

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.05.013.

苟俊菲, 甘凤玲, 刘春红. 紫色土坡面细沟形态变化及其对产流产沙的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 61-68, 75.

GOU Junfei, GAN Fengling, LIU Chunhong. Variation of Rill Morphology and Its Effect on Runoff and Sediment Yield on Purple Soil Slope[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5): 61-68, 75.

紫色土坡面细沟形态变化及其对产流产沙的影响

苟俊菲^{1,2}, 甘凤玲^{1,2}, 刘春红^{1,2}

(1.重庆师范大学 三峡库区地表过程与环境遥感重庆市重点实验室, 重庆 401331;

2.重庆市三峡库区地表生态过程野外科学观测研究站, 重庆 401331)

摘要: [目的]揭示紫色土坡面细沟形态特征及其对产流产沙的影响, 阐明紫色土区影响细沟产流产沙的主控因素, 进而为紫色土区水土流失治理提供参考依据。 [方法]以紫色土坡耕地为研究对象, 设计3个流量(6, 8, 10 L/min)和5个坡长(1, 2, 3, 4, 5 m), 利用放水冲刷试验定量分析细沟形态和产流产沙变化特征, 探讨细沟形态变化对产流产沙特征的影响。 [结果]随流量增加, 沟宽和沟深均呈增大趋势, 宽深比则呈减小趋势; 随坡长增加, 沟宽与宽深比呈先减小后增大的趋势, 沟深变化规律则相反, 且细沟形态在坡长3~4 m存在突变。流量与产流率、产沙率和细沟侵蚀速率呈正相关关系, 坡长与产沙率呈正相关关系, 而与产流率和细沟侵蚀速率呈负相关关系, 其中产流率主要受流量的影响, 而产沙率和细沟侵蚀速率受流量和坡长交互作用的影响较大。相关性分析表明, 相比于产流($r=0.54$, $p<0.05$), 细沟形态与产沙关系更为密切($r>0.67$, $p<0.01$)。通过多元逐步回归分析发现, 沟宽是影响细沟侵蚀速率的关键因素($p<0.05$), 沟深是影响产沙率、累积产沙量的关键因素($p<0.01$)。 [结论]沟宽与沟深可用于预测紫色土坡面侵蚀程度, 其中沟深是表征侵蚀产沙的最佳指标, 未来细沟侵蚀防治措施重点应在控制沟深发育方面。

关键词: 细沟形态; 产流率; 产沙率; 细沟侵蚀速率; 流量; 坡长; 紫色土坡面

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)05-0061-08

Variation of Rill Morphology and Its Effect on Runoff and Sediment Yield on Purple Soil Slope

GOU Junfei^{1,2}, GAN Fengling^{1,2}, LIU Chunhong^{1,2}

(1. Chongqing Key Laboratory of Surface Process and Environment Remote Sensing in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China; 2. Chongqing Field Observation and Research Station of Surface Ecological Process in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 401331, China)

Abstract: [Objective] The aim of this study is to explore the influence of rill morphology characteristics to runoff and sediment yield on purple soil slope as well as the main controlling factors affecting runoff and sediment yield in rill, and then to provide a reference for soil erosion control in purple soil area. [Methods] Purple sloping farmland was taken as the research object. A series of the scouring-erosion experiments were conducted under the different slope length (1, 2, 3, 4 and 5 m) and flow discharge (6, 8 and 10 L/min). The scouring-erosion experiments were used to quantitatively analyze the variation of rill morphology and the characteristics of runoff and sediment yield, and the influence of rill morphology variation on the characteristics of runoff and sediment yield was discussed. [Results] With the increase of flow discharge, the rill width and rill depth increased, and the width-depth ratio decreased. With the increasing of slope length, the rill width and width-depth ratio showed the decrease-increase trend, while the rill depth showed the contrary

收稿日期: 2022-07-13

修回日期: 2022-08-10

资助项目: 国家青年科学基金项目(42107355); 重庆市基础研究与前沿探索项目(cstc2018jcyjAX0489); 重庆市教委科技项目(KJQN201800531, KJQN202100518); 重庆市科委面上项目(CSTB2022NSCQ-MSX1053)

第一作者: 苟俊菲(1996—), 女, 四川广安人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: 815950112@qq.com

通信作者: 刘春红(1979—), 女, 河北冀州人, 博士, 副教授, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: 20131490@cqu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

tendency, and the rill morphology had a sudden change in the slope length of 3~4 m. Flow discharge was positively correlated with runoff yield rate, sediment yield rate and rill erosion rate. Slope length was positively correlated with sediment yield rate, but negatively correlated with runoff yield rate and rill erosion rate. Runoff yield rate was mainly affected by flow discharge, sediment yield rate and rill erosion rate were mainly affected by the interaction of flow discharge and slope length. Rill morphology had a weak relationship with the runoff ($r=0.54$, $p<0.05$), and was closely related to the sediment yield ($r>0.67$, $p<0.01$). Through multiple stepwise regression analysis, it was found that rill width was the key factor affecting the rill erosion rate ($p<0.05$), and rill depth was the key factor affecting sediment yield rate and cumulative sediment yield ($p<0.01$). [Conclusion] Rill width and rill depth could be used to predict the erosion degree of purple soil slope, and rill depth could be considered as the best indicator to characterize the sediment yield. In the future, rill erosion control measures should focus on the control of development of rill depth.

Keywords: rill morphology; runoff yield rate; sediment yield rate; rill erosion rate; flow discharge; slope length; purple soil slope

土壤侵蚀已成为威胁社会、经济、农业的全球性环境问题^[1]。水力侵蚀是紫色土坡面的常见土壤侵蚀形式之一^[2],可分为溅蚀、壤中流侵蚀、细沟侵蚀与细沟间侵蚀。细沟侵蚀一旦发生,则该区域的土壤侵蚀量至少增加几倍甚至几十倍^[3]。因此细沟侵蚀是水力侵蚀产沙中的重要过程,也是造成坡耕地表土流失和养分流失的重要原因之一^[4],深入探究细沟侵蚀过程对建立紫色土坡面土壤侵蚀预报模型具有重要的科学指导意义。

