GRSP 的提升效果最佳(79.1%),为阶上的 4.77 倍。15—30 cm 土层,CRT 在雨季对阶下 T-GRSP 的提升效果最佳(101%),为阶上的 2.11 倍。

两种措施下坡耕地 EE-GRSP 含量表现出与 T-GRSP 相似的时空分布特征(图 2),旱季和雨季均表现为

CRT>CK, 布设 CRT 措施使坡耕地旱季和雨季 EE-GRSP 含量分别提高 7.72%—93.8% 和 7.28%—102%。0—5 cm 和 5—15 cm 土层中, CRT 措施对 EE-GRSP 含量的影响表现为雨季大于旱季, 雨季提高率为旱季的 1.05—1.79 倍; 且对坡耕地 EE-GRSP 的提升效果阶下显著强于阶上, 为阶上 4.95—7.92 倍。15—30 cm 土层, CRT 措施在旱季对 EE-GRSP 含量的提升效果阶上为阶下的 3.16 倍, 但在雨季对阶下 EE-GRSP 含量的提升效果为阶上的 2.8 倍。

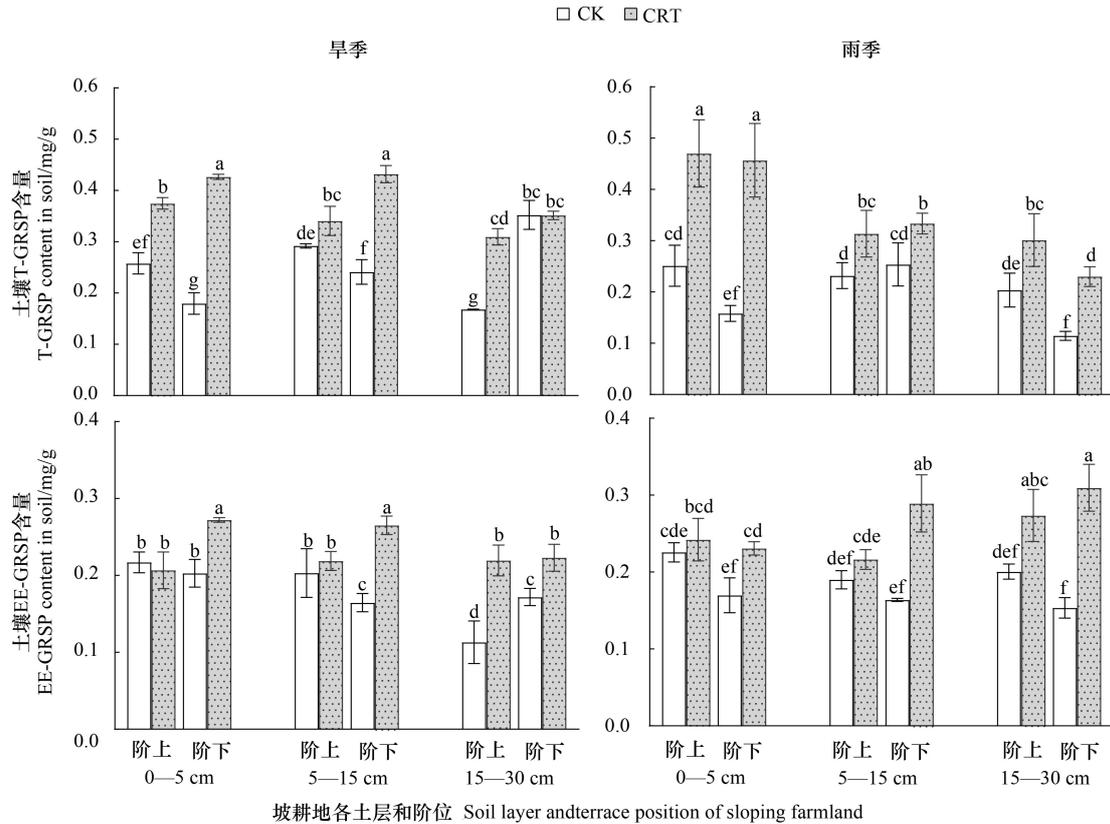


图2 两种处理下坡耕地旱季和雨季土壤 T-GRSP 和 EE-GRSP 含量

Fig.2 T-GRSP and EE-GRSP contents in dry season and rainy season of sloping farmland soil under two treatments

图中字母代表不同处理、不同土层及阶位下的土样分别在雨季或旱季的多重比较结果 ( $P < 0.05$ ); T-GRSP: 总球囊霉素土壤相关蛋白 Total glomalitin-related soil protein; EE-GRSP: 易提取球囊霉素土壤相关蛋白 Easily extractable glomalitin-related soil protein

通常以 EE-GRSP 与 T-GRSP 的比值衡量 AMF 的活跃程度, 占比越高, AMF 越活跃<sup>[15]</sup>。本研究中坡耕地 EE-GRSP 与 T-GRSP 的百分比见表 2, CK 和 CRT 坡耕地 EE-GRSP/T-GRSP 的比值范围分别为 48.2%—93.3% 和 50.5%—86.7%。0—5、5—15 cm 土层, CK 坡耕地 EE-GRSP/T-GRSP 比值整体高于 CRT, 但 15—30 cm 土层则表现为 CK<CRT。CK 坡耕地 EE-GRSP/T-GRSP 比值雨季高于旱季; CRT 坡耕地 5—15、15—30 cm 土层 EE-GRSP/T-GRSP 比值雨季高于旱季, 但 0—5 cm 土层旱季略高于雨季。此外, 0—5 cm 土层 CK 和 CRT 坡耕地 EE-GRSP 与 T-GRSP 的比值阶下整体高于阶上。5—15 cm 土层 EE-GRSP 与 T-GRSP 的比值各阶位无明显规律。而 15—30 cm 土层, CRT 措施使旱季坡耕地阶上和阶下 EE-GRSP 与 T-GRSP 比值提高 5.25% 和 29.9%, 阶下为阶上的 5.79 倍。

