

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.01.021; CSTR:32311.14.rswc.2026.01.021.

柯贤泽, 杨艳, 郑子成, 等. 暴雨条件下横垄坡面产汇流特征及其对微地形变化的响应[J]. 水土保持研究, 2026, 33(1):29-38, 45.

Ke Xianze, Yang Yan, Zheng Zicheng, et al. Runoff generation and confluence characteristics on cross-slopes with ridge tillage under rainstorm conditions and their response to microtopographic variations[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2026, 33(1):29-38, 45.

暴雨条件下横垄坡面产汇流特征及其对微地形变化的响应

柯贤泽¹, 杨艳², 郑子成¹, 王娜娜¹

(1. 四川农业大学 资源学院, 成都 611130; 2. 四川省水利规划研究院, 成都 610072)

摘要: [目的] 地表微地形变化势必会影响坡面产汇流特征, 弄清横垄作坡面产汇流特征及其与微地形变化间关系, 为区域水土流失有效防控提供支撑。[方法] 采用室内人工模拟降雨方法, 立足于微地形角度, 开展降雨条件下不同垄高(5, 10, 15 cm)、垄距(50, 70, 90 cm)的横垄坡面微地形变化与产汇流特征研究, 明晰不同坡面产汇流对微地形变化的响应。[结果] (1) 各横垄坡面地表糙度总体随垄高(H)和垄距(L)的增加而增加, 且受垄高($r=0.92, p<0.01$)的影响远大于垄距($r=0.14$); (2) 结构水文连通性随距高比(L/H)减小而减小, 功能水文连通性则在 L/H 为 4.7~5.0 区间的横垄坡面较低, 水文连通面积比率较均值减少 37.95%; (3) 初始产流时间随 L/H 先增大后减小, 中密垄(5.0 L/H)坡面初始产流时间最长(40 min); 各坡面汇流形态以平行状为主, 汇流网络均具有明显单分形特征, 其复杂性和自相似性与 L/H 呈显著正相关; (4) 地表微地形对汇流和产流特征的直接效应值分别为 0.871($p<0.01$)和 $-0.711(p>0.05)$, 通过直接影响汇流过程进而间接影响坡面产流。[结论] 研究区 L/H 在 4.7~5.0 区间的横垄坡面调控坡面产汇流效应最佳, 研究结果有助于坡面横垄合理布设与区域水土流失有效防控。

关键词: 横垄坡面; 微地形变化; 产流过程; 水文连通性; 汇流网络

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)01-0029-10

Runoff generation and confluence characteristics on cross-slopes with ridge tillage under rainstorm conditions and their response to microtopographic variations

Ke Xianze¹, Yang Yan², Zheng Zicheng¹, Wang Nana¹

(1. College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China;

2. Sichuan Water Conservancy Planning and Research Institute, Chengdu 610072, China)

Abstract: [Objective] Surface microtopographic variations inevitably affect the characteristics of slope runoff generation and confluence. Clarifying the characteristics of runoff generation and confluence on cross-slopes with ridge tillage and their relationship with microtopographic variations provides support for the effective prevention and control of regional soil and water loss. [Methods] An indoor artificial rainfall simulation method was used to study microtopographic variations and the runoff generation and confluence characteristics of cross-slopes with ridge tillage under different ridge heights (5, 10, 15 cm) and ridge distances (50, 70, 90 cm). The responses of runoff generation and confluence on different slopes to microtopographic variations were analyzed. [Results] (1) The surface roughness of each slope increased with increasing ridge height (H) and ridge distance (L), and the effect of ridge height ($r=0.92, p<0.01$) was much greater than that of ridge distance ($r=0.14$). (2) Structural hydrological connectivity decreased as the ratio of ridge distance to height (L/H) decreased, while functional

收稿日期: 2025-02-20

修回日期: 2025-04-01

接受日期: 2025-04-17

资助项目: 国家自然科学基金项目“紫色土坡面地表微地形变化与水沙过程的耦合机制”(42177316)

第一作者: 柯贤泽(2000—), 男, 湖北十堰人, 硕士研究生, 主要从事横垄土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: 928361907@qq.com

通信作者: 郑子成(1976—), 男, 内蒙古乌兰察布人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: zichengzheng@aliyun.com

<http://stbcyj.paperonice.org>

hydrological connectivity was lower on cross-slopes with L/H values ranging from 4.7 to 5.0, and the hydrologically connected area ratio decreased by 37.95% compared with the average. (3) The initial runoff generation time first increased and then decreased with L/H , reaching the longest duration (40 min) on the slope with medium-dense ridge (5.0 L/H). The runoff confluence patterns on each slope were mainly parallel, and the confluence networks exhibited distinct mono-fractal evolution characteristics. Both the complexity and self-similarity of these networks were significantly positively correlated with L/H . (4) The direct effect values of surface microtopography on runoff confluence and generation were 0.871 ($p < 0.01$) and -0.711 ($p > 0.05$), respectively, and microtopographic variations indirectly affected slope runoff generation by directly influencing the confluence process. [Conclusion] In the study area, cross-slopes with ridge tillage and L/H values between 4.7~5.0 demonstrate the optimal regulation of slope runoff generation and confluence. These findings are helpful for the rational layout of cross-slopes with ridge tillage and effective prevention and control of regional soil and water loss.

Keywords: cross-slopes with ridge tillage; microtopographic variations; runoff generation process; hydrological connectivity; confluence network

耕作措施引起的坡耕地微地形变化影响着坡面径流路径和汇流过程,进而影响坡耕地土壤侵蚀过程^[1]。横坡垄作一直被视为防治坡耕地水土流失的保护性耕作措施,主要通过调整垄高、垄距等结构因子^[2]改变地表微地形,提高土壤入渗性能、降低径流量,聚水聚土聚肥,以实现坡耕地水土流失有效调控与产能提升^[3-5]。有研究表明,横坡垄作是抑制水土流失效果最佳的耕作方法^[6],能有效减少径流泥沙产量^[7]。然而,有研究却表明,横坡垄作坡面破垄后则会加剧坡耕地水土流失^[8-9]。可见,横坡垄作措施对坡耕地水土流失作用研究存在相悖的观点,这可能与土壤性质、降雨强度、地表坡度以及垄的形态等因素有关^[10-11]。近年来,相继开展了垄作坡面结构因子与土壤侵蚀关系研究,结果表明,高垄坡面的水土保持效果总体优于低垄^[12],合理垄高能够减少坡面径流含沙量^[13]。但现有研究多侧重于垄作结构因子(垄宽、垄高和垄距等)对横坡坡面侵蚀产沙的影响^[14-15],缺乏基于垄作结构因子调控方面研究。水文连通承载着坡面产流、汇流有效衔接的重要作用,是探究坡面土壤侵蚀机理及产汇流演变过程的重要途径^[16]。垄宽、垄高和垄距的改变,势必会引起地表微地形的变化,进而影响着坡面产汇流特征、径流连通性及耕地资源高效利用。因此,本文以黄壤坡耕地横垄为研究对象,采用人工模拟降雨方法,开展暴雨条件下,不同垄高和垄距坡面微地形变化特征研究,明晰不同坡面产汇流特征对微地形变化的响应,以期为黄壤坡耕地径流有效调控与农业耕作措施合理配置提供理论依据与数据支撑。