近年来,国内外关于细沟侵蚀过程中坡长^[5]、坡度^[6]、雨强等^[7]侵蚀因子对坡面产流产沙的影响报道较多。如在黄土区,一般随坡长增加,产流产沙量呈增加趋势。但当坡长超过8 m,坡面侵蚀量则因土体透水性、细沟沟壁坍塌等会减小^[8],当坡长增至40 m后,产流量也会减少,存在“径流退化”现象^[9]。随坡度增加,坡面产流产沙量呈二次函数变化,临界坡度介于 $20^{\circ}\sim 25^{\circ}$ ^[6];雨强的增大会促使坡面流速增加,进而增强水流携沙能力^[7]。产流产沙与细沟形态变化是细沟侵蚀过程的两个方面,二者相互作用,径流冲刷与泥沙搬运不断改变细沟形态^[10],反过来,细沟又为径流和泥沙提供输送通道,其形态变化会引起水流结构转变,径流动能发生改变,则坡面产流产沙也会随之不同^[11]。因此,细沟形态与产流产沙之间关系密切。目前,关于细沟形态对产流的影响因试验条件、土壤性质不同,研究结果差异较大。如和继军等^[12]认为细沟形成前后产流量并无明显变化,细沟形态与产流相关性较弱。而裴冠博等^[13]认为细沟的形成以及沟宽、沟深的增大使径流形态发生转变,径流快速汇集于细沟沟道内,产流率会明显增大,细沟形态与产流率相关性较高($r=0.97$)。此外,细沟发育会加剧坡面侵蚀,其形态参数可较好地预测坡面侵

蚀强度。黄土坡面细沟割裂度、细沟密度能更好地预测坡面侵蚀强度^[13],而红壤坡面沟深、宽深比可较好地预测坡面侵蚀强度^[14]。

综上所述,细沟形态与产流产沙之间关系复杂,细沟形态与产流是否有关以及选取何种细沟形态指标来反映坡面侵蚀强度尚无统一认识。目前对细沟侵蚀的研究主要集中在黄土坡面^[15-16]和堆积体坡面^[17-18],而紫色土区细沟形态对产流产沙影响研究还较为薄弱。与黄土相比,紫色土有机质含量较高,有较高的农业价值,但因土层浅薄、土壤孔隙大、长江流域暴雨频繁等特点,紫色土区水土流失现象严重^[19]。因此本研究以紫色土坡耕地为研究对象,模拟径流对坡面的冲刷过程,探讨不同流量、不同坡长下紫色土坡耕地细沟形态变化及其产流产沙过程,并分析细沟形态指标与产流产沙特征的关系,明确紫色土坡耕地侵蚀产流产沙机制,为紫色土坡面土壤侵蚀模型的建立提供参数支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于重庆市沙坪坝区($29^{\circ}27'\sim 29^{\circ}46'N$, $106^{\circ}14'\sim 106^{\circ}31'E$) (图1)。该研究区属亚热带湿润季风气候,年平均降雨量1 083 mm,雨季主要集中在夏秋两季。年平均气温为 $17^{\circ}C$,无霜期341.6 d,具有冬暖夏热、春秋多变的特点。该区地势总体呈西高东低,海拔高度介于175~705 m。采样点位于沙坪坝区虎溪镇杨家沟小流域内,属于川东平行岭谷低山丘陵区的一部分,土壤以中性紫色土为主,土壤有机质含量较低,发育的地带性植被为亚热带常绿阔叶林。主要种植作物有黄豆(*Glycine max*)、玉米(*Zea mays*)和萝卜(*Raphanus sativus*)等。区内坡耕地广

布,夏季多暴雨,极易造成水土流失现象,其中坡耕地土壤侵蚀占总水土流失量的 60% 以上^[20]。

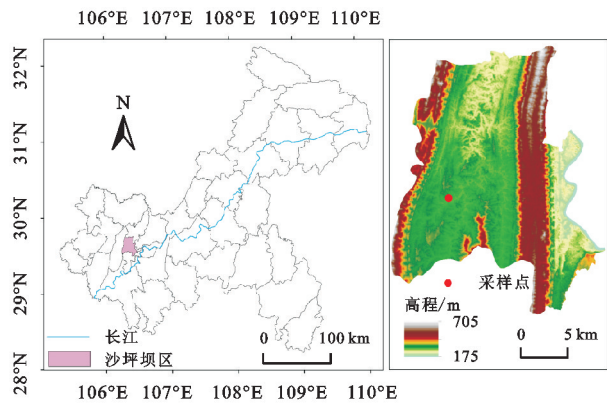


图 1 研究区图

1.2 试验材料与装置

本试验于 2020 年 9—12 月进行,在杨家沟小流域内紫色土坡耕地 0—20 cm 耕层取紫色土装袋运回。所取紫色土有机质含量为 10.69 g/kg,容重为 1.2 g/cm³,含水率介于 18%~23%。土壤质地为粉(砂)壤土,其中粉粒(0.002~0.05 mm)含量为 72.83%,黏粒(<0.002 mm)含量为 10.19%,砂粒(0.05~2 mm)含量为 16.98%。

试验装置主要由供水系统、稳流槽、土槽、集流桶 4 部分组成(图 2)。土槽长 6.0 m、宽 1.2 m、深 0.5 m。通过对研究区细沟野外调查,细沟宽度多在 20 cm 以下,因此本试验采用亚克力板将土槽竖向分隔为宽度一致的两部分,即试验土槽的规格为 6.0 m×0.6 m×0.5 m。采用水泵供水并通过水阀调节出水流量;在土槽末端设置集流装置,用于收集径流泥沙样。

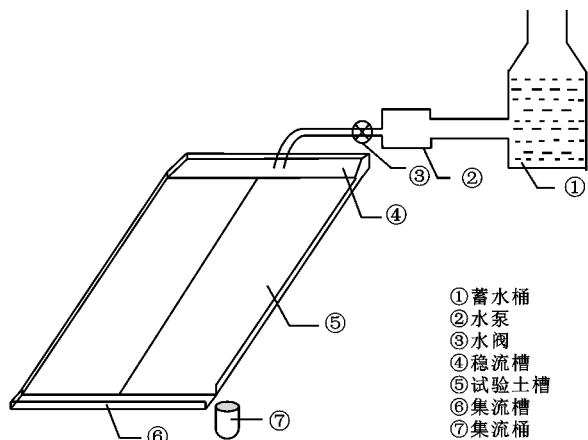


图 2 试验装置示意图

1.3 研究方法

土样采回后经自然风干,去除砾石等杂质并过 10 mm 筛。先在土槽底部装填 10 cm 细沙作为透水层并覆盖纱布(便于水分下渗)再进行填土。细沙层上采用分层填土的方式,以 5 cm 为单位,分 6 层依次进行填土,总厚度为 30 cm。为确保尽可能接近野外

