

大渡河干旱河谷区横垄坡面产流产沙特征及水保效益

杨瑞杰¹, 何淑勤^{1,2,3}, 逯传琦¹, 史小鹏¹, 郑子成⁴

(1.四川农业大学林学院,成都 611130;2.长江上游森林资源保育与生态安全国家林业和草原局重点实验室,成都 611130;3.四川农业大学水土保持与荒漠化防治重点实验室,成都 611130;4.四川农业大学资源学院,成都 611130)

摘要:为弄清干旱河谷区横垄坡面水土流失特征及水保效益,采用野外调查与室内人工模拟降雨相结合的方法,以坡耕地平作坡面为对照,开展了 4 种降雨强度(30,60,90,120 mm/h)和 4 种坡度(10°,15°,20°,25°)条件下横垄坡面产流产沙特征及减流减沙效益。结果表明:(1)横垄坡面产流时间随降雨强度和坡度的增大而提前,且受坡度影响远小于降雨强度;同等条件下,横垄坡面产流时间滞后平作坡面 8.14%~55.60%。(2)随着降雨强度和坡度的增大,横垄坡面产流率和产沙率均表现为增加趋势。(3)坡度与横垄坡面减流减沙效益随降雨强度的增大由正相关关系转变为负相关关系,而降雨强度与横垄坡面减流减沙效益关系复杂,无明显变化规律。降雨强度和坡度对横垄坡面产流产沙过程和减流减沙效益有重要影响,横垄坡面能够延长坡面径流形成时间,有效减少坡面产沙率,但横垄坡面减流减沙作用存在临界条件。研究结果可为区域坡耕地横垄措施合理布设和水土流失有效防控提供数据支撑和理论依据。

关键词:坡面侵蚀;干旱河谷区;产流产沙;横垄措施

中图分类号:S157.1 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2022)06-0016-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.06.003

Runoff and Sediment Yield Characteristics and Soil and Water Conservation Benefits of Cross Ridge Slope in Arid Valley of Dadu River

YANG Ruijie¹, HE Shuqin^{1,2,3}, LU Chuanqi¹, SHI Xiaopeng¹, ZHENG Zicheng⁴

(1.College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130; 2.Key Laboratory of Forest Resources Conservation and Ecological Security in the Upper Reaches of the Yangtze River, National Forestry and Grassland Administration, Chengdu 611130; 3.Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130; 4.College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130)

Abstract: In order to understand the characteristics of soil and water loss and benefit of soil and water conservation on the cross ridge slope in arid valley area, field investigation and indoor artificial rainfall simulation were carried out, and the characteristics of runoff and sediment yield and benefit of runoff and sediment reduction on cross ridge slope were analyzed under four rainfall intensities (30, 60, 90 and 120 mm/h) and four slopes (10°, 15°, 20° and 25°). And the flat sloping farmland was taken as the control. The results showed that: (1) The runoff production time on the cross ridge slope was advanced with the increasing of rainfall intensity and slope gradient, and it was much less affected by slope than by rainfall intensity. Under the same conditions, the runoff production time on cross ridge slope lagged behind that of flat sloping farmland by 8.14%~55.60%. (2) With the increasing of rainfall intensity and slope gradient, both runoff yield and sediment yield on the cross ridge slope showed an increasing trend. (3) With the increasing of rainfall intensity, the relationship between slope gradient and benefit of runoff and sediment reduction on cross ridge slope changed from positive phase to negative phase, while the relationship between rainfall intensity and benefit of runoff and sediment reduction on cross ridge slope was complex without obvious change law. Rainfall intensity and slope gradient had important effect on the process of runoff and sediment yield and the benefit of runoff and sediment reduction on the cross ridge slope, and cross ridge slope could

prolong the time of slope runoff formation, effectively reduce the slope sediment production rate, however there were critical conditions for the effect of runoff and sediment reduction on the cross ridge slope. The results could provide data support and theoretical basis for the regional reasonable layout of farmland cross ridge measures and the effective prevention and control of soil erosion.

