

和怡萱, 潘正阳, 李昭君, 陈展鹏, 王小燕, 陈方鑫, 朱广宇. 果园绿肥覆盖对土壤抗蚀性的影响及其季节变化特征[J]. 土壤学报, 2026,

HE Yixuan, PAN Zhengyang, LI Zhaojun, CHEN Zhanpeng, WANG Xiaoyan, CHEN Fangxin, ZHU Guangyu. Effects of Green Manure Mulching on Soil Erosion Resistance in Orchards and Its Seasonal Variation Characteristics[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

果园绿肥覆盖对土壤抗蚀性的影响及其季节变化特征*

和怡萱^{1,2}, 潘正阳^{1,2}, 李昭君^{1,2}, 陈展鹏^{1,2†}, 王小燕^{1,2},
陈方鑫^{1,2}, 朱广宇²

(1. 西南大学水土保持生态修复重庆市重点实验室, 重庆 400716; 2. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716)

摘要: 三峡库区土壤侵蚀严重, 绿肥覆盖有助于改善土壤结构、提升抗蚀性。然而, 绿肥对土壤抗蚀性的调控机制受植被特性与降雨分布等因素影响, 季节性响应尚不清晰, 明确不同覆盖处理对土壤抗蚀性的季节响应特征, 对库区筛选适宜绿肥具有重要意义。基于此, 本研究以三峡库区典型柑橘果园为对象, 设置清耕、白花三叶草和早熟禾三种覆盖处理, 于4月、6月、8月和10月测定各处理下植被特性、土壤理化性质及6项土壤抗蚀性指标, 并以6个抗蚀性指标构建土壤抗蚀性能综合指数(Comprehensive Soil Erosion Resistance Index, CSRI), 进一步定量评估不同绿肥覆盖对土壤抗蚀性的影响。结果表明, 不同覆盖处理下土壤抗蚀性呈现出明显的季节变化规律, 4—6月时土壤抗蚀性最强, 8月受到高温和强降水影响, 抗蚀性下降, 10月回升但未达峰值。与清耕相比, 绿肥显著改善土壤理化性质, 早熟禾、白花三叶草覆盖下CSRI分别为清耕的1.94倍、2.33倍。多元统计分析表明, CSRI主要受植被特性与土壤养分共同驱动, 关键因子为根质量密度(RMD)、土壤全氮(TN)和有机碳(SOC)。绿肥覆盖能显著改善土壤结构和提升土壤抗蚀性, 其中早熟禾的覆盖效果优于白花三叶草。

关键词: 土壤抗蚀性; 三峡库区; 柑橘园; 绿肥; 季节变化

中图分类号: S157.1 **文献标志码:** A

Effects of Green Manure Mulching on Soil Erosion Resistance in Orchards and Its Seasonal Variation Characteristics

HE Yixuan^{1,2}, PAN Zhengyang^{1,2}, LI Zhaojun^{1,2}, CHEN Zhanpeng^{1,2†}, WANG Xiaoyan^{1,2}, CHEN Fangxin^{1,2}, ZHU Guangyu²

(1. Chongqing Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Ecological Restoration, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China)

* 国家自然科学基金项目(41701246)、重庆市自然科学基金项目(CSTB2023NSCQ-MSX0117)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(XDJK2018B042)共同资助。Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.41701246), the Chongqing Natural Science Foundation (No.CSTB2023NSCQ-MSX0117) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.XDJK2018B042)

†通讯作者 Corresponding author, E-mail: zhan2013@swu.edu.cn

作者简介: 和怡萱(1999-), 女, 云南昆明人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀和小流域生态恢复。Email: h990424@163.com

收稿日期: 2025-07-28; 收到修改稿日期: 2026-06-01; 网络首发日期(www.cnki.net)

Abstract: 【Objective】 Soil erosion is serious in the Three Gorges Reservoir area, and green manure mulching can help improve soil structure and enhance erosion resistance. However, the regulation mechanism of green manure on soil erosion resistance is affected by vegetation characteristics and rainfall distribution, and the seasonal response is not clear. Therefore, it is important to clarify the seasonal response characteristics of different mulching treatments on soil erosion resistance, and to screen suitable green manure in the reservoir area. 【Method】 This study used typical citrus orchards in the Three Gorges Reservoir Area as the research objects and set up three mulching treatments: clear tillage, white clover, and Kentucky bluegrass. The vegetation characteristics, soil physical and chemical properties, and six soil erosion resistance indicators under each treatment were measured in April, June, August, and October. The Comprehensive Soil Erosion Resistance Index (CSRI) was constructed with six erosion resistance indicators to further quantitatively evaluate the influence of different green manure coverages on soil erosion resistance.

【Result】 The results showed that soil erosion resistance under different mulching treatments showed seasonal variation rules, with the strongest soil erosion resistance in April-June, declining in August under the influence of high temperature and heavy precipitation, and rebounding but not reaching the peak in October. Compared with clean tillage, green manure significantly improved soil physicochemical properties, and CSRI under Kentucky bluegrass and white clover cover was 1.94 and 2.33 times higher than that of clean tillage, respectively. Multivariate statistical analysis showed that CSRI was mainly driven by vegetation characteristics and soil nutrients together, and the key factors were root weight density (RMD), soil total nitrogen (TN) and organic carbon (SOC). 【Conclusion】 These results show that green manure mulching significantly improves soil structure and enhances soil erosion resistance, and the effect of Kentucky bluegrass cover is superior to that of white clover.

Key words: Soil erosion resistance; Three Gorges Reservoir area; Citrus orchards; Green manure; Seasonal variation

土壤侵蚀不仅导致土壤退化和肥力下降,还可能引发水体污染,威胁生态系统平衡^[1]。三峡库区主要为紫色土,母质风化快、结构性差、有机质含量低,易受降雨冲刷,水土流失问题突出^[2]。柑橘是库区主要经济作物,果园多分布于坡耕地,长期以来的机械化耕作与不合理的果园管理模式进一步削弱土壤结构稳定性,加剧侵蚀风险^[3]。绿肥作为生态覆盖措施,能够显著改善土壤结构,已在果园中逐步应用^[4]。然而,土壤抗蚀性受到绿肥植被特性和季节性降水的影响,不同绿肥在不同生育阶段对土壤结构与养分的调控能力存在差异,而降雨过程则可能加剧或缓解土壤侵蚀风险。了解绿肥覆盖下土壤抗蚀性的季节变化特征,对于科学评估和选择果园管理措施具有重要意义。

绿肥覆盖通过调控土壤理化性质进而影响土壤抗蚀性^[5-6]。Sultani 等^[7]研究表明,绿肥种植可显著改善土壤物理性状,使容重降低约 5%,总孔隙度提高约 8%;Ramos 等^[8]指出,间作绿肥有助于提高土壤水稳性团聚体的稳定性、土壤有机碳含量和全氮含量。植被根系通过改善土壤结构、增加土壤颗粒间的黏结力,从而提升抗蚀能力^[9],其分泌物不仅促进有机质积累,还可调节土壤 pH^[10]。Yang 等^[11]发现,植物光合产物的 5%~30%以根系分泌物的形式释放,成为有机碳的重要来源。植被不同生长阶段对土壤理化性质具有显著影响^[10]。Wang 等^[12]研究表明,从植被早期至成熟阶段,土壤有机碳、全氮、速效养分含量增加,容重降低,持水能力增强,土壤质量整体改善;且植被初期改善作用集中在表层,随着根系生长逐渐深入下层土壤^[13]。此外,季节性降水也会影响绿肥覆盖对抗蚀性的调控效果。降雨是土壤侵蚀的主要驱动因素之一^[14]。重庆地区降雨量大且时间分布不均,致使柑橘园在不同季节的侵蚀状况存在较大差异。在强降雨频发的时段,绿肥作物的覆盖度、生物量积累状况和根系发育,

