

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.05.001 CSTR:32310.14.stbxb.2025.05.001

史小鹏,何淑勤,杨艳,等.川西高山峡谷区不同种植模式坡面微地形变化及其对细沟发育的响应[J].水土保持学报,2025,39(5):33-43,52.

SHI Xiaopeng, HE Shuqin, YANG Yan, et al. Microtopographic changes of slopes under different planting patterns and their responses to rill development in the alpine canyon areas of western Sichuan[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(5): 33-43, 52.

川西高山峡谷区不同种植模式坡面微地形 变化及其对细沟发育的响应

史小鹏¹, 何淑勤^{1,2,3}, 杨艳⁴, 易海燕¹, 郑子成⁵, 张卫^{6,7}

(1.四川农业大学林学院,成都 611130; 2.长江上游森林生态与保育四川省重点实验室,成都 611130;
3.四川峨眉山森林生态系统国家定位观测研究站,成都 611130; 4.四川省水利规划研究院,
成都 610072; 5.四川农业大学资源学院,成都 611130; 6.康定市水利局,
四川 康定 626000; 7.都江堰市水务局,四川 都江堰 611800)

摘要: [目的] 为明晰高山峡谷区坡耕地不同种植模式对细沟形态变化特征的影响,选择适宜提升区域水土保持的种植模式。 [方法] 以裸坡为对照,以花椒树+李树+鹤草、花椒树+樱桃树+五月艾、花椒树+豆角、李树+黄豆等主要种植模式的坡耕地为研究对象,采用原位径流小区冲刷试验与运动恢复结构(structure from motion, SfM)摄影测量相结合的方法,分析不同冲刷流量下(6、10、14 L/min)坡面细沟形态特征及其与微地形变化的关系。 [结果] 1)相较于裸坡,不同种植模式侵蚀区面积达38.37%~78.43%;中大流量(10、14 L/min)条件下,不同种植模式下坡面粗糙度变化幅度均大于裸坡(-16.49%~11.56%);冲刷后15°~25°微坡度栅格占比提升0.70%~32.07%,60°~90°栅格占比降低1.40%~51.48%。 2)不同种植模式显著改变坡面汇流形态,形成具有分形特征的“树枝状”径流网络,其中花椒+李树+鹤草模式在6、14 L/min流量下分形维数达1.465~1.476,具有较强的径流分散和泥沙调控能力。不同种植模式坡面细沟纵剖面形态均表现为“宽浅式”,宽深比较裸坡降低25.98%~72.79%。 3)相较于微坡向和微坡度,不同种植模式坡面粗糙度与细沟纵剖面形态关系更为密切($p < 0.01$)。逐步回归分析表明,地面粗糙度是调控细沟发育的核心因子,通过优化地面粗糙度,可有效降低坡面细沟侵蚀风险。 [结论] 研究结果可为高山峡谷区坡耕地水土保持措施合理配置与水土流失有效防控提供理论依据。

关键词: 种植模式; 细沟侵蚀; 地表微地形; 坡耕地; 高山峡谷区

中图分类号: S157.1 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2025)05-0033-11

Microtopographic Changes of Slopes under Different Planting Patterns and Their Responses to Rill Development in the Alpine Canyon Areas of Western Sichuan

SHI Xiaopeng¹, HE Shuqin^{1,2,3}, YANG Yan⁴, YI Haiyan¹, ZHENG Zicheng⁵, ZHANG Wei^{6,7}

(1.College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2.Forest Ecology and Conservation in the Upper Researches of the Yangtze River Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 611130, China; 3.Sichuan Emei Mountain Forest Ecosystem National Observation and Research Station, Chengdu 611130, China; 4.Sichuan Institute of Water Resource Planning, Chengdu 610072, China; 5.College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 6.Kangding Water Resources Bureau, Kangding, Sichuan 626000, China; 7.Dujiangyan Irrigation Project Water Affairs Bureau, Dujiangyan, Sichuan 611800, China)

Abstract: [Objective] This study aimed to clarify the impacts of various planting patterns on rill morphological characteristics in sloping farmland within alpine canyon areas, and to select optimal planting patterns for enhancing soil and water conservation in the region. [Methods] Using bare slopes as control, we investigated four main

收稿日期: 2024-12-26 修回日期: 2025-02-24 录用日期: 2025-03-05 网络首发日期(www.cnki.net): 2025-06-04

资助项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF1302903); 四川省区域创新合作项目(2024YFHZ0193)

第一作者: 史小鹏(1995—), 男, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: 377922673@qq.com

通信作者: 何淑勤(1976—), 女, 博士生导师, 教授, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: angelhsq@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

planting configurations as the research subjects, including *Zanthoxylum*+Plum+*Candian fleabane*, *Zanthoxylum*+Cherry+*Artemisia indica*, *Zanthoxylum*+Green bean, and Plum+Soybean. The morphological characteristics of hillslope rills and their relationships with microtopographic alterations under different scour discharge rates (6, 10, and 14 L/min) were analyzed through in-situ runoff plot scour tests combined with the Structure-from-Motion (SfM) photogrammetry. [Results] 1) Compared to bare slopes, the erosion area for various planting patterns ranged from 38.37% to 78.43%. Under high flow conditions (10 and 14 L/min), the fluctuation in slope roughness for different planting patterns was more pronounced compared to bare slopes (-16.49% to 11.56%). After scour analysis revealed a 0.70% to 32.07% increase in 15° to 25° microtopographic units alongside a 1.40% to 51.48% reduction in 60° to 90° steep gradient segments. 2) Planting patterns altered the confluence patterns on slopes, resulting in a "dendritic" runoff network with fractal characteristics. At discharge rates of 6 and 14 L/min, the fractal dimension of the *Zanthoxylum* +Plum+*Candian fleabane* pattern ranged from 1.465 to 1.476, indicating superior flow redistribution capacity and effective regulation of hillslope sediment transport dynamics. The longitudinal profiles of rills under different planting patterns exhibited a "wide and shallow" morphology, with the width-to-depth ratio decreasing by 25.98% to 72.79% compared to bare slopes. 3) Compared to the micro-slope direction and micro-slope, the relationship between surface roughness and rill profile morphology was more closely associated ($p < 0.01$). Stepwise regression analysis revealed that surface roughness was the key factor driving rill development, and optimizing surface roughness could significantly reduce the risk of rill erosion. [Conclusion] The findings of this research can offer a theoretical foundation for rational allocation of soil and water conservation measures, as well as for effective prevention and control of soil and water loss in sloping farmland located in alpine canyon regions.

Keywords: planting patterns; rill erosion; surface microtopography; sloping farmland; alpine canyon areas

Received: 2024-12-26

Revised: 2025-02-24

Accepted: 2025-03-05

Online(www.cnki.net): 2025-06-04

土壤侵蚀是全球性的主要生态环境问题之一, 严重威胁社会和农业的可持续发展^[1]。据统计^[2], 全球范围内土壤侵蚀面积约为 1.64×10^7 km², 已达到地表总面积的 10.9%。其中坡耕地水土流失量是林草地的多倍^[3], 集中水流引起的细沟侵蚀是坡耕地侵蚀的主要来源, 细沟侵蚀量占到坡耕地土壤流失的 60%~80%^[4]。因此, 细沟侵蚀防治是坡耕地水土保持的重要任务^[5], 而精准刻画坡面细沟侵蚀发育过程成为坡耕地保护的关键基础环节, 对于提高坡耕地土壤侵蚀的预报精度和探索更为合理的种植模式具有重要意义。微地形主要通过影响坡面径流, 进而对坡面细沟侵蚀产生抑制或促进作用^[6], 而这些作用的产生与微地形的空间分布密切相关^[7]。近年来, 随着 GIS 技术在土壤侵蚀领域的广泛应用, 微地形空间因子的提取为细沟侵蚀分析提供了新思路, 国内外学者多采用地表高程变化、地面粗糙度、微坡向和细沟纵剖形态等因子来表征细沟侵蚀的发育特征^[6-9], 从不同角度开展细沟侵蚀机理方面研究。有研究^[10]表明, 黄土坡面细沟宽深比为 1.93~2.35, 且随着降雨强度的增加而增大^[5], 细沟密度、细沟割裂度和细沟复杂度均随降雨强度和坡度的增加而增大^[9]; 黏土