Keywords: slope erosion; arid valley area; runoff and sediment yield; cross ridge measures

干旱河谷区是我国西南地区特有的复杂地形和水文条件综合作用下形成的自然—社会—经济复合山地系统^[1],区域山高坡陡,多以坡耕地为主^[2]。区域气候条件独特,降雨集中,且多为暴雨,故合理保土耕作措施的实施显得尤为必要。降雨、坡度、耕作方式、作物类型等众多因素都是影响坡耕地水土流失的重要因子^[3-9]。以往水土流失研究多强调土壤作用,以土壤侵蚀发展程度与产沙量作为研究内容,对于如何控制和减弱水土流失发生的动力,主动利用坡面降雨径流的研究较为薄弱。随后有学者^[10]提出通过措施改变地表微地形,调控降雨径流流路^[11],以减弱或控制水土流失^[12-13];徐露等^[14]利用野外径流小区法对比不同耕作措施发现,横坡垄作结合秸秆覆盖有效抑制了紫色土坡耕地水土流失;谢亚茹等^[15]研究发现,措施布设过程中合理调整垄身的高度能够抑制土壤结皮形成,减少坡面径流含沙量,降低坡面侵蚀程度。耕作措施是通过改变坡面局部微地形,增大地表粗糙度,延长径流入渗时间,减小径流流速,从而达到减弱坡面水流挟沙能力的目的,且合理布设耕作措施可以有效提高坡面侵蚀性降雨标准^[16-17]。目前相关研究^[18-19]多集中在西北黄土高原区、南方红壤低山丘陵区以及西南紫色土丘陵区,针对干旱河谷区的研究较少。因此,本文以大渡河干旱河谷区坡耕地为研究对象,采用室内人工模拟降雨的方法,探讨横垄措施下坡面侵蚀过程与特征,查明降雨强度、坡度与横垄措施对坡面产流产沙的影响,为横垄措施水沙调控效应和干旱河谷坡耕地水土流失综合整治提供理论支撑和科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川省雅安市汉源县(29°05′—29°43′N, 102°16′—103°00′E),地处大渡河流域干旱河谷区,山高谷深,地势起伏较大^[20]。区域属于亚热带季风性气候,年平均气温 17.9℃,无霜期 300 天,年平均降水量 741.8 mm,降水多集中在 5—10 月,占全年降水量的 85%,易造成严重的水土流失^[21]。研究区土地利用类型以农业用地为主,坡耕地占比最高,土壤类型为褐潮土;区域内常见树种有铁杉(*Pinaceae*)、山杨(*Populus davidiana* Dode)、山柳(*Clethra barbinervis* Sieb. et Zucc.)、箭竹(*Sinarundinaria*

Nakai)、杜鹃(*Rhododendron simsii* Planch)等。

1.2 研究方法

1.2.1 试验装置 试验装置主要由 SR 型移动式人工模拟降雨器和土壤冲刷槽组成。降雨器属于侧喷式降雨器,配备 V-80100 喷头系统,喷头高度 6 m,降雨有效面积 4 m×5 m,降雨强度范围 10~150 mm/h,降雨均匀系数>85%。土壤冲刷槽是可调节坡度和水文条件的钢制土槽(2.0 m×1.0 m×0.4 m),土槽下方有向外侧延伸的“V”形出水口。

1.2.2 供试土壤 供试土壤采自四川省雅安市汉源县九襄镇大渡河流域干旱河谷区坡耕地 0—20 cm 耕层土壤,土壤类型为褐潮土,土壤容重为 1.27 g/cm³,最大持水量为 343.29 g/kg,有机质含量为 11.75 g/kg,黏粒、粉粒及砂粒质量分数依次为 28.99%,56.05%和 14.74%。土壤经自然风干后,过 10 mm 筛用于试验用土。在钢制土槽底部先铺设 10 cm 厚度的细沙充作透水层,再以 10 cm 土层厚度为单位采用容重还原法,分层填土于钢制土槽内,控制土壤平均容重在 1.27 g/cm³,每层土壤填装前将下面土层表面抓毛,以防止土层之间出现分层现象。