决定了其对降雨冲刷的缓冲能力。同时,绿肥作物通过调节微生物群落与碳、氮循环,进一步改善土壤结构稳定性与抗蚀性^[15]。

综上所述,土壤抗蚀性受到绿肥品种、生长阶段与季节性降水等因素的共同影响,单一指标难以充分揭示其抗蚀特征,因此需构建多指标综合评价体系以提升评估效果。土壤可蚀性 K 因子是 USLE 和 REUSLE 模型的核心部分,被广泛地应用于评估土壤可蚀性^[16]。但 K 因子具有较强的区域适应性,其评价结果可能存在一定局限性^[17]。因此,基于前人对土壤抗蚀性的研究成果,选取土壤黏结力(Coh)、贯入阻力(PR)、饱和导水率(K_s)、平均质量直径(MWD)、土壤结构稳定性指数(SSi)、土壤可蚀性(K)因子作为土壤抗蚀性评价指标^[18-19]。通过对 6 个抗蚀性指标进行加权平均法生成土壤抗蚀性能综合指数(CSRI),可更直观、全面地评价土壤抗蚀性。

尽管已有研究关注绿肥的水土保持效应,但缺乏对土壤抗蚀性的系统性评价体系,且对不同绿肥品种在生长各阶段对土壤理化性质的调控效应关注不足。同时,现有研究对季节动态关注不足,未能揭示降雨节律与植被生长周期对覆盖效果和抗蚀性之间的响应。因此,本研究以三峡库区典型柑橘园为对象,比较不同覆盖措施下植被特性、土壤理化性质与抗蚀性指标的季节变化特征,旨在揭示绿肥调控土壤抗蚀性的关键因子与季节性响应规律,以期为三峡库区紫色土柑橘园选择适宜的覆盖管理措施,为促进柑橘产业的可持续发展提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于重庆市忠县新立镇(30°16'10"N, 107°37'24"E),地处三峡库区腹地,属中亚热带湿润季风气候区。区域地势以丘陵为主,平均海拔为 462.75 m,坡耕地分布广泛。多年平均气温 17℃,多年平均降水量 1 279 mm,降雨集中在 5—8 月。土壤类型为紫色土,成土母质为侏罗系紫色砂岩与泥岩的风化产物,母质疏松,易发生水土流失。新立镇属典型的柑橘主产区,果园密集,土地利用以经济林地为主。

柑橘园内的柑橘树均为 2006 年种植,2018 年后陆续嫁接,并于 2015 年开始种植绿肥,果树在 2—3 月施基肥(高氮复合肥)、6—7 月施追肥(复合肥)、9—10 月施追肥(高钾复合肥),以及 12 月—次年 1 月采果后施基肥(柑橘皮渣有机肥),其余管理方式均统一。园内覆盖草种以豆科植物白花三叶草(*Trifolium repens* L.)和禾本科植物早熟禾(*Poa annua* L.)为主。试验设置三个处理:清耕(CK)、白花三叶草覆盖(C1)和早熟禾覆盖(C2),基本情况如表 1 所示。其中,清耕处理样地全年以自然生草为主,每月进行一次机械除草。

表 1 研究区不同处理的基本概况

Table 1 Basic information of different treatments

处理 Treatment	海拔 Altitude /m	坡度 Slope /°	坡向 Slope direction	树龄 Age of trees/a	面积 Area /m ²	果树密度	黏粒 Caly/%	粉粒 Silt/%	砂粒 Sand/%
						Density of fruit trees / (plants ·hm ⁻²)			
清耕 ^① (CK)	455	8~10	N	18	520	460	3.08	78.07	18.85
白花三叶草覆盖 ^②	457	8~10	N	18	610	460	3.83	80.11	16.07

(C1)									
早熟禾覆盖 [®]	467	8~10	N	18	640	460	4.81	80.90	14.29
(C2)									

① Clean tillage, ② White clover mulching, ③ Green manure

1.2 植被特性测定

每个样地选取 3 个具有代表性的 1 m×1 m 样方, 测量植被覆盖面积并计算平均覆盖度; 在每个样方内剪取样方内地上部分植被, 装袋带回实验室, 60°C 烘干至恒重后称量干重(g)。使用 500 cm³ 环刀 (直径 10 cm, 高 5 cm) 采集原状土样, 筛洗分离根系后同样烘干至恒重, 称量根系干重 (mg), 以计算根质量密度^[20]。根质量密度计算公式如下:

$$RMD = \frac{RM}{V} \quad (1)$$

式中, RMD 为根质量密度 (mg·cm⁻³), RM 为环刀内植物根系的烘干生物量 (mg), V 为环刀本身的体积 (cm³)。

1.3 土壤理化性质测定

在每个样方内使用 100 cm³ 环刀 (直径 5 cm, 高 5 cm) 在表土层采集原状土样, 采用环刀法测定土壤容重和孔隙度^[21]。同样地采用五点取样法采集 2 kg 表层 (0~10 cm) 散土样品, 去除石砾和根系后放在室外阴凉通风处自然风干, 以备测定土壤机械组成、水稳性团聚体、土壤有机碳、全氮及 pH。土壤机械组成采用激光粒度仪 (Mastersizer 3000) 进行测定 (美国制土壤分类标准: 砂粒为 2~0.05 mm, 粉粒为 0.05~0.002 mm, 黏粒为 <0.002 mm)^[22]; 水稳性团聚体采用 Yoder 湿筛法测定^[23] (套筛为 5、2、1、0.5、0.25 mm); 土壤有机碳采用重铬酸钾外加热法测定^[24]; 土壤全氮含量采用凯氏定氮仪测定; 土壤 pH 采用 pH 酸度计 (FE28-CN) 测定。

1.4 土壤抗蚀性指标测定及土壤抗蚀性能综合指数 (CSRI) 计算

根据前人的研究结果, 并结合本研究区的特点, 选取土壤黏结力、贯入阻力、饱和导水率、水稳性团聚体平均质量直径、土壤结构稳定性指数、土壤可蚀性 K 因子作为土壤抗蚀性指标。本研究采用 Eijkkamp 型微黏结力仪测定土壤黏结力, 采用 TYD-1 贯入仪测定土壤贯入阻力。在每个样方框附近选取未受扰动的地表进行测定, 每个样地选取 18 个测点, 每个测点的面积约为 0.0025 m²。将每 6 个测点的测定结果合并作为一个重复, 共得到 3 个重复测值用于统计分析。

基于上述测定的各粒级水稳性团聚体含量, 进一步计算水稳性团聚体平均质量直径 (MWD), 计算公式如下:

$$MWD = \sum_{i=1}^n X_i W_i \quad (2)$$

式中, MWD 为平均质量直径; X_i 为 i 粒级团聚体的平均直径 (mm); W_i 为 i 粒级团聚体的百分含量 (%)。

土壤饱和导水率 (Ks) 采用定水头法进行测定, 计算公式如下:

$$K_s = \frac{QL}{AtH} \quad (3)$$

式中, Ks 为土壤饱和导水率; Q 为水的流量; A 为土壤的横截面积 (mm²); t 为入渗时间 (min); H 为水头差 (mm); L 为土样的高度 (mm)。

土壤结构稳定性指数 (Soil structural stability index, SSI) 的计算公式如下:

$$SSI = \frac{SOM}{Clay + Silt} \times 100 \quad (4)$$

式中, SSI 为土壤结构稳定性指数, SOM、Clay、Silt 分别为有机质 (g·kg⁻¹)、黏粒 (%)、粉粒 (%) 含量。

土壤可蚀性 K 因子计算公式如下:

$$K_{\text{EPIC}} = \{0.2 + 0.3 \exp[-0.0256 \text{SAN}(1 - \text{SIL}/100)]\} \left(\frac{\text{SIL}}{\text{CLA} + \text{SIL}} \right)^{0.3} \left(1.0 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right) \left(1.0 - \frac{0.7\text{SN1}}{\text{SN1} - \exp(-5.51 + 22.9\text{SN1})} \right) \quad (5)$$