## 2.2 CRT 措施下坡耕地 SOC 和 TN 的含量及分布特征

坡耕地 SOC 和 TN 含量在不同季节、阶位及土层深度下的含量见图 3。CK 和 CRT 两种措施下, 坡耕地 SOC 含量变化范围分别为 9.74—16.6 g/kg 和 13.6—19.2 g/kg; TN 含量变化范围为 0.37—0.9 g/kg 和 0.6—0.96 g/kg。CRT 提高了坡耕地 SOC 和 TN 含量, 相比 CK, 旱季和雨季 SOC 含量分别提高 1%—68.3% 和

5.65%—23.8%, TN 含量提高 7.29%—79.7% 和 7.4%—37.9%。

表 2 两种措施下坡耕地土壤 EE-GRSP 占 T-GRSP 的百分含量/%

Table 2 Percentage content of EE-GRSP in T-GRSP in sloping farmland soil under two measures

阶位 Terrace position	0—5 cm				5—15 cm				15—30 cm			
	旱季		雨季		旱季		雨季		旱季		雨季	
	CK	CRT	CK	CRT	CK	CRT	CK	CRT	CK	CRT	CK	CRT
阶上 Above the terrace	84.2	55.2	89.8	51.5	69.6	64.2	82	68.9	67.4	70.9	64.6	86.7
阶下 Below the terrace	88.5	63.89	93.3	50.5	68.2	61.4	64.6	86.7	48.8	63.4	66.7	56.7

T-GRSP: 总球囊霉素土壤相关蛋白 Total glomalin-related soil protein; EE-GRSP: 易提取球囊霉素土壤相关蛋白 Easily extractable glomalin-related soil protein

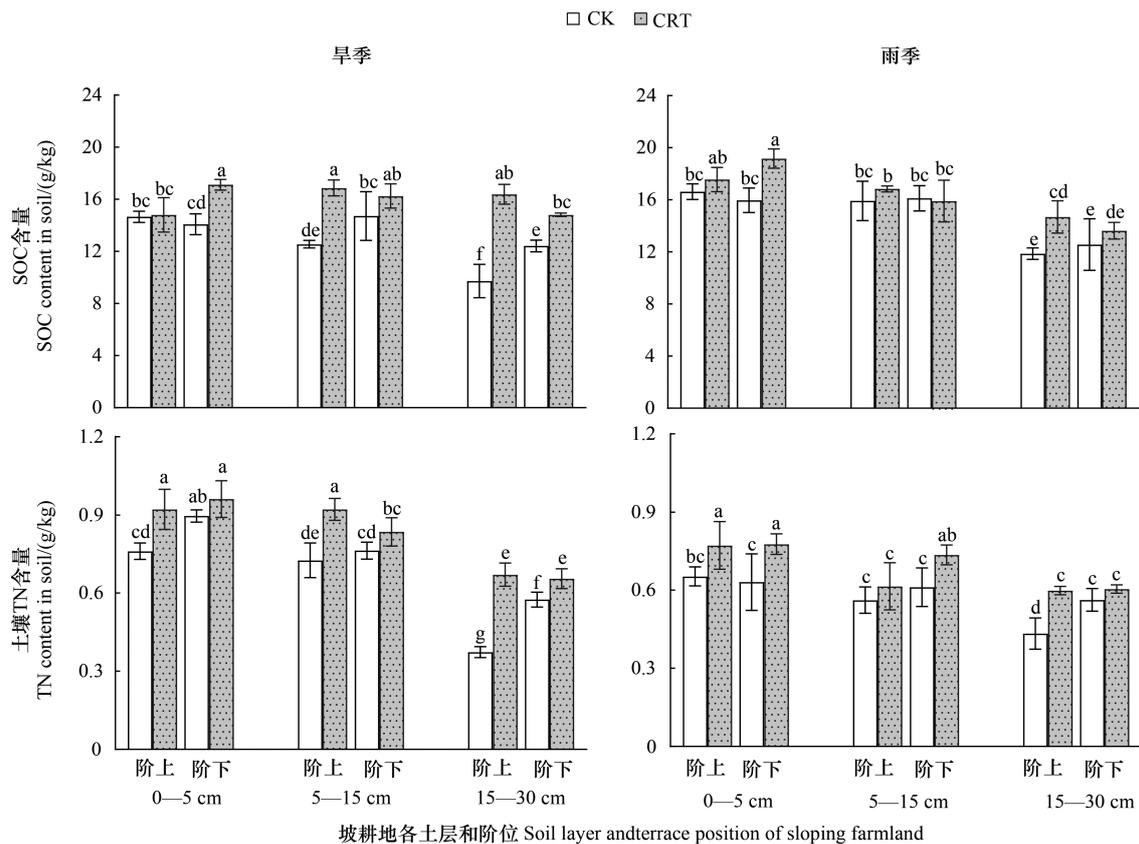


图 3 两种处理下坡耕地旱季和雨季土壤 SOC 和 TN 的含量

Fig. 3 SOC and TN contents of soil samples in dry season and rainy season of sloping farmland under two treatments

图中字母代表不同处理、不同土层及阶位下的土壤分别在雨季或旱季的多重比较结果 ( $P < 0.05$ )。SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon; TN: 全氮 Total nitrogen

0—5 cm 土层, CRT 措施使坡耕地阶下 SOC 含量较 CK 提高 21.5% (旱季) 和 20% (雨季), 且对阶下 SOC 含量的提升效果为阶上的 21.5 倍 (旱季) 和 3.54 倍 (雨季)。5—15 cm 土层, CRT 措施使坡耕地旱季 SOC 含量阶上和阶下分别提高 34.4% 和 10.4%, 雨季 SOC 含量阶上提高 5.73%。15—30 cm 土层, 旱季和雨季 SOC 含量表现为 CRT 显著高于 CK ( $P < 0.05$ ), CRT 对坡耕地阶上和阶下 SOC 的截留效果旱季高于雨季, 为雨季的 2.87 倍和 2.28 倍, 且对阶上 SOC 的提升效果为阶下的 3.55 倍 (旱季) 和 1.76 倍 (雨季)。