坡面细沟宽深比为 1.64~1.88, 且随着坡度的增加逐渐减小^[11]; 而黑土坡面细沟宽深比为 2.3~4.9, 细沟纵剖形态沿坡面呈“宽浅型—窄深型—宽浅型”变化^[12]。随着分形理论在地学领域的应用, 部分学者^[5,13]将分形理论引入细沟侵蚀研究中, 并以分形维数作为地形的量化参数, 建立区域土壤侵蚀预报模型^[14], 不仅有助于分析细沟侵蚀的内在联系与演变规律, 而且有效克服传统单因子量化参数的局限性^[13]。

西南高山峡谷区作为我国“三区四带”的重要生态屏障, 气候和地形复杂, 区域山高坡陡, 降水季节分布不均, 暴雨频发, 4—10月降雨量达到年降雨量的 80%, 区域内土壤类型丰富, 但土层薄、石砾多, 有机质积累慢, 抗扰动能力弱^[15]。此外, 少数民族传统生计方式导致耕地破碎且垂直差异明显^[16], 水土流失已成为该区域最为严重的环境问题之一, 严重制约着区域社会经济可持续发展。为了推动当地经济, 充分发挥民族特色资源的优势, 目前坡耕地内已形成较大规模的复合种植模式。虽然复合种植对坡面径流泥沙的调控作用可以有效地降低坡面水土流失程度^[14], 但在地形与气候独特的高山峡谷区, 坡耕地内植被的截流减沙效益受到严重限制^[17], 因此, 探

究高效合理的种植模式显得尤为重要。以往对高山峡谷区坡耕地水土流失的研究主要聚焦于无植被覆盖的裸坡养分流失及产流产沙^[18-20],针对坡耕地内形成的不同种植模式在自然条件下如何影响坡面土壤流失的研究尚不清晰,尤其是不同种植模式引起的地表微地形变化及其对细沟侵蚀特征参数的响应关系仍不明确。鉴于此,本研究以川西高山峡谷区康定市为研究区,以花椒树+李树+鹤草、花椒树+樱桃树+五月艾、花椒树+豆角、李树+黄豆复合种植模式为研究对象,并以裸坡为对照,采用野外原位放水冲刷试验与运动恢复结构技术相结合的方法,从地表微地形角度,开展不同种植模式坡面微地形变化特征及其对细沟侵蚀响应的研究,阐明水蚀过程中坡面细沟变化特征,以期为高山峡谷区坡耕地水土保持措施的合理配置提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于四川省康定市东部麦崩乡(30°13′~30°22′N, 102°13′~102°18′E),地处我国西南部(图1),地形由西北向东南倾斜,地形地貌支离破碎,沟壑纵横,是典型的高山峡谷区,海拔1 900~2 200 m,年平均气温5°~7°,属高原型大陆性季风气候。年平均降雨量为909.7~1 011.8 mm,集中于5—10月,占70%以上,具有历时短、强度大等特点。土壤类型以黄棕壤为主。区域内坡耕地种植主要以复合种植模式为主,包括花椒树(*Zanthoxylum bungeanum* Maxim.)+樱桃树(*Cerasus pseudocerasus*) +五月艾(*Artemisia indica* Willd.)、花椒树+李树(*Prunus cerasifera* Ehrh.)+鹤草(*Silene fortunei* Vis.)、花椒树+豆角(*Vigna unguiculata* subsp.)、花椒树+重楼(*Paris polyphylla*)等,以及单作玉米(*Zea mays* L.)、豆类(*Glycine max*)等模式。研究区土壤体积质量为1.34 g/cm³,总孔隙度为44.4%,有机质质量分数为38.59 g/kg,黏粒、粉粒和砂粒体积分数分别为21.9%、14.2%和63.9%。

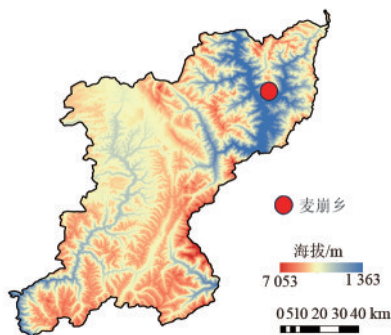


图1 研究区位置

Fig. 1 Geographic location of the study area

2 研究方法

2.1 试验区布设

试验于2023年5—10月在康定市麦崩乡进行。以研究区坡耕地分布情况为基础,利用无人机进行全方位航拍,并与实地调查结果相互对照验证,最终选取当地应用广泛、能够反映研究区典型种植情况的花椒树+李树+鹤草(ZPC)、花椒树+樱桃树+五月艾(ZCA)、花椒树+豆角(ZG)和李树+黄豆(PS)4种植模式作为研究对象,同时以裸坡(CK)为对照。

选取坡度(12°)、坡向(阳坡)、海拔、覆盖度和树龄较为一致的核心区域,参照全球观测体系监测样地的建设标准(forest global earth observatory, forest GEO, <https://www.forestgeo.si.edu/>),在每种种植模式和裸坡中,分别设置3个样地,样地间隔>50 m以避免相互干扰,每个样地进一步划分为3个样方(20 m×20 m)。每个样方内选择作物和植物长势、配置方式、土壤水肥条件相对一致的地块建立径流小区,规格为5 m(长)×2 m(宽)。每个样方的径流小区按照1个冲刷流量进行设置,即每个样地的3个样方分别对应3个冲刷流量,3个样地作为试验的重复,整个试验共设立45个径流小区。不同种植模式的耕地管理方式及种植规格均按当地农耕习惯进行(表1)。

2.2 冲刷试验

根据研究区暴雨发生频率和雨季多年降雨量资料,将试验小区面积换算为单宽流量^[12],结合前期预试验情况,分别设定6、10、14 L/min 3个流量梯度,冲刷时间为产流后60 min。试验开始前,在不扰动表层土壤和破坏地表微地形的条件下修剪坡面植被和作物至5 cm(乔木除外),以消除植被对地表遮盖而产生的影响^[8],并在径流小区四周设置14个标靶作为摄影测量建模控制点^[21]。

2.3 地表微地形因子

2.3.1 点云数据获取与DEM生成 采用运动恢复结构技术(SfM)进行微地形变化测定。每次冲刷试验前后,利用数码相机Canon EOS70D(*f*=18 mm)移动式对坡面进行拍摄,采集坡面微地形信息,相邻2张照片的重叠率为70%~80%。拍摄照片数量因细沟规模而异,为200~240张^[21],之后导入Agisoft Photoscan 1.3.3中通过尺度不变特征转换算法(scale-invariant feature transform, SIFT)提取标定点,采用光束法平差(bundle adjustment, BA)进行非线性优化,并建立稀疏点云。在此基础上,利用多视图立体视觉算法(patch-based multi-view stereo, PMVS)重建稠密点云,最终生成DEM(0.05 m×0.05 m),将DEM导入ArcGIS 10.8软件中提取相关参数。