式中, SAN、SIL、CLA 和 C 分别为砂粒(%)、粉粒(%)、黏粒(%)和有机碳含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), $\text{SN1} = 1 - \text{SAN}/100$ 。

$$K = -0.01383 + 0.5158 K_{\text{EPIC}} \quad (6)$$

式中, K_{EPIC} 为 EPIC 模型计算的土壤可蚀性因子, K 为修正后的土壤可蚀性因子。

基于上述 6 个抗蚀性指标, 结合主成分分析(PCA)法确定的权重系数, 通过加权平均法计算得到土壤抗蚀性能综合指数(CSRI), 计算公式如下:

$$\text{CSRI} = \sum_{i=1}^n K_i C_i \quad (7)$$

式中, CSRI 为土壤抗蚀性能综合指数; K_i 为第 i 个土壤抗蚀性能指标的权重; C_i 为第 i 个土壤抗蚀性能指标的隶属度^[20, 25]。

1.5 数据处理

使用 Microsoft Excel 2022 进行数据整理、计算, 使用 SPSS 24.0 软件对每月不同覆盖处理下的植被特性、土壤理化性质、土壤抗蚀性指标及抗蚀性能综合指数(CSRI)进行单因素方差分析, 采用 Waller-Duncan 法进行事后多重比较, 使用 Pearson 相关分析法对各因素指标之间的相关关系进行分析, 使用 R Studio 4.5.1 开展偏最小二乘回归(PLSR)和结构方程模型(SEM)分析, 使用 Origin 2024 作图。

2 结 果

2.1 植被特性和土壤理化性质的季节变化特征

不同覆盖处理对植被特性和土壤物理性质影响显著。由表 2 可知, 绿肥覆盖下植被覆盖度、地上生物量、根质量密度在各月均显著高于 CK 处理。C1、C2 处理下, 植被覆盖度的变化范围分别为 73.66%~99.28%、67.89%~97.29%; 地上生物量的变化范围分别为 65.22~156.35 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 、67.89~97.29 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$; 根质量密度的变化范围分别为 0.23~0.46 $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、0.29~0.52 $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。值得注意的是, 10 月时, C1 处理下植被覆盖度和地上生物量显著高于 C2, 但根质量密度显著低于 C2。

由表 3 可知, 各个覆盖处理下, 土壤容重无显著差异。绿肥覆盖下, 土壤孔隙度显著高于 CK 处理。各个处理下 >5 mm 粒级团聚体在 6 月和 10 月时无显著差异, C1 处理下 <0.25 mm 粒级团聚体在 6 月和 8 月时显著高于绿肥覆盖。

表 2 不同覆盖处理下植被特性的季节变化特征及差异

Table 2 Characteristics of seasonal changes and differences in vegetation characteristics under different mulching

treatments				
时间 Time	处理 Treatment	植被覆盖度 Fractional vegetation cover/%	地上生物量 Above-ground biomass/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	根质量密度 Root mass density/ ($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3}$)
4 月 April	CK	26.89±4.33b	8.89±2.69b	0.07±0.00b
	C1	98.54±0.74a	152.50±3.85a	0.41±0.05a
	C2	96.00±1.29a	163.10±5.35a	0.47±0.05a

土 壤 学 报
Acta Pedologica Sinica

6 月	CK	27.87±1.13b	10.47±0.22b	0.13±0.03b
June	C1	95.21±0.85a	113.69±4.19a	0.37±0.05a
	C2	92.00±5.17a	123.16±4.93a	0.39±0.00a
8 月	CK	23.12±7.17b	10.08±0.83b	0.11±0.03b
August	C1	83.49±4.92a	73.61±3.91a	0.22±0.03a
	C2	88.00±1.63a	77.11±3.17a	0.25±0.02a
10 月	CK	17.07±4.72c	6.65±0.69c	0.03±0.01c
October	C1	76.32±2.66a	60.75±4.47a	0.20±0.03b
	C2	66.35±1.54b	50.37±3.65b	0.27±0.02a

注：表中数据为平均值±标准误；相同月份不同小写字母表示不同植被覆盖处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。下同。Note: The data in the table are mean ± standard error; different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) between different vegetation coverin the same month. The same below.

表 3 不同覆盖处理下土壤物理性质季节变化特征及差异

Table 3 Characteristics of seasonal changes and differences in soil physical properties under different mulching treatments

时间 Time	处理 Treatment	容重 Bulk density/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	总孔隙度 Total porosity/%	水稳性团聚体粒径分布 Particle size distribution of water-stable agglomerates/%					
				> 5 mm	5~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	<0.25 mm
4 月	CK	1.46±0.05a	39.96±0.36b	15.74±0.93c	10.6±0.19a	6.11±0.57a	3.71±0.13a	2.26±0.24b	11.58±0.89a
April	C1	1.40±0.05a	46.59±1.25a	18.04±0.20b	9.31±0.58a	3.72±0.27b	2.46±0.06b	4.40±0.79a	12.06±1.30a
	C2	1.38±0.01a	48.72±1.44a	23.92±1.27a	6.10±1.03b	3.25±0.26b	4.74±0.94a	2.27±0.49b	9.73±1.13a
6 月	CK	1.43±0.03a	40.95±1.45b	21.54±0.68a	8.30±1.37a	3.78±0.27b	2.54±0.08a	2.34±0.46a	11.51±1.53a
June	C1	1.43±0.05a	45.05±1.73a	25.78±5.56a	6.06±1.12a	4.36±0.68a	4.21±1.47a	3.29±2.18a	6.29±2.69b
	C2	1.34±0.05a	46.66±1.77a	26.96±2.09a	8.32±0.68a	3.36±0.11b	3.07±0.55a	2.62±0.26a	5.67±0.79b
8 月	CK	1.49±0.04a	37.16±1.76b	13.60±1.23c	8.98±0.43a	4.92±0.42a	4.71±0.61a	3.93±0.56a	13.87±0.49a
August	C1	1.47±0.05a	45.03±1.30a	15.96±0.43b	8.65±0.66ab	6.47±0.49c	5.76±0.34a	4.46±0.41a	8.71±1.02b
	C2	1.48±0.03a	45.93±1.23a	18.53±1.07a	7.87±0.25b	4.31±0.92b	4.94±0.85a	4.41±1.16a	9.93±1.50b
10 月	CK	1.54±0.05a	39.76±1.03b	13.88±1.80a	7.16±0.79a	4.24±0.77a	4.89±0.61a	4.31±1.05a	15.52±0.88a
October	C1	1.53±0.02a	42.27±0.42a	18.46±2.25a	5.25±0.13b	3.15±0.70a	3.54±1.05a	3.60±1.22a	16.01±1.73a
	C2	1.50±0.01a	43.32±1.80a	15.31±2.72a	4.70±0.38b	3.58±0.64a	4.64±1.13a	4.60±0.43a	17.17±0.98a

由图 1a 和图 1b 可知所示, 绿肥覆盖处理的土壤有机碳 (SOC) 和全氮 (TN) 含量均显著高于 CK 处理, 且各个处理下 SOC 和 TN 呈现出明显的季节变化特征, C1 处理的 SOC 含量在 4 月达到峰值 $13.47 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而 C2 处理的 SOC 含量则在 6 月升至最高值 $19.43 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 但至 8 月两者分别显著下降 25.93% 和 38.60%; 相比之下, CK 处理的 SOC 含量全年处于较低水平, 10 月时降至最低值 ($7.86 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。绿肥覆盖的土壤全氮含量在 4—6 月持续上升, 并于 6 月时分别达到峰值 $1.97 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $1.72 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 但至 8 月不同绿肥品种间的 TN 含量差异不显著。