1 材料与方

1.1 供试土壤

供试土壤采集于四川省都江堰市灌口镇(103°

36'52"E, 31°00'34"N)耕层(0—20 cm)土壤,土壤类型为典型黄壤,土壤pH值为5.20,有机质含量为11.80 g/kg,土壤砂粒、粉粒和黏粒含量分别为13.03%, 58.01%, 28.96%。

1.2 研究方法

1.2.1 土槽装填与横垄坡面布设 试验钢制土槽规格为2.0 m×1.0 m×0.4 m。土槽前端设置有集流槽,坡度可通过液压装置调整。根据研究区坡耕地分布特点,本研究设计坡度为15°。基于研究区实地调查情况,试验前将供试土壤自然风干并过1 cm筛,除去杂草和石块,土壤平均容重保持在1.20 g/cm³,含水量控制在8%左右,含水量不足或超过者,通过喷水或晾晒的方式进行调整。采用分层填土法,在土槽底部填入10 cm的碎石与砂土作为排水滤层,每次填土前将土槽边壁压实,填土厚度为30 cm。

基于野外实地调查,结合研究区相关研究成果^[17-18],横坡垄作垄宽确定为30 cm,垄高和垄距见表1。

表1 横坡垄作坡面布设汇总表

垄高 H/cm	垄距 L/cm	距高比 (L/H)	横垄处理
5	50	10.0	低密垄
	70	14.0	低中垄
	90	18.0	低疏垄
10	50	5.0	中密垄
	70	7.0	中垄
	90	9.0	中疏垄
15	50	3.3	高密垄
	70	4.7	高中垄
	90	6.0	高疏垄

1.2.2 降雨参数 采用人工模拟降雨试验,于2024年3—5月在四川农业大学土壤侵蚀实验室进行。降雨装

置采用中国科学院水土保持研究所生产的 SR 型降雨器,喷头系统为美国 V-80100,降雨高度 6 m,均匀系数可达 85% 以上。研究区位于华西雨屏区,降雨以暴雨为主,根据多年水文资料与降雨特征,设计降雨强度为 1.0 mm/min,降雨历时为产流开始计时 40 min。

1.2.3 微地形提取 采用近景摄影测量技术与运动恢复结构(Structure from Motion, SfM)相结合的方法,对地表微地形进行提取。首先在土槽两侧布设控制点,将左下角控制点视为坐标原点获取各控制点坐标,在降雨前后运用尼康 Z7 相机(像素 4 575 万)顺时针围绕土槽坡面进行连续影像采集,其中,地形变化剧烈部位加密拍摄,相邻两张照片重叠度在 80% 以上。再通过 Mateshape Pro 软件进行照片处理,通过控制点对其进行矫正后建立稀疏点云,最后运用多视角立体集群算法对图像集进行聚簇,进行密集点云(3 mm×3 mm)的重建,以实现三维重建并生成微地形数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)。

地表糙度计算方法如下^[19]:

$$R = 100 \times \lg S = 100 \times \lg \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [Z(X_i) - \bar{Z}]^2} \quad (1)$$

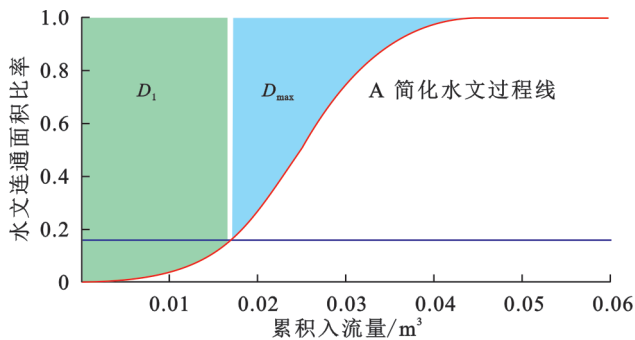
式中: R 为地表糙度; S 为各测点相对高程值的标准差; N 为生成 DEM 的密集点云 X_i 的数量; $Z(X_i)$ 为点云 X_i 的高程(mm); \bar{Z} 为 DEM 的平均高程(mm)。

1.2.4 坡面水文连通性分析

(1) 地形湿度指数(TWI)。地形湿度指数计算公式如下^[20]:

$$TWI = \ln \left(\frac{\alpha}{\tan \beta} \right) \quad (2)$$

式中: α 表示流经地表 i 点的单位等高线长度上的汇



流面积即上坡面积(m^2/m); β 为该点处坡度($^\circ$)。

(2) 汇流密度与径流频度。汇流密度:单位面积汇流路径的总长度,计算公式如下^[21]:

$$D_d = \sum_{j=1}^n L_j / A \quad (3)$$

式中: D_d 为汇流密度(m/m^2); L_j 为单个径流长度(m); A 为径流的控制面积(m^2)。

径流频度:单位面积汇流路径的数量,计算公式如下^[21]:

$$C_f = \sum_{w=1}^n N_w / A \quad (4)$$

式中: C_f 为汇流频度(个/ m^2); N 为不同级数径流的数量; A 为径流的控制面积(m^2); w 为汇流网络中最高级径流的级数。

(3) 相对地表连接函数。在降雨过程中,准确记录降雨和各土槽产流起始时间。从产流开始后,每隔 3 min 收集 1 次坡面径流样,采用体积法测定径流量(m^3)。忽略考虑径流运动速率、径流运移时间及降水入渗等,径流系数(时段内径流总量与降水总量的比值)等价于坡面水文连通面积与研究区总面积的比值 k , k 介于 0 到 1, 计算得到径流系数即为水文连通面积比率,它可以表示为累积入流量的函数,即为简化水文过程线,见图 1A。水文曲线到 1 中间的面积等价于地表储水量(m^3),即不能有效从土槽出水口流出的径流量,其中, D_i 表示某一时刻地表储水量(m^3), D_{max} 表示地表最大储水量(m^3)。将地表径流连接面积表示为地表储水的函数即为相对地表连接函数^[22],由图 1B 可知,它描述了地表微地形对径流产生作用的动态特征,可以作为水文功能连通性的指标。

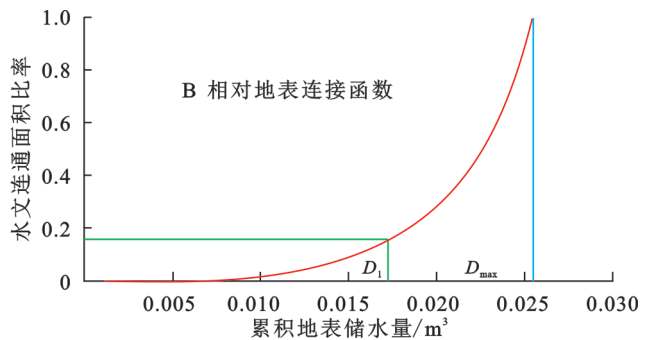


图 1 水文连通面积比率随累积入流量和累积地表储水量的变化

Fig. 1 Variation of hydrologically connected area ratio with cumulative inflow and cumulative surface storage