CRT 措施显著提高了坡耕地土壤 TN 含量 ( $P < 0.05$ )。0—5 cm 土层, CRT 对 TN 的截留效果整体表现为雨季优于旱季, 且在雨季对阶下土壤 TN 的截留效果为阶上的 1.26 倍, 但在旱季对土壤 TN 的截留效果则表现为阶上强于阶下, 为阶下的 2.9 倍。5—15 cm 土层, CRT 措施在旱季对土壤 TN 的截留效果阶上为阶下的

2.85 倍,在雨季对阶下土壤 TN 的截留效果为阶上的 2.15 倍。15—30 cm 土层,CRT 措施对土壤 TN 的截留效果旱季强于雨季,为雨季的 2.1 倍(阶上)和 1.89 倍(阶下),且对阶上的截留效果显著高于阶下,为阶下的 5.69 倍(旱季)和 5.13 倍(雨季)。

### 2.3 CRT 措施下坡耕地 GRSP 对 SOC 和 TN 的贡献率

通常以 GRSP 中的碳、氮含量(即 GRSP-C、GRSP-N)与 SOC 和 TN 的比值分别表征 GRSP 对 SOC 和 TN 的贡献率。本研究坡耕地 T-GRSP 对 SOC 和 TN 的贡献率变化范围分别为 0.32%—0.99%、0.8%—2.46%(表 3),其中,GRSP 中的碳和氮分别取其均值 35%(30%—40%)和 4%(3%—5%)。CK 和 CRT 坡耕地 T-GRSP 对 SOC 和 TN 的贡献率总体差异显著( $P < 0.05$ ),83%以上的样品 T-GRSP 对 SOC 和 TN 的贡献率呈现 CRT 高于 CK 的规律。相较于 CK,CRT 措施使坡耕地 T-GRSP 对 SOC 的贡献率提高 8.5%—141%,对 TN 的贡献率提高 2.58%—133%。

CRT 措施对表层(0—5 cm)土壤 T-GRSP 对 SOC 和 TN 的贡献率影响显著高于深层(15—30 cm)土壤。与 CK 相比,CRT 坡耕地 0—5、5—15 及 15—30 cm 土层 T-GRSP 对 SOC 的贡献率分别提高 43.9%—141%、27.7%—62.3%和 8.5%—83.4%,对 TN 的贡献率分别提高 19.7%—133%、6.38%—64.1%和 2.58%—87.1%。0—5 cm 土层,CRT 措施下坡耕地 T-GRSP 对 SOC 和 TN 贡献率在阶上和阶下的提升效果均表现为雨季高于旱季,分别为旱季的 1.77 倍和 1.45 倍(SOC)、2.96 倍和 1.09 倍(TN)。此外,与 CK 相比,CRT 使坡耕地表层土壤 T-GRSP 对 SOC 的贡献率提升效果阶下优于阶上,为阶上的 2.16 倍(旱季)和 1.81 倍(雨季)。

表 3 两种措施下坡耕地 T-GRSP 和 EE-GRSP 对 SOC、TN 的贡献率/%

Table 3 Contribution rate of T-GRSP and EE-GRSP to SOC and TN in sloping farmland under two measures

指标 Index	阶位 Terrace position	0—5 cm				5—15 cm				15—30 cm			
		旱季		雨季		旱季		雨季		旱季		雨季	
		CK	CRT	CK	CRT	CK	CRT	CK	CRT	CK	CRT	CK	CRT
T-GRSP-C/SOC	阶上	0.62	0.89*	0.53	0.94*	0.81	0.71	0.51	0.65	0.61	0.66	0.6	0.72
	阶下	0.45	0.87*	0.35	0.84*	0.57	0.93*	0.56	0.74*	0.99	0.83	0.32	0.59*
T-GRSP-N/TN	阶上	1.36	1.62*	1.54	2.45*	1.62	1.48	1.65	1.76	1.8	1.85	1.88	2.01
	阶下	0.8	1.78*	1.01	2.35*	1.26	2.07*	1.4	1.81*	2.45	2.15	0.81	1.52*
EE-GRSP-C/SOC	阶上	0.52	0.49	0.48	0.48	0.57*	0.45	0.42	0.45	0.41	0.47	0.59	0.65
	阶下	0.5	0.56	0.37	0.42	0.4	0.57*	0.53	0.64	0.49	0.53	0.44	0.8*
EE-GRSP-N/TN	阶上	1.14*	0.91	1.39	1.26	1.13*	0.95	1.35	1.42	1.22	1.32	1.87	1.83
	阶下	0.91	1.14*	1.07	1.19	0.86	1.27*	1.38	1.57	1.2	1.36	1.1	2.05*

表中\*代表 CK 和 CRT 在 0.05 水平上差异显著;T-GRSP-C/SOC:总球囊霉素土壤相关蛋白中的碳在土壤有机碳中的占比 Proportion of carbon in total glomalin-related soil protein in soil organic carbon;总球囊霉素土壤相关蛋白中的氮在土壤全氮中的占比 Proportion of nitrogen in total glomalin-related soil protein in soil total nitrogen;EE-GRSP-C/SOC:易提取球囊霉素土壤相关蛋白中的碳在土壤有机碳中的占比 Proportion of carbon in easily extractable glomalin-related soil protein in soil organic carbon;EE-GRSP-N/TN:易提取球囊霉素土壤相关蛋白中的氮在土壤全氮中的占比 Proportion of nitrogen in easily extractable glomalin-related soil protein in soil total nitrogen

