

DOI: 10.11766/trxb202508030377

CSTR: 32215.14.trxb202508030377

赵延亭, 王小燕, 贺辉, 陈展鹏, 陈方鑫, 单俏. 紫色土橘园种植不同绿肥对坡面产流产沙的影响及其作用机理[J]. 土壤学报, 2026, ZHAO Yanting, WANG Xiaoyan, HE Hui, CHEN Zhanpeng, CHEN Fangxin, SHAN Qiao. Effects of Different Green Manure Plantations on Runoff and Sediment Yield in Sloped Citrus Orchards with Purple Soil and Their Underlying Mechanisms[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

紫色土橘园种植不同绿肥对坡面产流产沙的影响及其作用机理*

赵延亭¹, 王小燕^{1,2†}, 贺辉¹, 陈展鹏^{1,2}, 陈方鑫^{1,2}, 单俏²

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 重庆市水土保持与生态修复重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 果园绿肥种植在改善土壤结构等理化性质, 减少土壤侵蚀方面发挥着积极作用。本研究以柑橘园径流小区为研究对象, 系统监测自然降雨条件下种植黑麦草、毛叶苕子和白三叶的小区及清耕小区(地表裸露)的产流产沙量, 分析绿肥植株特征(茎粗、株高、根长、覆盖度)对土壤结构(孔隙度、容重、平均入渗率)和有机质的影响及其与产流产沙的关系, 揭示绿肥种植对坡地果园土壤侵蚀的作用机理。结果表明: (1) 绿肥植株特征在初花期至盛花期显著提高, 毛叶苕子株高、根长最大, 黑麦草茎粗最优, 白三叶覆盖度最高。(2) 土壤容重、孔隙度与绿肥根长密切相关, 根系越发达, 土壤容重越低, 孔隙度越大($P < 0.05$)。盛花期绿肥小区容重较幼苗期显著降低, 孔隙度与平均入渗率显著升高, 清耕小区则相反; 与幼苗期相比, 盛花期时各小区有机质含量均有所提升, 但清耕小区的提升幅度最小。毛叶苕子小区容重的降幅、孔隙度和有机质的增幅均最大, 分别为 8.69%、8.22%、45.88%。黑麦草小区入渗特性表现最优, 白三叶次之。(3) 根长对壤中流及产沙的作用强度分别为 0.66、0.71, 株高、覆盖度分别对地表径流、地表产沙的作用强度为 0.62、0.61。包括全生长期及清表翻耕期的一个自然年内, 平均产流产沙量均表现为清耕 > 毛叶苕子 > 白三叶 > 黑麦草, 毛叶苕子小区平均径流含沙率最低; 白三叶在幼苗期、初花期减流减沙率最高, 黑麦草在盛花期、腐解期及非生长期减流减沙率最优。综上, 在坡地橘园混合种植黑麦草和白三叶可起到最佳水土流失防控作用, 这为不同生态功能区绿肥品种的混合搭配和时序配置提供了理论依据。

关键词: 紫色土; 柑橘园; 绿肥; 植株特征; 产流产沙

中图分类号: S154

文献标志码: A

Effects of Different Green Manure Plantations on Runoff and Sediment Yield in Sloped Citrus Orchards with Purple Soil and Their Underlying Mechanisms

ZHAO Yanting¹, WANG Xiaoyan^{1,2†}, HE Hui¹, CHEN Zhanpeng^{1,2}, CHEN Fangxin^{1,2}, SHAN Qiao²

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Ecological Restoration, Chongqing 400715, China)

Abstract: 【Objective】Green manure cultivation in orchards plays a positive role in improving soil physicochemical properties, such as soil structure, and in reducing soil erosion. However, the mechanisms by which green manures mitigate soil erosion in

*重庆市自然科学基金项目(CSTB2023NSCQ-MSX0117)、中央高校基本科研业务费专项资金项目

(XDJK2017B025, XDJK2018B042)和国家级大学生创新创业训练计划项目(202510635029)共同资助 Supported by the Chongqing Natural Science Foundation Program (No.CSTB2023NSCQ-MSX0117), the Fundamental Research Funds of the Central Universities of China (Nos.XDJK2017B025,XDJK2018B042),and the National College Students Innovation and Entrepreneurship Training Program (No.202510635029)

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

作者简介: 赵延亭(1999-), 女, 河南洛阳人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: 1905422123@qq.com

收稿日期: 2025-08-03; 收到修改稿日期: 2025-11-21; 网络首发日期(www.cnki.net):

sloping orchard systems remain unclear. 【Method】 This study was conducted using runoff plots in a citrus orchard to systematically monitor runoff and sediment yield under natural rainfall conditions in plots planted with ryegrass (*Lolium perenne*), hairy vetch (*Vicia villosa*), and white clover (*Trifolium repens*), compared with bare tilled (bare soil) control plots. The effects of green manure plant characteristics, stem thickness, plant height, root length, and vegetation cover, on soil structural properties (porosity, bulk density, average infiltration rate) and organic matter content, as well as their relationships with runoff and sediment production, were analyzed. 【Result】 The results showed that (1) Green manure plant traits significantly improved from initial to peak flowering. Hairy vetch exhibited the greatest plant height and root length, ryegrass had the optimal stem thickness, and white clover achieved the highest vegetation cover. (2) Soil bulk density and porosity were closely correlated with green manure root length: more developed root systems were associated with lower bulk density and higher porosity ($P < 0.05$). At peak flowering, green manure plots showed a significant decrease in bulk density and notable increases in porosity and average infiltration rate compared to the seedling stage, whereas the bare tilled control exhibited opposite trends. Organic matter content increased in all plots from seedling to peak flowering, but the smallest increase occurred in the bare control. Among treatments, hairy vetch showed the greatest reduction in bulk density (-8.69%) and the largest increases in porosity ($+8.22\%$) and organic matter ($+45.88\%$). Also, ryegrass demonstrated the best infiltration performance, followed by white clover. (3) Root length exerted strong influences on subsurface flow (effect strength = 0.66) and sediment yield (0.71), while plant height and vegetation cover primarily affected surface runoff (0.62) and sediment yield (0.61) by dissipating rainfall energy and resisting overland flow. Over a full annual cycle, including growth, residue decomposition, and tillage periods, the average runoff and sediment yields followed the order: bare tillage > hairy vetch > white clover > ryegrass, clearly indicating the superior overall erosion control by ryegrass. Although the hairy vetch plots recorded the lowest sediment concentration in runoff, temporal analysis revealed distinct performance patterns. Specifically, white clover was most effective in reducing runoff and sediment during the early growth stages (seedling/initial flowering) due to its rapid establishment, whereas ryegrass performed best during peak flowering, decomposition, and the non-growing season, owing to its persistent biomass and robust root system. 【Conclusion】 Intercropping ryegrass and white clover in sloping citrus orchards provides the most effective control of soil and water loss. These findings provide theoretical support for the strategic mixing and temporal scheduling of green manure species, tailored to specific ecological functions in different agroecological zones.

Key words: Purple soil; Citrus orchard; Green manure; Plant characteristics; Runoff and sediment yield

三峡库区紫色土矿质养分丰富, 肥力较高, 是重要的耕作资源^[1]。但紫色土具有土层浅薄, 抗蚀性差^[2], 地面较破碎, 板岩、黏土层及紫色砂页岩软弱易碎等特点^[3], 致使紫色土经果林仍存在严重的水土流失问题。《重庆市 2024 年水土保持公报》数据显示, 全市水土流失面积达 23 340 km², 占土地总面积的 28.33%。其中园地水土流失面积达 531 km², 占水土流失总面积的 2.27%, 表明园地土壤侵蚀问题仍较为突出。现有研究表明, 绿肥种植可通过改善土壤理化性质, 调控微生物群落结构^[4], 提升土壤养分含量^[5], 并减少水土流失。土壤物理参数 (容重、孔隙度等) 不仅直接影响降雨入渗、径流形成等水文过程, 更是调控土壤水肥气热循环^[6]的关键因素。相关研究证实, 绿肥种植可显著改善土壤耕作层的物理性质和提升水土保持效益。在猕猴桃园中种植豆科、禾本科及十字花科绿肥, 农田夏闲期混播种植苏丹草与长武怀豆, 均能显著降低土壤容重、提升土壤孔隙度^[7-8]。植株覆盖度与植物茎秆密度形成的冠层结构通过削弱雨滴动能、延缓产流时间等机制保护表土结构, 显著抑制土壤流失^[9-10], 同时根系发达的绿肥能通过增加土壤结构稳定性显著降低水土流失^[11]。油茶林间种百喜草与金鸡菊可降低地表径流泥沙量^[12], 百慕大、马尼拉、高羊茅、玉龙草的径流拦截率均显著高于裸地对照组, 且显著降低表层渗流量比, 提高土壤的入渗能力^[13]。

