

## 不同绿肥覆盖对紫色土坡地柑橘园土壤侵蚀及有机碳流失的差异性影响

王泽宇<sup>1</sup>, 王帅<sup>2</sup>, 张志彬<sup>1</sup>, 宁文文<sup>1</sup>, 向雨<sup>1</sup>, 文艺<sup>1</sup>,  
郭小点<sup>1</sup>, 石孝均<sup>1</sup>, 赵敬坤<sup>2</sup>, 张宇亭<sup>1</sup>

(1.西南大学资源环境学院,长江经济带农业绿色发展研究中心,重庆400700; 2.重庆市农业技术推广总站,重庆401122)

**摘要:** [目的] 为探究绿肥覆盖对紫色土坡地柑橘园径流、土壤侵蚀、土壤有机碳(SOC)和可溶性有机碳(DOC)流失的阻控效应。 [方法] 基于紫色土柑橘园的长期定位监测试验,对比分析黑麦草(*Lolium perenne* L.)、毛叶苕子(*Vicia villosa* Roth.)、三叶草(*Trifolium repens* L.)及农户习惯清耕4个管理方式下径流量、土壤侵蚀量、SOC和DOC流失量。 [结果] 从水土流失量、SOC和DOC总控效果来看,不同处理均不同程度降低径流流失、土壤侵蚀、SOC和DOC流失,整体表现为黑麦草>三叶草>毛叶苕子>清耕。相对于清耕对照,黑麦草处理减少地表径流流失22.75%、壤中流流失41.21%、土壤侵蚀量60.37%、SOC流失29.29%和DOC流失23.34%;三叶草处理减少地表径流流失21.06%、壤中流流失33.72%、土壤侵蚀量41.87%、SOC流失34.80%和DOC流失24.63%;毛叶苕子处理阻控水土流失效果较弱,减少地表径流流失10.56%、壤中流流失30.02%、土壤侵蚀量53.12%、SOC流失25.85%和DOC流失4.59%。试验期间土壤侵蚀、有机碳流失过程与降雨量均高度同步,12月至翌年1月降雨稀少,侵蚀量普遍低于15.00 kg/hm<sup>2</sup>。3月随降雨量增加,侵蚀量增至11.11~24.72 kg/hm<sup>2</sup>,SOC流失量则平均低于0.60 kg/hm<sup>2</sup>。4—9月雨季为主要侵蚀期,6月清耕侵蚀量达峰值221.26 kg/hm<sup>2</sup>,虽然7—8月降雨量骤减,但清耕侵蚀量仍高于100.00 kg/hm<sup>2</sup>;9月降雨量提升引起清耕侵蚀量显著上升至201.66 kg/hm<sup>2</sup>,SOC流失量也高于5.00 kg/hm<sup>2</sup>。不同雨量等级下,绿肥均显著降低紫色土径流系数和土壤侵蚀模数,相较清耕对照,黑麦草处理径流系数降低23.38%~43.89%,土壤侵蚀模数降低34.91%~78.81%;三叶草处理的径流系数降低16.75%~42.24%,土壤侵蚀模数降低33.31%~61.70%;毛叶苕子处理的径流系数降低16.90%~32.73%,土壤侵蚀模数降低35.05%~71.74%。 [结论] 无论从周年尺度还是不同降雨强度来看,绿肥覆盖均能有效抑制紫色土坡地的水土流失和有机碳流失。其中黑麦草水土保持效果最优,其次为三叶草,毛叶苕子水土保持效果相对较弱;而三叶草在有机碳固持中效果最优,其次为黑麦草,毛叶苕子有机碳固持效果相对较弱。因此,面对不同管理目标选择发挥相应能力的绿肥是防控紫色土坡地水土与有机碳流失的重要措施。

**关键词:** 覆盖作物; 果园; 紫色土侵蚀; 有机碳流失

中图分类号: S157.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)02-0275-12

## Differential Effects of Different Green Manure Cover Crops on Soil Erosion and Organic Carbon Loss in Citrus Orchards on Purple Soil Slopes

WANG Zeyu<sup>1</sup>, WANG Shuai<sup>2</sup>, ZHANG Zhibin<sup>1</sup>, NING Wenwen<sup>1</sup>, XIANG Yu<sup>1</sup>, WEN Yi<sup>1</sup>,  
GUO Xiaodian<sup>1</sup>, SHI Xiaojun<sup>1</sup>, ZHAO Jingkun<sup>2</sup>, ZHANG Yuting<sup>1</sup>

(1. Research Center for Green Development of Agriculture in Yangtze River Economic Belt, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400700, China; 2. Chongqing General Agricultural Technology Extension Station, Chongqing 401122, China)

收稿日期: 2025-09-22

修回日期: 2025-10-26

录用日期: 2025-11-03

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-12-19

资助项目: 国家绿肥产业技术体系项目(CARS-22-G13); 国家自然科学基金项目(32472835)

第一作者: 王泽宇(2000—),男,硕士研究生,主要从事果园绿肥土壤质量评价研究。E-mail: W907764990@163.com

通信作者: 张宇亭(1985—),男,博士,教授,主要从事土壤酸瘦改良与地力提升研究。E-mail: zyt2018@swu.edu.cn

赵敬坤(1983—),男,硕士,高级农艺师,主要从事土壤肥料技术推广研究。E-mail: 155100901@qq.com

<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

**Abstract:** [Objective] This study investigates the effectiveness of green manure cover crops in controlling runoff, soil erosion, and the loss of soil organic carbon (SOC) and dissolved organic carbon (DOC) in citrus orchards on purple soil slopes. [Methods] Based on a long-term fixed-point monitoring experiment in a purple soil citrus orchard, this study conducted a comparative analysis of runoff amount, soil erosion amount, SOC and DOC loss amounts under four management practices: ryegrass cover (*Lolium perenne* L.), hairy vetch cover (*Vicia villosa* Roth.), clover cover (*Trifolium repens* L.), and the farmer's conventional clean tillage. [Results] All treatments reduced runoff, soil erosion, and SOC and DOC loss to varying degrees, with the overall performance being ryegrass>clover>hairy vetch>clean tillage. Compared to clean tillage, ryegrass reduced surface runoff by 22.75%, interflow by 41.21%, soil erosion by 60.37%, SOC loss by 29.29%, and DOC loss by 23.34%. Clover reduced surface runoff by 21.06%, interflow by 33.72%, soil erosion by 41.87%, SOC loss by 34.80%, and DOC loss by 24.63%. Hairy vetch had a weaker effect on soil and water conservation, reducing surface runoff by 10.56%, interflow by 30.02%, soil erosion by 53.12%, SOC loss by 25.85%, and DOC loss by 4.59%. During the experiment, the processes of soil erosion and organic carbon loss were highly synchronized with rainfall patterns. From December to the following January, rainfall was scarce, and the erosion amount was generally below 15.00 kg/hm<sup>2</sup>. In March, with the increase in rainfall, the erosion amount increased to 11.11–24.72 kg/hm<sup>2</sup>, while SOC loss was less than 0.60 kg/hm<sup>2</sup>. The rainy season from April to September was the main erosion period. In June, the erosion amount under clean tillage reached a peak of 221.26 kg/hm<sup>2</sup>. Although rainfall dropped sharply in July and August, the erosion amount was still higher than 100.00 kg/hm<sup>2</sup>. Increased rainfall in September led to a significant increase in erosion to 201.66 kg/hm<sup>2</sup>, and the SOC loss was also higher than 5.00 kg/hm<sup>2</sup>. Under different rainfall levels, green manure significantly reduced the runoff coefficient and soil erosion modulus of purple soil. Compared to clean tillage, ryegrass reduced the runoff coefficient by 23.38%–43.89%, and the soil erosion modulus by 34.91%–78.81%. Clover decreased the coefficient by 16.75%–42.24% and modulus by 33.31%–61.70% and hairy vetch reduced the coefficient and modulus by 16.90%–32.73% and 35.05%–71.74%, respectively. [Conclusion] At both annual and rainfall event scales, green manure cover crops can effectively suppress soil and water loss and organic carbon loss in purple soil slopes. Among them, ryegrass has the best soil and water conservation effect, followed by clover and hairy vetch. However, clover has the best organic carbon sequestration effect, followed by ryegrass and hairy vetch. Therefore, selecting green manure species with corresponding capabilities according to different management objectives is an important measure to prevent and control soil and water loss and organic carbon loss in purple soil slopes.