由图 1c 可知, 不同覆盖处理下, 土壤碳氮比 (C/N) 在 6.34~10.17 范围内呈季节性波动变化。其中, C1 处理的 C/N 在 6 月达到峰值 (10.17), 显著高于其他处理 ($P < 0.05$), 但 8 月后开始下降。各处理间变化趋势存在差异: 与 4 月相比, CK 处理的 C/N 在 6 月上升 23.70%, 而早熟禾覆盖处理则在 8 月下降 26.45%。在 8 月和 10 月时, CK 处理的 C/N 显著高于 C1、C2 处理。

由图 1d 可知, 不同覆盖处理下, 土壤 pH 的变化范围为 6.79~8.38, 各处理均表现出明显的季节性变化特征。具体而言, 8 月份所有处理的 pH 均出现小幅下降, 其中 CK 处理的降幅最为显著, 但在 10 月回升至 8.22。相比之下, C2 处理的 pH 呈现持续上升趋势, 从 4 月的 6.85 逐渐升高至 10 月的 8.02。C1 处理的 pH 变化趋势则介于两者之间。

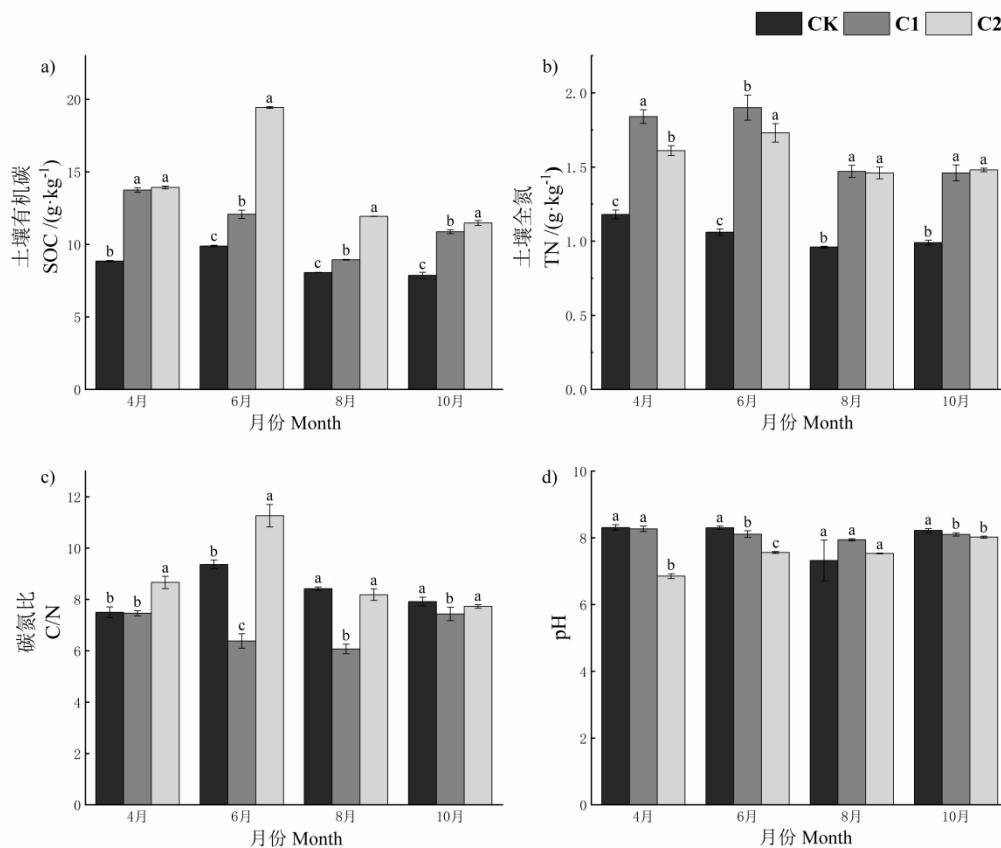


图 1 不同覆盖处理下土壤养分的季节变化特征及差异

Fig. 1 Characteristics of seasonal changes and differences in soil nutrients under different mulching treatments

2.2 绿肥覆盖下土壤抗蚀性指标的季节变化特征

不同覆盖处理下, 土壤抗蚀性指标均呈现出明显的季节变化规律。由图 2a 可知, C1、C2 处理的土壤黏结力 (Coh) 在 4 月时分别达到最高值 102.74、98.37 KPa, 后呈现下降趋

势,早熟禾覆盖下 Coh 波动较白花三叶草小。4 月、6 月和 10 月时 C1、C2 处理的 Coh 无显著差异,8 月时 C2 处理的 Coh 显著高于 C1。CK 处理下, Coh 显著低于绿肥覆盖处理。由图 2b 可知, CK 处理下, 土壤贯入阻力 (PR) 始终较高, C1、C2 处理在 4 月、8 月和 10 月时 PR 差异不显著, 6 月时 C2 显著低于 C1。10 月时, CK 处理的 PR 达到最高值 209.17 kPa。由图 2c 可知, CK 处理下, 土壤饱和导水率 (K_s) 显著低于绿肥覆盖处理。且不同绿肥品种间 K_s 差异不显著。4 月时饱和导水率较高, 分别达到 0.67、0.61 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$, 之后呈现下降趋势。由图 2d 可知, C1 处理的平均质量直径 (MWD) 在 6 月时达到最高值 5.02 mm, C2 处理在 4 月时达到最高值 5.18 mm, CK 处理的 MWD 均显著低于绿肥覆盖。由图 2e 可知, C2 处理的土壤结构稳定性指数 SSI 在 6 月时达到最高值 37.17, 后呈下降趋势, C2 处理的 SSI 显著高于白花三叶草。CK 处理下 SSI 显著低于绿肥覆盖, 且全年波动较小。由图 2f 可知, CK 处理的土壤可蚀性 K 因子全年均处于较高水平, 4 月、10 月时绿肥覆盖的 K 差异不显著, 6 月、8 月时 C2 处理的 K 显著低于 CK 和白花三叶草覆盖。C1 处理在 8 月时 K 较高, 与 CK 无显著差异。C2 处理的 K 在 6 月时达到最低值 0.22。

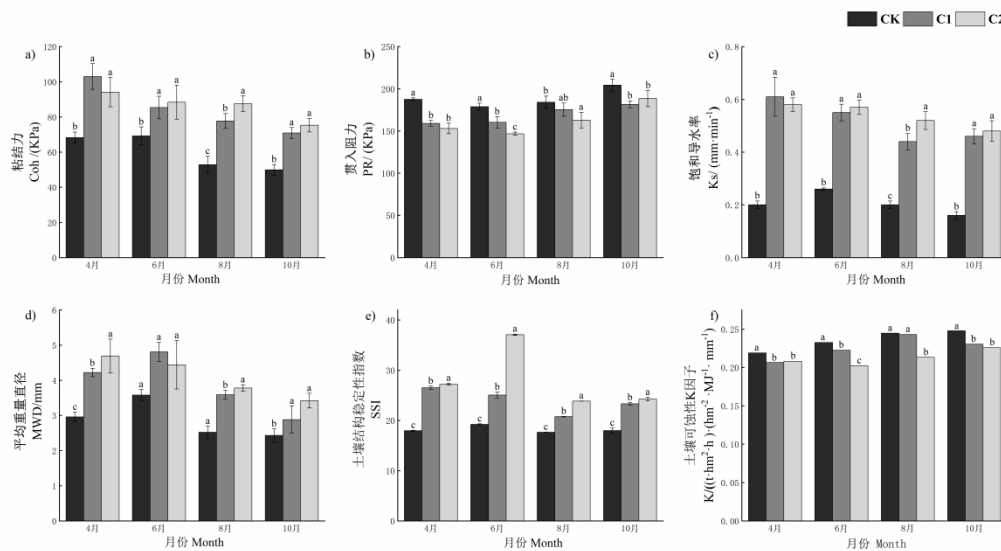


图 2 不同覆盖处理下土壤抗蚀性指标季节变化特征及差异

Fig. 2 Characteristics of seasonal changes and differences in soil erosion resistance indexes under different mulching treatments