目前大多数研究主要聚焦于绿肥整体覆盖对产流产沙及土壤容重与孔隙度等结构特性的影响。本研究以三峡库区紫色土坡地橘园为研究对象, 在标准径流小区种植不同品种绿肥, 观测绿肥种植生长周期对土壤结构 (容重、孔隙度、平均入渗率) 的影响及全生长期与非生长期对坡面产流产沙

的调控效果,分析绿肥植株特征、土壤结构(容重、孔隙度、平均入渗率)与产流产沙之间的关系,探讨柑橘园绿肥种植影响土壤侵蚀的作用机理,探明影响绿肥水土流失控制效果的关键植株特征,明确不同品种绿肥的水土保持效应,为果园绿肥选育与三峡库区紫色土柑橘坡园地的可持续发展提供理论依据及生产实践指导。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验于重庆市西南大学国家紫色土肥力与肥料效益监测站径流监测场内进行(29°48'36"N, 106°26'33"E)。该区属亚热带季风气候,多年平均气温 18.2°C,平均年降水量为 1157 mm,平均日照时数为 1014 h。该径流监测场共有 12 个宽 4 m、长 12 m、坡度为 15°的试验小区,小区由 20 cm 紫色土页岩母质层下垫面,40 cm 紫色土成熟耕作土(壤土)回填组成。为防止水流侧渗和串流的影响,小区底部和四周采用钢筋混凝土硬化,坡脚设汇流沟,通过 PVC 管道将小区产生的地表径流和壤中流分别汇入不同径流收集桶(图 1)。

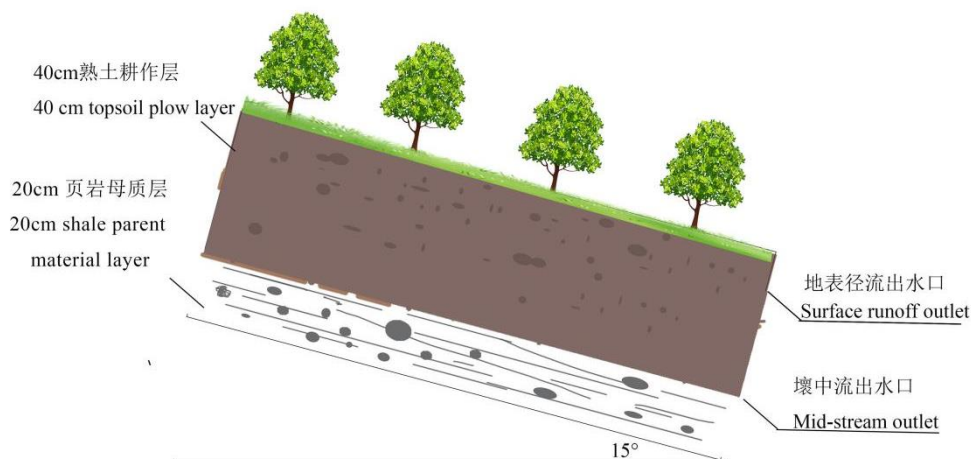


图 1 径流小区紫色土纵向剖面示意图

Fig 1. Schematic longitudinal profile of purple soil in the runoff plot

1.2 试验设计

2018 年 4 月在每个径流小区的中轴线上移栽一年生的“爱媛 38 号”柑橘苗,株距为 3 m,每个小区种植 4 株,各试验小区施肥水平相同。设计 3 种绿肥及 1 组清耕对照组,为使绿肥覆盖全园,参考刘瑞等^[4]研究结果,于小区内分别均匀撒播 22.5 kg·hm⁻² 黑麦草(*Lolium perenne*)、45 kg·hm⁻² 毛叶苕子(*Vicia villosa*)、22.5 kg·hm⁻² 白三叶(*Trifolium repens*)草籽,每组处理重复 3 次。所有小区于 2021 年 9 月 27 日撒播草籽,2022 年 8 月统一清除地表覆盖物并翻耕。

1.3 样品采集与测定

本文主要探讨不同绿肥品种从播种到腐解整个生长期及腐解后清表翻耕的一个自然年内,柑橘园径流小区产流产沙的特点及绿肥品种的植株特征差异对产流产沙的影响。本研究选取 2021 年 10 月至 2022 年 9 月收集到的 17 场侵蚀性降雨数据进行分析。根据中国政府网发布的中国气象局颁布的降水强度等级划分标准 (https://www.gov.cn/ztl/2008tffy/content_1113935.htm), 其中, 中雨 11 场、大雨 3 场、暴雨 3 场。

用 WatchDog 1120 (美国进口的自动记录翻斗式雨量计) 收集降雨数据。采用常规测量法测量径流、泥沙含量: 在降雨事件发生后测定各小区对应的地表径流及壤中流的水桶水量, 即为地表径流及壤中流的产流量; 径流桶中泥沙含量用取样测试法确定 (充分搅拌径流桶中浑水, 然后采集 200 mL 搅拌均匀的浑水带回实验室, 过滤烘干, 通过比例系数推算确定径流桶中泥沙含量)。2022 年 3—7 月每月采集不同绿肥完整植株样品 15 株, 带回实验室, 用清水冲洗地上地下部分后, 用万分之一克电子天平称取 15 株绿肥质量求平均值, 用游标卡尺测定绿肥根长、茎粗 (绿肥根部以上中间最粗壮部位直径求平均值), 用直尺测定绿肥植株的绝对高度。利用无人机垂直于小区坡面方向航拍小区绿肥覆盖情况, 利用 AutoCAD 2020 对航拍图像进行处理, 获得小区绿肥覆盖度数据。

土壤有机质采用重铬酸钾氧化—外加热法测定, 土壤容重、孔隙度、平均入渗率均采用环刀法测定。在土壤入渗试验过程中, 前 10 min 每隔 1 min 记录 1 次入渗量, 10—20 min 每隔 2 min 记录 1 次, 20—40 min 每隔 5 min 记录 1 次, 40—90 min 每隔 10 min 记录 1 次。计算出初始平均入渗率作为入渗指标。

1.4 数据处理与分析

平均入渗率计算公式:

$$\bar{I} = q/t$$

式中, $\bar{I}$ 为平均入渗率 ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$); q 为达到稳定入渗时的累计入渗量 (mm); t 为达到稳定入渗时所需的时间 (min)。

径流含沙率计算公式:

$$S = M/V$$

式中, S 为径流含沙率 ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$); M 和 V 分别为泥沙质量 (g) 和径流体积 (L)。

减流率计算公式:

$$P_{ri} = (P_{bi} - Q_{li})/Q_{bi}$$

式中, P_{ri} 为减流率 (%); Q_{bi} 和 Q_{li} 分别为清耕和各绿肥小区的产流量 (L)。

减沙率计算公式:

$$P_{si} = (S_{bi} - S_{li})/S_{bi}$$

式中, P_{si} 为减沙率 (%); S_{bi} 和 S_{li} 分别为清耕和各绿肥小区的产沙量 (g)。

运用 Excel 2016 处理数据, 用 SPSS 24 进行双因素方差分析、单因素方差分析、多元线性回归分析。使用 Origin2021、PS 进行数据绘图。

2 结果

2.1 不同绿肥品种植株特征

为探明绿肥影响坡面产流产沙的作用机理, 深入分析关键生长周期内绿肥的植株形态指标。表 1 数据显示, 2022 年 3—5 月 (初花期、盛花期) 内, 3 种绿肥株高、根长和茎粗等形态指标均呈增长趋势。盛花期, 黑麦草茎粗表现突出, 达 5.03 mm, 显著高于其他绿肥; 毛叶苕子的株高和根长具有显著优势, 分别达 18.07 cm 和 17.29 cm。6、7 月毛叶苕子进入腐解期, 但继续对白三叶、黑麦草

进行采集,测量的数据显示6月黑麦草茎粗(3.64 mm)较白三叶(3.18 mm)高14.5%,但根长指标(10.95 cm)显著低于白三叶(13.88 cm)。3—7月,各绿肥小区覆盖度均保持在80%以上,白三叶覆盖度始终高于黑麦草、毛叶苕子。