实际情况,将土壤容重控制在 1.15~1.25 g/cm³,平均容重为 1.2 g/cm³。每装填一层土壤,采用环刀法在土槽不同部位随机取 5 个样本带回实验室烘干测量检验,符合条件后将土层表面用平尺拉毛再装填下一层,最后压实土槽边壁以减少边界效应的影响。填土完成后,采用侧喷式降雨器降小雨润湿土壤,土壤初始含水率保持在 20%±2.0%,用聚丙烯膜布覆盖土槽 24 h 后再进行冲刷试验。根据研究区暴雨强度及坡耕地坡长和坡度,试验设置 3 个流量(6, 8, 10 L/min),5 个坡长(1, 2, 3, 4, 5 m)和 1 个坡度(15°)。每组试验重复 3 次,共计 45 场。

在试验开始前,对放水流量进行率定,确保流量误差≤2%。为避免水流直接冲刷土槽,将稳流槽下铺设纱布,并根据每次试验设定坡长将稳流槽置于距坡底 1, 2, 3, 4, 5 m 的相应位置,即分别代表坡长 1, 2, 3, 4, 5 m。根据前期预试验可知,在冲刷历时 16 min 后产流产沙基本稳定,因此本试验冲刷历时设定为 16 min。试验前 6 min 采样间隔为 1 min/次,从第 7 分钟开始采样间隔为 2 min/次收集径流样。细沟沟长采用精度 1cm 的皮尺测量。同时在坡面上、中、下 3 个位置设置测量断面,用钢尺(精度 1 mm)测量断面处的细沟沟宽、沟深,并取其平均值作为最终沟宽与沟深。采用量筒(精度 0.001 L)测量产流量,产沙量采用烘干法测定。试验结束后,更换全部装填土壤,并将土壤表面抹平打毛,保证土壤容重、含水率达到设定值后进入下一场试验。

1.4 数据分析处理

细沟宽深比可表征细沟断面形态变化,代表细沟宽度与对应深度的比值。计算式为:

$$\mu = \frac{w}{d} \tag{1}$$

式中:μ 为细沟宽深比;w 为细沟宽度(cm);d 为细沟深度(cm)。

产流率指各时段所收集的径流量与冲刷历时的比值,即坡面在单位时间内的产流量。计算式为:

$$R = \frac{q}{t} \tag{2}$$

式中:R 为产流率(L/min);q 为一定时段内的产流量(L);t 为冲刷历时(min)。

产沙率是指单位时间内因侵蚀产生的泥沙量。计算式为:

$$S = \frac{S_w}{t} \tag{3}$$

式中:S 为产沙率(g/min);S_w 为一定时段内的产沙量(g);t 为冲刷历时(min)。

细沟侵蚀速率指细沟在水流侵蚀作用下单位时间、单位面积上的产沙量。计算式为:

$$D = \frac{S_w}{blt} \quad (4)$$

式中: D 为细沟侵蚀速率 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$]; S_w 为一定时段内的产沙量 (kg); b 为水宽 (m); l 为沟长 (m); t 为冲刷历时 (min)。

2 结果与分析

2.1 细沟形态变化特征

细沟宽度、深度随流量、坡长变化都出现较大波动,波动趋势基本一致(图3)。细沟宽度介于 6.80~11.83 cm。随流量增加,沟宽逐渐增大,且增长速率也呈增大趋势。流量为 6 L/min, 8 L/min, 10 L/min 时,平均沟宽依次为 7.99 cm, 8.87 cm, 10.51 cm。流量从 6 L/min 增至 8 L/min, 8 L/min 增至 10 L/min 时,沟宽平均增长率分为 11.01%, 18.45%。不同流量下,沟宽最小值均出现在坡长为 4 m 时,最小沟宽分别为 6.80 cm(6 L/min), 7.00 cm(8 L/min), 8.17 cm(10 L/min)。坡长小于 4 m 时,沟宽随坡长的增加而减小,平均减小幅度为 30.04%;而坡长由 4 m 增至 5 m 时,沟宽增大了 35.05%。由此可见,坡长 4 m 是沟宽发育的“增—减”拐点。细沟深度介于 3.73~11.33 cm。沟深随流量增大而增大,但沟深增长速率

却有所减小。即流量 6 L/min, 8 L/min, 10 L/min 的平均沟深依次为 6.63 cm, 7.87 cm, 9.20 cm, 流量 8 L/min 与 10 L/min 的平均沟深分别是流量 6 L/min 条件下平均沟深的 1.19 倍和 1.39 倍。其中流量由 6 L/min 增至 8 L/min, 8 L/min 增至 10 L/min 时,沟深平均增长率分为 18.64%, 16.90%。当流量一定时,沟深随坡长变化趋势不同。流量为 6 L/min 时,沟深随坡长增加呈先增大后减小的趋势,在坡长 3 m 时,沟深发育最大为 8.67 cm;而流量为 8 L/min, 10 L/min 时,随坡长增加沟深均呈波动增大趋势,沟深平均增长率分别为 24.50% 和 34.92%。

细沟宽深比介于 0.82~2.10, 其变化与沟宽、沟深不同(图3)。随流量增加,细沟宽深比逐渐降低。流量为 6 L/min, 8 L/min, 10 L/min 的平均宽深比依次为 1.32, 1.15, 1.14。其中在流量由 6 L/min 增至 8 L/min 和 8 L/min 增至 10 L/min 时,宽深比下降速率分别为 12.41% 和 0.97%。表明随流量增加,沟深较沟宽增长迅速,宽深比逐渐减小。当流量一定时,宽深比随坡长增加呈先减小后增大趋势,均在坡长 3 m 时出现了最低值。当坡长从 1 m 增加到 3 m 时,平均宽深比从 1.45 下降至 0.90, 平均下降幅度为 37.86%;而坡长由 3 m 增至 5 m 时,平均宽深比由 0.90 增至 1.40, 平均增长速率为 55.38%。