表 1 试验小区基本情况
Table 1 Fundamental conditions of the experimental plot

种植模式	冠幅/m	胸径/cm	树高/m	树龄/a	海拔/m	覆盖度/%	株行距
ZPC	2.11(花椒树), 1.88(李树)	2.88(花椒树), 2.35(李树)	2.31(花椒树), 2.11(李树)	5(花椒树), 6(李树)	2 153	72	每区含 1 棵李树, 1 棵花椒树, 株行距为 2 m×1.5 m。鹤草种植密度为 720 000 株/hm ²
ZCA	2.31(花椒树), 1.5(樱桃树)	2.04(花椒树), 11.25(樱桃树)	2.33(花椒树), 1.80(樱桃树)	5(花椒树), 4(樱桃树)	2 148	75	每区含 1 棵花椒树和 1 棵樱桃树, 株行距为 2 m×1.5 m。五月艾种植密度为 423 333 株/hm ²
ZG	2.65(花椒树)	2.12(花椒树)	2.79 (花椒树)	6(花椒树)	2 131	55	每区含 2 棵花椒树, 株行距为 2 m×2 m。花椒树下种植豆角, 株行距为 0.5 m×0.5 m
PS	2.97(李树)	5.88(李树)	2.82(李树)	6(李树)	2 127	57	每区含 2 棵李树, 株行距为 2 m×1.5 m。李树下种植黄豆, 株行距为 0.5 m×0.5 m
CK					2 150		

2.3.2 微地形因子计算 地面粗糙度反映地表单元起伏变化的复杂程度, 采用地表高程标准差表示, 计算公式为:

$$SSR = \sqrt{\left[\frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (Z_i - \bar{Z})^2 \right]} \quad (1)$$

式中: Z_i 为 i 点的高程值, cm; k 为点个数。

在 DEM 的基础上, 利用向量拆分原理将坡度分为 0~3°、3°~8°、8°~15°、15°~25°、25°~35°、35°~45°、45°~60°、60°~75°、75°~90°, 统计各种种植模式细沟侵蚀前后微坡度分级中的栅格数占比^[6]。坡向改变细沟径流流向, 因此将微坡向以正北方向为 0, 按顺时针排列, 为 0~360°^[6], 分别代表北、东北、东、东南、南、西南、西、西北方向, 统计各坡向的栅格占比。

2.4 坡面汇流及地表细沟形态

2.4.1 汇流网络分析 采用 Strahler 分级法对汇流网络进行分级。在 Arcgis 10.8 软件中运用河网矢量化提取各坡面汇流网络, 并计算其汇流密度及径流频度, 以线条粗细表征径流等级, 线条越粗径流等级越高^[22]。汇流密度和径流频度从不同角度表征汇流网络中径流的集中与分散程度, 分别指单位面积内径流路径的长度和数量, 其值越大, 汇流网络越发达, 径流集中程度越低^[21], 计算公式为:

$$D_d = \frac{\sum_{j=1}^n L_{(j)}}{A} \quad (2)$$

式中: D_d 为汇流密度, m/m²; A 为总汇流面积, m²; $\sum_{j=1}^n L_{(j)}$ 为一级径流栅格内径流长度和; j 为径流栅格总数。

$$C_f = \frac{\sum_w N_w}{A} \quad (3)$$

式中: C_f 为径流频度, N/m²; A 为总汇流面积, m²; n 为

径流数量; w 为最高级径流数量。

细沟沟网可以基于分形维数原理, 采用盒维数法进行量化, 沟网越发达, 组织程度越高^[13]。将选定区域分成若干边长为 r 的格子(盒子尺寸 r 为 20~200 mm), 计算出对应非空网格数 $N(r)$, 由双对数坐标中 $\ln N(r)$ 和 $\ln r$ 作线性回归求出分形维数(D), 计算公式为:

$$D = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln N_r}{-\ln r} \quad (4)$$

式中: N_r 为相交盒子数; r 为盒子尺寸。

2.4.2 细沟形态特征 基于水系提取原理^[23], 在 AutoCAD 2019 软件中对沟长、沟宽及沟深进行测量并计算其形态参数。

1) 细沟密度

细沟密度反映坡面细沟的丰富程度^[24], 计算公式为:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{S} \quad (5)$$

式中: ρ 为细沟密度, m/m²; S 为坡面面积, m²; L_i 为第 i 条细沟长, m; i 为细沟条数($i=1, 2, \dots, n$)。

2) 细沟平均宽度和深度

细沟平均宽度和深度是坡面所有细沟宽度和深度的加权平均值^[11], 计算公式分别为:

$$\bar{W} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (6)$$

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (7)$$

式中: A_i 为第 i 条细沟的表面积, cm; W_i 为第 i 条细沟所有宽度的平均值, cm; D_i 为第 i 条细沟所有宽度的平均值, cm。

3) 细沟宽深比

细沟宽深比表征细沟在发育过程中下切侵蚀与侧蚀间的相互关系^[11],计算公式为:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n W_i}{\sum_{i=1}^n D_i} \quad (8)$$

式中:R为细沟宽深比;W_i为第i条细沟宽度,cm;D_i为第i条细沟深度,cm。

冲刷试验前,分别于不同种植模式试验地采集混合土样,用于土壤基本理化性质测定。其中土壤质地采用比重计法测定,土壤有机质采用重铬酸钾加热法测定,土壤体积质量采用环刀法测定^[25]。

3 结果与分析

3.1 不同种植模式坡面微地形变化特征

基于各小区地表高程变化情况,将坡面划分为

侵蚀区与沉积区,每个等级占试验小区面积的比例见图2。不同冲刷流量条件下,各种种植模式坡面侵蚀区面积均小于CK坡面。6 L/min冲刷流量,不同种植模式下坡面侵蚀区域所占比例为38.37%~58.22%,其中ZPC、ZG模式与CK坡面地表高程变化量均以-20~0 mm分布比例最高;其次为0~20 mm,二者占试验小区面积的60.89%~92.2%;ZCA和PS模式则相反。10 L/min冲刷流量,坡面高程值降低明显,细沟侵蚀较为强烈;不同种植模式坡面侵蚀区域所占比例总和为57.77%~78.43%,其中ZCA模式与CK坡面高程变化量<-100 mm所占比例分别达到37.31%和33.63%。14 L/min冲刷流量,不同种植模式坡面高程变化量分布范围较CK坡面更广,但坡面侵蚀区均<10 L/min(41.47%~56.04%),其中ZPC和PS模式坡面以沉积为主。

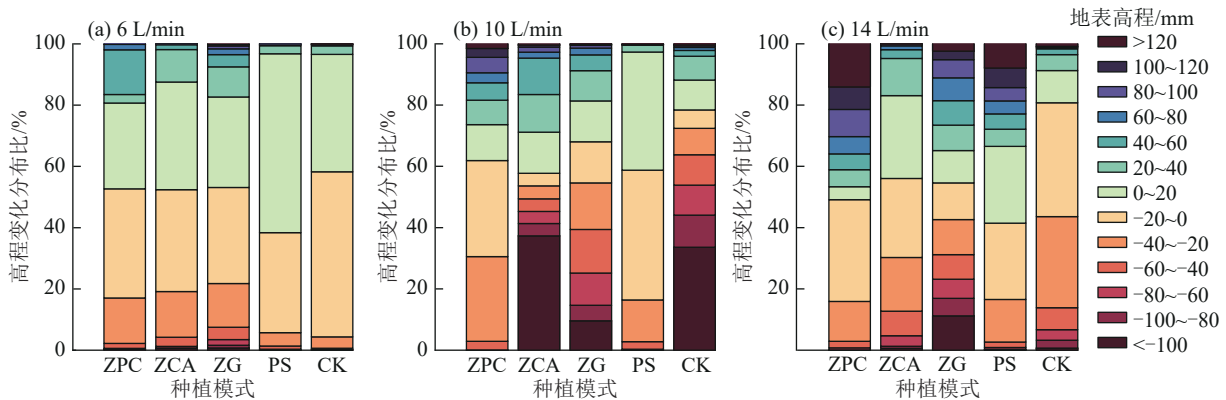


图2 不同种植模式下微地形高程变化量分布

Fig. 2 Distribution of microtopographic elevation change under various planting patterns