表1 不同绿肥植株形态指标值

Table 1 Morphological index values of different green manure plants

处理 Treatment	生长期 Growth stage	采样时间 Sampling time	株高 Plant height/cm	根长 Root length/cm	茎粗 Stem diameter/mm	覆盖度 Coverage/%
黑麦草 Ryegrass	初花期 ^①	2022/3	8.73±1.63Bb	11.17±0.76Bb	4.69±0.20Aa	87.44±1.50Bb
		2022/4	9.64±0.90Ba	14.42±0.97Ba	4.77±0.13Aa	91.97±1.16Aa
	盛花期 ^②	2022/5	9.83±1.11Ba	14.72±0.74ABa	5.03±0.16Aa	93.72±1.34Aa
	腐解期 ^③	2022/6	/	10.95±0.30b	3.64±0.32b	86.83±2.43Bb
		2022/7	/	/	/	81.21±2.17Bc
	平均值 ^④		9.40±5.22	12.81±1.94	4.50±0.57	88.23±4.78
毛叶苕子 Hairy vetch	初花期 ^①	2022/3	13.36±5.46Ab	16.59±2.35Aa	2.61±0.16Cb	82.21±1.07Cd
		2022/4	18.39±5.50Aa	16.79±0.96Aa	3.43±0.11Ba	95.81±1.95Ab
	盛花期 ^②	2022/5	18.07±4.54Aa	17.29±2.01Aa	3.31±0.31Ba	92.37±1.71Aa
	腐解期 ^③	2022/6	/	/	/	88.38±1.96Bc
		2022/7	/	/	/	80.54±1.70Bd
	平均值 ^④		16.61±24.80	16.89±1.65	3.12±0.43	87.85±6.19
白三叶 White clover	初花期 ^①	2022/3	2.36±0.35Cd	13.48±0.56Ba	3.22±0.12Ba	91.53±1.50Ab
		2022/4	3.42±0.32Cab	13.73±0.45Ba	3.27±0.15Ba	94.42±1.15Aab
	盛花期 ^②	2022/5	3.49±0.35Ca	13.96±0.31Ba	3.39±0.16Ba	96.52±2.04Aa
	腐解期 ^③	2022/6	3.42±0.14b	13.88±0.25a	3.18±0.20a	95.33±2.22Aa
		2022/7	3.17±0.80c	/	/	85.51±2.12Ac
	平均值 ^④		3.17±4.38	13.76±0.40	3.27±0.16	92.66±4.37

注:不同大写字母表示同一生长周期不同小区间差异显著,下同。不同小写字母表示同一小区不同生长周期差异显著($P<0.05$)。

Note: Different uppercase letters indicate significant differences between different plots within the same growth stage, the same below. While different lowercase letters indicate significant differences between different growth stages within the same plot ($P<0.05$). ①Initial flowering stage, ②Full flowering stage, ③Decomposition stage, ④Average value

2.2 不同绿肥种植土壤理化性质

由表2可知,幼苗期各小区容重($1.35\sim 1.39\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)、孔隙度($47.41\%\sim 49.00\%$)、有机质($16.80\sim 17.78\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、平均入渗率($0.18\sim 0.35\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$)均无显著差异($P>0.05$)。盛花期绿肥小区容重、孔隙度、平均入渗率较幼苗期均降低、升高、升高,清耕小区则相反。盛花期毛叶苕子小区容重、孔隙度较幼苗期降幅及增幅最大分别为8.69%、8.22%,白三叶小区次之,容重降低2.88%,孔隙度增幅3.71%,黑麦草、白三叶小区土壤平均入渗率增幅最大分别为316.7%、170.8%。幼苗期,清耕小区有机质含量最高,但盛花期绿肥小区有机质含量较幼苗期增幅最大,其中毛叶苕子小区增幅最显著,为45.88%。毛叶苕子小区在盛花期土壤容重、孔隙度、有机质含量均表现最优,黑麦草小区则表现出最优的入渗特性。

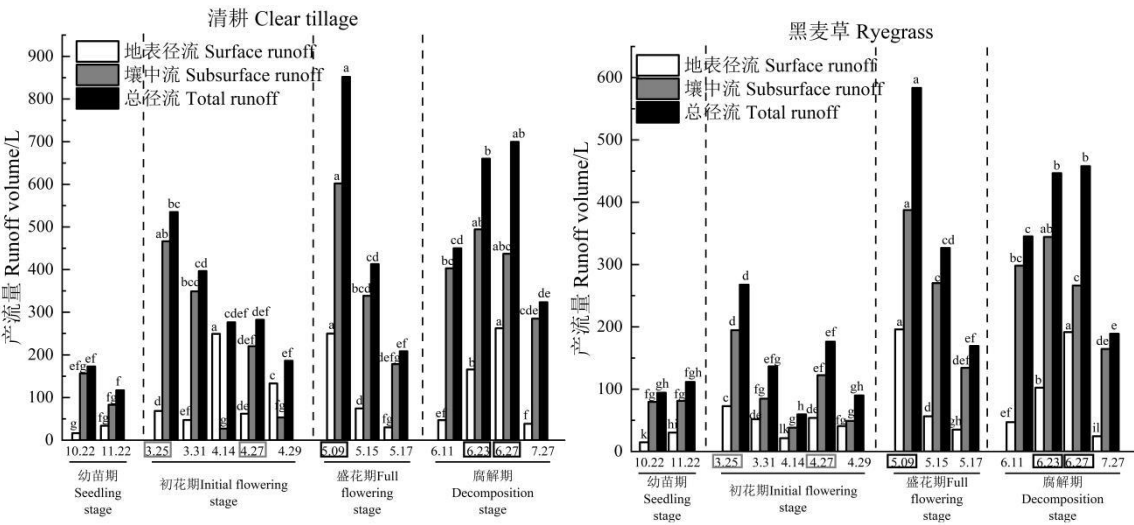
表2 不同绿肥处理对土壤理化性质的影响

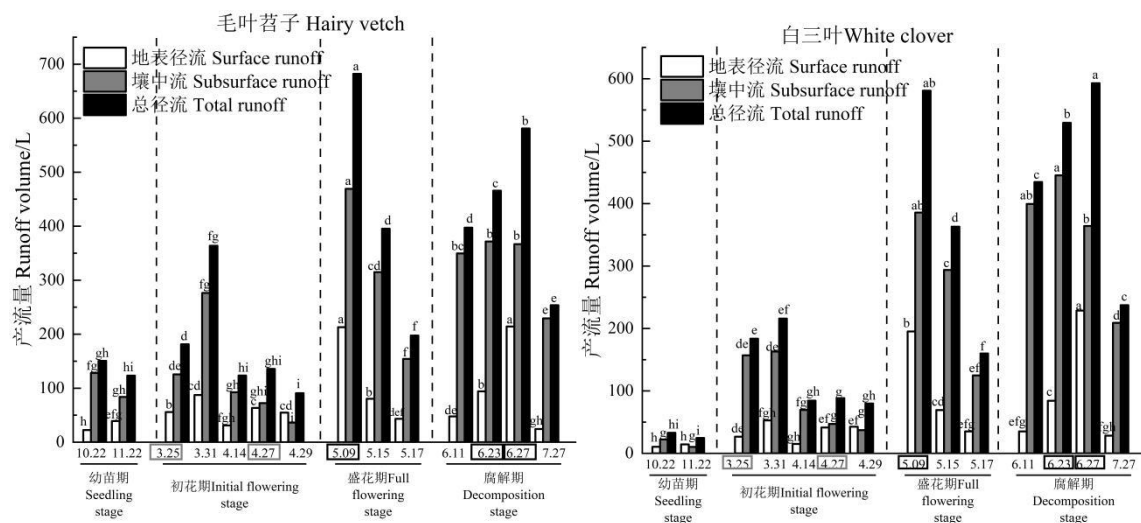
Table 2 Effects of different green manures on soil physicochemical properties

处理 Treatment	采样时间Sampling time	容重 Bulk density /(g·cm ⁻³)	孔隙度 Porosity /%	有机质 Organic matter /(g·kg ⁻¹)	平均入渗率 Average infiltration rate/ (mm·min ⁻¹)
清耕Clear tillage	幼苗期 Initial flowering stage	1.35±0.05A	48.92±1.85A	17.78±1.5A	0.43±0.15A
黑麦草Ryegrass		1.35±0.07A	49.00±2.56A	16.91±3.36A	0.18±0.11A
毛叶苕子Hairy vetch		1.38±0.10A	47.97±3.92A	16.87±3.45A	0.24±0.22A
白三叶White clover		1.39±0.09A	47.41±3.23A	16.8±0.68A	0.35±0.18A
清耕Clear tillage	盛花期 Full flowering stage	1.41±0.09A	46.87±3.33A	22.71±3.21A	0.23±0.44A
黑麦草Ryegrass		1.32±0.19A	50.01±7.02A	22.21±2.97A	0.75±0.79A
毛叶苕子Hairy vetch		1.26±0.15A	52.31±5.54A	24.61±1.87A	0.65±0.45A
白三叶White clover		1.35±0.06A	49.17±2.28A	22.31±0.85A	0.72±0.09A