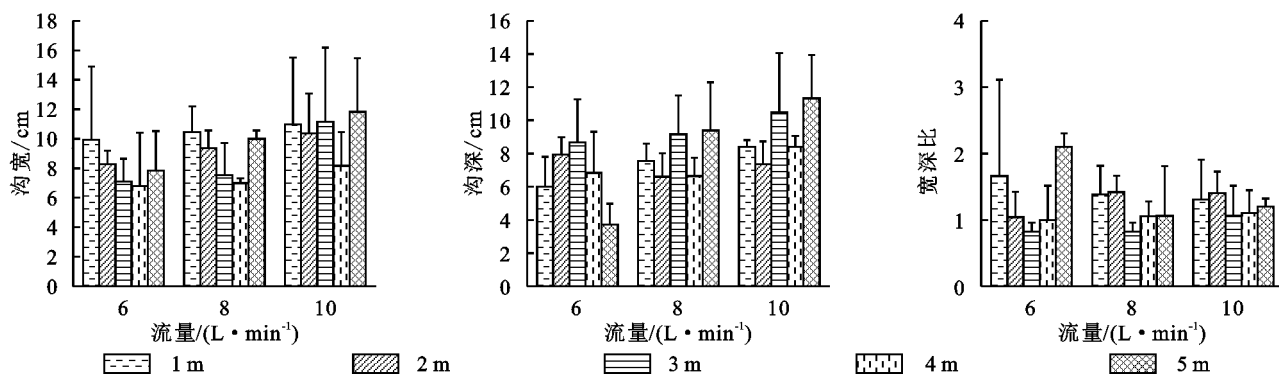


图3 不同坡长和流量条件下的细沟形态特征指标变化

2.2 产流产沙变化特征

不同坡长与流量条件下产流率变化过程可分为两个阶段:快速增长阶段(0~6 min)和稳定阶段(6~16 min)(图4A—C)。在快速增长阶段,产流率急速增加,6 L/min, 8 L/min, 10 L/min 3 个流量的产流率变化范围分别在 0~5.24 L/min, 0.11~7.54 L/min 和 0.26~9.46 L/min, 平均增长率分别为 229.86%, 1138.68% 和 754.60%。随冲刷历时延长,坡面土壤水分逐渐饱和,土壤水分下渗量逐渐减少,后趋于稳定。在 6 min 左右即快速增长阶段结束时,产流率均接近于该场次的设定放水流量。在稳定阶段,稳定产

流率随流量增加而增大。流量 6 L/min 的稳定产流率是 8 L/min, 10 L/min 稳定产流率的 73.95% 和 64.92%。平均产流率随流量增加也呈增大趋势,3 个流量的平均产流率分别为 4.53 L/min(6 L/min), 5.94 L/min(8 L/min), 7.24 L/min(10 L/min), 流量 8 L/min 和 10 L/min 的平均产流率分别是 6 L/min 的 1.31 倍和 1.60 倍。而平均产流率随坡长增加呈波动减小趋势,整体减小 10.14%。坡长 4 m 条件下,3 个流量的平均产流率均最低。当坡长从 1 m 增至 4 m 时,6 L/min, 8 L/min, 10 L/min 3 个流量的平均产流率随坡长增加均呈波动减小趋势,其下降速率分别为 38.45%,

37.42%,15.96%。当坡长由 4 m 增至 5 m 时,3 个流量下的平均产流率均呈增加趋势,其增长速率分别为 51.82%,44.95%,3.19%。

不同流量和坡长条件下产沙率随冲刷历时的变化规律基本一致(图 4D—F),在冲刷初始阶段,产沙率增长速率较快,为 151.93%~6 876.83%,均在第 4~6 min 内产沙率达到最大值,此后产沙率逐渐减小,即产沙率随冲刷历时延长呈先增大后减小趋势。但当流量为 10 L/min、坡长为 4 m 时产沙率在 0~9 min 内先增加后减小,第 10 分钟又突然增大,其原因可能是流量较大加剧了土体的不稳定,沟壁坍塌发生频繁,大量土壤被径流带走,使产沙率突然增加^[11]。当坡长一定时,平均产沙率随流量增加而增大,即在流量 6 L/min 时,平均产沙率最小为 614.05 g/min,分别为流量 8 L/min 和 10 L/min 平均产沙率的 67.85%,50.57%。当流量一定时,坡长 1 m 时平均产沙率最小为 363.92 g/min,

随坡长增加,平均产沙率呈增大趋势,分别为坡长 2,3,4,5 m 时的 49.62%,35.33%,35.35%和 25.74%。

细沟侵蚀速率随冲刷历时延长大致呈先增大后波动减小的趋势(图 4G—I)。在流量 6,8,10 L/min 条件下,最大细沟侵蚀速率依次为 12.62,17.44,17.31 kg/(m²·min),均出现在第 4~6 min 内,且随流量增加,平均细沟侵蚀速率分别表现为 3.87<5.78<6.60 kg/(m²·min)。

总体而言,最大细沟侵蚀速率与平均细沟侵蚀速率均随流量增加而增大。平均细沟侵蚀速率随坡长增加而减小。具体表现为:坡长为 1 m 时,细沟侵蚀速率在前 6 min 内平均增长了 7.67 倍,后逐渐减小,平均细沟侵蚀速率为 5.79 kg/(m²·min);而坡长为 2,3,4,5 m 时,平均细沟侵蚀速率随坡长增加逐渐降低,分别为 7.17,5.66,4.07,4.06 kg/(m²·min),其中,坡长由 3 m 增至 4 m 时细沟侵蚀速率降幅最大,达 28.04%。