**Keywords:** cover crop; orchard; purple soil erosion; organic carbon loss

**Received:** 2025-09-22

**Revised:** 2025-10-26

**Accepted:** 2025-11-03

**Online**(www.cnki.net): 2025-12-19

我国川渝地区的耕地类型主要以紫色土坡地为主<sup>[1]</sup>,其既是高生产力的农用地,也是生态脆弱区。由于紫色土坡地抗侵蚀能力较弱,再加上高强度的耕作及年降雨量大且暴雨频发的气候条件,使其成为我国主要的水土流失区之一<sup>[2]</sup>。近年来,紫色土坡地已成为重要的晚熟柑橘(*Citrus reticulata* Blanco)生产区,但普遍存在土层浅薄、结构性差、砾石含量高的特点,导致保水保肥能力差,雨季易发生土壤侵蚀和土壤有机碳(SOC)流失<sup>[3-4]</sup>,进而导致土壤退化,降低柑橘产量和品质。

目前,紫色土坡地水土保持常见措施均存在其

局限性,如工程措施(如梯田)虽效果显著,但成本昂贵且维护不易;清耕等传统耕作方式虽能短期除草保土,但长期会破坏土壤结构,并在耕作间歇期使地表处于裸露状态,无法持续抵御侵蚀;而覆盖措施(如秸秆、地膜等)则面临来源有限、有碍农事或可能造成污染等问题。紫色土坡地柑橘园可以通过绿肥种植,以增加植被覆盖度来降低土壤侵蚀,并且增加土壤SOC<sup>[5]</sup>。绿肥覆盖防治紫色土坡地水土及有机碳流失的机制是一个多过程协同作用的综合体系,其通过茂密冠层有效拦截降雨、削弱溅蚀并延缓径流,通过发达根系固结土体、提升土壤入渗能力,并

通过植物残体归还直接增加土壤有机质,从而协同实现保土、蓄水与固碳的多重效应,构建控制坡面水土和养分流失的最有效生态屏障<sup>[6]</sup>。径流流失、土壤侵蚀、SOC和DOC的流失受到绿肥种类、降雨强度、土壤类型等多因子的共同调控。

首先,不同绿肥品种因其生物学特性的差异,其效果迥然不同。禾本科绿肥通常具有密集的须根系,能有效固结土壤,改良团粒结构,从而增强土壤抗蚀能力;而豆科绿肥则侧重于生物固氮、增加地表覆盖度和有机质输入。LI等<sup>[7]</sup>的研究表明,禾本科高羊茅与豆科紫花苜蓿在防治水土流失方面并无显著差异,但禾本科草被因其根系密集,在固持土壤、减少侵蚀方面潜力更大;刘瑞<sup>[8]</sup>在紫色土坡地柑橘园的研究表明,3种绿肥对地表径流、壤中流和土壤侵蚀的防控效果总体表现为黑麦草>光叶苕子>二月兰。其中,黑麦草和光叶苕子处理年均分别减少地表径流27.17%和18.94%,减少壤中流18.50%和13.60%,减少土壤侵蚀58.34%和47.65%。

其次,降雨强度是驱动水土和有机碳流失的关键外部动力因子,显著的降雨事件下土壤有机碳会发生大量流失<sup>[9]</sup>。聂小东等<sup>[10]</sup>研究表明,当雨强从0.64 mm/min增至1.69 mm/min时,红壤坡耕地土壤侵蚀量显著增加,且84%以上的有机碳通过泥沙结合态流失;陈晓安等<sup>[11]</sup>研究发现,雨强从30 mm/h增至90 mm/h使地表径流产流时间从32.40 min缩短至1.53 min,并使壤中流相较于地表径流的产流滞后时间从0.45 min增至13.13 min,表明雨强对坡面产流过程有决定性影响。

土壤类型是构成水土流失发生的物质基础和环境背景。在不同质地的土壤上,绿肥阻控水土流失的效果也会有差异。常梦琦等<sup>[12]</sup>在江西红壤坡园地的研究表明,三叶草(*Trifolium repens*)覆盖的管理对坡地柑橘园水土流失展现出良好的阻控效果,径流阻控效果能达到58.82%、土壤侵蚀阻控效果能达到80.13%并且抑制有机碳的流失;张蒙等<sup>[13]</sup>在长江流域紫色土坡地研究表明,径流量与黑麦草(*Lolium perenne*)覆盖度之间呈极显著负相关,黑麦草平均径流和土壤侵蚀阻控率分别为68.62%和82.86%。尽管已有研究肯定绿肥在紫色土区的水土保持效益,但针对紫色土坡地柑橘园生态系统,多数研究聚焦绿肥的水土保持及氮磷阻控效益,而缺乏不同绿肥在阻控SOC和DOC流失的量化比较及绿肥种类、降雨强度等多因子调控的相关研究,难以做到对紫色土坡地柑橘园的绿肥品种进行科学选择。

本研究针对紫色土坡地柑橘园水土及土壤有机碳流失严重的问题,通过对比不同绿肥覆盖管理对径流流失、土壤侵蚀、SOC和DOC流失的影响,系统监测自然降雨事件中的水土和有机碳流失过程。基于径流量、土壤侵蚀量及有机碳流失量的时序数据,揭示绿肥覆盖下的地表径流和壤中流形成情况、土壤侵蚀特征及有机碳流失规律,重点阐明不同种类绿肥在阻控径流流失、土壤侵蚀和有机碳流失的差异性,为防治紫色土坡地柑橘园水土流失问题提供理论依据和科学基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本试验为原位径流场监测试验,位于重庆市西南大学的国家农业科学北碚实验站(29°48'36"N, 106°26'33"E)。试验地海拔266.3 m,年平均降水量1 115.3 mm,年平均日照时间1 276.7 h。供试土壤为川渝地区典型酸性紫色土,土壤质地为黏壤土,试验前土壤pH为5.6,有机质19.7 g/kg,全氮1.2 g/kg,全磷0.7 g/kg,全钾22.3 g/kg,土壤体积质量1.36 g/cm<sup>3</sup>。

在各试验小区中,以中轴线为基准种植4棵柑橘树苗,树间距为3 m,于2018年5月移栽,品种为“爱媛38号”,树龄4 a,长势健壮且株高、冠幅均匀。树冠郁闭度达50%。施肥水平在各小区保持一致,本研究试验期间以每年每株树体纯养分(包括无机肥和有机肥)N 356.0 g、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 187.0 g、K<sub>2</sub>O 321.0 g设计投入,施肥时间一般为每年3、6、9、12月,施肥方式均为在柑橘树滴水线附近开沟施肥。树下设有水管,每年夏季干旱缺水时期灌溉。

### 1.2 试验设计

本试验设有12个小区,小区长12 m,宽4 m,面积为48 m<sup>2</sup>,坡度为15°,坡向为北偏东12°。同时,土层深度均为60 cm,包括40 cm上层紫色土成熟耕作土和20 cm底层紫色土页岩母质层。为保障试验条件,小区四周使用混凝土板筑起围梗,保证小区中水流独立,以防水土肥串流,并在各小区坡脚设置汇流沟,使用PVC管道(直径75 mm)与径流桶连接收集降雨后小区产生的径流。

本试验共设置4个处理:1)黑麦草(*Lolium perenne* L.,多年生禾本科绿肥)覆盖管理;2)毛叶苕子(*Vicia villosa* Roth.,1 a生豆科绿肥)覆盖管理;3)三叶草(*Trifolium repens* L.,多年生豆科绿肥)覆盖管理;4)农户习惯清耕管理。本试验采用随机区组设计,每个处理设置3次重复。于2021年9月27日播种绿肥,为实现果园绿肥全覆盖,黑麦草、毛叶苕子、三叶草的播种量分别为22.5、45.0、22.5 kg/hm<sup>2</sup>,

播种方式为均匀撒播于试验小区内、柑橘树冠外。在其播种后的1~3月内需定期进行察看并根据绿肥实际生长情况进行适时适量补种。清耕处理则是于每年夏季(野草旺盛时)和绿肥播种前除草2~3次,清除地表所有自然生长的杂草与植被。随后,于2021年10月至2022年9月完整1a的生育期进行有效产流降雨事件监测,总降雨量达1 055 mm。周年降水结构呈现小雨(<10 mm)发生8次,中雨(10~25 mm)发生9次,大雨(25~50 mm)发生10次,暴雨(50~100 mm)发生3次,大暴雨(100~250 mm)发生2次。