2.3 不同绿肥种植土壤侵蚀特征

2.3.1 不同绿肥种植产流特征 幼苗期（2021 年 10—11 月）（图 2），中雨条件下，清耕小区总径流量显著高于白三叶及黑麦草小区，而略高于毛叶苕子小区。初花期（3—4 月）各小区 4 月两场中雨、一场大雨产流量均低于 3 月同类型降雨。大雨事件（3 月 25 日），毛叶苕子小区总径流量达 363.76 L，较白三叶及黑麦草小区分别高 68.6%、35.9%，其地表产流量（87.29 L）为各小区最高。4 月 27 日大雨事件中，白三叶总径流量仍为最小（88.50L），但黑麦草总径流量高于毛叶苕子。4 月 14 日中雨事件中，清耕小区地表径流量表现异常为 249.32 L，达同期白三叶小区的 16.54 倍，揭示裸露地表在连续降雨中的地表径流累积效应。盛花期，绿肥对极端降雨（5 月 9 日暴雨）的调控效果显著，黑麦草、毛叶苕子和白三叶小区总径流量分别为清耕小区的 68.5%、80.1%和 68.2%，其中壤中流占比分别达 66.4%（黑麦草）、68.8%（毛叶苕子）和 66.4%（白三叶），反映盛花期发达的根系对水分再分配的关键作用。两场中雨（5 月 15 日、5 月 17 日），绿肥小区中毛叶苕子小区总径流量最大。腐解期（6—7 月），6 月 27 日暴雨条件下白三叶小区总径流量（529.40 L）较清耕小区低 19.79%，但壤中流量（445.25 L）较清耕小区低 9.91%，白三叶仍有完整植株，说明绿肥冠层、根系相互作用促进优先流形成。幼苗期和初花期为白三叶小区产流量最低，盛花期及腐解期则为黑麦草小区产流量最低。



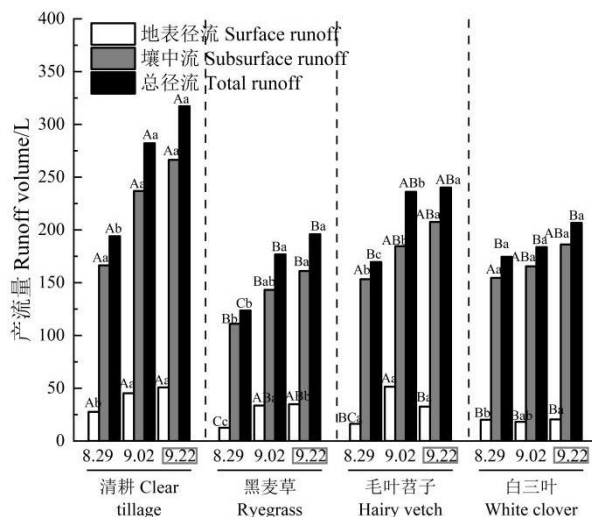


注：图中黑色字体日期表示中雨，灰色方框表示大雨，黑色方框表示暴雨。不同小写字母表示不同日期产流量差异显著 ($P < 0.05$)，下同。
Note: In the figure, dates in black font indicate moderate rain, gray boxes indicate heavy rain, and black boxes indicate torrential rain. Different lowercase letters indicate significant differences in runoff volume among different dates ($P < 0.05$). The same below.

图 2 不同绿肥种植生长期内侵蚀性降雨产流量

Fig. 2 Erosive rainfall runoff during the growth period of different green manure treatments

绿肥非生长期内 (图 3) ($P < 0.05$)，除 9 月 22 日为大雨外，其余两场降雨均为中雨。不同降雨强度下各小区产流量均表现为 9 月 22 日 > 9 月 2 日 > 8 月 29 日。三场降雨中，黑麦草小区产流量最低。从播种到腐解整个生长期及腐解后清表翻耕的一个自然年内，不同绿肥种植小区平均产流量均表现为清耕 > 毛叶苕子 > 白三叶 > 黑麦草。



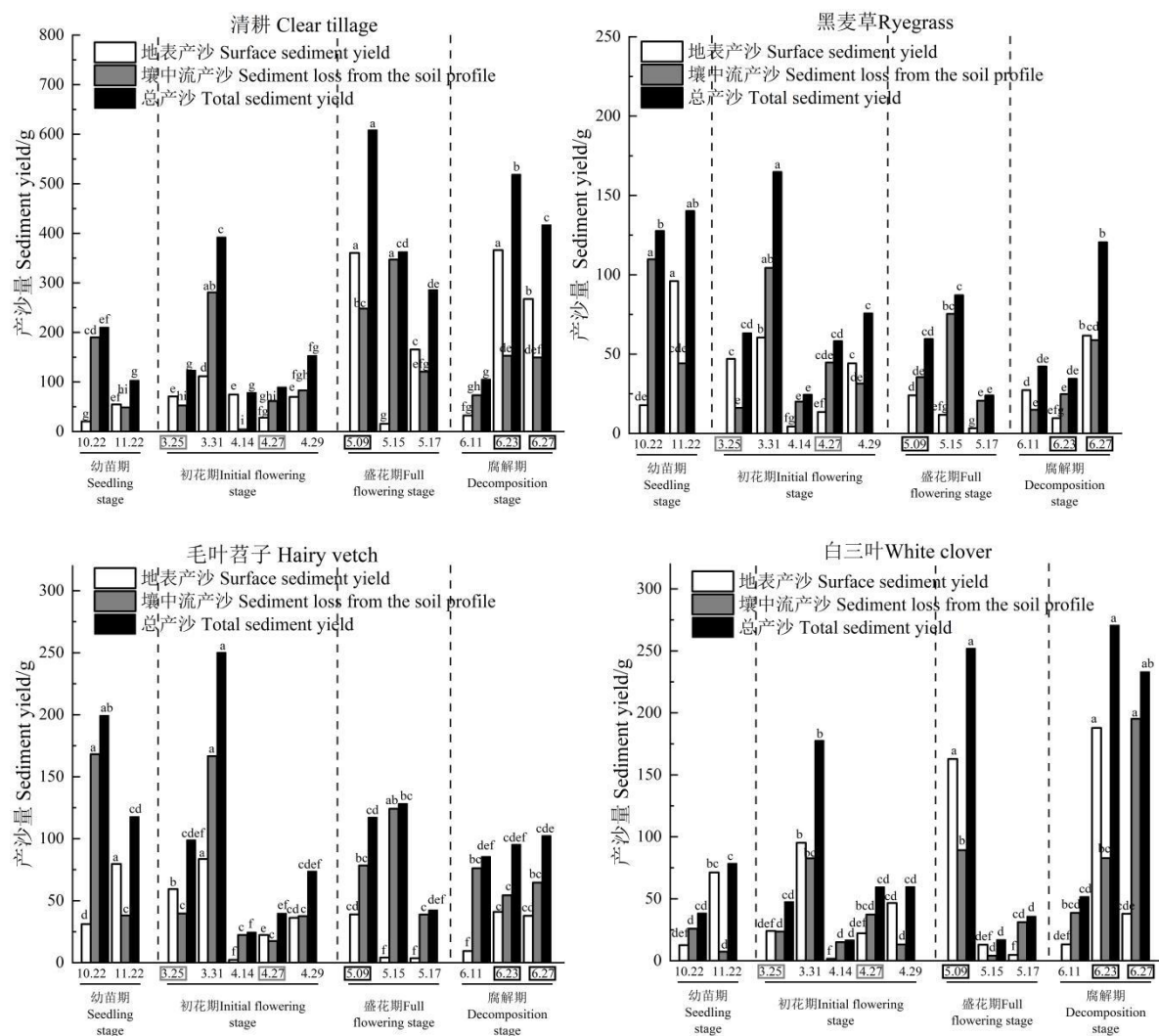
注：大写字母表示同一日期不同绿肥之间产流量差异显著，小写字母表示同一绿肥不同日期产流量差异显著 ($P < 0.05$)。Note: Uppercase letters indicate significant differences in runoff volume among different green manures on the same date, and lowercase letters indicate significant differences in runoff volume for the same green manure on different dates ($P < 0.05$).