CK 和 CRT 坡耕地 EE-GRSP 对 SOC 的贡献率分别为 0.95%—1.68%和 1.21%—2.27%,对 TN 的贡献率为 0.92%—1.85%和 1.07%—2.05%。约 82%的样品 EE-GRSP 对 SOC 的贡献率呈现 CRT 高于 CK 的规律,约 67%样品的 EE-GRSP 对 TN 的贡献率也表现为 CRT 高于 CK。CRT 坡耕地 EE-GRSP 对 SOC 和 TN 的贡献率较 CK 分别提高 1.38%—82%和 5.25%—87.2%。然而,与 T-GRSP 对 SOC 和 TN 的贡献率不同的是,CRT 措施对深层(15—30 cm)土壤 EE-GRSP 对 SOC 和 TN 的贡献率影响高于表层。相较于 CK,CRT 使坡耕地 0—5、5—15 和 15—30 cm 土层 EE-GRSP 对 SOC 的贡献率分别提高 1.38%—12.9%、7.27%—44.1%、8.70%—82.0%,使 EE-GRSP 对 TN 的贡献率提高 10.7%—25.6%、5.25%—47.4%和 7.85%—87.2%。此外,在深层土壤中,CRT 措施对坡耕地 EE-GRSP 对 SOC 和 TN 贡献率的影响阶下高于阶上。

### 3 讨论

#### 3.1 CRT 措施对坡耕地 GRSP 含量及分布特征的影响

不同生态系统中 GRSP 含量通常为 2—14.8 mg/g<sup>[5, 29, 32]</sup>。本研究坡耕地 T-GRSP 含量范围为 0.11—0.47 mg/g, 低于森林 (3.26 mg/g) 和草原 (0.79—2.13 mg/g) 土壤<sup>[12, 33]</sup>。可能由于森林和草原土壤中大量枯落物、根系分泌物和微生物等聚集于表层<sup>[34]</sup>, 导致表层土壤养分较高, AMF 活性强、侵染率高, 从而释放更多的球囊霉素<sup>[15]</sup>。其次, 耕地土壤长期的人为干扰会降低 AMF 丰度和活性, 减少球囊霉素分泌, 同时加速其分解<sup>[35]</sup>。此外, 由于坡耕地土壤侵蚀严重, 其土壤养分、微生物水平均较低, 导致坡耕地 GRSP 含量普遍低于农耕地 (1.4—2.41 mg/g)<sup>[36]</sup> 和弃耕地 (1.08—1.76 mg/g)<sup>[37]</sup>。

坡耕地布设 CRT 措施后, 旱季和雨季 T-GRSP 和 EE-GRSP 含量较 CK 均显著提高 ( $P < 0.05$ )。从季节看, CRT 措施对表层和中层土壤 T-GRSP 和 EE-TGRSP 的提升效果雨季高于旱季, 而深层土壤则为旱季高于雨季。一方面, 由于旱季表层和中层土壤水肥条件较差<sup>[38]</sup>, AMF 丰度和活性均较低<sup>[35, 39]</sup>, 而深层土壤旱季水分相对适宜, 且连日降雨易造成雨季深层土壤水分过剩、通气状况较差, 导致 AFM 侵染率和活性降低, 因而旱季表层和中层及雨季深层土壤 GRSP 本身含量较低。另一方面, 雨季水蚀作用明显强于旱季, 使得 CRT 措施在雨季的截留效果较早季可能更显著。因此造成了 CRT 对坡耕地 GRSP 的提升效果在季节和土层上的差异。从阶位看, 由于长期的“水蚀+耕作侵蚀”, 使 CK 坡耕地浅层土壤在中下部冲刷加剧<sup>[40]</sup>, 然而, 对于 CRT 坡耕地, 其阶下土壤在上部 CRT 的保护下径流冲刷效应减弱, 加之受到下部 CRT 对养分的截留富集效应, 导致 CRT 措施对坡耕地浅层土壤阶下 GRSP 的提高效果整体优于阶上。

#### 3.2 CRT 措施下坡耕地 GRSP 对土壤碳氮储量的贡献

CRT 措施不仅提高了坡耕地 SOC 和 TN 含量, 且显著提高了两者的储量 ( $P < 0.05$ )。如表 4 所示, 0—30 cm 土层中 CK 和 CRT 坡耕地 SOC 和 TN 储量范围分别为 54.1—67.8 t/hm<sup>2</sup> 和 2.48—2.88 t/hm<sup>2</sup>, 与已报道的云南滇中地区碳、氮储量相近<sup>[32, 41]</sup>。此外, 两种处理下坡耕地土壤碳、氮储量均呈现出 CRT > CK 的规律。相比 CK, CRT 措施使坡耕地 SOC 储量在旱季和雨季分别提高 8.06% 和 13.5%, TN 储量提高 7.01% 和 12.1%。且 CRT 对 SOC 和 TN 储量的提升效果雨季均高于旱季。该结果与前人研究相近, 认为 CRT 使云南松林生态系统碳储量提高 27.1%<sup>[42]</sup>, 且对雨季坡耕地碳储量提升作用显著<sup>[27]</sup>。

表 4 两种措施下坡耕地土壤 SOC 和 TN 储量 (均值±标准差,  $n=3$ )

Table 4 The storage of SOC and TN in sloping farmland soil under two measures (mean±standard deviation,  $n=3$ )

处理 Treatments	SOC 储量 SOC storage/(t/hm <sup>2</sup> )		TN 储量 TN storage/(t/hm <sup>2</sup> )	
	旱季	雨季	旱季	雨季
CK	54.1±2.88a	61±1.73b	2.69±0.11b	2.48±0.08a
CRT	58.5±2.66ab	67.8±2.6c	2.88±0.07c	2.76±0.08bc

SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon; TN: 全氮 Total nitrogen

已有大量研究关注各类型土壤中 GRSP 对 SOC 和 TN 库的贡献率。广东省森林土壤和北方针叶林土壤 GRSP 对 SOC 的贡献率分别为 2.32% 和 1%—2%<sup>[15, 43]</sup>, 人工林、次生林、原生林 0—10 cm 和 10—20 cm 土壤中 GRSP 对 SOC 的贡献率分别为 2.2%—4.8% 和 2.25%—3.25%<sup>[44]</sup>。哥斯达黎加热带雨林土壤 GRSP 对 SOC 和 TN 贡献率范围为 3%—5%<sup>[5, 45]</sup>, 中药材黄芩种植地 GRSP 对 SOC 和 TN 的贡献率分别为 4.6%—5% 和 15.5%—17.4%<sup>[46]</sup>。本研究坡耕地 T-GRSP 对 SOC 和 TN 的贡献率低于已有研究报道, 主要由于坡耕地本身 CRSP 含量低于其他地类。

现有研究较少关注坡耕地微地形改造措施对 GRSP 含量的影响, 及其与土壤碳、氮储量的关系, 导致 GRSP 在耕地尤其是坡耕地中的作用长期被忽视。本研究中 CRT 微地形改造措施显著提高了坡耕地 T-GRSP 和 EE-GRSP 对 SOC 和 TN 的贡献率。该措施对表层 (0—5 cm) 土壤中 T-GRSP 对 SOC 和 TN 的贡献率影响显

著高于深层土壤,且对雨季的影响高于旱季,对阶下 SOC 贡献率的提升效果优于阶上。这符合坡耕地耕作层(0—20 cm)SOC 损失最大<sup>[27]</sup>、中下坡冲刷严重<sup>[40]</sup>、雨季水蚀加剧等特点。因此,CRT 对坡耕地碳、氮库的固持规律可能与土壤侵蚀发生的土层、坡位及季节性等特征相关。

### 3.3 CRT 措施提高土壤碳氮储量的机制

GRSP 作为一种真菌代谢产物,与土壤理化性质及土壤碳、氮循环等密切相关<sup>[47]</sup>。研究表明 GRSP 与土壤孔隙度、SOC、TN 显著正相关,与土壤容重负相关<sup>[37, 48]</sup>。与前人研究结果一致,本研究中 T-GRSP 和 EE-GRSP 与土壤容重负相关,与土壤孔隙度正相关,与 SOC 和 TN 均显著正相关( $P \leq 0.01$ ) (图 4)。其次,坡耕地布设 CRT 后极大提高了 T-GRSP 与 SOC 和 TN 的相关性(由弱相关变为显著/极显著相关),且相关系数( $R^2$ )分别由 0.26 和 0.29 增至 0.66 和 0.64;同时提高了 T-GRSP 与土壤孔隙度的正相关性, $R^2$ 由 0.17 增至 0.51;容重的负相关性也极大增强。此外,旱季坡耕地 T-GRSP 与 SOC 显著正相关( $P \leq 0.01, R^2 = 0.69$ ),与 TN 呈正相关( $R^2 = 0.44$ ),而雨季坡耕地 T-GRSP 与 SOC 和 TN 均呈极显著正相关( $P \leq 0.001, R^2 = 0.78, R^2 = 0.82$ ),表明 T-GRSP 与 SOC 和 TN 的正相关性雨季强于旱季。

坡耕地表层土壤通常携带丰富的碳氮、微生物等。CRT 措施通过在研究区坡耕地每隔 7—8 m 修筑一道等高反坡台阶,有效截留了上坡淋流的表土及其所携带养分和微生物等,维持了土壤原有组分和理化状态。土壤容重和孔隙度是衡量土壤结构的重要参数<sup>[49]</sup>。容重反映了土壤的紧实度,容重大的土壤一定程度上会抑制植物根部的呼吸和生长,降低真菌对植物根系的侵染率<sup>[50]</sup>,从而影响 GRSP 的含量。此外,有机质可促进 GRSP 分泌<sup>[51]</sup>,而有机质含量越丰富的土壤容重越小。因此,容重与 GRSP 呈显著负相关,在众多土壤因子中,容重也被认为是影响 GRSP 含量的最大拮抗因子<sup>[48]</sup>。本研究坡耕地通过布设 CRT 措施显著提高了土壤有机质含量( $P < 0.05$ ),有效降低了土壤容重,提高了土壤孔隙度(表 1),并显著增强了 T-GRSP 与土壤容重的负相关性,及其与孔隙度的正相关性,表明该措施可通过提高有机质含量改善坡耕地土壤通气透水性,加强 GRSP 的分泌与积累。

CRT 措施显著提高了坡耕地 GRSP 对 SOC 的贡献率( $P < 0.05$ ),且显著加强了 T-GRSP 与 SOC 的正相关性,表明该措施下 GRSP 水平更高,SOC 含量也更高。而 GRSP 对 SOC 的贡献机制主要归功于 GRSP 较高的碳含量及其稳定性(顽固结构)。GRSP 分子量约为 355,碳含量超过 1/3,作为微生物来源的碳库,GRSP 对 SOC 的贡献是微生物生物量碳的 1.6—6.7 倍<sup>[44]</sup>,表明 GRSP 对 SOC 的贡献超过 AMF 菌丝生物量碳的贡献。其次,GRSP 结构稳定、不易降解。GRSP 具有显著的顽固结构,研究表明 GRSP 在人工林、次生林和原生林 3 种林分中的顽固性指数(即“烷基碳+芳香族碳”与“含氧烷基碳+羧基碳”的比值)分别为(98.6±18.9)%、(145.5±10.9)%和(20.7±0.3)%,均显著高于 SOC ( $P < 0.05$ ),且 GRSP 中的顽固性碳(即“烷基碳+芳香族碳”)与 SOC 中的顽固性碳显著正相关<sup>[44]</sup>。此外,GRSP 随菌根真菌衰亡和降解后释放到土壤中可维持 6—42 年<sup>[5]</sup>,明显长于菌丝的平均停留时间(5—6d)<sup>[52]</sup>。因此,较高的碳含量、顽固性碳结构、长期稳定存在于土壤环境,使 GRSP 对 SOC 具有突出贡献。