1.2.5 坡面径流流路分形特征 采用 Strahler 河流分级法对汇流网络进行分级,并以不同线条颜色来表达径流的等级;采用盒维数法计算坡面径流路径的分形特征^[23],改变不同盒子尺度 ϵ 覆盖坡面计算每个盒子内径流分布概率 $N(\epsilon)$ 如下:

$$N(\epsilon) = S_i / \sum S_i \quad (5)$$

式中: $N(\epsilon)$ 为径流分布概率; S_i 为盒子内径流路径所占像元面积(m^2)。

绘制 $N(\epsilon)$ 和 $1/\epsilon$ 的双对数图,通过拟合直线的斜率得到分形维数 D :

$$D = \lim[\lg N(\epsilon) / \lg(1/\epsilon)] \quad (6)$$

1.3 数据处理

采用 Metashape Pro 生成 DEM, ArcGIS 10.2 进行坡面三维分析和汇流网络的提取。图表制作采用 Surfer 22.2 和 Origin 2024。通过 Excel 2016 和 SPSS 27.0 数据处理软件进行数据统计处理。利用 R(v.4.4.0) 软件中的“pls-pm”程序包构建偏最小二乘路径模型 (Partial Least Squares Path Model, PLS-PM)。

2 结果与分析

2.1 横垄坡面地表微地形变化特征

由图 2 可知, 降雨作用下, 不同处理垄面土粒分离, 使坡面高程降低, 垄面剥离的土壤随坡面水流迁移至垄沟内沉积, 部分坡面破垄后局部高程值急剧降低, 微地形发生变化。同一垄高各处理坡面破垄主要发生于中下部, 其中, 50 cm 和 70 cm 垄距坡面仅在 5 cm 垄高条件下全部破垄, 其余处理坡面上部垄均未破垄, 90 cm 垄距坡面全部破垄。各横垄坡面高程变化量主要集中在 -20~0 mm 范围内, 所占比例随垄高增大呈现递减的趋势, 其中 15 cm 垄高所占比例平均值较 5, 10 cm 垄高分别减少 45.12% 和 40.03%。随垄高增加破垄导致的坡面沉积范围面积增大, 占比平均值分别为 7.03%, 9.81%, 44.87%。

由图 3 可知, 同一垄距条件下, 各处理坡面地表糙度随垄高增加而增加。同一垄高条件下, 除 5 cm 垄高坡面地表糙度随垄距增加呈先增大后减小的趋势外, 其余坡面地表糙度均随垄距增加而增加。相较于垄距变化, 横垄坡面地表糙度对垄高的响应更敏感。降雨前后地表糙度总体变幅均 < 5%。

2.2 横垄坡面水文连通性特征

2.2.1 结构水文连通性 由图 4 可知, 同一垄高条件下, 各处理坡面地形湿度指数均随垄距增大而先增大后减小, 70 cm 垄距坡面 TWI 平均值为 -2.64, 易于达到饱和而产流; 90 cm 垄距坡面 TWI 平均值为 -2.85, 地形湿度指数值较低, 因此蓄水面积较小。同一垄距条件下, 各处理坡面地形湿度指数均随垄高增大而先增大后减小, 10 cm 垄高坡面总体呈高值区较多, 除中疏垄外, 其余坡面最上部未破垄, 单位等高线长度上的汇流面积较大, 故地形湿度指数也较大。

由图 5A 可知, 各处理坡面汇流密度均随垄距增加而增大, 随垄高增加而减小。不同处理坡面, 高密垄汇流密度最小, 汇流网络较为集中, 发育不完善; 低疏垄汇流密度最大, 汇流网络发达, 径流分布分散。

由图 5B 可知, 各处理坡面径流频度随垄距增加而增大, 对应坡面汇流区域内径流路径数量越多,

排水有效性越高; 随垄高增加而减小, 对应坡面汇流区域内径流路径数量越少, 排水有效性越低。其中, $L/H \leq 5.0$ 的横垄坡面 (中密垄、高密垄、高中垄) 对应径流频度值近似且均较小 ($C_f < 20$ 个/ m^2), 表明径流排水有效性较低。

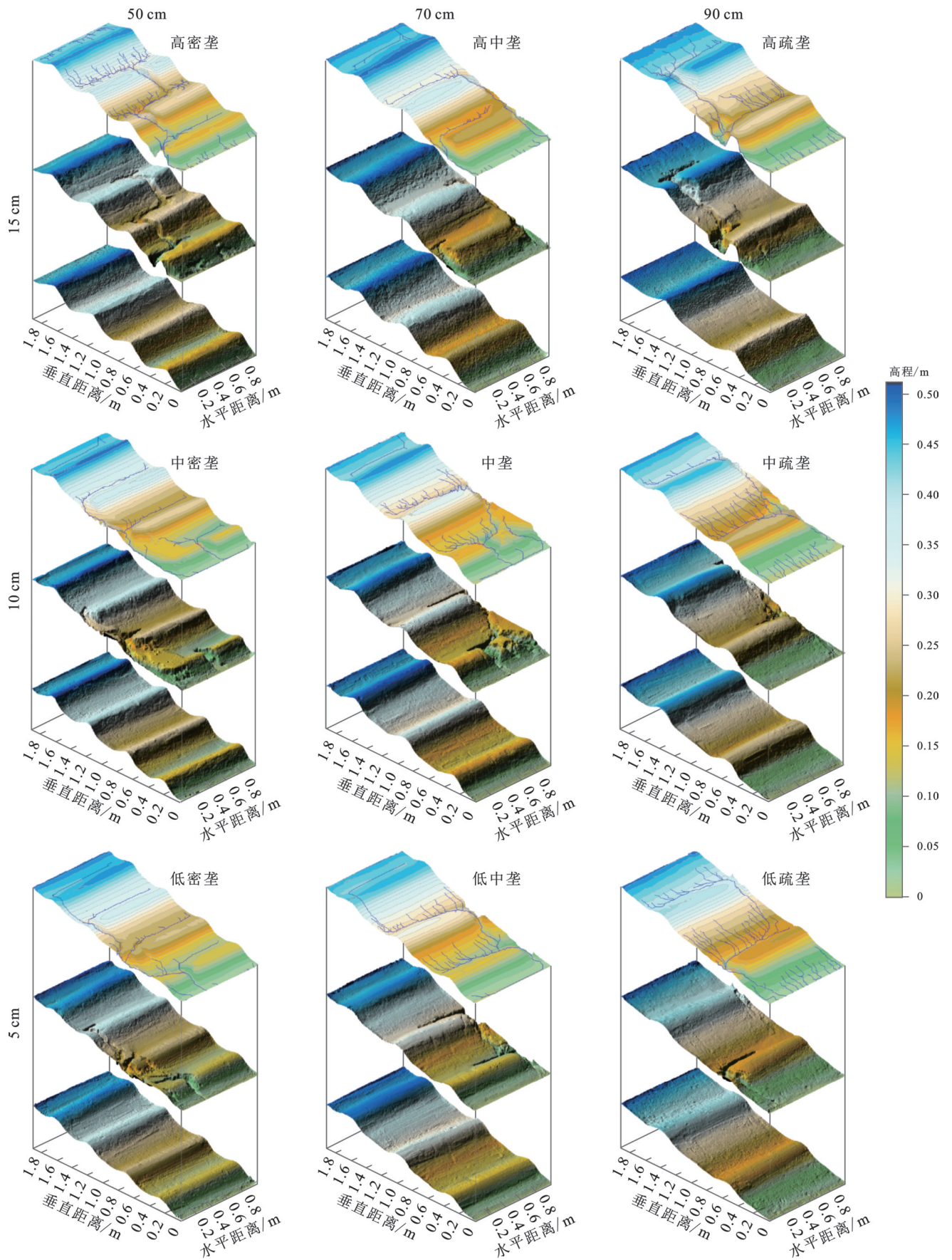
2.2.2 功能水文连通性 由图 6A 可知, 各处理横垄坡面在降雨前期垄沟蓄水导致坡面不连通, 水文连通面积比率为 0。当雨水蓄满导致破垄产流后, 坡面水文连通面积比率均快速增加, 随累计降雨量的持续增多其增速变缓, 最终趋于稳定, 整体呈现出“S”型的生长曲线。与预期结果一致, 由于试验过程中存在土壤入渗, 水文连通面积比率均小于 1。5 cm 和 10 cm 垄高坡面水文连通面积比率随垄距增大而先增大后减小, 15 cm 垄高坡面则随之先减小后增大。