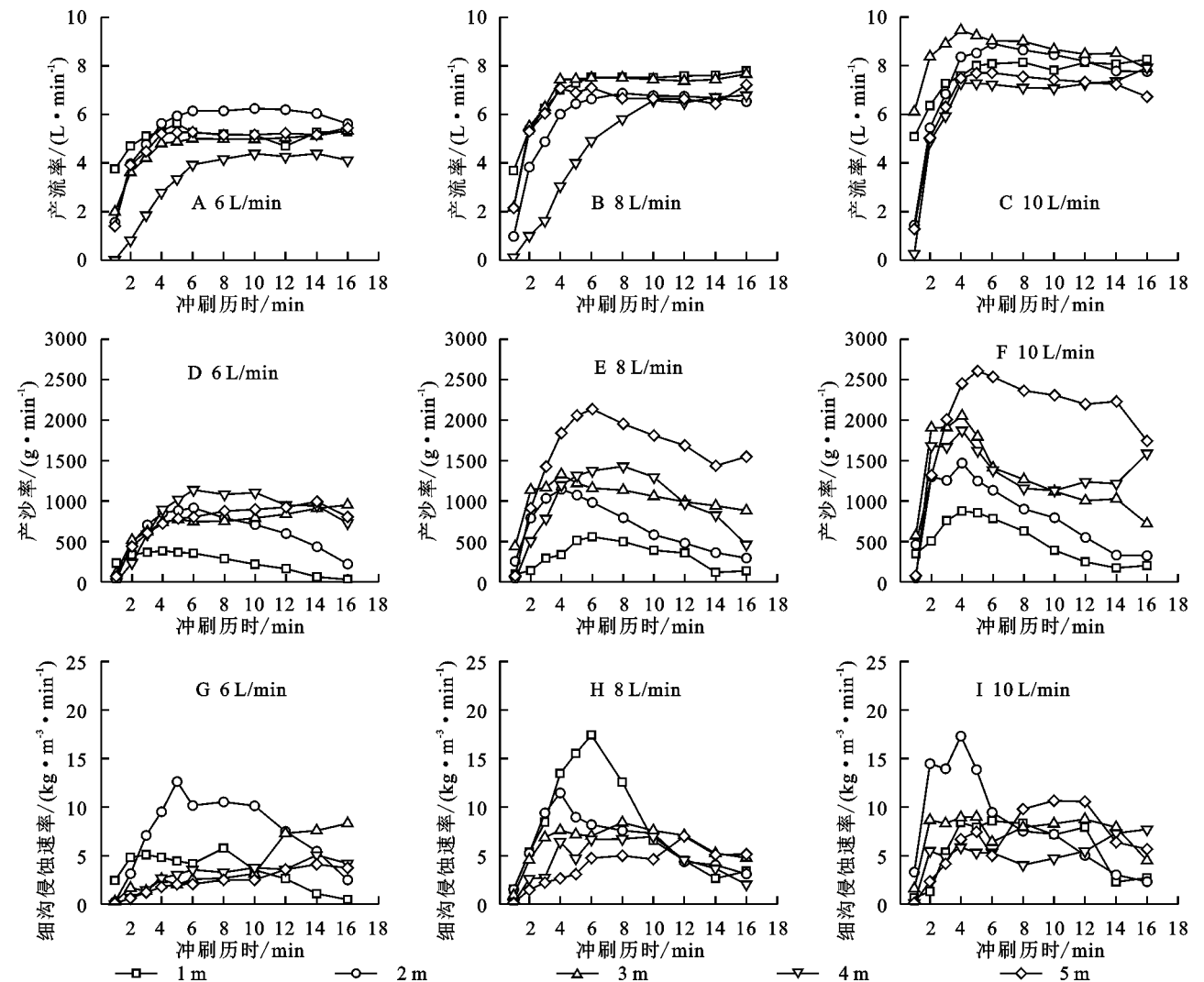


图 4 不同坡长及流量下产流产沙特征参数与冲刷历时的关系

2.3 坡长、流量及其交互作用对细沟侵蚀的影响

以坡长(L)、流量(Q)为自变量,平均产流率

(R_m)、平均产沙率(S_m)、平均细沟侵蚀速率(D_m)为因变量,通过 Design Expert 软件建立流量、坡长与

以上 3 个细沟侵蚀特征指标的回归方程,其为:

$$R_m=2.07+0.64Q-0.17L \tag{5}$$

$$S_m=282.67-10.92Q-150.44L+48.76QL \tag{6}$$

$$D_m=2.01+0.68Q-0.69L \tag{7}$$

3 个回归方程的 p 值小于 0.01,表明 3 个回归方程均达极显著水平,方程(5),(6),(7)的 R^2 分别为 0.77,0.89,0.58,回归方程拟合度均较好,其中平均产沙率的拟合优度最高。通过回归方程生成响应曲面,响应曲面的陡峭程度反映了各因变量随自变量流量、坡长的变化程度。平均产流率、平均产沙率以及平均细沟侵蚀速率均随流量增加而增大;与流量相比,平均产流率和平均细沟侵蚀速率随坡长增加而减小,而平均产沙率随坡长增加而增大(图 5)。

由表 1 可知,坡长对平均产沙率影响极显著,坡

长对平均产流率以及细沟侵蚀速率影响不显著,但控制流量后,对坡长与产流率以及细沟侵蚀速率进行偏相关分析,坡长与其二者相关性有所提高。此外,流量与产流率以及细沟侵蚀速率均呈显著或极显著的正相关关系,流量对平均产沙率影响较小,但控制坡长后,对流量与平均产沙率进行偏相关分析,二者呈极显著的正相关关系($r=0.76,p<0.01$)。坡长 \times 流量交互项对平均产流率、平均产沙率、平均细沟侵蚀速率影响极为显著($R^2>0.58,p<0.01$),平均产流率与流量的显著性和 R^2 高于坡长以及坡长 \times 流量交互项,平均产沙率、平均细沟侵蚀速率与流量、坡长的显著性和 R^2 均低于坡长 \times 流量交互项,说明产流率主要受流量的影响,产沙率和细沟侵蚀速率主要受坡长和流量交互作用的影响。

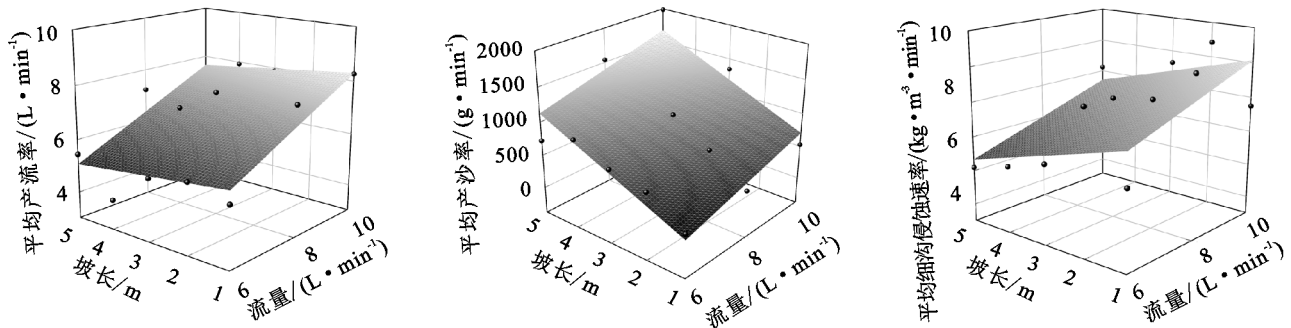


图 5 细沟侵蚀对坡长和流量的响应曲面

表 1 细沟侵蚀参数与坡长、流量及其交互项相关分析

变量	细沟侵蚀参数		
	平均产流率	平均产沙率	平均细沟侵蚀速率
坡长	-0.19	0.76**	-0.50
流量	0.86**	0.50	0.57*
坡长 \times 流量	0.77**	0.82**	0.58**