由图3可知,不同冲刷流量条件下,各种种植模式坡面粗糙度较冲刷前均有所降低(除14 L/min冲刷流量ZPC和ZCA模式坡面外)。6 L/min冲刷流量,不同种植模式坡面粗糙度变化幅度均小于CK坡面,其中PS模式坡面变幅最大(-7.41%),ZCA模式坡面变幅最小(-1.71%)。10 L/min冲刷流量,不同种

种植模式坡面粗糙度变化幅度均大于CK坡面,其中ZCA模式坡面变幅最大(-16.49%),PS模式坡面变幅最小(-0.83%)。14 L/min冲刷流量,不同种植模式坡面粗糙度变化幅度均大于CK坡面,变化幅度为-6.20%~11.56%,其中ZPC和ZCA模式坡面粗糙度与冲刷前相比略有增加。

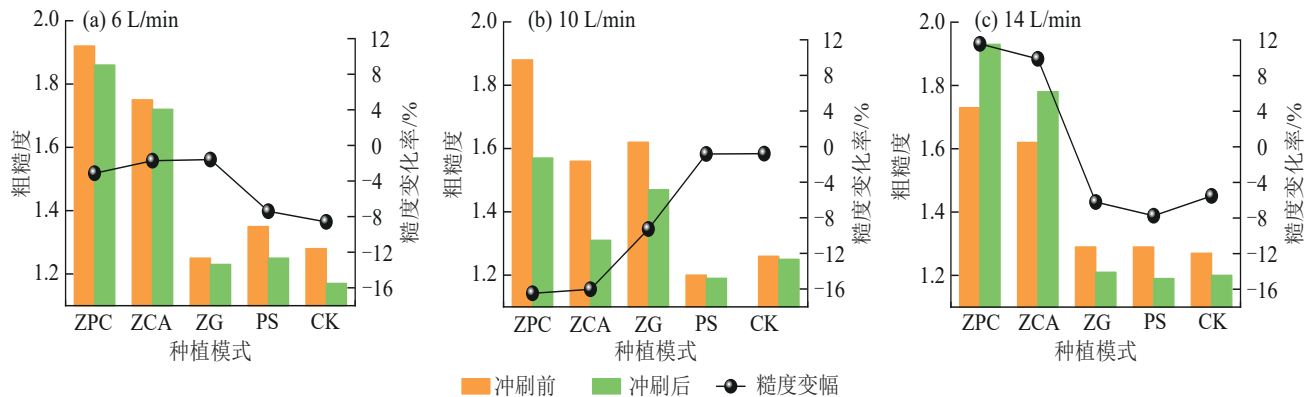


图3 不同种植模式下坡面粗糙度变化特征

Fig. 3 Variation characteristics of slope surface roughness under different planting patterns

由图 4 可知,不同冲刷流量条件下各种植模式坡面南坡向栅格占比均小于 CK 坡面。6 L/min 冲刷流量,不同种植模式坡面南坡向占试验小区栅格总数的 2.16%~24.17%。其中,ZG 模式坡面南坡向占比最大,PS 模式最小;10 L/min 冲刷流量,不同种植模式坡面南坡向占试验小区栅格总数的 20.04%~

26.77%。其中,PS 模式坡面占比最大,ZPC 模式最小;14 L/min 冲刷流量,不同种植模式坡面南坡向占试验小区栅格总数的 16.50%~24.89%。其中,ZG 模式坡面占比最大,ZCA 模式占比最小。同一种植模式下各坡向栅格分布比随冲刷流量的增加无明显突变。

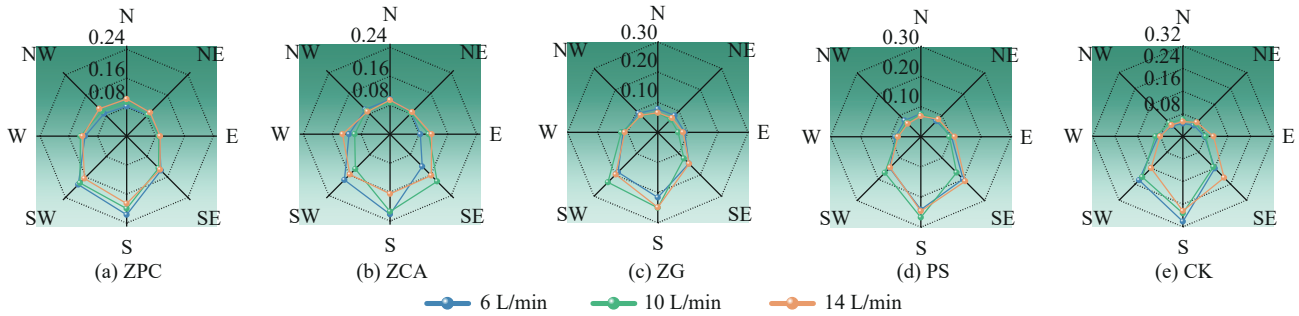


图 4 微坡向分布特征

Fig. 4 Distribution characteristics of micro-slope

由图 5 可知,不同种植模式坡面微坡度在冲刷结束后 15°~25°栅格占比均增大,60°~90°栅格占比均减小(除 14 L/min 冲刷流量 ZCA 模式和 CK 坡面外)。6 L/min 冲刷流量,不同种植模式坡面 15°~25°栅格占比增幅为 0.70%~9.53%,其中 ZG 模式坡面增幅最小,60°~90°栅格占比降幅为 1.40%~51.48%,其中 ZCA 模式坡面降幅最小。10 L/min 冲

刷流量,不同种植模式坡面 15°~25°栅格占比增幅为 1.07%~32.07%,60°~90°栅格占比降幅为 2.61%~43.76%,其中 ZPC 模式坡面变幅最大,CK 坡面最小。14 L/min 冲刷流量,不同种植模式坡面 15°~25°栅格占比增幅为 7.56%~18.32%,60°~90°栅格占比降幅为 6.43%~37.03%,其中 ZPC 模式坡面变幅最大,ZG 模式坡面变幅最小。