图 6B 各曲线发展态势同图 6A 相似。随垄高增加, 50 cm 垄距坡面水文连通面积比率分别为 0.425, 0.430, 0.825; 70 cm 垄距坡面水文连通面积比率分别为 0.714, 0.656, 0.431; 90 cm 垄距坡面水文连通面积比率分别为 0.428, 0.540, 0.716。其中, 50 cm 和 90 cm 垄距坡面水文连通面积比率随垄高增加呈递增趋势, 70 cm 垄距坡面则随之呈递减趋势。此外, 高中垄与中密垄的连接函数增长速率最小, 低疏垄连接函数增长速率最大。

2.3 横垄坡面汇流特征分析

2.3.1 汇流网络特征 本研究对比 1000, 1500, 2000, 2500 共 4 个集水面积阈值 (栅格数), 汇流网络的总长度随集水面积阈值的增大而减少, 当曲线趋于平滑时, 取对应的值作为最优阈值^[24], 故确定最佳集水面积阈值为 2000。

由图 7 可知, 坡面汇流形态大致分为树枝状和并行状, 并以并行状为主。坡面汇流网络等级主要为 3 级, 其中, 高疏垄、中密垄和低中垄最大等级为 4 级。不同处理横垄坡面汇流网络形态差异明显但规律相似: 在降雨初期, 垄丘下坡面首先产生 1 级水系, 呈树枝状且平行于坡面; 随累积降雨量的增加, 1 级水系在沟垄内汇集形成 2 级水系, 平行于横垄; 下部垄沟率先蓄满后雨水溢出冲刷垄面形成跌坎、断续细沟和细沟, 进一步发育导致破垄, 在坡面的中下部径流路径合并沿坡面方向形成 3 级水系, 中部垄陆续垮塌与坡面下方的径流路径汇集形成新的 3 级水系, 汇流网络各级径流路径连通性增加; 其中, 高中垄、中密垄、中垄因中部破垄后泥沙沉积形成低洼区重新蓄水破垄形成新的径流路径, 径流路径数量增加; 最后部分坡面上部破垄使径流路径进一步向上延伸, 汇流网络趋于稳定。



注: 图层由下至上依次为降雨前坡面DEM、降雨后坡面DEM和降雨后坡面汇流网络简图。

图 2 不同横垄坡面地表微地形变化特征

Fig. 2 Characteristics of surface microtopographic variations on different cross-slopes with ridge tillage

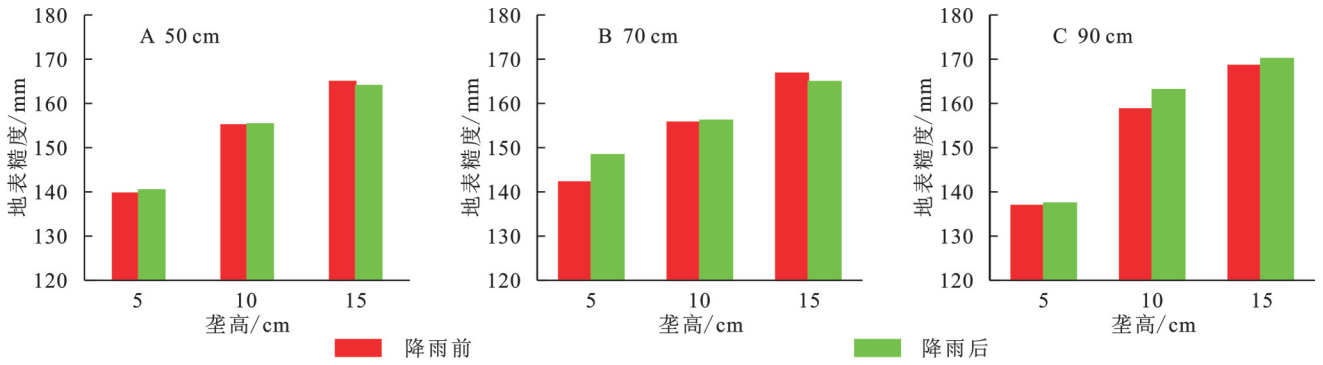


图3 不同横垄坡面地表糙度变化特征

Fig. 3 Characteristics of surface roughness changes on different cross-slopes with ridge tillage

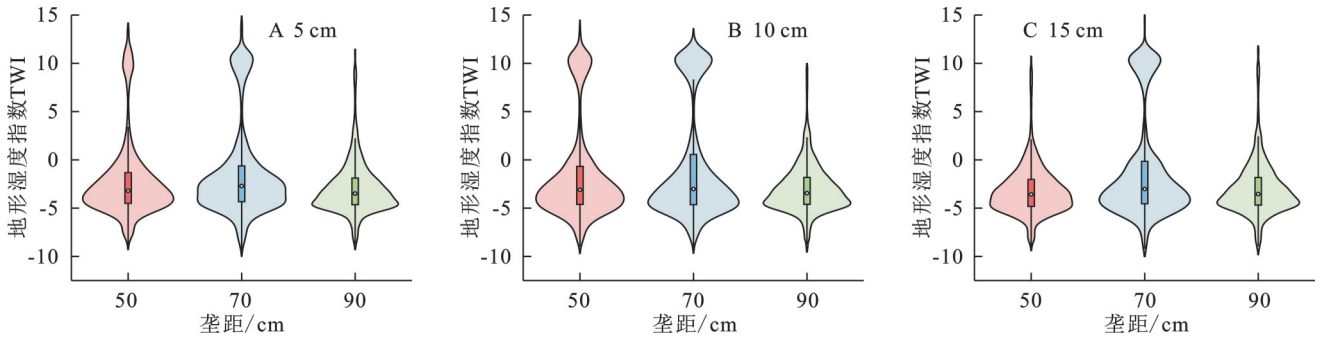


图4 不同横垄坡面地形湿度指数(TWI)的变化特征

Fig. 4 Variation characteristics of topographic wetness index (TWI) on different cross-slopes with ridge tillage