注:**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。

2.4 细沟形态与产流产沙特征的关系

不同坡长与流量条件下细沟形态与产流产沙特征参数的相关关系见图 6。在产流方面,除沟宽与产流特征参数平均产流率、累积产流量呈显著正相关关系外($r=0.54,p<0.05$),沟深、宽深比与产流特征参数相关性均不显著。在产沙方面,宽深比与产沙特征参数平均产沙率、平均细沟侵蚀速率以及累积产沙量相关性均不显著,这可能是因为平均宽深比集中在 1~1.5,数值变化不明显,其次沟壁崩塌具有随机性,导致宽深比发育不稳定,径流含沙量波动较大^[11]。沟深与平均产沙率、累积产沙量均呈极显著正相关关系($r>0.67,p<0.01$),沟宽与细沟侵蚀速率呈显著正相关关系($r=0.54,p<0.05$)。综上可知,细沟形态变化与坡面产流关系较弱,与坡面产沙关系较密

切。这与张攀等^[11]、和继军等^[12]在黄土区的研究结果基本一致。产流主要与土壤下渗、土壤结皮等有关,细沟形态对产流的影响十分有限。径流侧蚀以及下切导致的细沟形态变化促使产沙量明显增加,因此可通过细沟形态变化预测坡面侵蚀产沙特征。

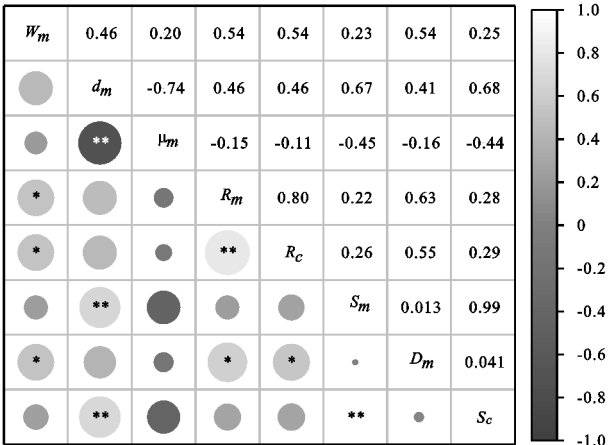
细沟形态与侵蚀产沙是一个彼此关联的动态耦合系统,单因子相关性分析只能表明二者之间的密切程度,并不能准确表达细沟形态与产沙的因果关系,因此通过多元逐步回归分析,确定细沟形态指标(沟宽、沟深、宽深比)对产沙特征参数(产沙率、细沟侵蚀速率、累积产沙量)的影响程度。由表 2 可知,建立的沟深与产沙率、累积产沙量的回归方程极显著($p<0.01$),沟宽与细沟侵蚀速率的回归方程显著($p<0.05$)。沟深是影响产沙率、累积产沙量的关键因素,沟宽是影响细沟侵蚀速率的关键因素。综上可知,沟深是表征坡面产沙特征的最佳指标。

3 讨论

3.1 细沟形态特征分析

细沟侵蚀强度的变化与流量、坡长等因素的交互作用有关。一般认为在小坡长条件下,细沟形态整体发育较小,多呈“浅宽式”^[14];随着坡长增加,沿程径

流能量不断变化^[21],细沟沟底下切、沟岸扩张明显^[13],导致细沟形态以及水流挟沙能力发生变化,进而影响整个土壤侵蚀过程。黄土坡面结构松散^[22],土壤孔隙度大,细沟形态转折坡长为 7~8 m^[23],但本研究表明,紫色土坡面细沟形态在坡长 3~4 m 存在突变值,这可能是由于坡面本身性质不同所造成,与黄土相比,紫色土黏粒含量、有机质含量较高^[19],遇水易黏结,因此土壤坡面的抗蚀能力不同,从而导致细沟形态变化突变点存在差异。本研究中细沟宽深比与坡长为非线性关系,随坡长增加先减小后增大,这与裴冠博等^[13]指出宽深比与坡长呈负相关关系不同,其原因可能是当坡长较小时,径流路径短,径流下渗引起的损失较小,坡面径流量迅速汇集于初步成型的细沟中^[24],此时的细沟呈“浅宽式”^[14]。当坡长增加时,汇水面积增大,径流侵蚀作用增大,细沟以纵断面发展为主,沟深较沟宽侵蚀显著。此外,由于溯源侵蚀作用^[25],致使沟深增大,从而造成宽深比不断减小。随着坡长进一步增加,坡面细沟发育不稳定,以边壁坍塌为主,其速率大于径流下切速率^[14],沟宽增长速率大于沟深,宽深比又逐渐增大。



注: W_m 为平均沟宽; D_m 为平均沟深; μ_m 为平均宽深比; R_m 为平均产流率; R_c 为累积产流量; S_m 为平均产沙率; D_m 为平均细沟侵蚀速率; S_c 为累积产沙量。* 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 6 细沟形态指标与产流产沙特征参数的相关性分析

表 2 多元线性逐步回归分析结果

回归方程	F 值	p 值	R ²
$S_m=164.06d_m-382.08$	10.45	0.007	0.45
$D_m=0.645W_m-0.47$	5.30	0.038	0.29
$S_c=1873.71d_m-4781.80$	11.20	0.005	0.46

在本研究中,细沟沟深与宽深比均在流量由 6 L/min 增至 8 L/min 阶段变化幅度最大,而沟宽在此阶段变化幅度最小。这表明在小流量范围内以细沟下切侵蚀为主,在大流量范围内以细沟侧蚀以及沟

壁坍塌为主。其原因可能是在小流量条件下,径流侵蚀能力弱,径流含沙量小,而径流搬运泥沙所消耗能量与侵蚀能量两者互相消长^[23],导致侵蚀消耗能量大,且细沟下切速率大于沟壁坍塌速率,则宽深比、沟深变化幅度大。在试验开始前进行降雨润湿土壤,致使坡面出现土壤结皮,减少下渗,从而增加坡面抗蚀性^[26]。在大流量条件下,径流剪切力大,土壤结皮层易被冲刷破坏,径流对坡面的侵蚀作用加大,径流含沙量增加,搬运泥沙速率比侵蚀速率增长快,致使侵蚀消耗能量有所减弱,虽然细沟下切速率仍大于沟壁坍塌速率,但其增长速率却相反,则细沟沟宽变化幅度大。