图 3 不同绿肥种植非生长期内侵蚀性降雨产流量

Fig. 3 Runoff yield from erosive rainfall during the non-growth period of different green manure treatments

2.3.2 不同绿肥种植小区产沙特征 幼苗期 (2021 年 10 月—11 月) (图 4)，两场中雨后白三叶及黑麦草小区总产沙量均低于清耕小区，其中白三叶小区较清耕小区分别降低 81.67% 及 24%。毛叶苕

子小区总产沙量略高于清耕小区，可能与此时绿肥特征不明显，根系不发达有关。初花期（2022 年 3 月—4 月），3 月 31 日中雨事件各小区总产沙量均达到初花期总产沙峰值，其中黑麦草小区总产沙量（164.8 g）显著低于毛叶苕子小区（250.3 g）。4 月 27 日（大雨）数据显示，各小区产沙量均低于 4 月 29 日中雨产沙量。盛花期（2022 年 5 月），在极端降雨时（5 月 9 日）绿肥抗侵蚀能力显著，黑麦草、毛叶苕子、白三叶小区的总产沙量分别为清耕小区的 9.78%、19.26%和 41.41%。在腐解期（6—7 月），两场暴雨事件中，白三叶小区总产沙量均显著高于黑麦草及毛叶苕子小区，清耕小区在 6 月 23 日（暴雨）时总产沙量达 519.0 g，为生长周期最高值。白三叶在幼苗期、初花期抗侵蚀能力最优，而黑麦草在盛花期及腐解期抗侵蚀能力最优；黑麦草在极端降雨条件下抗侵蚀能力最优，而白三叶表现最弱。



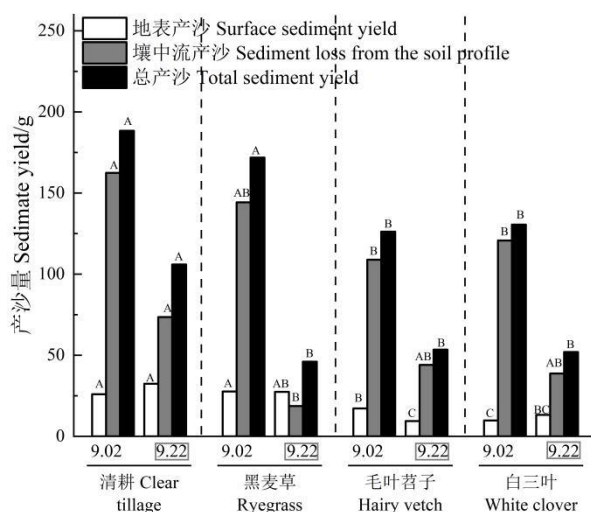
注：不同小写字母表示不同日期产沙量差异显著（ $P < 0.05$ ）。Note: Different lowercase letters indicate significant differences in sediment yield among different dates. ($P < 0.05$).

图 4 不同绿肥种植生长期侵蚀性降雨产沙量

Fig. 4 Sediment yield from erosive rainfall during the growth period of different green manure treatments

绿肥非生长期产沙量清耕小区中雨和大雨总产沙量分别达 188.40 和 105.99 g，显著高于绿肥小区（图 5）。各小区均表现为中雨总产沙量大于大雨总产沙量，中雨时绿肥小区总产沙量表现为黑麦草 > 白三叶 > 毛叶苕子，而大雨时总产沙量表现为毛叶苕子 > 白三叶 > 黑麦草。黑麦草小区大雨时壤中流产沙量锐减至 18.66 g，总产沙量降幅达 73.2%。白三叶小区中雨时地表产沙量最低

(9.75 g)，大雨时其地表产沙量增至 13.24 g。研究证实，绿肥虽已翻耕清除但仍可有效降低地表径流侵蚀，其中黑麦草小区在大雨条件下控蚀效果最为显著。从播种到腐解整个生长期及腐解后清表翻耕的一个自然年内，平均产沙量均表现为清耕>毛叶苕子>白三叶>黑麦草。



注：不同大写字母表示同一日期不同绿肥间产沙量差异显著 ($P < 0.05$)。Note: Uppercase letters indicate significant differences in sediment yield among green manure treatments within the same date ($P < 0.05$).

图 5 不同绿肥种植非生长期内侵蚀性降雨产沙量

Fig. 5 Sediment yield from erosive rainfall during the non-growth period of different green manure treatments

清耕小区除幼苗期径流含沙率 ($1.08 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) 最小外 (图 6)，其余生长期径流含沙率均大于绿肥种植小区。黑麦草、白三叶小区径流含沙率均随着生长周期呈现先降后升的趋势，毛叶苕子小区则呈现直线下降趋势，且均在幼苗期达峰值。白三叶小区除在幼苗期 ($2.04 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)，腐解期径流含沙率 ($0.41 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) 高于黑麦草、毛叶苕子小区，其他生长期内绿肥小区间径流含沙率差距不明显。非生长期 (2022 年 7—9 月)，各小区径流含沙率基本一致。整个生长期及腐解后清表翻耕的一个自然年内平均径流含沙率为清耕>白三叶>黑麦草>毛叶苕子，种植绿肥可有效减少该区土壤流失量。

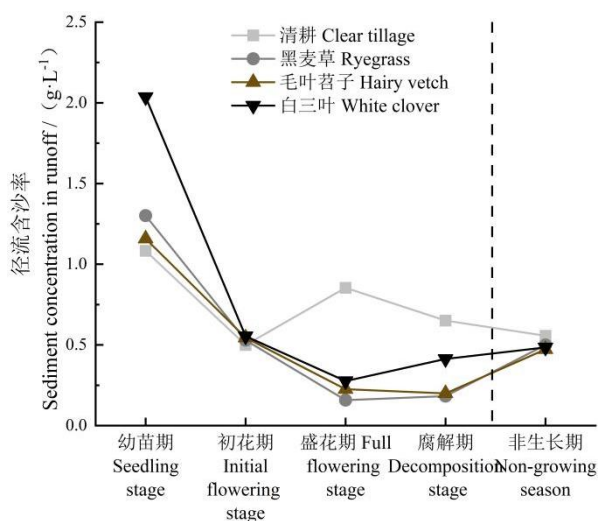


图 6 不同绿肥种植生长期及非生长期径流含沙率

Fig. 6 Sediment concentration in runoff during the growth and non-growth periods of different green manure treatments

2.3.3 不同绿肥种植小区减流减沙率 绿肥生长期内白三叶小区与黑麦草和毛叶苕子小区减流减沙趋势不同(图7)。白三叶小区减流率随着生育期逐渐降低,而减沙率则表现为降升降的趋势;黑麦草与毛叶苕子小区减流减沙率均表现为先升后降。白三叶小区减流率在幼苗期即达峰值,而黑麦草、毛叶苕子小区减流率则在初花期达峰值。黑麦草、毛叶苕子、白三叶小区减沙率均在盛花期达到最大值。毛叶苕子在幼苗期减流率和减沙率均出现负值。白三叶在生长前期(幼苗期至初花期)具有明显优势,而黑麦草在生长后期(盛花期至腐解期)及非生长期表现更优。