绿肥覆盖种植关键时期:通常在9月进行播种,10—12月是绿肥的生长阶段。进入1—3月,绿肥进入旺盛生长期,此期间(特别是1月中旬)果园绿肥覆盖率可达到80%,并在3月中旬实现柑橘园的全覆盖。4—6月是绿肥的开花期,从初期延续至盛花期,并于5月中旬基本完成开花结实。此后,绿肥进入腐解期(7—9月),绿肥不进行刈割,在7月中旬自然枯萎覆盖于行间,腐解程度逐步加深,最终于9月中旬完成完全腐解。

### 1.3 样品采集与数据处理

绿肥生物量和覆盖度测定:收割代表性样方(1 m×1 m)的全部地上部分,立即称重得到鲜生物量,105℃杀青30 min,放入60℃烘箱烘24~72 h至恒重,称量干重,计算单位面积生物量;随机选取多个样方,通过网格法,判断绿肥冠层垂直投影所占面积。

产流产沙测定:试验期间,根据降雨频次和降雨量,及时观察径流收集桶内的径流和泥沙(包括汇流沟内的泥沙)的收集情况,在每次降雨产流后的及时采样,合并为每月产流和产沙量。采样时首先用洁净的测量尺准确测量并读取各小区径流收集桶中地表径流和壤中流的水位值,以计算地表径流和壤中流流量,3个重复小区的平均值为该处理的地表径流、壤中流的产流量。同时将地表径流和壤中流收集桶中的径流液用洁净的手持搅拌机充分搅拌均匀,使沉积在径流桶底部的泥沙能够均匀地分布在径流液中。同时用350 mL聚乙烯瓶采集混合径流水样,水样采集完毕后立即带到实验室,放置沉淀,使用20 μm滤纸过滤后,泥沙样品立即进行烘干用于计算产沙量。而水样使用聚乙烯瓶储存保存于4℃冰箱并于48 h内分析完毕。

SOC和DOC测定方法:泥沙风干后,过0.25 mm筛,采用重铬酸钾容量法-外加热法测定SOC;过滤后的水样用0.45 μm玻璃纤维膜抽滤,抽滤后,将滤液倒入去离子水润洗过的聚乙烯瓶中,在样品中加入硫酸至pH<2,在4℃冰箱里保存,使用总有机碳分析仪

(Multi N/C 2100S/1)测定径流DOC浓度。

降雨事件中径流量和径流系数计算公式为:

$$W=H \times A \quad (1)$$

$$R=W/(S \times P) \times 1\,000 \times 100\% \quad (2)$$

式中:W为径流量,m<sup>3</sup>;H为水位值,m;A为收集桶底面积,m<sup>2</sup>;R为径流系数,%;S为小区面积,m<sup>2</sup>;P为降雨量,mm;1 000为换算系数。

降雨事件中土壤侵蚀量计算公式为:

$$Q=M_d/S \times 10 \quad (3)$$

式中:Q为侵蚀量,kg/hm<sup>2</sup>;M<sub>d</sub>为泥沙干重,g;S为小区面积,m<sup>2</sup>;10为单位换算系数。

有机碳质量分数的测定:将泥沙风干后,过100目筛,采用重铬酸钾容量法测定泥沙有机碳质量分数。降雨事件中土壤SOC流失通量计算公式为:

$$L=SC \times SQ/1\,000 \quad (4)$$

式中:L为SOC流失通量,kg/hm<sup>2</sup>;SC为侵蚀土壤中SOC质量分数,g/kg;SQ为当次土壤侵蚀量,kg/hm<sup>2</sup>;1 000为换算系数。

降雨事件中径流DOC流失通量计算公式为:

$$D=DC \times DQ/(S \times 100) \quad (5)$$

式中:D为DOC流失通量,kg/hm<sup>2</sup>;DC为径流中的DOC浓度,mg/L;DQ为径流量,L;S为小区面积,m<sup>2</sup>;100为换算系数。

采用SPSS 18和OriginPro 2022软件处理试验数据和绘制图表。

## 2 结果与分析

### 2.1 绿肥生长状况

绿肥生长动态监测(表1)显示,其生物量与植被覆盖度呈现显著季节性变化。10—11月黑麦草和毛叶苕子维持低位(<0.30 kg/m<sup>2</sup>,覆盖度<70.00%),1—3月为旺盛生长期,而4—6月为开花期,其中黑麦草与毛叶苕子在4月达到生物量峰值,分别为1.07、1.26 kg/m<sup>2</sup>,最大覆盖度分别为97.04%、98.25%,三叶草则在6月生长至顶峰(1.26 kg/m<sup>2</sup>,97.55%)。黑麦草和毛叶苕子在7—9月进入腐解期后,自然枯萎覆盖于行间,此时生物体已经死亡,无生物量。而三叶草在7—9月仍正常生长,生物量和覆盖度在持续下降。

### 2.2 不同绿肥覆盖下降雨及径流流失的动态变化

由图1a可知,降雨事件主要集中在4—6月,该时段降雨量约占周年降雨量的65.00%。而7、8月出现严重季节性干旱,降雨量大幅降低,仅占周年降雨量的5.00%。地表径流数据表明,降雨量和地表径流的月份分布特征整体上呈地表径流量随着降雨量增加而增大。地表径流流失主要集中在5、6月,各处理在该时段的地表径流流失量占周年流失量的66.36%~

70.60%。其中,地表径流峰值出现在2022年6月(降雨量为238 mm),此时各处理地表径流流失量对比为黑麦草(521.65 L)<三叶草(597.01 L)<毛叶苕子(598.06 L)<清耕(748.70 L)。周年阻控效果显示,黑麦草与三叶草覆盖显著降低地表径流流失,其地

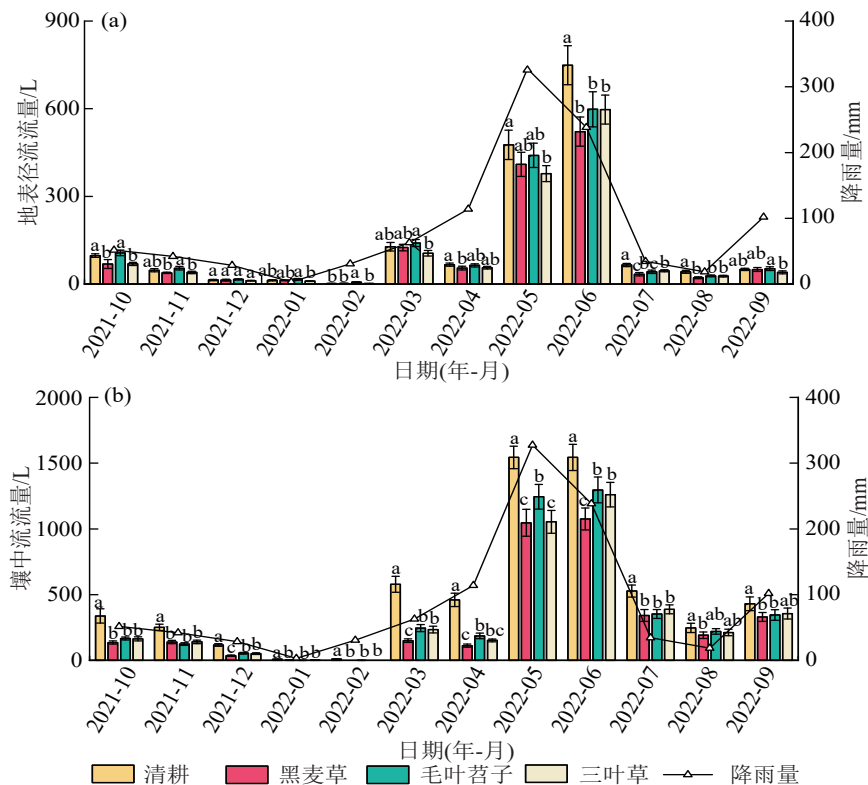
表径流阻控率排序为黑麦草(22.75%)>三叶草(21.06%)>毛叶苕子(10.56%)。黑麦草和三叶草的地表径流流失量近全年显著低于清耕处理,而毛叶苕子仅6—8月显著低于清耕处理( $p<0.05$ ),月平均减少29.67%的地表径流量。