CRT 措施显著提高了坡耕地 GRSP 对 TN 的贡献率,且加强了 T-GRSP 与 TN 的正相关性,表明该措施下 GRSP 水平更高,土壤 TN 含量也更高。但 GRSP 对土壤 TN 的贡献机制是否也与 GRSP 中的氮含量及其顽固结构和稳定性等有关需进一步研究证实。此外,SOC 和 TN 在坡耕地土壤中的累积,可能反作用于土壤 AMF 真菌,提高其侵染率与孢子活性,促进 GRSP 分泌。

## 4 结论

(1) CRT 措施显著提高了坡耕地 T-GRSP、EE-GRSP 及 SOC 和 TN 的含量与储量,且对 GRSP 含量的提升效果总体表现为雨季强于旱季、表层土壤高于深层、阶下优于阶上;对 SOC 和 TN 储量的提升效果雨季优于旱季。

(2) CRT 措施还显著提高了坡耕地 GRSP 对 SOC 和 TN 储量的贡献率。该措施下 T-GRSP 对坡耕地 SOC

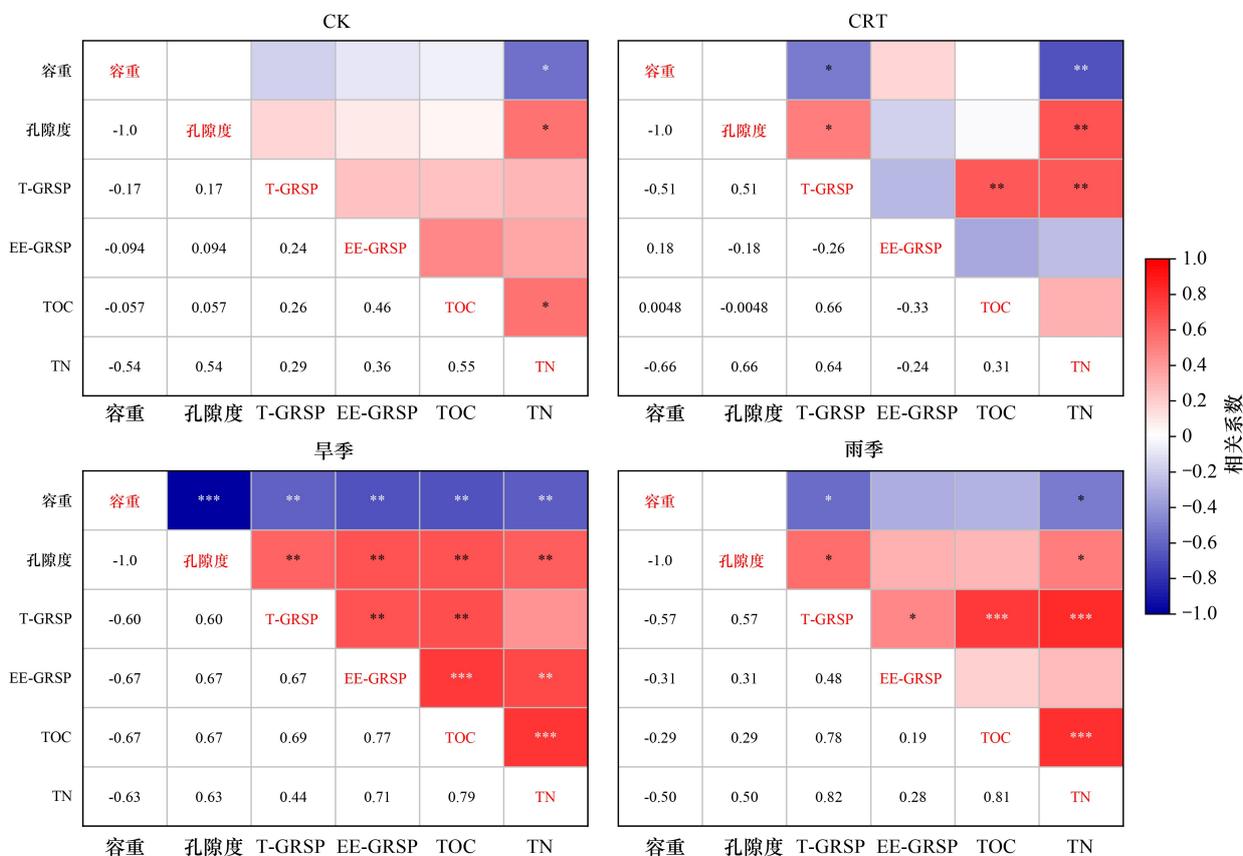


图4 土壤理化性质和 GRSP 的相关性分析

Fig.4 Correlation of soil physical and chemical properties and GRSP

图中\*代表 $P<0.05$ ; \*\*代表 $P<0.01$ ; \*\*\*代表 $P<0.001$ 

和 TN 贡献率的影响整体表现为表层土壤强于深层,且提升效果表现为雨季高于旱季、阶下优于阶上。

(3) CRT 措施提高坡耕地土壤碳氮储量的主要机制包括:a)降低 SOC 和 TN 的流失;b)通过提高有机质含量改善土壤通气透水性,进而提高 GRSP 的分泌与积累;c)通过提高 GRSP 对 SOC 和 TN 的贡献率,促进土壤碳氮的固持与封存。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 夏梓泰, 赵吉霞, 李永梅, 王自林, 范茂攀. 周年轮作休耕模式对土壤球囊霉素和团聚体稳定性的影响. 农业环境科学学报, 2022, 41 (1): 99-106.
- [ 2 ] 黄艺, 王东伟, 蔡佳亮, 郑维爽. 球囊霉素相关土壤蛋白根际环境功能研究进展. 植物生态学报, 2011, 35(2): 232-236.
- [ 3 ] Nichols K A, Wright S F. Carbon and nitrogen in operationally defined soil organic matter pools. Biology and Fertility of Soils, 2006, 43(2): 215-220.
- [ 4 ] 吴强盛, 袁芳英, 费永俊, 李莉, 黄咏明. 菌根真菌对白三叶根际团聚体稳定性、球囊霉素相关土壤蛋白和糖类物质的影响. 草业学报, 2014, 23(4): 269-275.
- [ 5 ] Rillig M C, Wright S F, Nichols K A, Schmidt W F, Torn M S. Large contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to soil carbon pools in tropical forest soils. Plant and Soil, 2001, 233(2): 167-177.
- [ 6 ] 柴立伟, 刘梦娇, 蒋大林, 樊灏, 曹晓峰, 黄艺. 北京市不同地区土壤中的球囊霉素荧光特征及其与土壤理化性质的关系. 环境科学, 2016, 37(12): 4806-4814.
- [ 7 ] 王建, 周紫燕, 凌婉婷. 球囊霉素相关土壤蛋白的分布及环境功能研究进展. 应用生态学报, 2016, 27(2): 634-642.
- [ 8 ] Singh A K, Rai A, Singh N. Effect of long term land use systems on fractions of glomalin and soil organic carbon in the Indo-Gangetic plain.

- Geoderma, 2016, 277: 41-50.
- [ 9 ] Rillig M C, Ramsey P W, Morris S, Paul E A. Glomalin, an arbuscular-mycorrhizal fungal soil protein, responds to land-use change. *Plant and Soil*, 2003, 253(2): 293-299.
- [ 10 ] Fokom R, Adamou S, Teugwa M C, Begoude Boyogueno A D, Nana W L, Ngonkeu M E L, Tchameni N S, Nwaga D, Tsala Ndzomo G, Amvam Zollo P H. Glomalin related soil protein, carbon, nitrogen and soil aggregate stability as affected by land use variation in the humid forest zone of south Cameroon. *Soil and Tillage Research*, 2012, 120: 69-75.
- [ 11 ] Zhao J S, Chen S, Hu R G, Li Y Y. Aggregate stability and size distribution of red soils under different land uses integrally regulated by soil organic matter, and iron and aluminum oxides. *Soil and Tillage Research*, 2017, 167: 73-79.
- [ 12 ] 邸涵悦, 郝好鑫, 孙兆祥, 姜海, 程凉, 郭忠录. 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. *生态环境学报*, 2021, 30(4): 718-725.