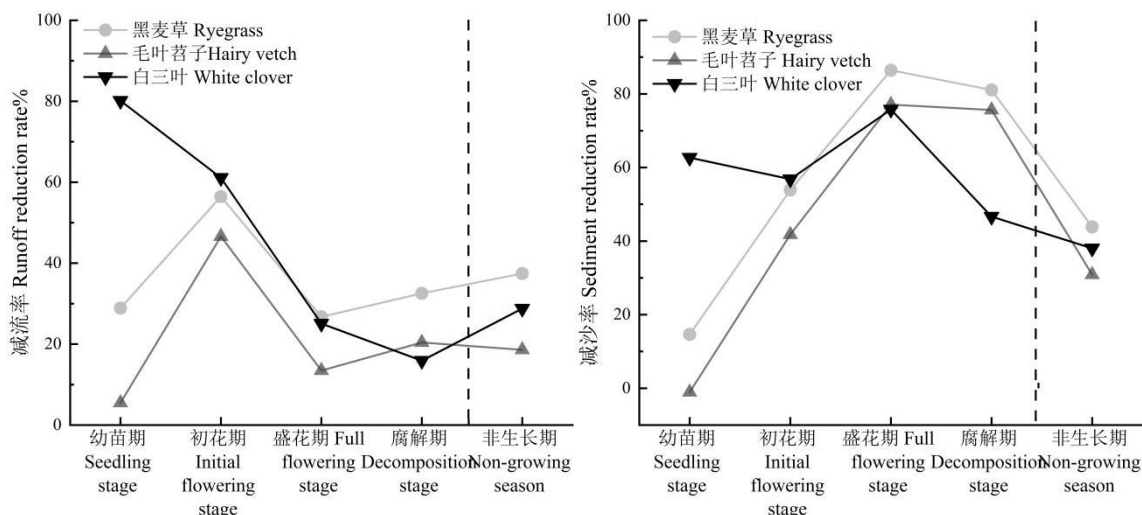


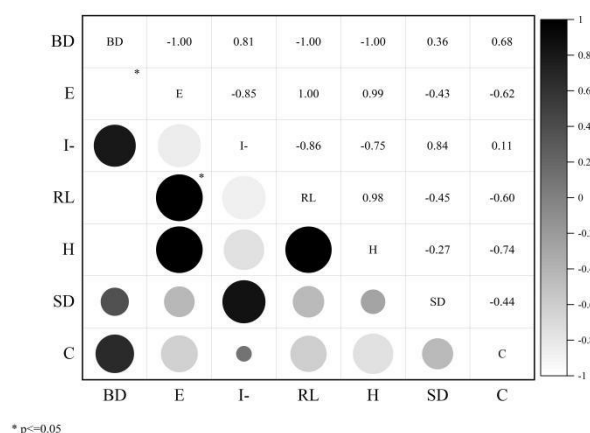
图7 不同绿肥种植生长期及非生长期减流减沙率

Fig. 7 Runoff and sediment reduction rates during the growth and non-growth periods of different green manure treatments

3 讨论

3.1 绿肥种植对土壤理化性质的影响

绿肥种植可有效改善土壤结构、提升土壤肥力并降低板结风险,对果园土壤容重和孔隙度等物理性状具有显著调控作用^[15]。土壤容重作为表征土壤紧实度、透气性和保水保肥能力的重要指标^[16],已有研究表明,植被主要通过改善土壤结构,降低土壤容重、增加土壤毛管孔隙度等土壤物理特性,进而提高土壤持水能力^[17]。本研究中3种绿肥小区盛花期土壤容重较幼苗期降低,孔隙度、平均入渗率和有机质较幼苗期均升高。Ma等^[18]和杨春霞等^[19]研究证实绿肥可有效降低土壤容重并增加土壤孔隙度。程分生等^[20]在锥栗园生草试验中发现黑麦草处理土壤孔隙度最高。王传印等^[21]探究在鲁西南地区樱桃园生草栽培对土壤理化性质的影响中发现白三叶在使土壤容重降低、孔隙度提高等方面优于黑麦草,毛叶苕子可显著提高土壤有机质含量。而本研究表明,毛叶苕子在降低土壤容重、提升孔隙度及有机质含量方面最优,黑麦草在土壤入渗特性方面最优。这可能与试验时长、绿肥种类及土壤类型不同有关。由图8可知,植株特征中根长与孔隙度显著正相关,与容重显著负相关。刘芳等^[22]得出植株极细根和细根与土壤容重显著负相关,与孔隙度显著正相关。两者虽均为根系特征,但是类型不同本试验探究的为根长,而刘芳等的试验探究的为根系的粗细,故下一步试验可探究3种绿肥的根系直径对土壤结构(容重、孔隙度、平均入渗率)的影响。



注: BD: 容重; E: 总孔隙度; I-: 平均入渗率; RL: 根长; H: 株高; SD: 茎粗; C: 覆盖度。* $P < 0.05$ 。下同。
Note: BD: Bulk density; E: Total porosity; I-: Average infiltration rate; RL: Root length; H: Plant height; SD: Stem diameter; C: Coverage. * $P < 0.05$. The same below.

图8 绿肥特征与土壤结构性质的相关性

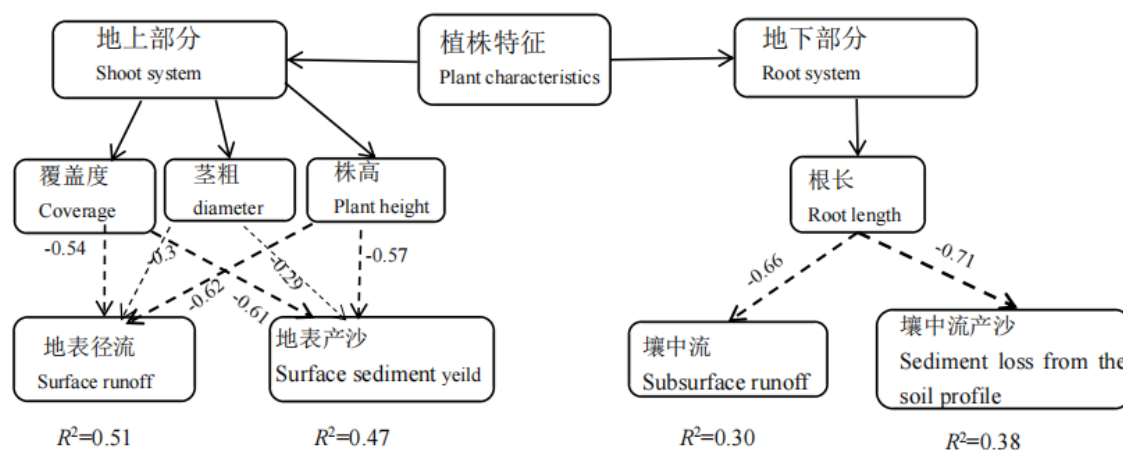
Fig. 8 Correlation between green manure characteristics and soil properties

3.2 绿肥种植对产流产沙的影响

良好的植被可以减少地表径流, 增加壤中流和地下径流, 起到防止水土流失的作用^[23-24]。邵奕铭等^[25]研究证实植被冠层、枯落层和根系系统协同作用形成立体防护体系, 冠层结构通过削弱雨滴动能、延缓产流时间等机制保护表土结构。本研究探究绿肥对地表径流及产沙、壤中流及产沙的作用机理。由图9路径分析可知, 地上部分(株高、茎粗、覆盖度)与地表径流、地表产沙的拟合度良好, 而地下部分(根长)与壤中流、壤中流产沙的拟合度良好。地上部分主要影响地表径流, 根系主要影响壤中流。与吴泽等^[26]研究结果一致, 地表径流为耕地>果园地>竹林地>林地, 耕地覆盖度最低, 其地表径流最大, 而林地含有更稳定的复合缓冲层和地表覆盖层, 对降雨截留及延缓径流汇聚起决定性作用; 而壤中流表现为竹林地>果园地>耕地>林地, 可能因竹林地根系较浅, 根系的阻挡作用可有效增加土壤入渗, 从而使得竹林地中壤中流的产流量大于果园地。3—5月为绿肥的初花期及盛花期, 植株特征明显, 探究不同绿肥的植株特征(地上部分: 覆盖度、株高、茎粗; 地下部分: 根系)与产流产沙的相关性。有研究发现, 草被根系减沙优于冠层, 而冠层减少坡面径流优于根系^[27]。黑麦草小区地表产沙量与根系长度呈显著负相关($P < 0.05$), 与焦若愚等^[28]的结论一致。与张思毅等^[29]研究结果不同, 白三叶小区植株特征与径流产沙未呈现显著相关性, 这可能与试验设计有关。本试验是在自然降雨条件下进行的, 未控制绿肥覆盖度, 且主要是对植株初花期及盛花期做相关性分析。陈浩等^[30]通过对高羊茅、菖蒲单播及混播草地不同部位(叶、茎、根)对坡面侵蚀的系统研究, 发现各草被地上部分(茎、叶)减流的相对贡献均高于根系, 但其减沙的相对贡献均呈现根系高于地上部分的特征。毛叶苕子地表径流、产沙与茎粗均呈显著负相关关系($P < 0.05$), 与陈浩等的研究结论并不一致, 但Zhang等^[31]研究表明, 草被冠层与根系在减少径流与产沙方面的作用几乎一致, 不同草被类型由于其结构和形态特征存在显著差异, 从而导致对侵蚀的调控效应明显不同, 而毛叶苕子对径流、产沙的调控主要取决于茎粗。毛叶苕子虽冠层茂密但其茎秆柔软细长, 导致冠层结构不稳定。白三叶在幼苗期、初花期减流减沙效果最好, 黑麦草在盛花期、腐解期减流减沙效果最优。白三叶匍匐于地面生长, 其覆盖度高, 且主根短, 侧根发达。须根系的黑麦草为簇生状叶片, 具有很高的叶面积指数, 可以较大程度拦蓄降雨, 延长降雨入渗时间, 另外由于黑麦草具有较厚的冠层可以截留一部分降雨^[27], 须根使黑麦草具有发达的细根结构, 能有效地固结土壤改善土体结构, 从而增强表层土壤的抗侵蚀能力。故在初花期白三叶优先形成的匍匐茎覆盖减流减沙效益优于黑麦草, 而黑麦草在盛花期较厚的冠层及发达的根系对减流减沙的效益要优于白三叶。