表 1 绿肥各月份生物量及覆盖度

Table 1 Biomass and coverage of green manure in each month

月份	黑麦草		毛叶苕子		三叶草	
	生物量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	覆盖度/%	生物量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	覆盖度/%	生物量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	覆盖度/%
10	2 495±220ef	63.69±2.64h	2 135±202e	61.33±1.09g	7 647±879ef	65.25±2.02f
11	2 550±433f	68.84±2.46g	2 493±245e	69.47±2.22f	7 143±727fg	78.58±3.02e
12	3 039±268f	74.01±3.06f	2 829±564e	73.55±3.04ef	5 970±502gh	82.41±1.97e
1	4 091±254de	79.14±2.01e	3 177±431de	78.32±2.12cd	5 339±643h	87.32±2.15d
2	4 702±329d	84.21±3.25d	4 141±433d	81.36±1.56c	7 010±508fg	89.25±3.18cd
3	6 685±664c	89.66±2.44c	6 022±554c	86.67±2.21b	7 700±558def	90.98±2.41cd
4	10 662±950a	97.04±1.08a	12 647±1 127a	98.25±3.09a	9 318±866cd	92.21±3.66cd
5	9 504±1 106b	95.22±1.47ab	11 560±977a	89.46±1.98b	10 518±766bc	98.69±2.29a
6	6 277±600c	91.33±5.24bc	10 272±1 120b	76.38±4.12de	12 566±1 635a	97.55±3.26ab
7	—	—	—	—	11 656±977ab	93.64±1.45bc
8	—	—	—	—	9 275±1 100cde	89.67±5.22cd
9	—	—	—	—	8 300±948def	79.31±1.02e

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同月份间差异显著( $p<0.05$ );“—”表示无数据。



注:图柱上方不同小写字母表示同一月份不同处理间差异显著( $p<0.05$ )。下同。

图 1 不同绿肥覆盖下地表径流和壤中流的月份分布特征

Fig. 1 Monthly distribution characteristics of surface runoff and interflow under different green manure cover crops

壤中流流量监测数据(图 1b)显示,壤中流流失量月份分布与降雨同步,主要集中在5、6月,各处理在该时段壤中流流失量占周年流失量的50.99%~59.96%。其中壤中流峰值(2022年6月)与强降雨事件同步,此时各处理壤中流流失量排序为黑麦草(1 075.33 L)<三叶草(1 260.22 L)<毛叶苕子

(1 296.24 L)<清耕(1 543.89 L)。周年阻控效果表明,黑麦草与三叶草覆盖显著降低壤中流流失,壤中流阻控率对比为黑麦草(41.21%)>三叶草(33.72%)>毛叶苕子(30.02%)。黑麦草于3—6月壤中流流失量显著低于其他处理( $p<0.05$ ),其中3—4月壤中流阻控率高达74.09%~75.64%。三叶草壤

中流流量除 8—9 月外均显著低于清耕处理, 阻控率达 35.94%。

由表 2 可知, 不同处理的径流产流状况存在显著差异, 清耕处理阻控径流能力最弱, 其周年径流深平均达 65.60 mm, 显著高于绿肥覆盖处理。在任何雨量事件中, 清耕处理的径流系数均显著高于其他处理, 试验期间小雨和中雨事件出现连续性, 土壤持续湿润, 降雨产生径流量较高, 其清耕处理平均径流系数分别高达 11.53% 和 11.06%。而 6—9 月出现季节性干旱, 田间持水量急剧下降, 此后出现的大暴雨产

生的径流量反而较低。试验期间绿肥覆盖显著削减径流, 黑麦草在任何降雨强度下均保持最低的径流系数, 毛叶苕子与三叶草则效果相近, 在任何雨强下径流系数均显著低于清耕, 其径流系数降幅分别为 23.38%~43.89%、16.90%~32.73%、16.75%~42.24%。高雨强(大雨、暴雨和大暴雨)下绿肥覆盖的调控作用减弱, 黑麦草、毛叶苕子和三叶草径流系数的降幅分别为 23.38%~38.42%、16.90%~25.00%、16.75%~34.73%, 表明绿肥的径流阻控效果在此类强降雨事件中减弱。

表 2 不同降雨强度等级下紫色土坡地柑橘园的径流产流状况

Table 2 Runoff status of citrus orchards on purple soil slopes under different rainfall intensity levels

处理	降雨量/mm	径流深/mm	径流系数/%				
			小雨	中雨	大雨	暴雨	大暴雨
清耕	1 055.00	65.60±5.80a	11.53±0.77a	11.06±1.25a	5.96±0.21a	6.21±0.78a	3.55±0.41a
黑麦草	1 055.00	42.01±2.86b	6.47±0.32c	6.37±0.41b	3.67±0.23c	4.24±0.28b	2.72±0.24b
毛叶苕子	1 055.00	49.35±5.22b	8.08±0.71b	7.44±0.65b	4.47±0.45b	5.01±0.67b	2.95±0.32b
三叶草	1 055.00	46.07±4.33b	6.66±0.70c	7.08±0.63b	3.89±0.41bc	5.17±0.44ab	2.76±0.25b

注: 2021 年 10 月至 2022 年 9 月绿肥完整 1 a 的生育期; 同列不同小写字母表示不同处理间差异性达到显著水平 ( $p < 0.05$ )。下同。

### 2.3 不同绿肥覆盖下土壤侵蚀的动态变化

由图 2 可知, 土壤侵蚀主要集中在 6—9 月, 各处理在该时段侵蚀量占周年总量的 50.34%~64.91%。其中侵蚀峰值出现在 2022 年 9 月(降雨量为 102 mm), 此时各处理土壤侵蚀量排序为黑麦草(149.21 kg/hm<sup>2</sup>) < 毛叶苕子(153.41 kg/hm<sup>2</sup>) < 三叶草(155.04 kg/hm<sup>2</sup>) < 清耕(201.66 kg/hm<sup>2</sup>)。

周年阻控效果显示, 土壤侵蚀阻控率对比为黑

麦草(60.37%) > 毛叶苕子(53.12%) > 三叶草(41.87%)。黑麦草处理土壤侵蚀量近全年显著低于其他处理 ( $p < 0.05$ ), 仅 1—3 月与清耕处理无异。毛叶苕子处理仅于 6—8 月显著低于三叶草处理 ( $p < 0.05$ ), 相比三叶草处理减少达 55.23% 侵蚀量。而三叶草处理则于 1—5 月显著低于毛叶苕子处理 ( $p < 0.05$ ), 相比毛叶苕子处理减少达 21.70% 侵蚀量。

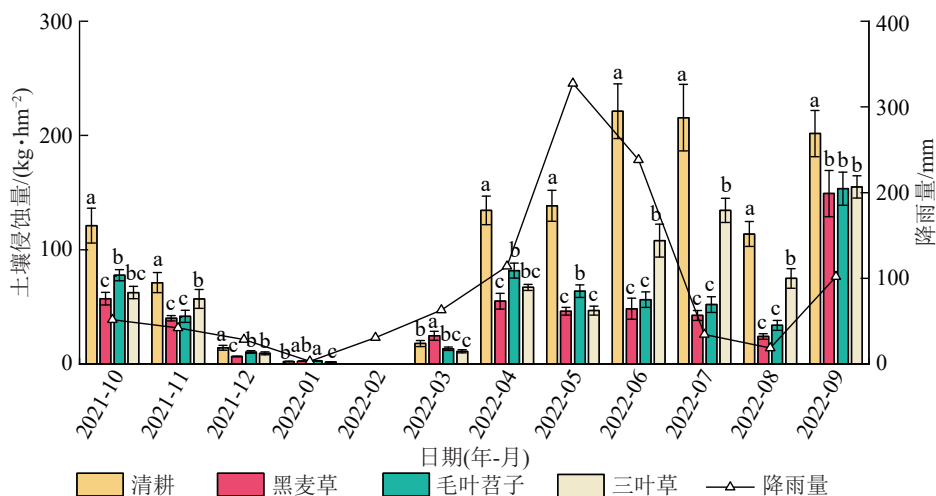


图 2 不同绿肥覆盖下土壤侵蚀量的月份分布特征

Fig. 2 Monthly distribution characteristics of soil erosion under different green manure cover crops