2.3 绿肥覆盖下土壤抗蚀性能季节变化特征及其主控因素

2.3.1 土壤抗蚀性能的季节变化特征 由图 3 可知, 土壤抗蚀性能综合指数 (CSRI) 呈现出明显的季节变化规律。CK 处理下, CSRI 在 6 月时较高, 后呈现出下降趋势。C1 处理下, CSRI 在 4 月到 8 月时呈现出下降趋势, 10 月后小幅度回升。早熟禾覆盖下, CSRI 在 6 月时达到最高值, 并呈现下降趋势。绿肥覆盖的 CSRI 显著高于 CK 处理, 4 月、10 月时 C1、C2 处理的 CSRI 无显著差异, 但在 6 月、8 月时 C2 处理的 CSRI 显著高于 C1。

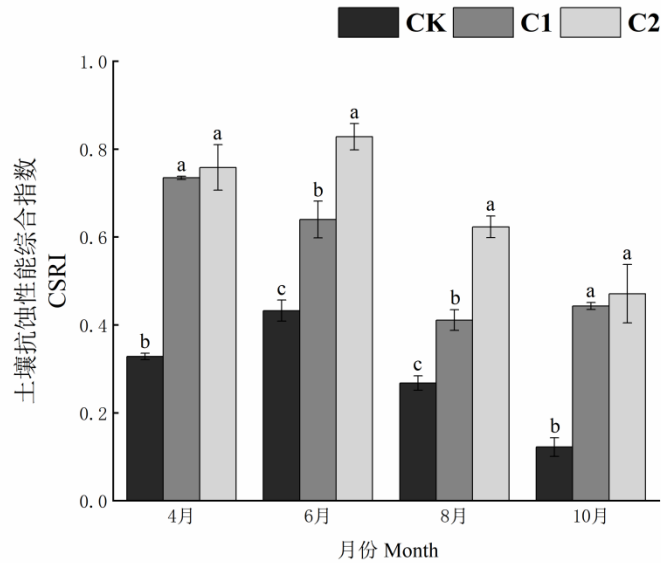


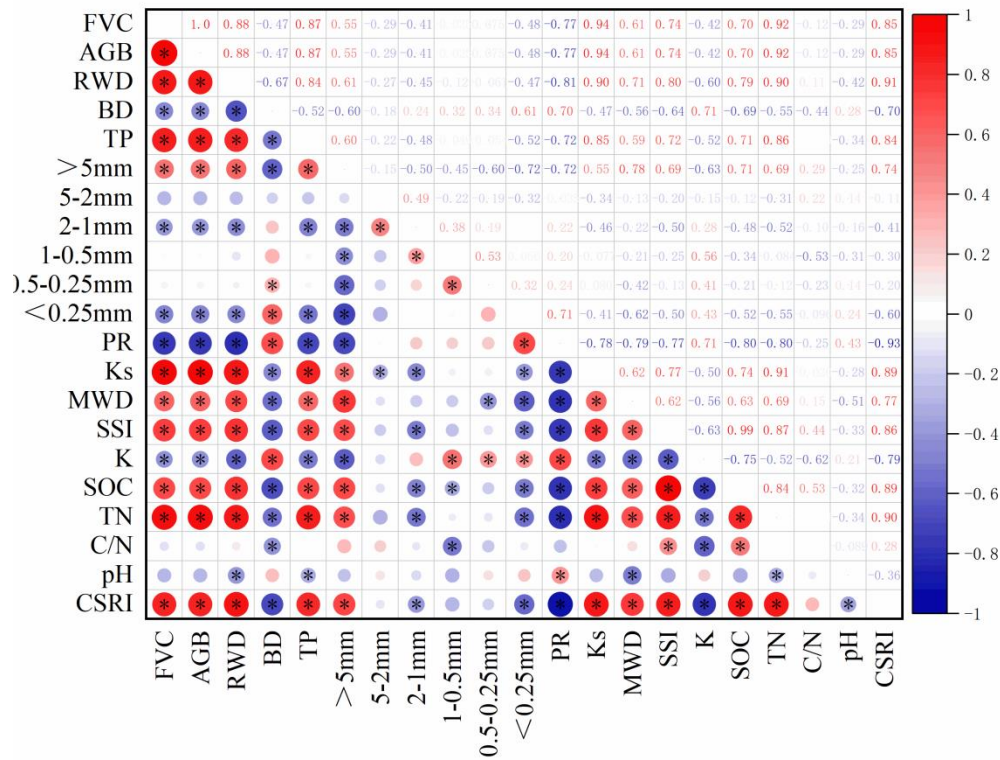
图 3 不同覆盖处理下土壤抗蚀性能综合指数季节变化特征及差异

Fig. 3 Characteristics of seasonal changes and differences in Comprehensive Soil Erosion Resistance Index (CSRI) index under different mulching treatments

2.3.2 影响土壤抗蚀性能的主控因素 在本研究中, 土壤可蚀性指标 Coh 、 K_s 、 MWD 和 SSI 与 FVC 、 AGB 、 RMD 、 SOC 、 TN 等植被特性及土壤理化性质指标呈显著正相关, 而与 BD 、 PR 显著负相关 (图 4)。此外, 还发现 FVC 、 AGB 、 RMD 与 SOC 、 TN 显著正相关 (表 3)。CSRI 与 FVC 、 AGB 、 RMD 、 TP 、 SOC 、 TN 呈显著正相关, 与 BD 、 PR 、 K 呈显著负相关。由于 CSRI 与大多数土壤性质显著相关。因此, 进一步进行 PLSR 模型, 以区分影响 CSRI 的主要因素。

PLSR 模型结果表明, 本研究测量的植被特性、土壤理化性质、抗蚀指标等解释了不同覆盖处理下柑橘园 CSRI 变化约 99.34%, 其中第一和第二组分的解释分别为 97.88% 和 1.20%。 RMD (1.365)、 TN (1.345)、 SOC (1.339)、 FVC (1.280)、 AGB (1.280)、 TP (1.251)、 $>5\text{ mm}$ 团聚体 (1.112)、 BD (1.052) 的投影变量重要度均大于 1.0, 说明这些影响因素对 CSRI 的变化具有显著影响。其中 RMD 最为关键, VIP 值最大。

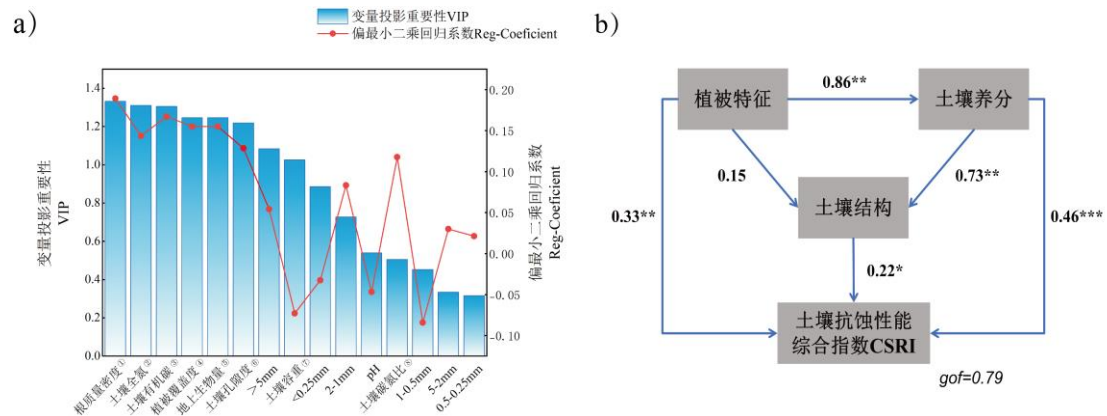
由于所有这些影响因素均是相互显著相关的。因此, 进一步采用结构方程模型 (SEM) 来揭示这些影响因素之间的相互作用对 CSRI 的影响。如图所示, SEM 模型拟合效果良好 ($gof=0.79$)。结果表明, 植被特性 (0.33**)、土壤养分 (0.46***)、土壤结构 (0.22*) 均对 CSRI 有直接影响, 其中植被特性与土壤养分对 CSRI 有极显著影响。除直接作用外, 植被特性通过增加土壤养分、改善土壤结构对 CSRI 产生间接影响。而土壤养分也可以通过改善土壤结构对 CSRI 产生间接影响。植被特性、土壤养分、土壤结构对 CSRI 的总效应分别为 0.90、0.62、0.22。