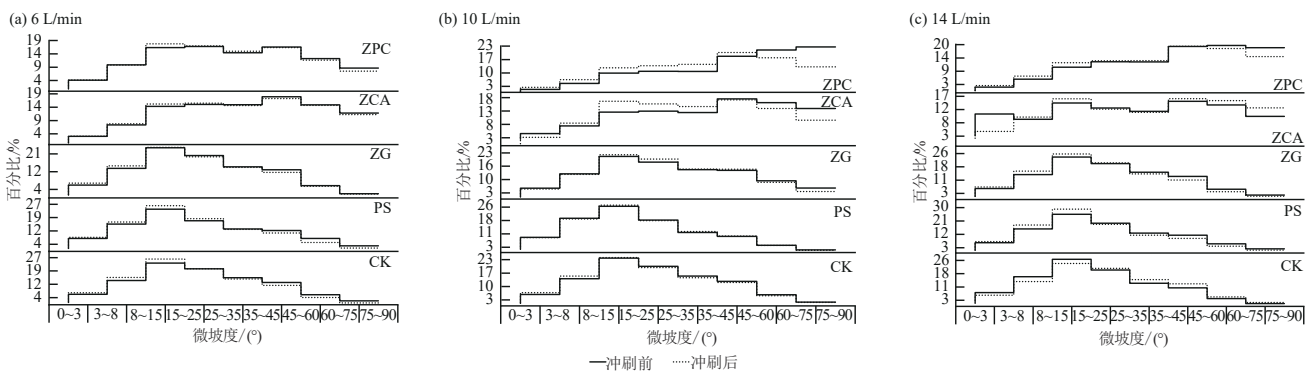


图 5 微坡度分布特征

Fig. 5 Distribution characteristics of micro-aspect

3.2 不同种植坡面细沟形态特征

3.2.1 坡面汇流路径 由图 6 可知,不同冲刷流量下各种植模式坡面汇流形态均为“树枝状”,且干流与支流、支流与支流之间均呈锐角,所有坡面汇流网络水系等级均为 4 级,且随着冲刷流量的增加,各种植模式坡面低级径流数量逐渐减小。6、10 L/min 冲刷流量,各种植模式坡面径流路径通过相邻坑洼进行汇聚与连接,并逐渐向坡面上方延伸。与 CK 坡面相比,ZPC 模式坡面径流路径起点分支和低级水系最多,汇流网络最密集,ZG 模式坡面径流路径连通性较强,4 级水系较多。14 L/min 冲刷流量,不同种植模

式坡面汇流网络较为稀疏,多个低级径流逐渐合并形成较为连续的高级径流。

由图 7 可知,不同冲刷流量下,各种植模式坡面 $\ln N(r)$ 与 $\ln(r)$ 均呈对数线性关系,相关系数 R^2 均 >0.99 ,坡面细沟侵蚀形态具有明显的分形性质,且分形维数 (D) 均大于 CK 坡面。6、14 L/min 冲刷流量,分形维数 (D) 均表现为 ZPC 模式坡面最大 (1.476, 1.465),其汇流网络最发达,组织程度最高,PS 模式坡面最小 (1.449, 1.413); 10 L/min 冲刷流量,分形维数 (D) 则表现为 ZG 模式坡面最大 (1.454),ZCA 模式坡面最小 (1.425)。

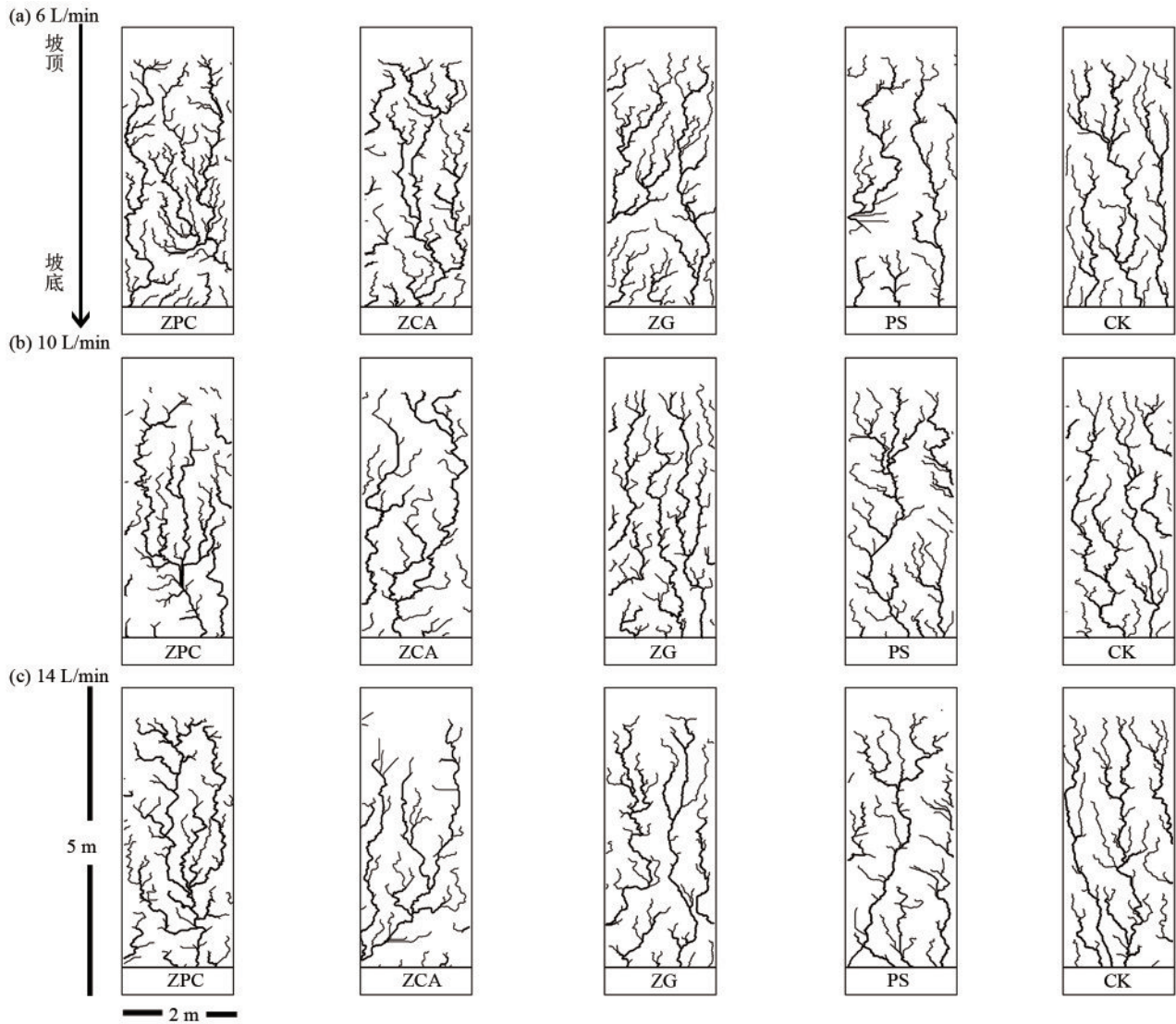


图 6 汇流网络演变特征

Fig. 6 Evolutionary characteristics of the runoff network

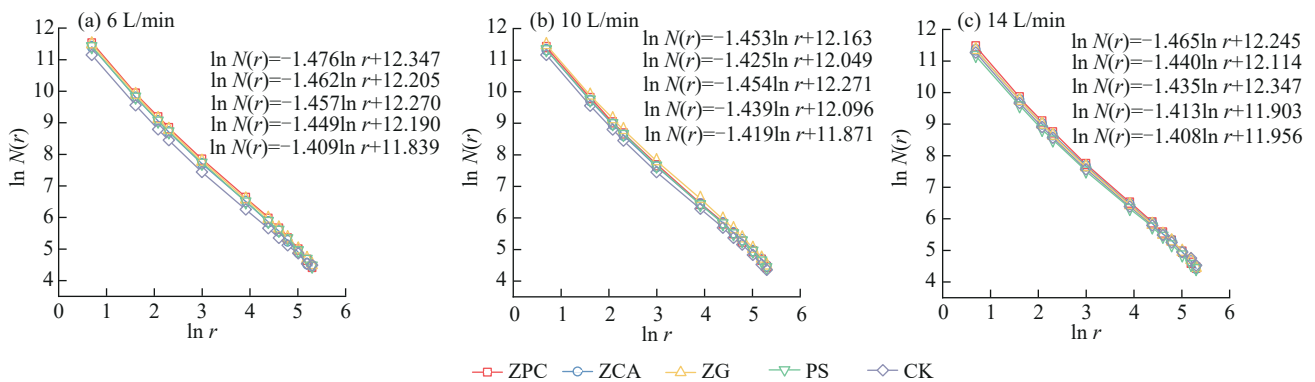
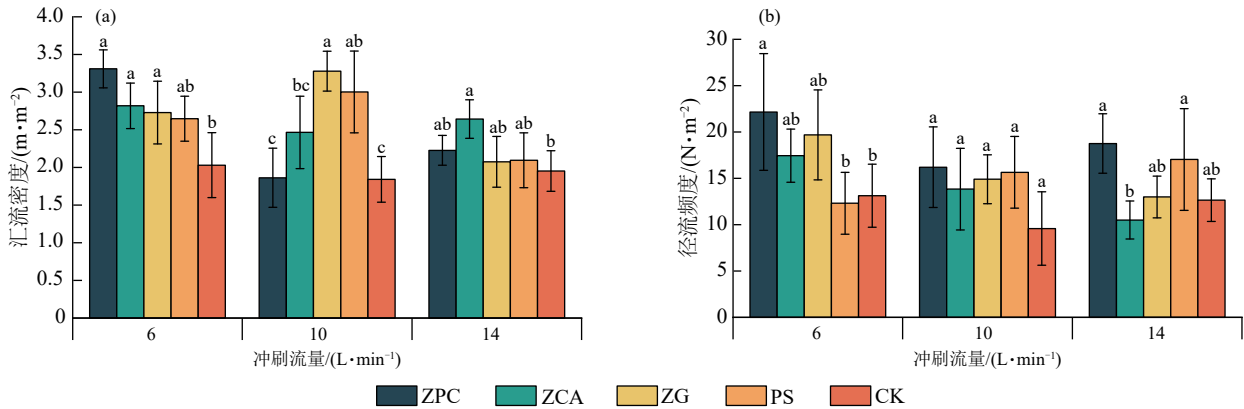