由表 3 可知, 土壤侵蚀模数随雨量等级提升而提升, 但连续的低雨量事件导致中雨事件清耕侵蚀模数平均为 30.52 t/(km<sup>2</sup>·a) 高于其他雨量等级下的侵蚀模数。绿肥覆盖全面抑制侵蚀, 其中黑麦草效果最优,

小雨/中雨降幅达 64.10%~78.81%, 暴雨下降幅达 75.78%; 而三叶草在小雨/中雨等级表现相对较弱, 降幅仅为 33.31%~36.87%; 毛叶苕子在小雨-暴雨雨量等级下土壤侵蚀模数整体降低 50.31%~71.74%。强

降雨主导土壤侵蚀,大暴雨等级下绿肥覆盖土壤侵蚀模数整体偏高,较清耕处理仅降低 34.91%~40.46%。

2.4 不同绿肥覆盖下有机碳的流失特征

由图 3 可知,试验期间,降雨事件引发的土壤侵蚀携带的泥沙中的 SOC 质量分数随着绿肥生物量降低及腐解程度加深而增加,从绿肥播种到生长旺盛期增幅显著。绿肥覆盖处理 SOC 质量分数整体高于清耕,各处理侵蚀土壤 SOC 平均质量分数周年对比表现为黑麦草(47.93 g/kg)>毛叶苕子(42.60 g/kg)>三叶

草(40.16 g/kg)>清耕(35.40 g/kg)。相较于其他处理,毛叶苕子在快速腐解期至缓慢分解期(5—9月)SOC 质量分数最高,平均达 55.26 g/kg。

2022年7—8月,试验所在地因季节性干旱造成未产生土壤侵蚀的降雨事件及田间持水量降低。而9月的土壤侵蚀量(149.21~201.66 kg/hm<sup>2</sup>)和侵蚀土壤 SOC 质量分数均较高,该月侵蚀土壤 SOC 质量分数为黑麦草(58.28 g/kg)>毛叶苕子(48.29 g/kg)>三叶草(42.90 g/kg)>清耕(33.24 g/kg),土壤侵蚀量对比相反。

表 3 不同降雨强度等级下紫色土坡地柑橘园的土壤侵蚀状况

Table 3 Soil erosion status of citrus orchards on purple soil slopes under different rainfall intensity levels

处理	土壤侵蚀模数/(t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )				
	小雨	中雨	大雨	暴雨	大暴雨
清耕	18.13±1.28a	30.52±2.78a	21.98±1.90a	27.74±2.29a	27.24±1.86a
黑麦草	3.84±0.39c	10.94±0.73c	9.70±0.88b	6.72±0.60c	17.73±1.27b
毛叶苕子	5.12±0.41c	13.72±2.47c	10.92±1.86b	8.71±0.34c	17.69±1.27b
三叶草	12.09±1.10b	19.40±2.47b	8.42±0.90b	12.56±0.67b	16.22±0.25b

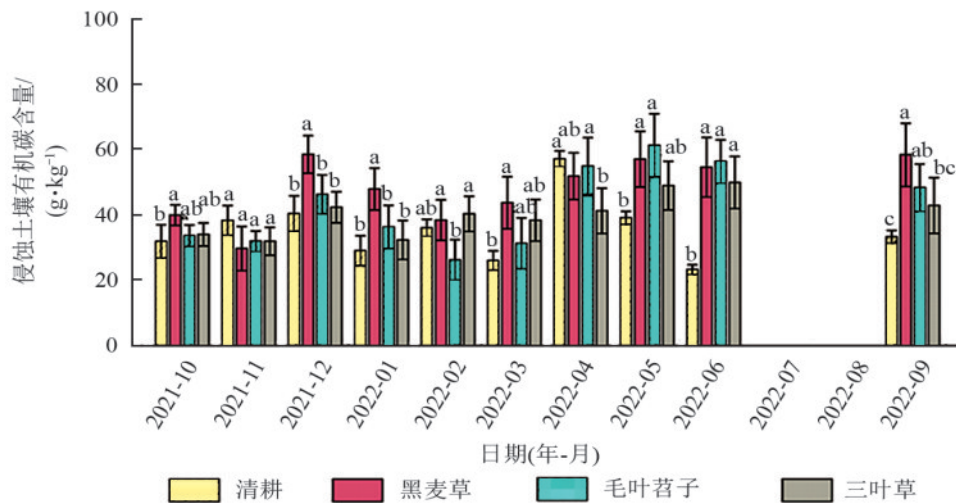


图 3 不同绿肥覆盖下降雨事件造成的侵蚀土壤有机碳流失含量的月份特征

Fig. 3 Monthly characteristics of soil organic carbon loss in eroded soil caused by rainfall events under different green manure cover crops

由表 4 可知,DOC 流失以壤中流为主导(占比约 70.00%),绿肥覆盖显著抑制壤中流造成的 DOC 流失( $p<0.05$ ),DOC 壤中流截获率对比为三叶草(37.45%)>黑麦草(30.33%)>毛叶苕子(14.56%);而地表径流中整体截获能力有限,黑麦草达 4.32%,毛叶苕子和三叶草 DOC 地表径流流失量显著高于清耕处理,可能与毛叶苕子和三叶草在生长或腐解过程中向土壤表层释放更多可溶性有机质,从而在降雨径流事件中更易被冲刷有关。

SOC 和 DOC 截获效果(表 5)显示,不同绿肥覆盖对紫色土坡地柑橘园 SOC 和 DOC 流失具有良好的截获效果。有机碳总流失截获效果呈三叶草(29.74%)>

黑麦草(26.34%)>毛叶苕子(15.33%)。试验期间,有机碳流失主要以随径流流失的 DOC 为主(占比 49.56%~55.85%)。从不同流失形式来看,SOC 截获率对比表现为三叶草(34.80%)>黑麦草(29.29%)>毛叶苕子(25.85%),绿肥覆盖较清耕处理显著降低 SOC 总流失量( $p<0.05$ )。DOC 截获率对比表现为三叶草(24.63%)>黑麦草(23.34%)>毛叶苕子(4.59%),绿肥覆盖较清耕处理显著降低 DOC 总流失量( $p<0.05$ ),其中三叶草和黑麦草削减效果最突出。

2.5 不同绿肥覆盖下径流量、土壤侵蚀、SOC 和 DOC 流失差异性特征

周年观测结果显示,相比清耕处理,黑麦草地表

径流阻控率达22.75%(图1a)、壤中流阻控率达41.21%(图1b)和土壤侵蚀阻控率达60.37%(图2),均为3种绿肥覆盖管理中最高,且其SOC截获率达29.29%(表5)、DOC截获率达23.34%(表5)。三叶草SOC截获率(34.80%)及DOC截获率(24.63%)均为3种绿肥覆盖管理最高(表5),但固土能力最弱,土壤侵蚀量较清耕处理仅减少41.87%(图2),且其地

表径流阻控率达21.06%(图1a),壤中流阻控率达33.72%(图1b)。毛叶苕子除土壤侵蚀阻控效果(阻控率为53.12%)较好外(图2),与清耕处理相比,地表径流阻控率仅为10.56%(图1a),壤中流阻控率仅为30.02%(图1b),SOC截获率仅为25.85%(表5),DOC截获率仅为4.59%(表5),均为3种绿肥覆盖管理中最低。

表4 不同绿肥覆盖下DOC流失量特征

Table 4 Characteristics of DOC loss under different green manure cover crops

处理	地表径流		壤中流	
	流失量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	流失占比/%	流失量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	流失占比/%
黑麦草	7.76±0.35c	33.42	15.46±0.67c	66.58
毛叶苕子	9.94±0.45a	34.39	18.96±0.66b	65.61
三叶草	8.95±0.45b	39.20	13.88±0.71c	60.80
清耕	8.11±0.59c	26.77	22.19±0.86a	73.23

表5 不同绿肥覆盖下2个绿肥生长季的土壤有机碳流失总量

Table 5 Total soil organic carbon loss in two green manure growing seasons under different green manure cover crops

处理	SOC		DOC		流失总量/(kg·hm <sup>-2</sup> )
	流失量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	流失占比/%	流失量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	流失占比/%	
黑麦草	21.80±0.23b	48.42	23.22±1.02c	51.28	45.02±1.25b
毛叶苕子	22.86±0.34b	44.15	28.90±1.12b	55.85	51.75±1.46b
三叶草	20.10±0.33b	46.83	22.83±1.16c	53.17	42.94±1.49b
清耕	30.83±0.49a	50.44	30.29±1.45a	49.56	61.12±1.94a