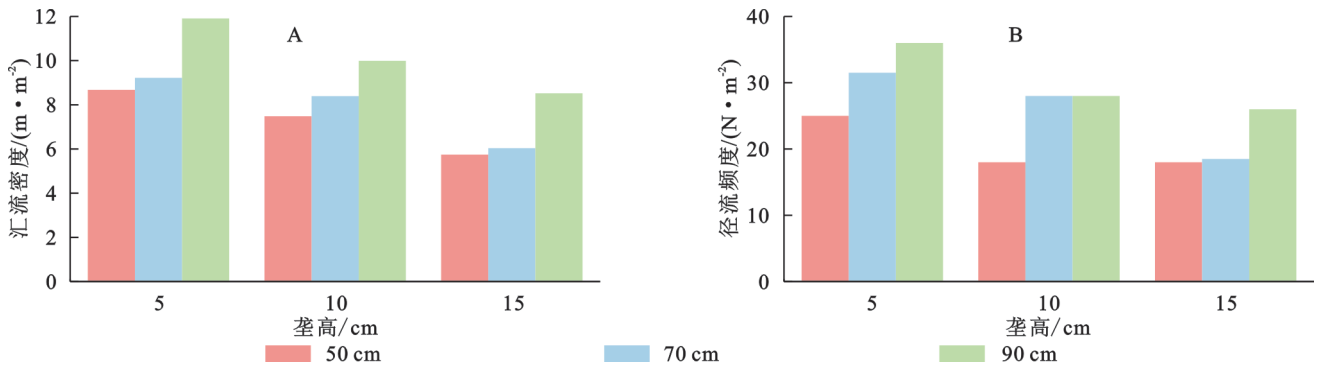
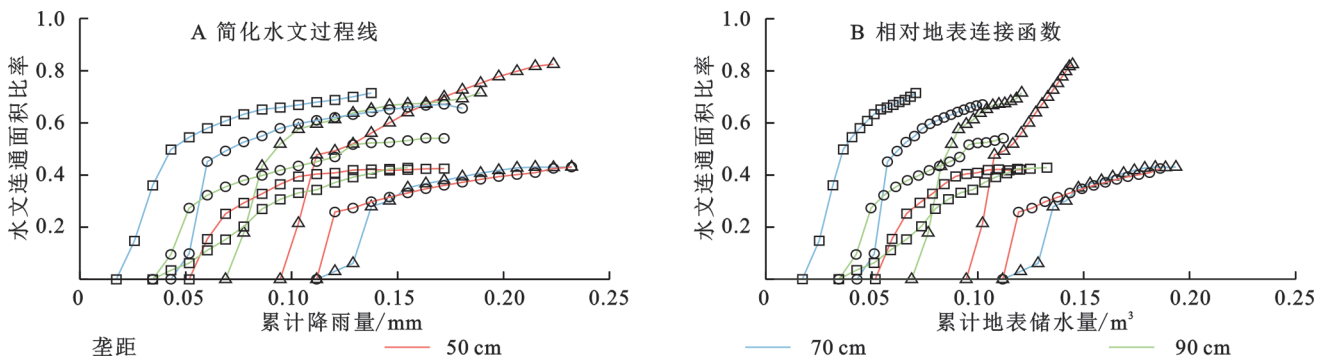


图5 不同横垄坡面汇流密度与径流频度变化

Fig. 5 Variations of confluence density and runoff frequency on different cross-slopes with ridge tillage



注:□,○,△分别表示5,10,15 cm的垄高。

图6 水文连通面积比率随累积降雨量和累积地表储水量的变化

Fig. 6 Variation of hydrologically connected area ratio with cumulative rainfall and cumulative surface storage

2.3.2 径流流路分形特征 由表2可以看到各处理坡面 $\lg N(\epsilon)$ 与 $\lg(1/\epsilon)$ 均满足线性正相关关系,且 R^2 均高于0.99,各坡面汇流网络均有显著的分形特征,

且随垄距增加 R^2 增大,分形特征增强。进一步分析发现,同一垄高各坡面随垄距增加汇流网络的分形维数 D 越大,同一垄距各坡面随垄高减小汇流网络

的分形维数 D 增大,不同横垄坡面 L/H 越小,汇流网络的复杂性和自相似性越强。

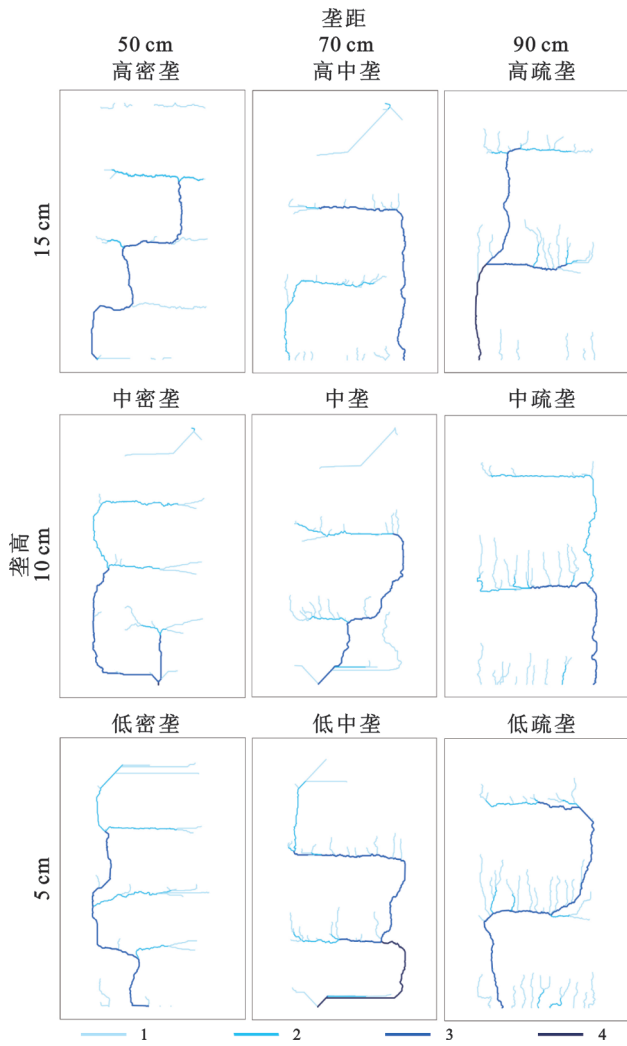


图 7 不同横垄坡面汇流网络

Fig. 7 Confluence networks on different cross-slopes with ridge tillage

2.4 坡面产流特征

由表 2 可以看出,随垄高增加,50 cm 垄距坡面初

始产流时间先增大后减小,说明垄距较小时高垄丘受到的渗透压力更大,更易于破垄发生产流;70 cm 和 90 cm 垄距坡面初始产流时间明显滞后,其中,5 cm 垄高坡面比 15 cm 垄高坡面初始产流时间分别提前了 79.5% 和 50.0%。各处理横垄坡面中中密垄具有最长的产流时间,在降雨后 40 min 开始产流。由表 2 还可知,随垄距增加,5 cm 和 10 cm 垄高坡面平均产流量呈现出倒“V”型变化,15 cm 垄距坡面则对应呈现出“V”型变化。70 cm 垄距坡面平均产流率较稳定,随垄高增大,50 cm 和 90 cm 垄距坡面平均产流率增加。