注：FVC 为植被覆盖度，AGB 为地上生物量，RMD 为根质量密度；BD 为容重，TP 为总孔隙度；SOC 为土壤有机碳含量，TN 为全氮含量，C/N 为碳氮比；Coh 为土壤黏结力，PR 为土壤贯入阻力，Ks 为土壤饱和导水率，MWD 为平均质量直径，SSI 为土壤结构稳定性指数，K 为土壤可蚀性 K 因子；CSRI 为土壤抗蚀性能综合指数，下同。* $P < 0.05$ Note: FVC is Fractional vegetation cover, AGB is above-ground biomass, RMD is root weight density; BD is bulk density, TP is total porosity; SOC is soil organic carbon content, TN is total nitrogen content, and C/N is the carbon to nitrogen ratio; Coh is soil cohesion, PR is soil penetration resistance, Ks is saturated hydraulic conductivity of the soil, MWD is mean weight diameter, SSI is the structural stability index of the soil, K is the soil erodibility K factor; CSRI is the soil erosion resistance composite index, the same below. * $P < 0.05$

图 4 植被特性、土壤理化性质、抗蚀性指标与 CSRI 的相关性

Fig. 4 Correlation analysis of vegetation characteristics, soil physical and chemical properties, and erosion resistance indexes with CSRI



注：图中英文对照：①根系质量密度（RMD）；②土壤全氮（TN）；③土壤有机碳（SOC）；④植被覆盖

度 (FVC)；⑤土壤孔隙度 (TP)；⑥地上生物量 (AGB)；⑦土壤容重 (BD)；⑧土壤碳氮比 (C/N)
图 5 基于偏最小二乘回归 (PLSR) 的 CSRI 主导因子分析 (a) 与基于结构方程模型 (SEM) 的土壤抗蚀
效应指数驱动路径解 (b)

Fig. 5 CSRI dominant factor analysis based on Partial Least Squares Regression (PLSR) (a) vs. Structural
Equation Modeling (SEM) based Soil Resistance Effect Index Driving Path Solution (b)

3 讨论

3.1 绿肥覆盖对果园土壤理化性质的影响

不同覆盖处理下土壤理化性质呈现出显著的季节性变化特征，主要受植被生长周期、气候条件及降水分布调控。在 4—6 月绿肥生长旺季，地上部快速积累生物量，根系通过缠绕与穿插方式改变土壤结构^[26]，进而可能降低土壤容重、增加孔隙度，促进土壤颗粒团聚。根系分泌物增强颗粒间黏结力，显著提高大团聚体比例与稳定性，并为微生物提供丰富碳源^[27]。同时，有机碳作为“胶结剂”，与团聚体形成和稳定之间存在相互促进的关系^[28]。进入 8 月，高温多雨加剧了侵蚀风险，绿肥的改良效应有所减弱。高温加速凋落物分解，导致有机质输入滞后；强降水引起氮素淋失加剧^[29]。然而，绿肥覆盖下的土壤孔隙度、大团聚体比例、有机碳与全氮含量仍显著高于清耕处理，表明绿肥在极端气候下仍具有一定缓冲作用。10 月绿肥植株逐渐衰退，地上部生长减缓，根系活性下降，微生物活动和有机质输入减少，导致团聚体稳定性及有机碳含量略有下降。相较于清耕处理，绿肥覆盖仍显著改善土壤结构与养分状况，表明其在土壤质量提升方面具有较强的持续效应。

不同覆盖处理间土壤理化性质差异显著。清耕处理由于缺乏植被覆盖和有机质输入，土壤透气性和持水性能较差，进而限制有机碳和全氮的积累。早熟禾对土壤理化性质的改良效果优于白花三叶草，这与张朋朋等^[30]研究结果不一致，可能是由于土壤类型不同导致的。早熟禾地上生物量较高，能够持续为土壤提供碳源，同时其具有较高的细根密度，根系更新快，地下碳输入显著^[31]。Demenois 等^[32]研究发现，细根长度还与 $>2\text{mm}$ 团聚体比例之间存在显著的正相关关系。而豆科绿肥通过根瘤固氮显著提高土壤全氮 (TN) 含量，增强了土壤氮素供应，且其根际分泌的碱性物质有助于中和酸性，提高土壤 pH^[33]。相比之下，禾本科绿肥残体分解释放有机酸，使早熟禾覆盖下的 pH 低于白花三叶草处理。在施肥条件一致下，清耕处理的 C/N 比显著高于白花三叶草覆盖，主要由于绿肥通过增加氮素输入、促进矿化，从而降低 C/N 比^[34]；而清耕缺乏有机补充，且夏季强降雨条件下易发生氮素淋溶，氮素损失大于有机碳，导致 C/N 比上升。Tian 等^[35]研究指出，坡地果园裸地 TN 流失率为 5.1%，远高于绿肥覆盖下的 1.2%，进一步体现了绿肥在养分保持与土壤养分平衡方面的重要作用。

3.2 绿肥覆盖对果园土壤抗蚀性指标的影响

不同覆盖处理下土壤抗蚀性指标呈现出显著的季节性变化特征。在 4—6 月绿肥生长高峰期，根系发育旺盛，植株覆盖率高，土壤结构稳定性达到全年最佳。此阶段黏结力显著增强，PR 值较低，MWD 和 SSI 升至全年最高水平，表明团聚体稳定、结构稳固；根系穿插也提高了土壤孔隙度，促进水分入渗，使饱和导水率 (K_s) 上升，K 因子降至最低，土壤抗蚀性最强。然而，进入 8 月后，重庆地区迎来高温强降雨期，土壤结构遭受扰动，抗蚀性指标整体下降。 K_s 下降，PR 和 K 值上升，MWD 与 SSI 略有降低，反映出高温加速有机质分解、强降雨冲击团聚体，并引起氮素和可溶性有机碳的淋失，可能会扰动土壤结构。10 月时，随着气温回落、绿肥进入衰退期，根系活性降低，结构指标有所回升但仍低于前期高峰。绿肥残体逐步分解，释放有机质，为土壤微生物提供碳源，进而促进微生物活动和土壤结构的恢复^[36]。此阶段 MWD、SSI、 K_s 等指标较 8 月有所改善，说明绿肥覆盖仍能维持一定的

结构完整性和抗蚀能力。

不同覆盖处理间土壤抗蚀性差异显著。清耕处理的团聚体稳定性较差,饱和导水率较低,尤其在降雨强度大、频次高时,裸露地表受外力扰动显著,土壤抗蚀能力显著减弱。绿肥覆盖能通过冠层削弱雨滴动能,降低侵蚀强度,同时提高地表粗糙度,降低径流速度,从而减少坡面产流与泥沙流失^[37]。Duan 等^[38]在红壤区发现,果园实施生草覆盖在极端降雨下能显著降低径流与泥沙产出;程子珍等^[39]研究发现,与清耕相比,生草覆盖径流量减少 44.3%,产流系数降低 3.3 个百分点。此外,植被根系通过物理和化学作用增强土壤结构稳定性。Gyssels 等^[9]研究表明禾本科植物形成的浅层密集须根系统,细根发达,能显著增强土壤颗粒间的黏结力,改善土壤结构。