植被可通过根系介导的土壤结构（容重、孔隙度、入渗率）改良作用调控坡面产流产沙过程。植物根系作为植物—土壤系统物质交换与能量传输的重要通道，其生长过程通过生物化学作用显著影响土壤物理性质。研究表明，根系发育可促进土壤团聚体形成，降低容重，提升黏聚力及有机质含量^[22]。刘洋等^[32]在片麻岩梯田的长期定位观测发现，随着植被恢复年限的增加，土壤容重降低，总孔隙度提升，持水能力显著增强。朱万泽等^[33]的研究进一步证实，植被重建可使土壤容重降低，总孔隙度增加，从而提升入渗能力并抑制超渗产流。绿肥小区盛花期较幼苗期土壤容重降低、孔隙度上升与刘卓昕等^[34]建立的容重-孔隙度定量关系一致。马雪燕等^[35]发现植被覆盖使土壤入渗能力显著提升，草地系统径流系数较裸地明显降低。赵炯昌等^[36]研究证实，优化植物格局可使入渗量增加，径流量和侵蚀量减少。本研究得出相似规律：壤中流与容重、平均入渗率呈负相关，与孔隙度呈正相关。机理分析表明，发达的根系通过增加大孔隙比例改善入渗性能，同时根系分泌物及残体分解使有机质含量增加，促进水稳性团聚体的形成。

绿肥通过形态特征（茎粗、根长、株高、覆盖度）和改良土壤结构（容重、孔隙度、平均入渗率）双重机制影响产流产沙过程。而黑麦草根长是影响地表产沙的主要植株特征，茎粗是影响毛叶苕子地表径流的主要植株特征。故在品种选择上可选取根长较大，茎粗较优的黑麦草及毛叶苕子变异品种。黑麦草盛花期及腐解期的减流减沙效益最优，白三叶幼苗期及初花期减流减沙效益最优。未来研究可探讨黑麦草与白三叶在柑橘园水土保持中的协同增效作用。在生产实践中，西南山地柑橘园可混合播种黑麦草、白三叶等绿肥。不同地区可选择适合本地种植的绿色肥，监测其减流减沙效益，分析减流减沙效益在生长期内的变化，进行绿肥搭配种植，以期获得最佳的水土保持效果。



注：实线和虚线分别表示正相关和负相关。线的粗细表示影响的大小。* $P < 0.05$ 。Note: Solid and dashed lines represent positive and negative correlations respectively. Line thickness indicates the magnitude of the effect. * $P < 0.05$.

图9 绿肥地上部分及根系对产流产沙的作用强度

Fig. 9 Intensity of aboveground biomass and root system effects on runoff and sediment yield under green manure cultivation

4 结论

绿肥株高、根长和茎粗等形态指标随生长周期（初花期至盛花期）均呈增长趋势，土壤容重、孔隙度、平均入渗率等土壤结构指标受到绿肥种植及其生长周期的显著影响。盛花期绿肥小区土壤容重、孔隙度、平均入渗率较幼苗期分别呈降低、增加、提高的特征，而清耕小区则相反。毛叶苕子在改善土壤容重及孔隙度上表现最优，盛花期土壤容重、孔隙度最大降幅及增幅分别为 8.69%及

8.22%，其株高、根长显著优于白三叶及黑麦草。而黑麦草的土壤平均入渗率在盛花期表现最优，白三叶次之；黑麦草茎粗最大，白三叶覆盖度最高。根长对壤中流及产沙的作用强度分别为 0.66、0.71，株高、覆盖度分别对地表径流、地表产沙的作用强度分别为 0.62、0.61。绿肥类型与生育阶段的交互作用显著影响水土保持效益，白三叶在生长前期（幼苗期至初花期）具有明显优势，而黑麦草在生长后期（盛花期至腐解期）及非生长期表现更优。在坡地橘园中混合种植黑麦草和白三叶可起到最佳的水土流失防控作用。在果园土壤管理等生产实践活动中，可根据具体生态功能要求，因地制宜地进行绿肥品种的混合搭配及时序配置，以达到最佳的生产与生态效益。

参考文献 (References)

- [1] Huang B Y, Li S C, Long F, et al. Comparative study on nutrient element characteristics of purple soil under different weathering degrees[J]. Soil and Water Conservation in China, 2014(6): 22-26. [黄宝玉, 李绍才, 龙凤, 等. 不同风化程度下紫色土营养元素特性比较研究[J]. 中国水土保持, 2014(6): 22-26.]
- [2] 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.]
- [3] Song X B, Fang X J, Li G X, et al. The research progress of impact of interflow on the nutrient loss of purple soil slope[J]. Journal of Yunnan Agricultural University(Natural Science), 2015, 30(2): 311-316. [宋想斌, 方向京, 李贵祥, 等. 壤中流对紫色土坡面养分流失影响研究进展[J]. 云南农业大学学报(自然科学版), 2015, 30(2): 311-316.]
- [4] Wei Z K, Wang X, Wu Y P, et al. Effects of green manure planting on soil ammonium oxidizing microorganisms in *Citrus* orchards[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2024, 43(1): 122-132. [魏振康, 王雪, 伍玉鹏, 等. 橘园绿肥种植对土壤氨氧化微生物的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(1): 122-132.]
- [5] Zhang W Q, Jin S C, Liu Z W, et al. Nutrient content of four different Leguminous green manure and its effect on soil fertility improvement potential[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2024, 47(5): 891-897. [张雯琦, 金思成, 刘智文, 等. 4 种豆科绿肥养分含量及其对土壤培肥效应分析[J]. 南京农业大学学报, 2024, 47(5): 891-897.]
- [6] Zhang X X, Yang Z R, Zha T G, et al. Changes in the physical properties of soil in forestlands after 22 years under the influence of the conversion of cropland into farmland project in loess region, western Shanxi Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(2): 416-424. [张晓霞, 杨宗儒, 查同刚, 等. 晋西黄土区退耕还林 22 年后林地土壤物理性质的变化[J]. 生态学报, 2017, 37(2): 416-424.]
- [7] Li C, Wang J, Xing W C, et al. Effects of green manure on physical properties of topsoil in a dryland winter wheat field[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(2): 107-113, 121. [李超, 王俊, 邢文超, 等. 绿肥填闲种植对旱作冬小麦农田耕层土壤物理性质的影响[J]. 水土保持通报, 2022, 42(2): 107-113, 121.]
- [8] Zhang A H, Yao D J, Zhang Y T, et al. Effects of green manure on soil physical properties, yield of kiwifruit in orchard[J]. Northern Horticulture, 2022(1): 86-93. [张爱华, 姚单君, 张宇亭, 等. 猕猴桃园绿肥对土壤物理性质、猕猴桃产量的影响[J]. 北方园艺, 2022(1): 86-93.]
- [9] Yan Y, Zhen H C, Zhai X Y, et al. The role of vegetation on earth bunds in mitigating soil erosion in Mollisols region of Northeast China[J]. Catena, 2021, 196: 104927.
- [10] Liu Y, Zhao L. Effect of plant morphological traits on throughfall, soil moisture, and runoff[J]. Water, 2020, 12(6): 1731.
- [11] Li Q, Liu G B, Zhang Z, et al. Relative contribution of root physical enlacing and biochemical exudates to soil erosion resistance in the Loess soil[J]. Catena, 2017, 153: 61-65.
- [12] Chen L S, Mei L, Chen Y Z, et al. Effects of interplanting herbage on surface runoff associated with nitrogen and phosphorus losses in *Camellia oleifera* plantations[J]. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition), 2021, 45(6): 127-134. [陈隆升, 梅莉, 陈永忠, 等. 油茶林生草栽培对地表径流及氮磷流失特征的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45(6): 127-134.]