由图 8 可知,破垄后坡面产流量急剧增大达到峰值,产流后期则逐渐趋于稳定。随垄高增加,各坡面破垄产流量增大。各坡面时段最大产流量随垄距增加而递减。垄高为 15 cm 时,产流量在 3~9 min 时达到峰值。10 cm 垄高坡面在产流 0~6 min 时段内产流量达到峰值,其中,中密垄在 30~33 min 内上坡位垄面破垄故存双峰。5 cm 垄高各坡面无明显峰值,整体趋于稳定。

2.5 垄作结构因子与微地形及产汇流特征的关系

由表 3 可以看到,单一垄作结构因子中地表糙度可以较好地用垄高进行拟合,垄距对其的拟合效果较差,组合条件下地表糙度可以较好地用垄高和距高比进行拟合,且具有统计意义上的极显著关系,故可利用垄高以及两者比例关系较好地预测地表微地形。

由图 9 可知,垄高与地表糙度呈极显著正相关($p < 0.01$),与初始产流时间和平均产流率呈显著正相关($p < 0.05$),与汇流密度和径流频度呈显著负相关($p < 0.05$);垄宽与分形维数呈极显著正相关($p < 0.01$);距高比与汇流密度和径流频度呈极显著正相关($p < 0.01$),与分形维数呈显著正相关($p < 0.05$),与地表糙度、初始产流时间和平均产流率呈显著负相关($p < 0.05$);地表糙度与平均产流率呈显著正相关($p < 0.05$)。

表 2 不同横垄坡面径流流路 $\log N(\epsilon)$ 与 $\log(1/\epsilon)$ 的关系及产流特征

Table 2 Relationships between $\log N(\epsilon)$ and $\log(1/\epsilon)$ of runoff pathways and runoff generation and confluence characteristics on different cross-slopes with ridge tillage

垄高/cm	垄距/cm	距高比	双对数拟合方程	R^2	D	初始产流时间/min	平均产流率/ ($L \cdot \text{min}^{-1}$)
5	50	10.0	$\ln N(\epsilon) = 1.2631 \ln(1/\epsilon) + 11.5361$	0.9955	1.2631	17	1.74
	70	14.0	$\ln N(\epsilon) = 1.2705 \ln(1/\epsilon) + 11.4185$	0.9966	1.2705	7	2.34
	90	18.0	$\ln N(\epsilon) = 1.2980 \ln(1/\epsilon) + 11.7799$	0.9973	1.2980	12	1.61
10	50	5.0	$\ln N(\epsilon) = 1.2389 \ln(1/\epsilon) + 11.3168$	0.9946	1.2389	40	2.38
	70	7.0	$\ln N(\epsilon) = 1.2526 \ln(1/\epsilon) + 11.3397$	0.9962	1.2526	16	2.59
	90	9.0	$\ln N(\epsilon) = 1.2934 \ln(1/\epsilon) + 11.7705$	0.9967	1.2936	13	1.96
15	50	3.3	$\ln N(\epsilon) = 1.2229 \ln(1/\epsilon) + 11.1024$	0.9955	1.2229	33	4.18
	70	4.7	$\ln N(\epsilon) = 1.2446 \ln(1/\epsilon) + 11.3353$	0.9957	1.2446	39	2.38
	90	6.0	$\ln N(\epsilon) = 1.2804 \ln(1/\epsilon) + 11.6212$	0.9969	1.2804	24	3.22

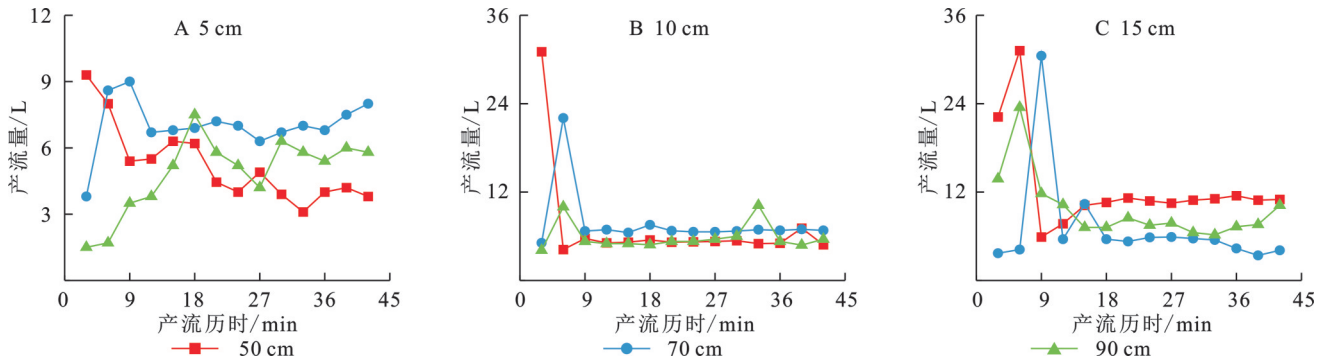


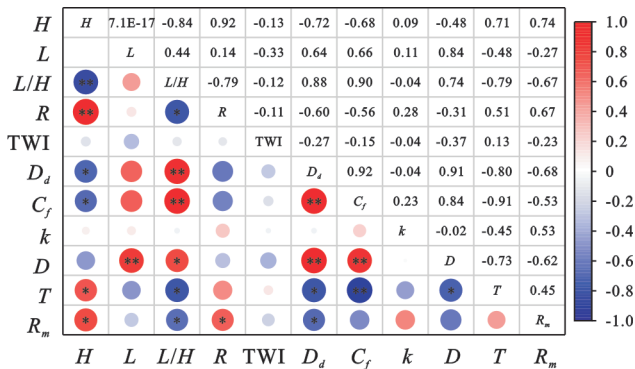
图 8 不同横垄坡面产流量随产流历时的变化

Fig. 8 Variation of runoff yield with runoff duration on different cross-slopes with ridge tillage

表 3 垄作结构因子与微地形的线性回归分析
Table 3 Linear regression analysis of ridge tillage structural factors and microtopography

回归方程	R^2	F	p
$R=2.427 H+131.297$	0.852	40.212	<0.001
$R=0.091 L+149.215$	0.019	0.136	0.724
$R=-1.872 L/H+171.579$	0.626	11.699	0.011
$R=2.309 H-0.126 L/H+133.545$	0.853	17.347	0.003