- [ 13 ] Singh G, Bhattacharyya R, Das T K, Sharma A R, Ghosh A, Das S, Jha P. Crop rotation and residue management effects on soil enzyme activities, glomalin and aggregate stability under zero tillage in the Indo-Gangetic Plains. *Soil and Tillage Research*, 2018, 184: 291-300.
- [ 14 ] Schindler F V, Mercer E J, Rice J A. Chemical characteristics of glomalin-related soil protein (GRSP) extracted from soils of varying organic matter content. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(1): 320-329.
- [ 15 ] 权常欣, 马玲玲, 林钊凯, 唐旭利. 广东省森林球囊霉素相关土壤蛋白含量及影响因素. *生态环境学报*, 2020, 29(2): 240-249.
- [ 16 ] 仲召亮, 王文杰, 张文天, 王琼. 不同林分及农田土壤中球囊霉素蛋白组成特征差异研究. *北京林业大学学报*, 2016, 38(4): 107-115.
- [ 17 ] 谢素芳. 坡耕地梯田化: 远离水土流失. *中国人大*, 2010(15): 32-34.
- [ 18 ] 云南省自然资源厅. 《云南省第三次全国国土调查主要数据公报》. 云南省人民政府, 2021.
- [ 19 ] 王伟, 贺莉莎. 云南省坡耕地现状调查及分析. *中国水土保持*, 2019(4): 20-23.
- [ 20 ] 陈正发, 李靖, 段青松, 王莹, 相彪, 宁东卫. 基于 USLE 模型的云南省坡耕地土壤侵蚀和养分流失评价. *农业工程学报*, 2022, 38(16): 124-134.
- [ 21 ] 陈雪, 宋娅丽, 王克勤, 王帅兵. 基于 Van Genuchten 模型的等高反坡阶下土壤水分特征. *水土保持研究*, 2019, 26(5): 45-52.
- [ 22 ] 唐佐芯, 王克勤, 李秋芳, 杨寿荣, 李太兴, 李宝荣. 等高反坡阶对坡耕地产流产沙和氮磷迁移的作用研究. *水土保持研究*, 2013, 20(1): 1-8.
- [ 23 ] 王震, 王克勤, 赵洋毅, 彭淑娴, 王帅兵, 李凯. 山坡退化林地林木生长对微地形人工干预的响应. *应用生态学报*, 2019, 30(8): 2583-2590.
- [ 24 ] 张洋, 王克勤, 段旭, 刘晓微, 赵露杨, 赵洋毅. 等高反坡阶措施下玉米水分利用效率对坡耕地土壤水分变化的响应. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2022, 50(1): 112-125.
- [ 25 ] 王帅兵, 宋娅丽, 王克勤, 赵洋毅, 张继辉, 闫腾云, 陈宇. 不同雨型下等高反坡阶对红壤坡耕地氮、磷流失的影响. *农业工程学报*, 2018, 34(13): 160-169.
- [ 26 ] 王帅兵, 王克勤, 宋娅丽, 陈雪, 王震. 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. *水土保持学报*, 2017, 31(6): 39-45.
- [ 27 ] 陈敏全, 王克勤. 等高反坡阶对坡耕地土壤碳库的影响. *水土保持通报*, 2015, 35(6): 41-46, 52.
- [ 28 ] 刘晓微, 赵洋毅, 王克勤, 马彩霞, 段旭, 张洋. 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. *水土保持学报*, 2022, 36(1): 307-315.
- [ 29 ] Wright S F, Upadhyaya A. Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Science*, 1996, 161(9): 575-586.
- [ 30 ] Janos D P, Garamszegi S, Beltran B. Glomalin extraction and measurement. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(3): 728-739.
- [ 31 ] 王薇菡, 虞依娜, 谢嘉淇, 林泽生, 李乔妹, 叶有华. 中国南亚热带不同造林模式碳汇林土壤碳、氮、磷的积累及化学计量特征. *生态学报*, 2023, 43(5): 1793-1803.
- [ 32 ] Nie J, Zhou J M, Wang H Y, Chen X Q, Du C W. Effect of long-term rice straw return on soil glomalin, carbon and nitrogen. *Pedosphere*, 2007, 17(3): 295-302.
- [ 33 ] 王启, 包玉英. 草原植物群落退化与恢复过程中球囊霉素的动态变化. *中国菌物学会第五届会员代表大会暨 2011 年学术年会论文摘要集*. 2011, 158-159.
- [ 34 ] 王振, 王子煜, 韩清芳, 李文静, 韩丽娜, 丁瑞霞, 贾志宽, 杨宝平. 黄土高原苜蓿草地土壤碳、氮变化特征研究. *草地学报*, 2013, 21(6): 1073-1079.
- [ 35 ] 阙弘, 葛阳洋, 康福星, 凌婉婷. 南京典型利用方式土壤中球囊霉素含量及剖面分布特征. *土壤*, 2015, 47(4): 719-724.
- [ 36 ] 杜介方, 张彬, 解宏图, 王连峰, 何红波, 张旭东. 不同施肥处理对球囊霉素土壤蛋白含量的影响. *土壤通报*, 2011, 42(3): 573-577.
- [ 37 ] 沈育伊, 滕秋梅, 徐广平, 孙英杰, 张德楠, 牟芝熠, 周龙武. 桂林会仙岩溶湿地土地利用方式对球囊霉素相关土壤蛋白分布的影响. *地*