### 3 讨论

#### 3.1 绿肥覆盖对水土流失的阻控效应

不同绿肥因其覆盖特性、生物量和根系结构差异,表现出显著不同的水土保持效果。本研究中,黑麦草处理对径流和土壤侵蚀的抑制效果最为明显,与崔璨<sup>[14]</sup>在柑橘园的研究结果一致,黑麦草处理使径流量降低29.75%,土壤侵蚀量降低61.46%。黑麦草的优势得益于其长期覆盖、高生物量及分蘖能力强、土壤加固效果显著的根系结构<sup>[15]</sup>。黑麦草在12月生长阶段覆盖度达70.00%以上,此时土壤侵蚀量阻控率达53.91%。3月中旬实现柑橘园的全覆盖,4—6月为绿肥的开花期,此时覆盖度达91.33%~97.04%,地表径流阻控率达14.01%~30.33%,壤中流阻控率达30.35%~75.64%,土壤侵蚀阻控率达59.10%~78.15%。姚单君等<sup>[16]</sup>研究表明,黑麦草在盛花期能显著降低24.84%径流量;ZHOU等<sup>[17]</sup>研究表明,黑麦草进入开花期后,径流量减少约70.00%,土壤侵蚀量减少约95.00%。然而,本研究中径流量削减幅度相对较低,可能与黑麦草在实际田间条件下主要通过其密集须根系固结土壤、增强抗剪强度、但对地表

径流的直接阻控能力相对有限有关,反映模拟降雨条件与真实田间环境下降雨侵蚀过程与植被响应机制的差异。7—8月腐解期,黑麦草残体形成天然屏障层,此时地表径流阻控率达47.99%~48.72%,壤中流阻控率达22.22%~35.32%,土壤侵蚀阻控率达78.79%~80.30%;9月腐解末期,绿肥处理水土流失情况已与清耕无异。

三叶草的水土保持功能在不同时期具有鲜明特点,从周年尺度来看,其径流阻控率达30.88%,土壤侵蚀阻控率达41.87%,得益于其长达6个月的良好地表覆盖。LI等<sup>[18]</sup>在三峡库区柑橘园的研究表明,三叶草较对照减少径流18.50%,减少土壤侵蚀66.70%;SILLER等<sup>[19]</sup>研究表明,三叶草处理较对照减少径流50.00%,减少土壤侵蚀77.00%。2021年12月至翌年5月的生长期和开花期覆盖度高达82.41%~98.69%,能有效促进水分下渗,并且其直根系在土壤中形成高效的导水通道,加速水分自地表的下渗,但其密集根系网络本身也极大地增加水分在土壤中运移的阻力,有效延缓并降低水分以壤中流形式向系统外部的输出。因此,对壤中流阻控

更为突出,此时壤中流阻控率达31.75%~84.11%。NADERI等<sup>[20]</sup>研究表明,三叶草开花期径流减少39.73%,土壤侵蚀减少79.98%,与本研究三叶草开花期径流阻控率达27.75%、土壤侵蚀阻控率达55.14%的趋势相符,可能与三叶草在生长期和开花期通过冠层拦截与根系固土协同作用调控降雨侵蚀过程有关。魏艳等<sup>[21]</sup>在紫色土区的研究表明,豆科绿肥主要通过大幅提升土壤黏聚力(141.30%~189.74%)来增强其抗剪能力63.81%,其效果与根系密度密切相关,佐证了本研究豆科绿肥种植通过根系发挥对土壤侵蚀的阻控作用。到7—9月腐解期,三叶草仍会生长,其主要功能转化为对削弱地表径流的冲刷能力,此时地表径流阻控率达20.00%~35.00%。正是这种前期阻控土层内水流、后期削弱表层侵蚀的协同作用共同支撑三叶草的水土保持能力。

相比之下,一年生毛叶苕子生物量迅速衰减,导致水土保持效果较弱。仅在4月开花期初期,覆盖度达98.25%,此时毛叶苕子水土保持效果达到最佳,径流阻控率达52.48%、土壤侵蚀阻控率为39.21%。进入腐解期后,其土壤保护能力进一步削弱。径流阻控率仅25.66%,土壤侵蚀阻控率为53.12%,与毛叶苕子生长状况密切相关。与黑麦草、三叶草相比,毛叶苕子虽在花期能形成高覆盖度,但其攀附生长特性导致冠层结构疏松,对降雨的物理拦截效率较低;其浅层根系虽能一定程度固持表土,但难以形成如黑麦草般密集的根网以显著增强土壤抗剪强度,可能是其水土保持功能持续性不及多年生绿肥的关键机制所在。

本研究还揭示紫色土地柑橘园径流的主要形式及绿肥覆盖对不同雨强的响应。壤中流是主要的径流形式,占总径流量的70.00%。张翼<sup>[22]</sup>在紫色土地耕地的研究发现,地表径流为主要的产流方式,占径流量的68.30%~77.10%,与本研究试验地紫色土土壤相对浅薄、易形成壤中流有关。绿肥种植显著降低壤中流流量,绿肥处理较清耕平均减少30.02%~41.21%,主要归因于绿肥根系延伸至深层土壤,通过根-土互作改变土壤孔隙结构和水力特性,从而阻碍水分入渗和壤中流流速密切相关,其中黑麦草根入土深达100~110 cm。从不同雨量等级来看,绿肥显著降低径流流失和土壤侵蚀,但效果随雨量增大而降低。但值得注意的是,试验期间,连续的小雨和中雨多发生于秋冬季,此时气温较低,土壤蒸散作用弱,前期土壤湿度往往维持在较高水平。因此,降雨更易转化为径流,导致小雨和中雨也能形成较多的径流。相反,大雨、暴雨和大暴雨多发生于夏季,该时期出现严重的季节性干旱,日照时间长,土

壤蒸散作用强烈,致使前期土壤湿度低,降雨下渗过程增强,大部分水分用于湿润土壤,仅少量形成径流。此现象导致小雨和中雨的径流系数反而高于其他雨量等级,与郑宇等<sup>[23]</sup>的研究结果一致,即中雨是导致水土流失的最主要雨型,与其较高的发生频率有关,与YAN等<sup>[24]</sup>和CHEN等<sup>[25]</sup>的研究结果不同,强降雨显著提升径流和土壤流失量,其中极端降雨更使径流系数从48.85%急剧增至89.79%。根本原因在于不同季节降雨特性与土壤水分状况的交互作用决定径流的形成情况。而土壤侵蚀模数的变化趋势则呈现出与之不同的特征。在小雨事件下,土壤侵蚀由雨滴击溅主导,总体泥沙流失量相对较低。而由于连续的低雨量事件发生,使中雨事件下的各处理侵蚀模数普遍较高。与之相反,大雨、暴雨和大暴雨事件虽然径流系数较低,但由于绝对降雨量显著增大,形成径流深较大、流速较高的地表径流,侵蚀动力转变为以径流冲刷为主导,从而引发强烈的泥沙流失,侵蚀模数显著升高。

进一步分析表明,绿肥的水土保持效益不仅体现在径流与侵蚀量的减少,还反映在其对土壤结构的实质性改善,如增加有机质和根系固土,以及生态系统服务功能的提升,包括增强土壤固碳能力、提升蓄水能力和维持土壤肥力。

### 3.2 绿肥覆盖对不同形式有机碳流失的影响

绿肥覆盖通过减少侵蚀量和改善土壤碳库稳定性,显著降低SOC流失<sup>[26]</sup>。本研究表明,绿肥较清耕平均减少SOC流失7.97~10.73 kg/hm<sup>2</sup>,其中三叶草截获率最高,达34.80%。黑麦草和三叶草阻控SOC流失与阻控水土流失的能力存在差异,之所以出现这种差异归因于黑麦草通过根系固土减少侵蚀总量,从而减少有机碳的流失;而三叶草则通过土壤团聚和增加微生物活性来保护碳库,即使发生侵蚀,SOC的流失也相对较少。其次是黑麦草处理,SOC截获率达29.29%。薄晶晶等<sup>[27]</sup>的研究表明,黑麦草在翻压后33 d后碳快速释放,累积释放率达70.46%,与本研究黑麦草处理较低的SOC流失量相印证,但其较高的SOC截获率表明,黑麦草的保碳效益不仅源于碳释放,更与其发达的须根系有效固持土壤、减少携碳泥沙流失密切相关。黑麦草和三叶草处理SOC流失减少可能与其为多年生作物,为土壤提供SOC持续累积有关。LEDO等<sup>[28]</sup>研究表明,多年生作物较1 a生作物增加SOC约20.00%;SIDDIQUE等<sup>[29]</sup>研究表明,无论多年生作物功能和植被类型如何,与1 a生作物相比,显著增加SOC储量。本研究结果与上述结论一致,进一步揭示三叶草在阻控SOC流失方面的优势,可能与其根系分泌物的胶结