3.3 绿肥覆盖对果园土壤抗蚀性能的影响

在皮尔逊相关分析中,CSRI 与植被特性指标的相关度均大于等于 0.85;在 PLSR 分析中,RMD 是 CSRI 的关键影响因子。结构方程表明植被不仅直接影响 CSRI,也可通过调控土壤结构和养分间接影响 CSRI。这表明绿肥覆盖通过多层级、交互作用影响土壤抗蚀性能。此外,PLSR 分析结果表明,土壤有机碳(SOC)和全氮(TN)被识别为影响抗蚀性的关键因子。此外,相关性分析结果表明,SOC 与 >5 mm 粒径团聚体含量呈显著正相关,而与 2~1 mm、1~0.5 mm、<0.25 mm 粒径团聚体含量呈显著负相关,这表明 SOC 有助于促进大团聚体的形成,提高土壤结构稳定性,同时稳定的团聚体能有效保护 SOC,减缓其矿化分解^[39]。作为调节土壤结构稳定性和微生物活性的核心驱动变量,土壤养分状况及其碳氮比的动态变化在提升土壤抗蚀能力的过程中发挥了重要作用。因此,进一步探讨 SOC 含量和 TN 含量对抗蚀性的具体影响,有助于深入理解绿肥覆盖改善 CSRI 的内在机制。

如图 6 所示,SOC 与 CSRI 呈显著正相关($R^2=0.91$),TN 与 CSRI 的相关性亦强($R^2=0.81$),但二者对 CSRI 的响应模式存在差异。图 6a 显示, SOC 与 CSRI 呈非线性关系,表现出边际效应递减:在 SOC 含量较低时,CSRI 快速上升,超过 $12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 后增长趋缓,这表明在中低碳土壤中增加有机碳含量对抗蚀性提升效果更明显,在有机质丰富的土壤中则需综合考虑其他因素进行调控。图 6b 显示, TN 与 CSRI 呈持续上升关系,无明显边际效应。当 TN 低于 $1.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,CSRI 增长缓慢,超过该阈值后上升加快,这表明在氮含量较高的范围内,其对土壤抗蚀性的促进作用更加显著。

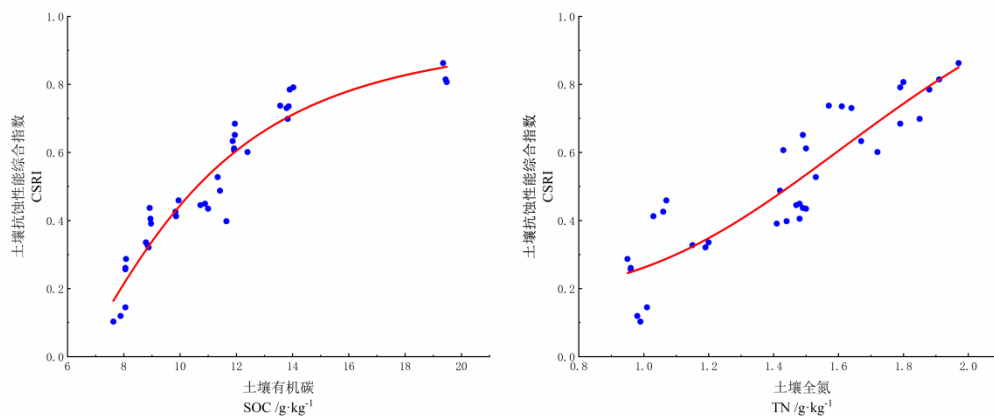


图 6 土壤抗蚀性能综合指数 (CSRI) 与土壤有机碳 (SOC) 和全氮含量 (TN) 之间的关系

Fig. 6 Relationship between Comprehensive Soil Erosion Resistance Index (CSRI) and soil organic carbon (SOC) total nitrogen content (N)

4 结 论

本研究系统分析了三峡库区柑橘园在不同绿肥覆盖下的土壤抗蚀性的季节变化特征,明确了各覆盖措施对抗蚀性关键因子的影响机制及其调控路径。不同覆盖处理下植被特性与土壤理化性质呈现显著的季节变化,4—6月时植被覆盖度、地上生物量和根质量密度较高,土壤容重降低、孔隙度上升,>5 mm团聚体比例增加。绿肥覆盖处理的容重、<0.25 mm团聚体比例显著低于清耕,孔隙度、大团聚体含量更高,对土壤结构的改善效果显著。抗蚀性指标也呈现出明显的季节性特征,4—6月时土壤黏结力、饱和导水率、平均质量直径、土壤结构稳定性指数升高,贯入阻力和土壤抗蚀性K因子下降。绿肥覆盖处理显著提高了土壤抗蚀性能综合指数,早熟禾在改善土壤结构和增强抗蚀性方面优于白花三叶草。Pearson相关、PLSR及结构方程模型表明,CSRI主要受根质量密度、土壤全氮和土壤有机碳驱动,植被特性与土壤养分的影响最显著。

参考文献(References)

- [1] Trimble S W, Crosson P. Land use: U.S. soil erosion rates—Myth and reality[J]. *Science*, 2000, 289(5477): 248-250.
- [2] Su Z A, Xiong D H, Zhang J H, et al. Research progress of soil erosion of purple soil slope farmland and its prevention and control measures[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2018(2): 42-47, 69. [苏正安, 熊东红, 张建辉, 等. 紫色土坡耕地土壤侵蚀及其防治措施研究进展[J]. *中国水土保持*, 2018(2): 42-47, 69.]
- [3] Cerdà A, Ackermann O, Terol E, et al. Impact of farmland abandonment on water resources and soil conservation in *Citrus* plantations in eastern Spain[J]. *Water*, 2019, 11(4): 824.
- [4] Ding T T, Duan T Y. Research progress on the influence of orchard green manure on fruit treesoil-microbe system[J]. *Journal of Fruit Science*, 2021, 38(12): 2196-2208. [丁婷婷, 段廷玉. 果园绿肥对果树-土壤-微生物系统影响研究进展[J]. *果树学报*, 2021, 38(12): 2196-2208.]
- [5] Li H, Chen Y, Liu X H, et al. Factors affecting the soil erosion and scouring resistance of bank hedgerows in purple soil sloping cropland[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(11): 40-52. [李鸿, 谌芸, 刘泉宏, 等. 紫色土坡耕地地埂草篱根系土壤抗蚀与抗冲性能特征研究[J]. *草业学报*, 2023, 32(11): 40-52.]
- [6] Huang X, Zheng J K, Ren Y Z, et al. Effect of hedgerow on anti-erodibility of sloping farmlands consisted of purple soil in the hilly area of central Sichuan Basin[J]. *Mountain Research*, 2024, 42(1): 27-36. [黄鑫, 郑江坤, 任雨之, 等. 川中丘陵区紫色土坡耕地植物篱措施对土壤抗蚀性的影响[J]. *山地学报*, 2024, 42(1): 27-36.]
- [7] Sultani M I, Gill M A, Anwar M M, et al. Evaluation of soil physical properties as influenced by various green manuring legumes and phosphorus fertilization under rain fed conditions[J]. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 2007, 4(1): 109-118.
- [8] Ramos M E, Benítez E, García P A, et al. Cover crops under different managements vs. frequent tillage in almond orchards in semiarid conditions: Effects on soil quality[J]. *Applied Soil Ecology*, 2010, 44(1): 6-14.
- [9] Gyssels G, Poesen J, Bochet E, et al. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: A review[J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2005, 29(2): 189-217.
- [10] Bi B Y, Han F P. GC-MS analysis of root exudates of alfalfa in different cropping years on the Loess Plateau[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, 26(3): 611-617. [毕博远, 韩凤朋. 黄土高原不同种植年限紫花苜蓿根系分泌物 GC-MS 分析[J]. *草地学报*, 2018, 26(3): 611-617.]
- [11] Yang X, Wang B R, Fakher A, et al. Contribution of roots to soil organic carbon: From growth to decomposition experiment[J]. *Catena*, 2023, 231: 107317.
- [12] Wang L X, Guo M M, Chen Z X, et al. Quantifying the contributions of factors influencing the spatial heterogeneity of soil aggregate stability and erodibility in a Mollisol watershed[J]. *Catena*, 2024, 239: 107941.
- [13] Joshi R K, Garkoti S C. Influence of vegetation types on soil physical and chemical properties, microbial biomass and stoichiometry in the central Himalaya[J]. *Catena*, 2023, 222: 106835.
- [14] Jin J Y, Wang L, Jin T S, et al. Spatio-temporal variation of rainfall erosivity of different magnitudes based on the REOF method—Take Chongqing as an example[J]. *Journal of Southwest University(Natural Science Edition)*, 2025, 47(1): 163-177. [靳军英, 王林, 金铁生, 等. 基于 REOF 的不同量级降雨侵蚀力时空变化——以重庆市为例[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2025, 47(1): 163-177.]