图 7 盒维数计算结果

Fig. 7 Calculation results of the box dimension

由图 8 可知,不同冲刷流量下,各种植模式坡面汇流密度表现为 CK 坡面最低,径流频度表现为 ZPC 模式坡面最高。6 L/min 冲刷流量,ZPC、ZCA 和 ZG 模式坡面汇流密度显著高于 CK 坡面 ($p < 0.05$); CK 坡面径流频度显著低于 ZPC 模式坡面 ($p < 0.05$),与其他模式坡面差异均

不显著。10 L/min 冲刷流量,CK 坡面汇流密度显著低于 ZG 和 PS 模式坡面 ($p < 0.05$),与 ZPC 和 ZCA 模式坡面差异不显著;不同种植模式间坡面径流频度差异均不显著。14 L/min 冲刷流量,CK 坡面汇流密度显著低于 ZCA 模式坡面,径流频度显著高于 ZCA 模式坡面 ($p < 0.05$)。



注:图柱上方不同小写字母表示同一冲刷流量不同处理间差异显著($p < 0.05$)。

图 8 汇流密度和径流频次变化特征

Fig. 8 Evolutionary trends in confluence density and runoff frequency

3.2.2 细沟几何形态参数 由表 2 可知,不同冲刷流量下,各种植模式坡面细沟均表现为“宽浅式”,且坡面细沟密度均大于 CK 坡面。6 L/min 冲刷流量,相较于 CK 坡面,不同种植模式坡面细沟宽深比降低 25.98%~72.64%,其中 ZPC 模式坡面降幅最大,ZG 模式坡面最小;坡面细沟密度增加 33.80%~67.88%,其中 ZPC 模式坡面增幅最大,ZCA 模式坡面最小。10 L/min 冲刷流量,相较于 CK 坡面,不同种植模式坡面细沟宽深比降低 31.90%~41.83%,其中 ZCA 模式坡面降幅最大,ZPC 模式坡面最小;坡面细沟密度增加 21.35%~37.08%,其中 ZG 模式坡面增幅最大,PS 模式坡面最小。14 L/min 冲刷流量,相较于 CK 坡面,不同种植模式坡面细沟宽深比降低 45.59%~72.79%,坡面细沟密度增加 24.07%~48.15%,其中 ZPC 模式坡面变幅最大,PS 模式坡面变幅最小。

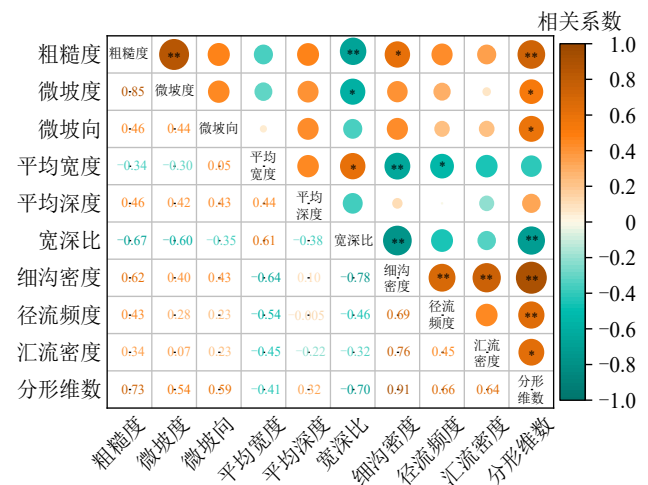
表 2 细沟几何形态参数

Table 2 Rill geometry parameters

种植模式	冲刷流量/ (L·min ⁻¹)	平均宽度/ 度/cm	平均深度/ 度/cm	宽深比	细沟密度/ (m·m ⁻²)
ZPC	6	3.12	1.31	2.38	6.01
ZCA	6	5.14	0.95	5.41	4.79
ZG	6	7.08	1.10	6.44	5.14
PS	6	5.03	0.93	5.41	4.84
CK	6	7.22	0.83	8.70	3.58
ZPC	10	7.66	1.47	5.21	4.49
ZCA	10	4.63	1.04	4.45	4.44
ZG	10	8.19	1.06	7.73	4.88
PS	10	10.03	1.25	8.02	4.32
CK	10	14.99	1.96	7.65	3.56
ZPC	14	7.90	2.33	3.39	4.80
ZCA	14	6.77	1.36	4.98	4.63
ZG	14	8.65	1.54	5.62	4.31
PS	14	4.54	0.67	6.78	4.02
CK	14	11.46	0.92	12.46	3.24

3.3 细沟形态特征与微地形因子的关系

由图 9 可知,不同种植模式坡面粗糙度与细沟分形维数呈极显著正相关($R^2=0.725, p < 0.01$),与细沟密度呈显著正相关($R^2=0.618, p < 0.05$),微坡度与分形维数呈显著正相关($R^2=0.538$),微坡向与细沟分形维数呈显著正相关($R^2=0.591$);坡面粗糙度与细沟宽深比呈极显著负相关($R^2=-0.849$),微坡度与细沟宽深比呈显著负相关($R^2=-0.599$)。



注:*表示相关性达到显著水平($p < 0.05$);**表示相关性达到极显著水平($p < 0.01$)。

图 9 细沟形态与微地形因子相关性分析

Fig. 9 Correlation analysis between rill morphology and microtopographic factors

为进一步反映细沟发育的内在本质,将坡面细沟宽深比、细沟密度、分形维数与不同种植模式下坡面粗糙度、微坡度、微坡向进行回归拟合(表 3)表明,细沟宽深比与坡面粗糙度呈线性递减函数关系,细沟密度和分形维数与坡面粗糙度呈线性递增函数关系。利用坡面粗糙度指标可以较好地预测研究区不同种植模式坡面细沟形态特征。就决定系数而言,分形维数的拟合效果优于细沟宽深比和细沟密度。

表3 细沟形态指标与微地形因子回归分析

Table 3 Regression analysis of rill morphological indices and microtopographic factors