3.2 细沟形态对产沙特征的影响

侵蚀产沙是土壤侵蚀过程中的主要搬运物质^[27],而产沙特征指标产沙率与细沟侵蚀速率对正确认识细沟侵蚀有重要作用。细沟侵蚀速率与产沙率二者随冲刷历时的变化过程基本一致,这是因为侵蚀速率与产流产沙有关,产流率随冲刷历时先增加后趋于稳定,而产沙率在此过程中变化较大,因此细沟侵蚀速率与产沙率随冲刷历时变化规律一致,均为先增大后减小^[28]。但这与极端降雨下的侵蚀速率先陡降再趋于稳定研究结果不同^[29]。可能是因为极端降雨下坡面径流量较大,在试验初期坡面的土壤细颗粒被径流快速搬运,土壤细颗粒大量减少导致土壤侵蚀速率陡降^[30]。同时,随地表径流下渗,土壤趋于饱和,径流率也趋于稳定,径流侵蚀能力与土壤抗蚀能力处于动态平衡^[31],即侵蚀速率逐渐趋于稳定。本试验在冲刷初期坡面土壤细颗粒较多,且土壤含水率低,土壤颗粒之间的黏结力弱,土壤易被剥蚀,则细沟侵蚀速率不断增大;随冲刷历时延长,坡面表层的土壤细颗粒基本已被搬运,且土壤含水率的增加,使土粒之间的黏结性增强^[31],因此细沟侵蚀速率逐渐减小。

细沟形态与侵蚀产沙相互影响,关系复杂。本研究表明,紫色土坡面坡长由 3 m 增至 4 m 时细沟侵蚀速率变化幅度最大,这是因为细沟形态在 3~4 m 时存在突变,细沟通过深度、宽度、长度等因素变化改变沟内水流结构,进而影响侵蚀过程发生显著变化^[14]。这与裴冠博等^[13]在黄绵土坡面坡长由 4 m 增至 5 m 时细沟发育最快从而导致侵蚀量增幅最大的研究结果一致。本研究结果表明可通过沟宽、沟深预测坡面侵蚀产沙,其中沟深是表征侵蚀产沙的最佳指标,这与 Lou 等^[32]研究结果一致,而有学者认为沟长是表征侵蚀产沙的最佳指标^[33]。这可能是因为在细沟侵蚀过程中,沟壁坍塌导致沟宽变化,沟壁坍塌对产沙的贡献较小,而导致沟深与沟长的变化的下切

侵蚀与溯源侵蚀的贡献率较大^[34]。此外,土壤类型以及土壤质地、试验方法等差异也会导致预测侵蚀产沙特征指标存在差异^[32]。

本研究通过放水冲刷试验探究紫色土坡耕地细沟形态演变过程,明确细沟侵蚀发生机理,但雨滴溅蚀对细沟发育的影响有待后续的人工降雨试验进行研究。此外,影响坡面细沟侵蚀的因素较多,包括地形(坡长与坡度)、径流、降雨、土壤等,本研究主要探讨不同坡长和流量条件下的细沟形态发育对紫色土坡耕地细沟侵蚀的影响,今后将进一步开展多因素综合分析。

4 结论

(1) 沟宽和沟深均与流量呈正相关关系,宽深比与流量呈负相关关系。随坡长增加,沟宽和宽深比先减小后增大,沟深呈先增大后减小,且坡面细沟侵蚀存在临界坡长3~4 m。

(2) 产流率、产沙率与细沟侵蚀速率三者均与流量呈正相关关系,且产流率和细沟侵蚀速率均与坡长呈负相关关系,产沙率与坡长呈正相关关系。产流率受流量的影响较大,产沙率和细沟侵蚀速率主要受坡长和流量交互作用的影响。

(3) 细沟形态变化对产沙影响较大,即可通过细沟形态指标(沟宽、沟深)预测紫色土坡面侵蚀程度,沟深是表征坡面产沙特征的最佳指标($r>0.67$, $p<0.01$)。

参考文献:

- [1] 王振龙,杜明成,姜翠玲,等.基于人工降雨试验的淮北地区产流产沙差异性研究[J].水科学进展,2019,30(4):507-514.
- [2] 侯宁,王勇,赵虎,等.耕作侵蚀对不同坡度下紫色土侵蚀产沙的影响[J].山地学报,2021,39(4):495-505.
- [3] 王鹏飞,郑子成,张锡洲,等.玉米季横垄坡面细沟侵蚀特征及其影响因素[J].土壤学报,2016,53(4):869-880.
- [4] 何育聪,郑浩杰,韩剑桥.间歇性与连续性降雨对黄土坡面细沟侵蚀影响的比较[J].水土保持学报,2020,34(6):8-13.
- [5] Han Z, Zhong S Q, Ni J P, et al. Estimation of soil erosion to define the slope length of newly reconstructed gentle-slope lands in hilly mountainous regions [J]. Scientific Reports, 2019,9:4676.
- [6] 苏远逸,李鹏,任宗萍,等.坡度对黄土坡面产流产沙过程及水沙关系的影响[J].水土保持研究,2020,27(2):118-122.
- [7] 吕刚,贾晏泽,刘雅卓,等.褐土与棕壤坡耕地细沟侵蚀发生的阶段性水沙变化[J].水土保持学报,2020,34(5):42-48.
- [8] 王玲玲,范东明,王文龙,等.水蚀风蚀交错区不同坡长坡面产流产沙过程[J].人民黄河,2016,38(3):72-75.
- [9] 方海燕,蔡强国,李秋艳.黄土丘陵沟壑区坡面产流能力及影响因素研究[J].地理研究,2009,28(3):583-591.
- [10] 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.
- [11] 张攀,唐洪武,姚文艺,等.细沟形态演变对坡面水沙过程的影响[J].水科学进展,2016,27(4):535-541.
- [12] 和继军,宫辉力,李小娟,等.细沟形成对坡面产流产沙过程的影响[J].水科学进展,2014,25(1):90-97.
- [13] 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):79-84,182.
- [14] 倪世民,冯舒悦,王军光,等.不同质地重塑土坡面细沟侵蚀形态与水力特性及产沙的关系[J].农业工程学报,2018,34(15):149-156.
- [15] Jiang Y M, Shi H J, Wen Z M, et al. The dynamic process of slope rill erosion analyzed with a digital close range photogrammetry observation system under laboratory conditions [J]. Geomorphology, 2019, 350: 106893.
- [16] Sun L Y, Fang H Y, Cai Q G, et al. Sediment load change with erosion processes under simulated rainfall events [J]. Journal of Geographical Sciences, 2019,29(6):1001-1020.
- [17] Niu Y B, Gao Z L, Li Y H, et al. Characteristics of rill erosion in spoil heaps under simulated inflow: A field runoff plot experiment [J]. Soil and Tillage Research, 2020,202:104655.
- [18] 张恒,高照良,牛耀彬,等.两种工程堆积体坡面细沟形态与产沙关系对比研究[J].土壤学报,2021,58(1):115-127.
- [19] 张媛静,张平仓,丁文峰.黄土与紫色土坡面侵蚀特征对比试验研究[J].水土保持通报,2010,30(4):60-62.
- [20] 郑红丽,韦杰,陈国建,等.三峡库区紫色土坡耕地土壤侵蚀研究:进展与方向[J].重庆师范大学学报:自然科学版,2014,31(3):42-48.
- [21] 刘冉,余新晓,蔡强国,等.坡长对坡面侵蚀、搬运、沉积过程影响的研究进展[J].中国水土保持科学,2020,18(6):140-146.
- [22] 杨茹珍,张风宝,杨明义,等.急陡黄土坡面细沟侵蚀的水动力学特性试验研究[J].水土保持学报,2020,34(4):31-36.
- [23] 沈海鸥,郑粉莉,温磊磊,等.黄土坡面细沟侵蚀形态试验[J].生态学报,2014,34(19):5514-5521.
- [24] 张翔,高照良,卢茜.壤土堆积体坡面细沟形态及其沿程分布特征[J].水土保持研究,2019,26(5):53-59.