- [13] Xu H, Yan Z W, Hu R G, et al. Ecological control effect of different herbaceous vegetative filter belts on nitrogen and phosphorus in runoff[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(6): 140-147, 155. [徐晗, 鄢紫薇, 胡荣桂, 等. 不同草本植被过滤带对径流中氮磷的生态阻控效果[J]. 水土保持学报, 2022, 36(6): 140-147, 155.]
- [14] Liu R, Zhang Y T, Wang Z C, et al. Control effect of green manure cover on nitrogen and phosphorus loss of *Citrus* orchard on purple soil slope farmland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(2): 68-74. [刘瑞, 张宇亭, 王志超, 等. 绿肥覆盖对紫色土坡耕地柑橘园氮磷流失的阻控效应研究[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 68-74.]
- [15] Muhtar·zari, Gulmira·kakix, Ahat·keram, et al. Effects of green manure intercropping on soil fertility and fruit quality in “Huizao” Jujube orchard[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2024(7): 135-142. [木合塔尔·扎热, 故丽米热·卡克什, 艾海提·克然木, 等. 绿肥间作对灰枣果园土壤肥力和果实品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2024(7): 135-142.]
- [16] Feng H M, Guo X L, Xiao Y Y, et al. Evaluation of soil fertility under different planting and breeding models based on principal component analysis[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2023(10): 1-10. [冯慧敏, 郭小丽, 肖远业, 等. 基于主成分分析不同种养模式下的土壤肥力评价[J]. 中国土壤与肥料, 2023(10): 1-10.]
- [17] Li Y Z, Han T F, Liu K L, et al. Response of soil enzyme activity and rice yield to winter green manure incorporation in red paddy soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2023, 29(7): 1313-1322. [李亚贞, 韩天富, 柳开楼, 等. 红壤稻田土壤酶活性及水稻产量对翻压冬季绿肥的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(7): 1313-1322.]
- [18] Ma D K, Yin L N, Ju W L, et al. Meta-analysis of green manure effects on soil properties and crop yield in northern China[J]. Field Crops Research, 2021, 266: 108146.
- [19] Yang C X, Zhao Z P, Yang L P, et al. Nutrient characteristics of mulch green manure and their influences on soil physical and chemical property in Yunnan rubber plantation[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(2): 467-474. [杨春霞, 赵志平, 杨丽萍, 等. 不同覆盖绿肥养分特性及其对橡胶园土壤理化性质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 467-474.]
- [20] Cheng F S, You L H, Yu J L, et al. Effects of cold-season green manure on soil biochemical properties and the microbial community in a *Castanea henryi* orchard, China[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(11): 62-75. [程分生, 尤龙辉, 余锦林, 等. 冷季型绿肥对锥栗园土壤生化性质及微生物群落的影响[J]. 草业学报, 2021, 30(11): 62-75.]
- [21] Wang C Y, Chen D, Cai S D, et al. The impact of grass cultivation on the physicochemical properties of soil in cherry orchards in the southwestern Shandong Region[J]. Journal of Fruit Resources Guoshu, 2025, 6(4): 52-54, 68. [王传印, 陈迪, 蔡生栋, 等. 生草栽培对鲁西南地区樱桃园土壤理化性质的影响[J]. 果树资源学报, 2025, 6(4): 52-54, 68.]
- [22] Liu F, Wang P P, Cao Y Y, et al. Root distribution characteristics of typical herbaceous plants and their effects on soil physicochemical properties on the Loess Plateau[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2024, 33(10): 1-13. [刘芳, 王佩佩, 曹玉莹, 等. 黄土高原典型草本植物根系分布特征及其对土壤理化性质的影响研究[J]. 草业学报, 2024, 33(10): 1-13.]
- [23] Liu S Y, Zuo C Q. A review of vegetation impacts on runoff[J]. Territory & Natural Resources Study, 2005(1): 42-44. [刘士余, 左长清. 植被对径流影响的研究综述[J]. 国土与自然资源研究, 2005(1): 42-44.]
- [24] Xiong S Z, Lü G, Li Y X, et al. Response of soil denudation process to vegetation coverage of dumping site under extreme rainstorm conditions [J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62(5): 1271-1281. [熊姝臻, 吕刚, 李叶鑫, 等. 极端暴雨作用下排土场边坡土壤剥蚀率对植被覆盖度的响应[J]. 土壤学报, 2025, 62(5): 1271-1281.]
- [25] Shao Y M, Gao G Y, Liu J B, et al. Effects of vertical cover structure of grass and shrub on reducing runoff and soil loss under natural rainfall in the Loess Hilly Region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(1): 322-331. [邵奕铭, 高光耀, 刘见波, 等. 自然降雨下黄土丘陵区草灌植物垂直覆盖结构的减流减沙效应[J]. 生态学报, 2022, 42(1): 322-331.]
- [26] Wu Z, Jiang Y J, Jiang G H, et al. Characteristics of different land-use types of slope runoff in a karst trough valley located in Zhongliang Mountain, Chongqing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(16): 6072-6082. [吴泽, 蒋勇军, 姜光辉, 等. 中梁山岩溶槽谷区不同土地利用方式坡地产流规律[J]. 生态学报, 2019, 39(16): 6072-6082.]

- [27] Gan Z T, Ye J, Zhou Q, et al. Effects of grass vegetations on the processes of soil erosion over slope lands in simulated rainfalls[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(9): 2387-2396. [甘卓亭, 叶佳, 周旗, 等. 模拟降雨下草地植被调控坡面土壤侵蚀过程[J]. *生态学报*, 2010, 30(9): 2387-2396.]
- [28] Jiao R Y, Song X Y, Zhao X K, et al. Runoff and sediment yield benefits and hydraulic characteristics of perennial ryegrass plantation canopy and root slope in the Loess Plateau[J]. *Arid Land Geography*, 2022, 45(1): 208-218.[焦若禹, 宋孝玉, 赵新凯, 等. 黄土沟壑区黑麦草植被冠层与根系坡面水沙效益及水力特性[J]. *干旱区地理*, 2022, 45(1): 208-218.]
- [29] Zhang S Y, Liang Z Q, Xie Z Y, et al. Effects of different parts of *Trifolium repens* L. on sediment reduction and runoff hydrodynamic parameters[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(8): 1306-1314. [张思毅, 梁志权, 谢真越, 等. 白三叶不同部位减沙效应及其对径流水动力学参数的影响[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(8): 1306-1314.]
- [30] Chen H, Wang B, Wang D D, et al. Regulation effects of the roots, stems, and leaves of mixed grassland on erosion processes of loess slope in northern Shaanxi Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(17): 8449-8464. [陈浩, 王博, 王豆豆, 等. 混播草地不同部位对陕北黄土坡面侵蚀过程的调控效应[J]. *生态学报*, 2025, 45(17): 8449-8464.]
- [31] Zhang X, Yu G Q, Li Z B, et al. Experimental study on slope runoff, erosion and sediment under different vegetation types[J]. *Water Resources Management*, 2014, 28(9): 2415-2433.
- [32] Liu Y, Hou Z S, Zhao S, et al. Evolution of plant species diversity and soil characteristics on hillslopes during vegetation restoration in the gneiss region of the Taihang Mountains after reclamation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(15): 5331-5339. [刘洋, 侯占山, 赵爽, 等. 太行山片麻岩山区造地边坡植被恢复过程中植物多样性与土壤特性的演变[J]. *生态学报*, 2018, 38(15): 5331-5339.]
- [33] Zhu W Z, Sheng Z L, Shu S M. Soil physical properties and water holding capacity of natural secondary forests in a sub-alpine region of western Sichuan, China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(6): 205-212. [朱万泽, 盛哲良, 舒树淼. 川西亚高山次生林恢复过程中土壤物理性质及水源涵养效应[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(6): 205-212.]
- [34] Liu Z X, Gao P, Mu X M, et al. Effects of vegetation restoration on soil hydrophysical properties in loess region[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(6): 206-213. [刘卓昕, 高鹏, 穆兴民, 等. 黄土区植被恢复对土壤水文物理性质的影响[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(6): 206-213.]
- [35] Ma X Y, Mu X M, Wang S Y, et al. Effects of vegetation restoration on soil infiltration and runoff in the Gully Regions on the Loess Plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(6): 89-96, 104. [马雪燕, 穆兴民, 王双银, 等. 黄土高塬沟壑区植被恢复对土壤入渗及产流的影响[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(6): 89-96, 104.]
- [36] Zhao J C, Pan D L, Wei W, et al. Simulation experiment on the influence of vegetation pattern on soil infiltration and water and sediment process[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(4): 1373-1380. [赵炯昌, 潘岱立, 卫伟, 等. 植被格局对土壤入渗和水沙过程影响的模拟试验研究[J]. *生态学报*, 2021, 41(4): 1373-1380.]

(责任编辑: 檀满枝)