细沟形态指标	回归方程	R^2	p
宽深比	$Y=14.67-5.88X$	0.44	<0.01
细沟密度	$Y=2.26+1.55X$	0.38	<0.05
分形维数	$Y=1.36+0.06X$	0.53	<0.01

注: X 为坡面粗糙度。

4 讨论

4.1 微地形因子对种植模式的响应

本研究中,中小流量条件下,ZPC、ZCA、ZG和PS模式坡面粗糙度总体呈降低趋势,是因为在冲刷过程中,土壤团聚体受径流浸润作用发生崩解分散后,随径流发生迁移,部分泥沙在平缓或低洼处沉积,部分迁移出径流小区,地表以削高填低的趋势变得越来越平整^[22]。由于各试验坡面的草本及作物根系减弱侵蚀动力,分散坡面径流^[26-27],使不同种植模式坡面微地形因子变化幅度均小于CK坡面。随着冲刷流量的增大,径流能量随之增大,对坡面细沟的下切作用和搬运泥沙的能力增强^[28],沟壁崩塌与径流汇集冲刷交替进行,细沟发育程度提高,加之植被根茎形态的阻力作用不足以抵挡径流的冲刷^[27],导致不同种植模式地面粗糙度的变化无明显规律,而且本试验设计的冲刷时间仅为60min,可能与降雨条件下地表微地形变化存在差异^[29]。

有研究^[6]表明,微坡度越大,地表填注量越大,地表填注量的增加对抑制水土流失的作用呈增加趋势。本研究中,冲刷后 $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 栅格占比均增大, $60^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 栅格占比均减小,蓄水保土能力降低,可能是由于不同种植模式的初始坡面存在一定微坡度,径流首先在低洼处汇集,当其超过洼地蓄水能力时形成跌坎^[6],促进土体坍塌,土体坍塌又为径流剥蚀提供大量松散的颗粒,土粒随微坡度和坡向移动,加速细沟的发育过程^[22],从而使整个坡面的微坡度向更平缓的趋势发展。同时,在冲刷初期可能因地表作物及草本部分细碎凋落叶片,增加坡面水力糙率而形成局部水跃现象,促使微坡度 $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 区域发生沉积(对应栅格占比上升)。但随着流量增大,细碎凋落叶片被水流冲刷而重新分布,形成定向排列,促使 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 糙率各向异性^[30],故导致不同种植模式坡面粗糙度下降而侵蚀面积却减少。不同种植模式冲刷后微坡向均以南向为主导,且南坡向栅格占比均小于CK坡面,表明在本研究条件下微坡向对细沟侵蚀作用不敏感。

4.2 细沟形态对种植模式的响应

细沟的形成及其分布状况可用于表征坡耕地侵蚀强弱^[4],其侵蚀形态在地形和水文上均具有重要的作用^[5,7,9]。本研究中不同种植模式坡面汇流网络均表现为“树枝状”,径流路径整体分布较为分散,是由于初始地表的起伏促使水流在坑洼处聚集,洼地溃塌后逐渐形成连续的径流路径,并且各坑洼均可以成为径流的起点^[21]。各种种植模式坡面粗糙度与分形维数呈线性关系,表明地面粗糙度阻碍细沟分支的交会,导致“细枝状”径流分支增多。同时,植株根茎部对径流路径也具有阻碍作用,可改变局部微地形的水力传导特性^[31],进而形成分散的侵蚀流路^[32]。随着冲刷流量增加,径流流速加快,低级别径流没有充足发育时间^[28],故各种种植模式坡面汇流网络均较为稀疏。研究^[33]表明,复合种植模式形成的坡面汇流密度与汇流网络的演化过程相反,本研究中各种种植模式汇流密度均无明显规律,可能缘于植被对水流的非线性响应作用^[34]。小流量条件下,植被可能导致坡面形成离散式障碍单元,通过产生局部湍流使水流功率降低,通过水流扰动诱导更多细沟起点^[32],随着流量增大,植被对水流分散作用减弱,导致水流较为集中,但并非呈线性增加。由于研究区土壤渗透性较强^[18],流量较大条件下坡面汇流密度均未明显增加。相对于汇流密度,ZPC模式坡面由于鹤草密集蔓生茎对径流的拦滤功能,增强径流路径分选效应,形成更发达的分支状细沟网络^[35],因此,径流频度及分形维数均表现为最大,而CK坡面径流集中程度较高。

已有研究^[9]表明,黄土高原区细沟多呈“窄深式”,而本研究中,中小流量条件下各种种植模式坡面细沟形态均呈“宽浅式”,是由于高山峡谷区的地形坡度较陡,水流能量较高,使水流在坡面上快速分散。作物的直根系与木本植物的须根系形成复合根网,在耕层土壤形成三维加固层^[26],使细沟下切受阻但侧向扩展加强,分散水流^[27],加之研究区土壤中砂粒质量分数高(63.9%),并含有较多的砾石,从而形成“宽浅式”细沟。此外,这可能与试验土壤和条件有关,一方面是由于黄土节理发育^[5],且为室内模拟试验,土壤均质程度高,而本试验为野外原位坡面土壤;另一方面,本研究为放水冲刷试验,无雨滴对地表的作用。有研究^[36]表明,复合种植坡面可以抑制细沟宽度15cm以上发育,本研究中各种种植模式坡面细沟宽度均 <15 cm,与已有研究^[26]结果较为一致。CK坡面因无植被,细沟在下切侵蚀过程中,径流对沟壁的冲刷导致细沟间的分水岭被侵蚀并与相邻细沟合并^[11],宽度

逐渐增加,而各种植模式坡面细沟演化受地面粗糙度和植被因子限制而不断自发调整^[27,37]。

5 结论

1)相较于裸坡,不同冲刷流量条件下,不同种植模式坡面侵蚀区面积显著减少,15°~25°微坡度栅格占比增加,而60°~90°栅格占比减少,且各种植模式坡面粗糙度和侵蚀集中程度均有所降低。

2)不同种植模式坡面呈“树枝状”径流网络,分形维数和细沟密度均高于裸坡,细沟剖面形态呈“宽浅式”。花椒+李树+鹤草种植模式坡面在6、14 L/min流量下表现出较高的分形维数,细沟宽深比与坡面粗糙度呈线性递减函数关系,而细沟密度、分形维数与粗糙度呈相反的变化趋势。

3)研究区应优先考虑采用花椒树+李树+鹤草等高覆盖、高根系密度的种植模式,以增强地面粗糙度,调控坡耕地细沟侵蚀。

4)因受研究区域野外条件及研究资料所限,本研究仅通过原位冲刷试验开展不同种植模式坡面微地形变化及细沟发育特征研究。今后应在基于野外研究平台完善的基础上,进一步开展降雨条件下高山峡谷区不同种植模式坡耕地水土流失机理研究,以及天然降雨的水土流失监测,以期丰富和完善我国土壤侵蚀理论,并有效服务于区域水土流失防控。

参考文献:

- [1] ZHOU Y, YI Y J, LIU H X, et al. Spatiotemporal dynamic of soil erosion and the key factors impact processes over semiarid catchments in southwest China[J]. *Ecological Engineering*, 2024, 201: e107217.
- [2] WANG B, ZHANG G H, SHI Y Y, et al. Effects of near soil surface characteristics on the soil detachment process in a chronological series of vegetation restoration[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2015, 79(4): 1213-1222.
- [3] 吴佳.黄土高原旱坡地秋作入渗蓄水与防蚀作用特征研究[D].西安:西安理工大学,2016.
WU J. Studies on the infiltration water storage and prevention of autumn crops in arid loess sloping fields[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2016.
- [4] SHEN H O, ZHENG F L, WEN L L, et al. Impacts of rainfall intensity and slope gradient on rill erosion processes at loessial hillslope[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 155: 429-436.
- [5] 李朋飞,黄珂瑶,胡晋飞,等.黄土丘陵沟壑区细沟发育形态的变化及其与侵蚀产沙的关系[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(18): 92-102.
LI P F, HUANG K Y, HU J F, et al. Morphological

development of rills and its relationship with hillslope erosion in the hilly and gully Loess Plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(18): 92-102.