作用促进大团聚体形成、增强对SOC的保护有关,而黑麦草则主要通过减少侵蚀量实现SOC保蓄。毛叶苕子的SOC截获能力相对偏低,仅为25.85%。与单俏<sup>[30]</sup>在三峡库区柑橘园的研究发现不同,种植毛叶苕子较三叶草显著提升SOC的固持能力,可能与土壤粒径组成差异有关,紫色土<2 mm团聚体相对较多,而毛叶苕子随粒径减小SOC固持能力减弱。

5—9月腐解期,侵蚀土壤SOC质量分数普遍较高,结合绿肥显著降低土壤侵蚀量的结果,说明绿肥腐解驱动碳积累。其中7—8月出现严重的季节性干旱,干旱胁迫可能导致土壤团聚体稳定性降低,土壤裂隙发育,并影响绿肥残体的正常腐解过程;当9月极端降雨事件发生时,前期干旱处理的土壤更易发生剧烈侵蚀,导致累积的SOC在短期内大量流失。此现象突显前期干旱与后续极端降雨的共同作用,显著放大碳流失风险,表明在评估绿肥的固碳潜力时,必须考虑气候极端事件的叠加影响。

DOC的流失量主要与降雨有关<sup>[31]</sup>,其迁移路径由壤中流主导<sup>[32]</sup>,与本研究DOC随壤中流流失占比60.80%~73.23%的结果一致。绿肥覆盖通过延缓径流形成,增加土壤渗透性和腐解释放DOC<sup>[33-34]</sup>,显著降低DOC流失量。本研究发现,绿肥覆盖截获DOC的主要方式是截获壤中流中的DOC,DOC壤中流截获率对比为三叶草(37.45%)>黑麦草(30.33%)>毛叶苕子(14.56%),且三叶草的DOC总径流流失截获率也为最高(24.63%)。此结果与三叶草腐解速率快、DOC释放迅速有关。刘业萍等<sup>[35]</sup>研究表明,三叶草在增加土壤DOC方面展现出长期覆盖的累积效应,相对减少DOC流失;张荣琴等<sup>[36]</sup>在渭北果园的研究表明,三叶草腐解速率快,DOC释放快,有利于短期内提升土壤活性碳库;洪莉等<sup>[37]</sup>在南方桃园的研究表明,三叶草C/N比较低,易于腐解,翻压90 d时质量累积减少率达80.69%,快速释放DOC,与本研究共同揭示三叶草通过快速腐解驱动活性碳库转化的特性,但本研究进一步发现,其对DOC的截获率最高,表明三叶草在释放DOC的同时,可能通过根系-土壤互作增强土壤对可溶性碳的吸附与固定能力,实现释放与固存的动态平衡。相较之下,黑麦草对土壤DOC流失的截获率仅为23.34%,与其较高的C/N比和较慢的腐解速率密切相关。尽管有研究<sup>[38]</sup>指出,短期种植禾本科绿肥可提高土壤DOC含量,但本研究中黑麦草对DOC流失的截获效果相对有限,主要归因于其缓慢的腐解进程和较高的C/N比,导致DOC的释放速率较低,从而减弱对土壤DOC流失的截获能力。本研究中绿肥

覆盖对地表径流DOC截获效果较弱,可能与降雨时期及绿肥生育期差异有关,即径流形成而绿肥覆盖尚未完全拦截高速流水。

值得注意的是,绿肥对减少SOC和DOC流失的贡献不仅在于碳固定,还在于其自身的碳输入与转化。绿肥植株腐解后转化为土壤有机质,是土壤碳库的重要来源。黑麦草等禾本科绿肥碳氮比较高,腐解周期较长,更利于形成稳定的碳组分;而毛叶苕子等豆科绿肥虽腐解较快,但其根系分泌物及残体有助于团聚体形成,保护有机碳免受矿化分解。

## 4 结论

1)3种绿肥覆盖措施均能有效阻控水土流失和有机碳流失。在水土保持方面,与清耕处理相比,地表径流流失阻控率为黑麦草(22.75%)>三叶草(21.06%)>毛叶苕子(10.56%);壤中流流失阻控率为黑麦草(41.21%)>三叶草(33.72%)>毛叶苕子(30.02%);土壤侵蚀阻控率为黑麦草(60.37%)>毛叶苕子(53.12%)>三叶草(41.87%)。

2)黑麦草的水土保持能力最好,其次是三叶草。径流系数削减率为黑麦草(38.74%)>三叶草(33.28%)>毛叶苕子(27.04%);土壤侵蚀模数削减率为黑麦草(61.04%)>毛叶苕子(55.28%)>三叶草(45.32%)。

3)在有机碳固持方面,与清耕处理相比,SOC截获率为三叶草(34.80%)>黑麦草(29.29%)>毛叶苕子(25.85%);DOC截获率为三叶草(24.63%)>黑麦草(23.34%)>毛叶苕子(4.59%),三叶草的有机碳固持能力最好,其次是黑麦草。

综合来看,根据不同的管理目标,选择具有相应优势的绿肥种类是防控紫色土坡地水土及有机碳流失的重要措施。

### 参考文献:

- [1] 张怡,何丙辉,王仁新,等.横坡和顺坡耕作对紫色土壤团聚体稳定性的影响[J].中国生态农业学报,2013,21(2):192-198.  
ZHANG Y, HE B H, WANG R X, et al. Effects of across-and along-slope ploughs on soil aggregate stability [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21 (2): 192-198.
- [2] 苏正安,张建辉,聂小军.紫色土坡耕地土壤物理性质空间变异对土壤侵蚀的响应[J].农业工程学报,2009,25(5):54-60.  
SU Z A, ZHANG J H, NIE X J. Response of spatial variability of soil physical properties to soil erosion in purple soil slope farmland [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(5): 54-60.
- [3] 李月臣,刘春霞,赵纯勇,等.三峡库区重庆段水土流失