- [15] Xu J, Si L L, Zhang X, et al. Various green manure-fertilizer combinations affect the soil microbial community and function in immature red soil[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 14: 1255056.
- [16] Wischmeier W H, Mannering J V. Relation of soil properties to its erodibility[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1969, 33(1): 131-137.
- [17] Huang X F, Lin L R, Ding S W, et al. Characteristics of soil erodibility K value and its influencing factors in the changyan watershed, southwest Hubei, China[J]. *Land*, 2022, 11(1): 134.
- [18] Wang B, Zhang G H. Quantifying the binding and bonding effects of plant roots on soil detachment by overland flow in 10 typical grasslands on the Loess Plateau[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2017, 81(6): 1567-1576.
- [19] Zhang B J, Zhang G H, Zhu P Z, et al. Temporal variations in soil erodibility indicators of vegetation-restored steep gully slopes on the Loess Plateau of China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2019, 286: 106661.
- [20] Wang H, Zhang G H, Li N N, et al. Soil erodibility influenced by natural restoration time of abandoned farmland on the Loess Plateau of China[J]. *Geoderma*, 2018, 325: 18-27.
- [21] Nanjing Institute of Soil Research, Chinese Academy of Sciences. Physical and chemical analysis of soil[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978. [中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1978.]
- [22] Liu X M, Huang Y F. An experiment study on employing laser grain-size analyzer to analyze soil mechanical composition[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(4): 579-582. [刘雪梅, 黄元仿. 应用激光粒度仪分析土壤机械组成的实验研究[J]. *土壤通报*, 2005, 36(4): 579-582.]
- [23] Wang X Y, Gao X F, Liu H P, et al. Review of analytical methods for aggregate size distribution and water-stability of soil macro-aggregates[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9(3): 106-113. [王秀颖, 高晓飞, 刘和平, 等. 土壤水稳性大团聚体测定方法综述[J]. *中国水土保持科学*, 2011, 9(3): 106-113.]
- [24] Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. [鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.]
- [25] Feng T, Chen X Y, Zhu P Z, et al. Differences in soil erosion resistance between different vegetation types of purple soil in the Three Gorges Reservoir area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2025, 62(5): 1259-1270. [冯滔, 陈晓燕, 朱平宗, 等. 三峡库区紫色土不同植被类型土壤抗蚀性能差异研究[J]. *土壤学报*, 2025, 62(5): 1259-1270.]
- [26] Zhang J, Ran Y G, Ma D H, et al. Dynamic characteristics of *Cynodon dactylon* root growth and its influence on soil pore evolution[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2025, 62(1): 54-68. [张靖, 冉义国, 马东豪, 等. 狗牙根根系生长动态特征及其对土壤孔隙演变的影响[J]. *土壤学报*, 2025, 62(1): 54-68.]
- [27] Ma W M, Tang S H, Dengzeng Z, et al. Root exudates contribute to belowground ecosystem hotspots: A review[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 937940.
- [28] Mustafa A, Xu M G, Ali Shah S A, et al. Soil aggregation and soil aggregate stability regulate organic carbon and nitrogen storage in a red soil of Southern China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 270: 110894.
- [29] Hess L J T, Hinckley E S, Robertson G P, et al. Rainfall intensification increases nitrate leaching from tilled but not no-till cropping systems in the U.S. Midwest[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 290: 106747.
- [30] Zhang P P, Hu W, Guan Z H, et al. Effects of grass on soil nutrients, enzyme activities and bacterial community in apple orchard[J]. *Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition)*,

- 2024, 52(9): 86-96. [张朋朋, 胡雯, 管增辉, 等. 生草对苹果园土壤养分、酶活性及细菌群落的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2024, 52(9): 86-96.]
- [31] Wang G Y, Liu S, Fang Y, et al. Adaptive changes in root morphological traits of Gramineae and Leguminosae seedlings in the ecological restoration of the semiarid region of northwest China[J]. Land Degradation & Development, 2020, 31(16): 2417-2429.
- [32] Demenois J, Carriconde F, Bonaventure P, et al. Impact of plant root functional traits and associated mycorrhizas on the aggregate stability of a tropical Ferralsol[J]. Geoderma, 2018, 312: 6-16.
- [33] Wang N, Li J Y, Xu R K. Use of agricultural by-products to study the pH effects in an acid tea garden soil[J]. Soil Use and Management, 2009, 25(2): 128-132.
- [34] Zhou G P, Chang D N, Gao S J, et al. Co-incorporating leguminous green manure and rice straw drives the synergistic release of carbon and nitrogen, increases hydrolase activities, and changes the composition of main microbial groups[J]. Biology and Fertility of Soils, 2021, 57(4): 547-561.
- [35] Tian L, Liu Y J, Ma Y C, et al. Combined role of ground cover management in altering orchard surface-subsurface erosion and associated carbon-nitrogen-phosphorus loss[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2024, 31(4): 5655-5667.
- [36] Song J, Huang J, Gao J S, et al. Effects of green manure planted in winter and straw returning on soil aggregates and organic matter functional groups in double cropping rice area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(2): 564-570. [宋佳, 黄晶, 高菊生, 等. 冬种绿肥和秸秆还田对双季稻区土壤团聚体和有机质官能团的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(2): 564-570.]
- [37] Zhang Q L, Wang Z L, Wang D D, et al. Advances in researches of the effects of grassland vegetation on soil erosion in Loess Plateau[J]. Advances in Earth Science, 2017, 32(10): 1093-1101. [张琪琳, 王占礼, 王栋栋, 等. 黄土高原草地植被对土壤侵蚀影响研究进展[J]. 地球科学进展, 2017, 32(10): 1093-1101.]
- [38] Duan J, Liu Y J, Yang J, et al. Role of groundcover management in controlling soil erosion under extreme rainfall in *Citrus* orchards of Southern China[J]. Journal of Hydrology, 2020, 582: 124290.
- [39] Cheng Z Z, Fan X P, Xia Y, et al. Combined effects of living mulch and fertilizer reduction on nitrogen and phosphorus runoff loss in a *Citrus* orchard[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2023, 40(6): 1358-1367. [程子珍, 范先鹏, 夏颖, 等. 生草覆盖及配合化肥减量对柑橘园地表径流氮磷流失的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(6): 1358-1367.]

(责任编辑: 檀满枝)