- [6] 罗键,尹忠,郑子成,等.不同降雨条件下紫色土横垄坡面地表微地形变化特征[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(16): 3162-3173.
LUO J, YIN Z, ZHENG Z C, et al. Variation characteristics of microtopography of ridge tillage of purple soil under different rainfall patterns[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(16): 3162-3173.
- [7] 牛耀彬,吴旭,高照良,等.工程堆积体坡面细沟侵蚀形态空间变化[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(6): 32-38.
NIU Y B, WU X, GAO Z L, et al. Spatial variation of rill erosion morphology on the slope of engineering accumulation[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(6): 32-38.
- [8] ZHU P Z, ZHANG G H, WANG C S, et al. Variation in land surface roughness under typical plant communities on steep gully slopes on the Loess Plateau of China[J]. *Catena*, 2021, 206: e105549.
- [9] 龙琪,韩剑桥,何育聪,等.黄土坡面细沟侵蚀强度的空间分布及形态分异特征[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(1): 1-7.
LONG Q, HAN J Q, HE Y C, et al. Spatial distribution of rill erosion intensity on loess slope and its morphology differentiation characteristics[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(1): 1-7.
- [10] 裴冠博,龚冬琴,付兴涛.晋西黄绵土坡面细沟形态及其对产流产沙的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(6): 79-84.
PEI G B, GONG D Q, FU X T. Rill morphology and its effect on runoff and sediment yield on loessal soil slope in western Shanxi Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(6): 79-84.
- [11] 麻力文,陈晓燕,陶婷婷,等.不同降雨强度及坡度条件下饱和紫色土坡面细沟形态特征[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(1): 77-83.
MA L W, CHEN X Y, TAO T T, et al. Morphological characteristics of rills on the slope surface of saturated purple soil under different rainfall intensities and slopes[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(1): 77-83.
- [12] 车晓翠,赵文婷,沈海鸥,等.黑土坡面细沟形态及剖面特征试验研究[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(5): 55-59.
CHE X C, ZHAO W T, SHEN H O, et al. Experimental study of rill morphology and its profile characteristics at Chinese mollisol hillslope[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(5): 55-59.
- [13] 张攀,姚文艺,陈伟.降雨驱动下黄土坡面细沟的分形和熵量化描述[J]. *中国水土保持科学*, 2014, 12(5): 17-22.
ZHANG P, YAO W Y, CHEN W. Quantitative description of rill morphology on the rainfall-driven loess hill-

- slope by fractal and entropy[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2014, 12(5): 17-22.
- [14] 张霞, 李鹏, 李占斌, 等. 黄土高原丘陵沟壑区临界地貌侵蚀产沙特征[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(4): 129-136. ZHANG X, LI P, LI Z B, et al. Characteristics of erosion and sediment yield under critical landform in hill-gully area of Loess Plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(4): 129-136.
- [15] WANG L H, LI Y C, GAN Y S, et al. Reconstructing high-resolution gridded precipitation data in the southwest China highland canyon area using an improved (MGWR) downscaling method[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 948: e174866.
- [16] 周金星, 关颖慧, 汪亚峰, 等. 西南高山峡谷区水土流失综合防治技术与示范[J]. *生态学报*, 2024, 44(18): 7937-7943. ZHOU J X, GUAN Y H, WANG Y F, et al. Technology and demonstration of comprehensive control of soil and water loss in southwest alpine gorge area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(18): 7937-7943.
- [17] SCHWARZ M, RIST A, COHEND, et al. Root reinforcement of soils under compression[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2015, 120(10): 2103-2120.
- [18] 王嘉琦, 王勇, 张泽洪, 等. 西南高山峡谷区人为耕作扰动对典型坡耕地坡面坡形和微地形的影响[J]. *水土保持学报*, 2025, 39(1): 152-159. WANG J Q, WANG Y, ZHANG Z H, et al. Effects of tillage disturbance on slope shape and micro-topographic features on typical sloping cropland of southwestern alpine-canyon area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(1): 152-159.
- [19] ZHANG Y, WANG Q, MAO J T, et al. Soil nutrient redistribution in sloping farmland of dry-hot valleys in the upper Red River[J]. *Catena*, 2024, 244: e108273.
- [20] PAN L D, SHI D M, JIANG G Y, et al. Impacts of different management measures on soil nutrients and stoichiometric characteristics for sloping farmland under erosive environments in the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2024, 244: e106173.
- [21] 周苍宁, 王清震, 唐恺, 等. 紫色土坡耕地不同微地形地表汇流网络特征[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(2): 146-152. ZHOU C N, WANG Q Z, TANG K, et al. Characteristics of surface confluence network in different micro-topography types of purple soil slope farmland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(2): 146-152.
- [22] LUO J, ZHENG Z C, LI T X, et al. Spatial heterogeneity of microtopography and its influence on the flow convergence of slopes under different rainfall patterns[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 545: 88-99.
- [23] 吴淑芳, 刘勃洋, 雷琪, 等. 基于三维重建技术的坡面细沟侵蚀演变过程研究[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(9): 114-120. WU S F, LIU B Y, LEI Q, et al. Evolution process of slope rill erosion based on 3D photo reconstruction technique[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(9): 114-120.
- [24] 李龙, 秦富仓, 钱秋颖, 等. 冲刷条件下裸露砂岩区坡面细沟微形态变化及其侵蚀特征[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(5): 37-43. LI L, QIN F C, QIAN Q Y, et al. Micro-morphological changes and erosion characteristics of rill on bare pisha sandstone slope under scouring conditions[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(5): 37-43.
- [25] 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: e106835.
- [26] 崔志强, 王文龙, 郭明明, 等. 不同植被措施下排土场边坡细沟发育时空特征[J]. *土壤学报*, 2020, 57(5): 1155-1165. CUI Z Q, WANG W L, GUO M M, et al. Spatial and temporal characteristics of rill development on slopes of waste dump of mining as affected by revegetation measures[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(5): 1155-1165.
- [27] 杨波, 王文龙, 郭明明, 等. 矿区排土场边坡不同植被配置模式的控蚀效益研究[J]. *土壤学报*, 2019, 56(6): 1347-1358. YANG B, WANG W L, GUO M M, et al. Erosion-controlling effects of revegetation on slope of refuse dump in mining area relative to vegetation pattern[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(6): 1347-1358.
- [28] WANG N N, LUO J, HE S Q, et al. Characterizing the rill erosion process from eroded morphology and sediment connectivity on purple soil slope with upslope earthen dike terraces[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 860: e160486.
- [29] 董晓宇, 秦富仓, 李龙, 等. 裸露砂岩区坡面侵蚀过程中地表粗糙度与水力侵蚀特征参数的关系[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(2): 33-41. DONG X Y, QIN F C, LI L, et al. Relationship between surface roughness and hydraulic erosion characteristic parameters during slope erosion in exposed pisha sandstone area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(2): 33-41.
- [30] 蔡泽康, 王健, 陈俞池, 等. 柔性植被叶片近地表覆盖对坡面流体力学特性的影响[J]. *水资源与水工程学报*, 2024, 35(1): 133-142. CAI Z K, WANG J, CHEN Y C, et al. Impact of near-surface coverage by flexible vegetation foliage on the hydrodynamic characteristics of overland flow[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2024, 35(1): 133-142.

(下转第52页)