- 的时空格局特征[J].地理学报,2008,63(5):502-513.
- LI Y C, LIU C X, ZHAO C Y, et al. Spatiotemporal features of soil and water loss in the Three Gorges Reservoir area of Chongqing [J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(5):502-513.
- [4] HUA K K, ZHU B, WANG X G, et al. Forms and fluxes of soil organic carbon transport *via* overland flow, interflow, and soil erosion [J]. Soil Science Society of America Journal, 2016, 80(4):1011-1019.
- [5] 王全九,杨婷,刘艳丽,等.土壤养分随地表径流流失机理与控制措施研究进展[J].农业机械学报,2016,47(6):67-82.
- WANG Q J, YANG T, LIU Y L, et al. Review of soil nutrient transport in runoff and its controlling measures [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6):67-82.
- [6] KASSAM A, DERPSCH R, FRIEDRICH T. Global achievements in soil and water conservation: The case of Conservation Agriculture [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2014, 2(1):5-13.
- [7] LI L Y, CHEN P, WANG K L, et al. Gramineae-legumes mixed planting effectively reduces soil and nutrient loss in orchards [J]. Agricultural Water Management, 2023, 289:e108513.
- [8] 刘瑞.绿肥覆盖对紫色土坡耕地柑橘园水土保持及氮磷养分流失的影响[D].重庆:西南大学,2021.
- LIU R. Effects of green manure cover on soil and water conservation and nitrogen and phosphorus loss of citrus orchard on purple soil slop farmland [D]. Chongqing: Southwest University, 2021.
- [9] HANCOCK G R, KUNKEL V, WELLS T, et al. Soil organic carbon and soil erosion: Understanding change at the large catchment scale [J]. Geoderma, 2019, 343:60-71.
- [10] 聂小东,李忠武,王晓燕,等.雨强对红壤坡耕地泥沙流失及有机碳富集的影响规律研究[J].土壤学报,2013,50(5):900-908.
- NIE X D, LI Z W, WANG X Y, et al. Effect of rainfall intensity on soil loss from slope farmland of red soil and organic carbon enrichment in sediment [J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(5):900-908.
- [11] 陈晓安,杨洁,汤崇军,等.雨强和坡度对红壤坡耕地地表径流及壤中流的影响[J].农业工程学报,2017,33(9):141-146.
- CHEN X A, YANG J, TANG C J, et al. Effects of rainfall intensity and slope on surface and subsurface runoff in red soil slope farmland [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(9):141-146.
- [12] 常梦琦,胡瑞,徐佳文,等.红壤坡地新开发果园土壤有机碳迁移对不同管理措施响应[J].水土保持学报,2023,37(4):124-131.
- CHANG M Q, HU R, XU J W, et al. Response of soil organic carbon migration to different management measures in newly developed orchards in red soil slope [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(4):124-131.
- [13] 张蒙,胡桂清,张文太,等.长期植被覆盖对紫色土坡面减流减沙能力的影响[J].水土保持研究,2024,31(5):164-172.
- ZHANG M, HU G Q, ZHANG W T, et al. Effect of long-term vegetation coverage on runoff and sediment reducing ability of purple soil slope [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5):164-172.
- [14] 崔璨.紫色土柑橘园地绿肥覆盖的水土流失阻控及重金属污染防治效应[D].重庆:西南大学,2023.
- CUI C. Effects of green fertilizer cover on soil erosion prevention and heavy metal pollution control in purple soil citrus orchard [D]. Chongqing: Southwest University, 2023.
- [15] DE BAETS S, POESEN J, MEERSMANS J, et al. Cover crops and their erosion-reducing effects during concentrated flow erosion [J]. Catena, 2011, 85(3):237-244.
- [16] 姚单君,张钦,张爱华,等.不同绿肥种植下盛花期土壤水分和氮磷淋失特征[J].北方园艺,2021(21):86-93.
- YAO D J, ZHANG Q, ZHANG A H, et al. Characteristics of water leaching and nitrogen and phosphorus leaching in soil under different green manure in full bloom [J]. Northern Horticulture, 2021(21):86-93.
- [17] ZHOU Z C, SHANGGUAN Z P. The effects of ryegrass roots and shoots on loess erosion under simulated rainfall [J]. Catena, 2007, 70(3):350-355.
- [18] LI H Y, ZHU N Y, WANG S C, et al. Dual benefits of long-term ecological agricultural engineering: Mitigation of nutrient losses and improvement of soil quality [J]. Science of the Total Environment, 2020, 721:e137848.
- [19] SILLER A R S, ALBRECHT K A, JOKELA W E. Soil erosion and nutrient runoff in corn silage production with Kura clover living mulch and winter rye [J]. Agronomy Journal, 2016, 108(3):989-999.
- [20] NADERI M N, SADEGHI S H, ERFANZADEH R, et al. Deciphering runoff and soil loss processes during various phenological stages of *Trifolium pratense* at small plot scale [J]. Soil Science Society of America Journal, 2025, 89(4):e70100.
- [21] 魏艳,刘有斌,刘泉宏,等.紫色土区拉巴豆和紫花苜蓿根-土复合体抗剪性能研究[J].草业学报,2023,32(8):82-90.
- WEI Y, LIU Y B, LIU X H, et al. Study on shear strength of root-soil composite of *Dolichos lablab* and *Medicago sativa* in purple soil region [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(8):82-90.

- [22] 张翼. 间作对紫色土坡耕地油茶林水土保持及氮磷养分流失的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2024.  
ZHANG Y. Effects of intercropping on soil and water conservation and nitrogen and phosphorus nutrient loss in oil tea forests on purple soil slope cropland[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2024.
- [23] 郑宇, 李力, 丁文峰. 差异雨型下水土保持措施对紫色土坡面产流产沙的影响[J]. 长江科学院院报, 2025, 42(6): 87-93.  
ZHENG Y, LI L, DING W F. Effect of soil and water conservation measures on runoff and sediment yield from purple soil slopes under different rainfall patterns[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2025, 42(6): 87-93.
- [24] YAN Y J, HU Z Y, WANG L J, et al. Impact of extreme rainfall events on soil erosion on karst Slopes: A study of hydrodynamic mechanisms[J]. Journal of Hydrology, 2024, 638: e131532.
- [25] CHEN H, ZHANG X P, ABLA M, et al. Effects of vegetation and rainfall types on surface runoff and soil erosion on steep slopes on the Loess Plateau, China [J]. Catena, 2018, 170: 141-149.
- [26] MÁRQUEZ-GARCÍA F, HAYAS A, PEÑA A, et al. Influence of cover crops and tillage on organic carbon loss in Mediterranean olive orchards [J]. Soil and Tillage Research, 2024, 235: e105905.
- [27] 薄晶晶, 王俊, 付鑫. 两种绿肥腐解及其碳氮养分释放动态特征[J]. 生态科学, 2019, 38(6): 37-45.  
BO J J, WANG J, FU X. Decomposition and carbon nitrogen nutrient releases of two green manures[J]. Ecological Science, 2019, 38(6): 37-45.
- [28] LEDO A, SMITH P, ZERIHUN A, et al. Changes in soil organic carbon under perennial crops [J]. Global Change Biology, 2020, 26(7): 4158-4168.
- [29] SIDDIQUE I A, GRADOS D, CHEN J, et al. Soil organic carbon stock change following perennialization: A meta-analysis[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2023, 43(5): e58.
- [30] 单俏. 种植绿肥对三峡库区柑橘园土壤有机碳的固持及抗蚀性的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2024.  
SHAN Q. Impact of applying green manure on citrus orchards' anti-erodibility and soil organic carbon retention in the three gorges reservoir area [D]. Chongqing: Southwest University, 2024.
- [31] THIÉBEAU P, GIRARDIN C, RECOUS S. Water interception and release of soluble carbon by mulches of plant residues under contrasting rain intensities [J]. Soil and Tillage Research, 2021, 208: e104882.
- [32] 熊子怡, 郑杰炳, 王丹, 等. 不同施肥条件下紫色土旱坡地可溶性有机碳流失特征[J]. 环境科学, 2021, 42(2): 967-976.  
XIONG Z Y, ZHENG J B, WANG D, et al. Characteristics of dissolved organic carbon loss in purple soil sloping fields with different fertilization treatments [J]. Environmental Science, 2021, 42(2): 967-976.
- [33] 何淑勤, 宫渊波, 武万华, 等. 不同坡度下玉米生长期紫色土坡面径流及其可溶性有机碳流失特征[J]. 水土保持学报, 2019, 33(1): 91-97.  
HE S Q, GONG Y B, WU W H, et al. Characteristics of runoff and dissolved organic carbon loss in purple soil with different slope gradients during maize growth stages [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(1): 91-97.
- [34] LIU X J, FU Z Y, ZHANG W, et al. Soluble carbon loss through multiple runoff components in the shallow subsurface of a karst hillslope: Impact of critical zone structure and land use [J]. Catena, 2023, 222: e106868.
- [35] 刘业萍, 毛云飞, 胡艳丽, 等. 苹果园生草对土壤微生物多样性、酶活性及碳组分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(10): 1792-1805.  
LIU Y P, MAO Y F, HU Y L, et al. Effects of grass planting in apple orchard on soil microbial diversity, enzyme activities and carbon components [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, 27(10): 1792-1805.
- [36] 张荣琴, 刘辰, 李夏浩祺, 等. 渭北果园绿肥腐解溶解性有机物的释放特征[J]. 草业科学, 2021, 38(8): 1459-1468.  
ZHANG R Q, LIU C, LI X, et al. Characteristics of dissolved organic matter release during green manure decomposition [J]. Pratacultural Science, 2021, 38(8): 1459-1468.
- [37] 洪莉, 陈令会, 曹锦萍, 等. 南方桃园不同绿肥的腐解及养分释放规律研究[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(11): 294-297.  
HONG L, CHEN L H, CAO J P, et al. Study on characteristics of decomposing and nutrients releasing of different green manures in southern orchards [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(11): 294-297.
- [38] ZHOU X Q, CHEN C R, LU S B, et al. The short-term cover crops increase soil labile organic carbon in southeastern Australia [J]. Biology and Fertility of Soils, 2012, 48(2): 239-244.