- 球学报, 2022, 43(4): 491-501.
- [38] 陈雪, 宋娅丽, 王克勤. 等高反坡阶措施对滇中红壤坡耕地土壤贮水量的影响. 水土保持研究, 2019, 26(6): 92-99.
- [39] Preger A C, Rillig M C, Johns A R, Du Preez C C, Lobe I, Amelung W. Losses of glomalin-related soil protein under prolonged arable cropping: A chronosequence study in sandy soils of the South African Highveld. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(2): 445-453.
- [40] Su Z G, Li Y, Zhang J H, Xiong D H, Dong Y F, Zhang S, Zhang B J, Yang D. Spatial variation in soil, SOC, and total N redistribution on affected and non-affected slope terraces due to the 8.0 Wenchuan Earthquake in 2008 by using  $^{137}\text{Cs}$  technique. *CATENA*, 2017, 155: 191-199.
- [41] 孙轲, 黎建强, 杨关吕, 左嫚, 胡景. 滇中高原云南松林枯落物输入对土壤碳氮储量及其分布格局的影响. 生态学报, 2021, 41(8): 3100-3110.
- [42] 李学峰, 王克勤, 宋娅丽, 张雨鉴, 马延骁. 等高反坡阶对滇中云南松林生态系统碳储量及增量分配格局的影响. 水土保持研究, 2019, 26(5): 21-27.
- [43] Treseder K K, Turner K M, Mack M C. Mycorrhizal responses to nitrogen fertilization in boreal ecosystems: potential consequences for soil carbon storage. *Global Change Biology*, 2007, 13(1): 78-88.
- [44] Zhang J, Tang X L, Zhong S Y, Yin G C, Gao Y F, He X H. Recalcitrant carbon components in glomalin-related soil protein facilitate soil organic carbon preservation in tropical forests. *Scientific Reports*, 2017, 7: 2391.
- [45] Lovelock C E, Wright S F, Clark D A, Ruess R W. Soil stocks of glomalin produced by arbuscular mycorrhizal fungi across a tropical rain forest landscape. *Journal of Ecology*, 2004, 92(2): 278-287.
- [46] 贺学礼, 许珂, 郭辉娟. 黄芩根围 AM 真菌分布与土壤碳氮相关性研究. 河北农业大学学报, 2011, 34(5): 63-68.
- [47] Vasconcellos R L F, Bonfim J A, Baretta D, Cardoso E J B N. Arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin-related soil protein as potential indicators of soil quality in a recuperation gradient of the Atlantic forest in Brazil. *Land Degradation & Development*, 2016, 27(2): 325-334.
- [48] 贺海升, 王琼, 裴忠雪, 王慧梅, 王文杰. 落叶松人工林球囊霉素相关土壤蛋白与土壤理化性质空间差异特性. 生态学杂志, 2015, 34(12): 3466-3473.
- [49] 杨玮, 兰红, 李民赞, 孟超. 基于图像处理和 SVR 的土壤容重与土壤孔隙度预测. 农业工程学报, 2021, 37(12): 144-151.
- [50] 毕银丽. 丛枝菌根培养新技术及其对土地复垦生态效应. 北京: 地质出版社, 2007.
- [51] 高秀兵, 邢丹, 陈瑶, 周富裕, 赵华富, 陈娟, 郭灿, 周玉锋. 茶树根际球囊霉素相关土壤蛋白含量及其与土壤因子的关系. 茶叶科学, 2016, 36(2): 191-200.
- [52] Zhu Y G, Michael Miller R. Carbon cycling by arbuscular mycorrhizal fungi in soil-plant systems. *Trends in Plant Science*, 2003, 8(9): 407-409.