注: H 为垄高; L 为垄距; L/H 为距高比; R 为地表糙度。



注: H 为垄高; L 为垄距; L/H 为距高比; R 为地表糙度; TWI为地形湿度指数; D_d 为汇流密度; C_f 为径流频度; k 为水文连通面积比; D 为汇流路径分形维数; T 为产流时间; R_m 为平均产流率。**表示在 0.01 水平上极显著相关, *表示在 0.05 水平上显著相关。

图 9 垄作结构因子与微地形及产汇流特征的相关性分析

Fig. 9 Correlation analysis of ridge tillage structural factors with microtopography and generation and confluence characteristics

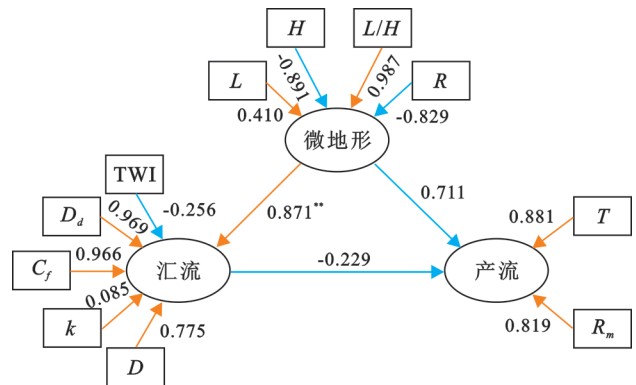
由图 10 可知,地表微地形对坡面产汇流特征的影响可以较好地构建偏最小而成路径模型(PLS-PM),模型整体的拟合优度(Goodness of Fit, GOF)为 0.694,地表微地形对产流特征的直接效应值为 -0.711 ($p > 0.05$),对汇流特征的直接效应值为 0.871 ($p < 0.01$),进而间接影响坡面产流的效应较弱(-0.199),坡面汇流对产流的直接效应值为 -0.229 。

3 讨论

3.1 地表微地形对产汇流特征的影响

坡耕地地表糙度主要由耕作所导致,其空间分

布特征具有明显的方向性。本研究中各横垄坡面地表糙度整体随垄高和垄距的增加而增加,而与垄高呈极显著正相关($p < 0.01$),这是由于垄高增大对应点云高程差异增大,起伏程度越大地表糙度越大,而垄距增大对应高程的变异系数增大。地表糙度变化对垄高的响应更剧烈,同时,与距高比呈显著负相关($p < 0.05$),说明垄作结构因子的组合同样是影响横垄坡面起伏程度的重要因素。地表糙度变化随距高比变化效果不同, $L/H \leq 4.7$ 的横垄坡面降雨后地表糙度降低, $L/H \geq 5.0$ 的地表糙度则增加,存在一个临界比例值在 4.7~5.0 之间。李志刚等^[25]研究坡耕地 5 种地表起伏的坡面漫流汇水形态共分为树枝状、平行状和羽毛状,还有研究对比 3 种不同耕作措施发现,垄作坡面汇流形态以平行状为主,中、高级径流主要为横向、纵向平行发育,这与本研究结果一致。



注:图中椭圆形为潜变量,长方形为观测变量,**表示在 0.01 水平上极显著相关,模型拟合优度(GOF)为 0.694。

图 10 微地形与产汇流特征的偏最小二乘路径模型(PLS-PM)
Fig. 10 Partial least squares path model (PLS-PM) of microtopography and runoff generation and confluence characteristics

本研究中径流流路的分形特征与垄距和结构水文连通性呈极显著正相关($p < 0.01$),与距高比呈显著正相关($p < 0.05$),随垄距增加,同一垄高各处理横垄坡面距高比增大,对应分形维数增大,汇流网络的复杂性和自相似性越强;相反距高比减小,则分形维

数减小,坡面汇流网络越不发达,径流越集中。初始产流时间是坡面综合效应的反映,与地表凹凸起伏状况、土壤初始含水量以及雨强等有关^[26]。耕作方式增加了土壤渗透,降低了径流能量,并在调节径流过程方面起着重要作用^[27]。在本研究中,初始产流时间与地表糙度没有呈现显著相关性,而与距高比呈显著负相关($p < 0.05$),这是因为垄高增加导致洼地蓄水量增大,入渗时间和累积入渗量增大,进而延长破垄和径流产生的时间,这与 Liu 等^[9]研究结论较为一致。初始产流时间随距高比增大呈现先增大后减小的趋势,其中,中密垄(5.0 L/H)具有最长的产流时间,这与杨瑞杰等^[14]横垄处理条件下(7.5 L/H)的试验结果相比变化规律一致。

3.2 水文连通性对地表微地形的响应

汇流密度与径流频度都是表征汇流网络结构特征的指标,分别从不同角度反映坡面汇流网络中径流的集中与分散程度以及径流排水有效性,在本研究中汇流网络结构水文连通性特征值与距高比呈极显著正相关($p < 0.01$),而与地表糙度呈负相关且无显著相关性,张利超等^[28]研究也表明,汇流密度和径流频度随着糙度的增加而降低。使用简化的水文曲线及其相对地表连接函数来量化功能性水文连通性,水文连通面积比率均小于 1,这与 Wang 等^[29]的研究结果保持一致,在降雨后期,不同横垄坡面水文连通面积比率均在一定范围内保持稳定,这主要是因为横垄坡面土壤可蚀性的空间变异性很大,一些区域不受侵蚀和沉积过程的强烈影响,这与 Luo 等^[30]的研究结果保持一致。其中, L/H 在 4.7~5.0 区间的横垄坡面(中密垄与高中垄)对应水文连通面积比率较小为 0.430,0.431,水文连通性较低,对应结构连通性的特征体现为径流频度小,排水有效性低;高疏垄和低中垄两坡面汇流网络最大等级为 4 级,对应水文连通面积比率也较高,分别为 0.716,0.714。坡面水文连通性对距高比有这样的响应,对于径流长度而言,增加垄高有益于坡面分流,汇流集中在垄沟低洼处,降低径流连通性从而使径流长度较低,而增加垄距使得垄间能形成稳定连贯的流路,增加径流长度;对于径流数量而言,增加垄高提升坡面入渗能力降低了排水有效性,而增加垄距使汇流面积增大,汇流网络更加分散,增加径流数量提高坡面排水有效性。

本研究仅对 9 种不同处理坡面初步探讨不同垄高垄距条件下横垄坡面的产汇流特征,未来研究应结合生产效率和土地资源利用,进一步探讨距高比对产流特征影响的临界条件,以期为区域水土保持及农业生产提供更为科学的依据。

4 结论

(1) 各横垄坡面地表糙度整体随垄高和垄距的增加而增加,地表糙度变化受垄高($r=0.92, p < 0.01$)的影响远大于垄距($r=0.14$),横垄坡面降雨前后地表糙度变化随 L/H 先降低后增加,存在临界 L/H 值在 4.7~5.0 之间。

(2) 结构水文连通性指标汇流密度与径流频度随 L/H 减小而减小,相反则增大; L/H 为 4.7~5.0 的横垄坡面水文连通面积比率均值较低为 0.43,水文连通面积比率较最大值减少 47.82%。地表微地形对汇流特征因子影响较大,直接效应值为 0.871($p < 0.01$)。