- 2021,52(6):1290-1298.
- [15] 何苗苗,刘芝芹,王克勤,等.滇池流域不同植被覆盖土壤的入渗特征及其影响因素[J].水土保持学报,2022,36(3):181-187.
- [16] 吕宸,宫渊波,车明轩,等.川西高寒山地灌丛草甸土壤抗蚀性研究[J].水土保持学报,2020,34(2):9-17.
- [17] 宋孝玉,李亚娟,李怀有,等.不同地貌类型及土地利用方式下土壤粒径的分形特征[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2009,37(9):155-160,167.
- [18] 杜书立,李浩,陈强,等.典型黑土区侵蚀沟空间分布特征及主要影响因子分析:以黑龙江省引龙河农场为例[J].土壤与作物,2013,2(4):177-182.
- [19] 刘宝元,刘刚,王大安,等.区域沟蚀野外调查方法:以东北地区为例[J].中国水土保持科学,2018,16(4):34-40.
- [20] Zhang T, Liu G, Duan X, et al. Spatial distribution and morphologic characteristics of gullies in the Black Soil Region of Northeast China: Hebei watershed[J]. Physical Geography, 2016,37(3/4):228-250.
- [21] 闫业超,张树文,岳书平.近40年黑土典型区坡沟侵蚀动态变化[J].农业工程学报,2010,26(2):109-115.
- [22] Li H, Cruse R M, Liu X, et al. Effects of topography and land use change on gully development in typical mollisol region of Northeast China[J]. Chinese Geographical Science, 2016,26:779-788.
- [23] 黄彦,孟岩,郑文生,等.降雨强度和坡度对黑土区坡面径流侵蚀及入渗的影响研究[J].灌溉排水学报,2016,35(S1):73-76.
- [24] 姜义亮,郑粉莉,温磊磊,等.降雨和汇流对黑土区坡面土壤侵蚀的影响试验研究[J].生态学报,2017,37(24):8207-8215.
- [25] 范昊明,蔡强国,王红闪.中国东北黑土区土壤侵蚀环境[J].水土保持学报,2004,18(2):66-70.
- [26] Randolph J. Environmental land use planning and management [J]. Journal of Planning Education and Research, 2005,24(4):452-453.
- [27] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:科学技术出版社,1978.
- [28] 张甘霖.土壤调查实验室分析方法[M].上海:科学技术出版社,2012.
- [29] 刘光崧.土壤理化分析与剖面描述[M].北京:中国标准出版社,1996.
- [30] 国家林业局.中华人民共和国林业行业标准:森林土壤分析方法[S]. LY/T1210-1275-1999,林业出版社,1999.
- [31] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part I: A discussion of principles-ScienceDirect[J]. Journal of Hydrology, 1970,10(3):282-290.
- [32] 黄昌勇.土壤学[M].北京:中国农业出版社,1999.
- [33] 洪宗文,温娅檬,刘一霖,等.川西亚高山不同彩叶林土壤水稳性团聚体特征[J].应用与环境生物学报,2021,27(3):601-607.
- [34] 朱家琪,满秀玲,王飞.我国寒温带4种森林植被类型下土壤团聚体粒级组成及其稳定性比较研究[J].土壤通报,2020,51(3):606-613.
- [35] Perfect E, Kay B D. Applications of fractals in soil and tillage research: a review [J]. Soil and Tillage Research, 1995,36(1/2):1-20.

(上接第68页)

- [25] 齐星圆,高照良,张翔,等.黄土堆积体变坡长坡面细沟动态发育过程[J].水土保持研究,2019,26(3):42-48.
- [26] 刘森,杨明义,张凤宝.黄土坡面细沟发育及细沟与细沟间侵蚀比率研究[J].水土保持学报,2015,29(1):12-16.
- [27] 吕刚,刘雅卓,陈鸿,等.褐土和棕壤坡耕地细沟侵蚀过程及侵蚀产沙特征[J].水土保持学报,2019,33(3):64-69.
- [28] 王小燕,王天巍,蔡崇法,等.含碎石紫色土坡面降雨入渗和产流产沙过程[J].水科学进展,2014,25(2):189-195.
- [29] Sun L Y, Zhou J L, Cai Q G, et al. Comparing surface erosion processes in four soils from the Loess Plateau under extreme rainfall events [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2021,9(4):520-531.
- [30] Luo J, Zheng Z V, Li T X, et al. Quantifying the contributions of soil surface microtopography and sediment concentration to rill erosion [J]. Science of the Total Environment, 2020,752:141886.
- [31] 戎玉博,骆汉,谢永生,等.雨强对工程堆积体侵蚀规律和细沟发育的影响[J].泥沙研究,2016(6):12-18.
- [32] Lou Y C, Gao Z L, Sun G F, et al. Runoff scouring experimental study of rill erosion of spoil tips. [J]. Catena, 2022,214:106249.
- [33] Shen H O, Zheng F L, Wen L L, et al. An experimental study of rill erosion and morphology [J]. Geomorphology, 2015,231:193-201.
- [34] 王龙生,蔡强国,蔡崇法,等.黄土坡面细沟形态变化及其与流速之间的关系[J].农业工程学报,2014,30(11):110-117.