(3) 初始产流时间随 L/H 比例值先增大后减小,中密垄(5.0 L/H)坡面具有最长的产流时间为 40 min;各坡面时段最大产流量随垄高增加而增加,随垄距增大而减少;各坡面汇流形态以平形状为主,汇流网络均具有较强单分形特征($R^2 > 0.99$),不同横垄坡面 L/H 越小,汇流网络的复杂性和自相似性越弱。

(4) 地表微地形对汇流和产流特征的直接效应值分别为 0.871($p < 0.01$)和 -0.711 ($p > 0.05$),通过直接影响汇流过程进而间接影响坡面产流。总体而言 L/H 为 4.7~5.0 的横垄坡面(高中垄和中密垄)水土保持效果最好,通过设置合适的距高比能有效减缓径流发育提升水土保持效果。

参考文献(References):

- [1] Wang N N, Zheng Z C, Li T X, et al. Soil surface roughness impacts erosion behavior through selective regulation of flow properties in rainfall-seepage scenarios [J]. Soil and Tillage Research, 2025, 246: 106350.
- [2] Yang S Q, Han R Y, Xing L, et al. Effect of slope farmland soil and water and soil nitrogen and phosphorus loss based on different crop and straw applications and ridge patterns in the basin of the main stream of the Songhua River [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(1): 42-47.
- [3] Peng Q, Liu B Y, Hu Y X, et al. The role of conventional tillage in agricultural soil erosion [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2023, 348: 108407.
- [4] 桑琦明,王磊,郑粉莉,等.东北黑土区坡耕地斜坡垄作与顺坡垄作土壤侵蚀对比分析 [J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 73-78.
Sang Q M, Wang L, Zheng F L, et al. Comparative study on hillslope soil erosion between sloping ridge-tillage and longitudinal ridge-tillage in Chinese mollisol region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(3): 73-78.
- [5] Jia L Z, Zhao W W, Zhai R J, et al. Quantifying the effects of contour tillage in controlling water erosion in

- China: a meta-analysis[J]. *Catena*, 2020, 195:104829.
- [6] Rao W L, Zhang Q F, Qian Z Y, et al. Microtopographic response of tilled loess slopes during stages of water erosion development[J]. *Catena*, 2024, 245:108309.
- [7] Stevens C J, Quinton J N, Bailey A P, et al. The effects of minimal tillage, contour cultivation and in-field vegetative barriers on soil erosion and phosphorus loss[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 106(1):145-151.
- [8] Liu Q J, Zhang H Y, An J, et al. Soil erosion processes on row sideslopes within contour ridging systems [J]. *Catena*, 2014, 115:11-18.
- [9] Liu Q J, Shi Z H, Yu X X, et al. Influence of microtopography, ridge geometry and rainfall intensity on soil erosion induced by contouring failure[J]. *Soil and Tillage Research*, 2014, 136:1-8.
- [10] 安娟,殷小琳,李国会,等.雨滴打击与壤中流交互作用对横坡垄作坡面侵蚀过程的影响[J].*水土保持学报*, 2021, 35(1):50-55,64.
An J, Yin X L, Li G H, et al. Interactive influence of raindrop impact and seepage on soil erosion process within contour ridge system [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(1):50-55,64.
- [11] 何周窈,何淑勤,逯传琦,等.大渡河流域干旱河谷区坡面侵蚀产沙与水动力学特征研究[J].*长江流域资源与环境*, 2023, 32(4):832-841.
He Z Y, He S Q, Lu C Q, et al. Study on characteristics of slope erosion sediment production and hydrodynamics in arid valley area of Dadu River Basin [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023, 32(4):832-841.
- [12] 朱上卿,赵桂茹,安瞳昕,等.不同播种方式微地形差异对坡耕地水土流失的影响[J].*水土保持学报*, 2023, 37(3):43-51.
Zhu S Q, Zhao G R, An T X, et al. Effects of microtopography difference of different sowing patterns on soil and water loss in sloping farmland [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(3):43-51.
- [13] 谢亚茹,程金花,李语晨,等.黄土区土壤结皮和垄高对坡面产流产沙的影响[J].*东北农业大学学报*, 2017, 48(10):42-49.
Xie Y R, Cheng J H, Li Y C, et al. Effect of soil crust and ridge height on runoff producing and sediment yield in loess area[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2017, 48(10):42-49.
- [14] 杨瑞杰,何淑勤,逯传琦,等.大渡河干旱河谷区横坡坡面产流产沙特征及水土保持效益[J].*水土保持学报*, 2022, 36(6):16-22.
Yang R J, He S Q, Lu C Q, et al. Runoff and sediment yield characteristics and soil and water conservation benefits of cross ridge slope in arid valley of Dadu River[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(6):16-22.
- [15] 陆淑宁,李荣融,姚冲,等.横坡垄作对坡耕地产流产沙及氮磷养分流失过程影响研究[J].*土壤学报*, 2024, 61(5):1271-1283.
Lu S N, Li R R, Yao C, et al. Study on the effects of counter tillage on runoff and sediment yield and process of nitrogen and phosphorus nutrient loss on sloping farmland[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61(5):1271-1283.
- [16] 崔晓芳,刘佳悦,尹钊,等.坡度及植被盖度对潮土坡面土壤侵蚀特征的影响[J].*东北林业大学学报*, 2025, 53(4):117-125.
Cui X F, Liu J Y, Yin Z, et al. The impact of slope and vegetation coverage on soil erosion characteristics of tidal soil slopes[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2025, 53(4):117-125.
- [17] Luo J, Zheng Z C, Li T X, et al. Assessing the impacts of microtopography on soil erosion under simulated rainfall, using a multifractal approach[J]. *Hydrological Processes*, 2018, 32(16):2543-2556.
- [18] 安龙龙,郑子成,王永东,等.耕作措施对玉米生长期黄壤坡耕地径流及可溶性有机碳流失的影响[J].*水土保持学报*, 2022, 36(5):75-81,89.
An L L, Zheng Z C, Wang Y D, et al. Effects of tillage practices on runoff and dissolved organic carbon loss from yellow soil sloping farmland during maize growth periods [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(5):75-81,89.
- [19] Kuipers H. A reliefmeter for soil cultivation studies[J]. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 1957, 5(4):255-262.
- [20] Beven K J, Kirkby M J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant [J]. *Hydrological Sciences Bulletin*, 1979, 24(1):43-69.
- [21] 芮孝芳,蒋成煜,张金存.流域水文模型的发展[J].*水文*, 2006, 26(3):22-26.
Rui X F, Jiang C Y, Zhang J C. Development of watershed hydrologic models [J]. *Journal of China Hydrology*, 2006, 26(3):22-26.
- [22] 王盛萍,姚安坤,赵小婵.基于人工降雨模拟试验的坡面水文连通性[J].*水科学进展*, 2014, 25(4):526-533.
Wang S P, Yao A K, Zhao X C. Analyzing hydrological connectivity for a slope-surface on the basis of rainfall simulation experiment [J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(4):526-533.
- [23] Nayak S R, Mishra J, Jena P M. Fractal analysis of image sets using differential box counting techniques[J]. *International Journal of Information Technology*, 2018, 10(1):39-47.