1.2.3 试验设计 基于研究区的降雨特征和坡耕地分布特点,本试验设定 30,60,90,120 mm/h 4 个降雨强度,10°,15°,20°和 25°等 4 个地表坡度,共计降雨 48 场,单场降雨历时为 60 min。为确保最后 1 桶径流泥沙样品收集时长满 3 min,总降雨时长可视情况增加或减少 0~1 min。同时,依照当地农耕习惯,在土槽内布设横垄坡面,坡面修建 2 条规格相同的横垄,起始点距坡顶 0.5 m,垄顶间距 0.6 m,其垄高 8 cm,垄底宽 50 cm,且每场降雨设置平作坡面为对照(CK)。为了保证前期条件一致,每场降雨试验前,采用降雨强度 30 mm/h 预降雨 10 min。每组试验重复 3 次。

1.3 样品采集与处理

降雨开始后,认真观测坡面。在坡面开始产流的前 5 min 每 1 min 收集 1 次径流样品,5 min 后每 3 min 收集 1 次径流样品。降雨结束后,将径流泥沙混合样静置 24 h 分离径流和泥沙,采用体积法测得径流量,侵蚀泥沙采用烘干法测定。

1.4 数据处理与分析

统计分析采用 Excel 2019 进行,图表制作采用 Origin 2018 软件。

2 结果与分析

2.1 产流时间

由图 1 可知,随着降雨强度或坡度的增大,各坡面产流时间总体呈明显提前变化趋势。与 10°横垄坡面相比,25°横垄坡面平均产流时间提前 32.09%;120 mm/h 降雨的横垄坡面平均产流时间较 30 mm/h 降雨横垄坡面提前 79.44%。经分析可知,产流时间受坡度影响远小于降雨强度。相同条件下,横垄坡面比 CK 坡面产流时间滞后 8.14%~55.60%,主要是因为横垄的存在导致坡面局部地表微地形发生变化,地表粗糙度增加,填注量增大,雨水在垄沟汇集,入渗时间和累积入渗量增加,进而延长径流形成时间。

2.2 降雨强度对横垄坡面产流产沙过程的影响

2.2.1 降雨强度对横垄坡面产流过程的影响 由图 2 可知,坡面产流率随降雨强度的增大而增加。10°坡面,120 mm/h 横垄坡面平均产流率比 30 mm/h 横垄坡面增加 82.35%;25°坡面,120 mm/h 横垄坡面

平均产流率较 30 mm/h 横垄坡面增加 86.63%。30,60,90,120 mm/h 降雨条件下,10°横垄坡面平均产流率分别为 CK 坡面的 73.25%,39.72%,73.79%,86.94%,25°横垄坡面平均产流率分别为 CK 坡面的 73.23%,74.90%,61.92%,95.34%,说明横垄坡面减流能力随降雨强度的增大呈先增强后减弱的趋势,存在明显临界值。此外,25°横垄坡面在 120 mm/h 降雨强度条件产流率出现峰值。

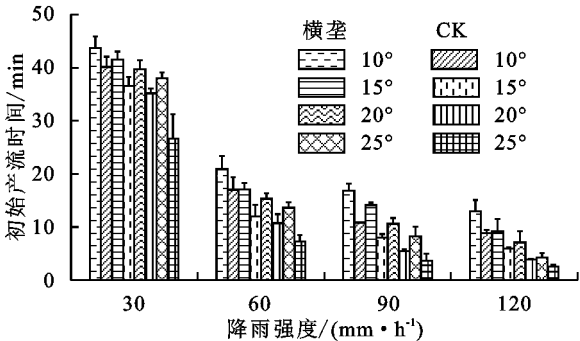


图 1 雨强、坡度组合条件下坡面的初始产流时间

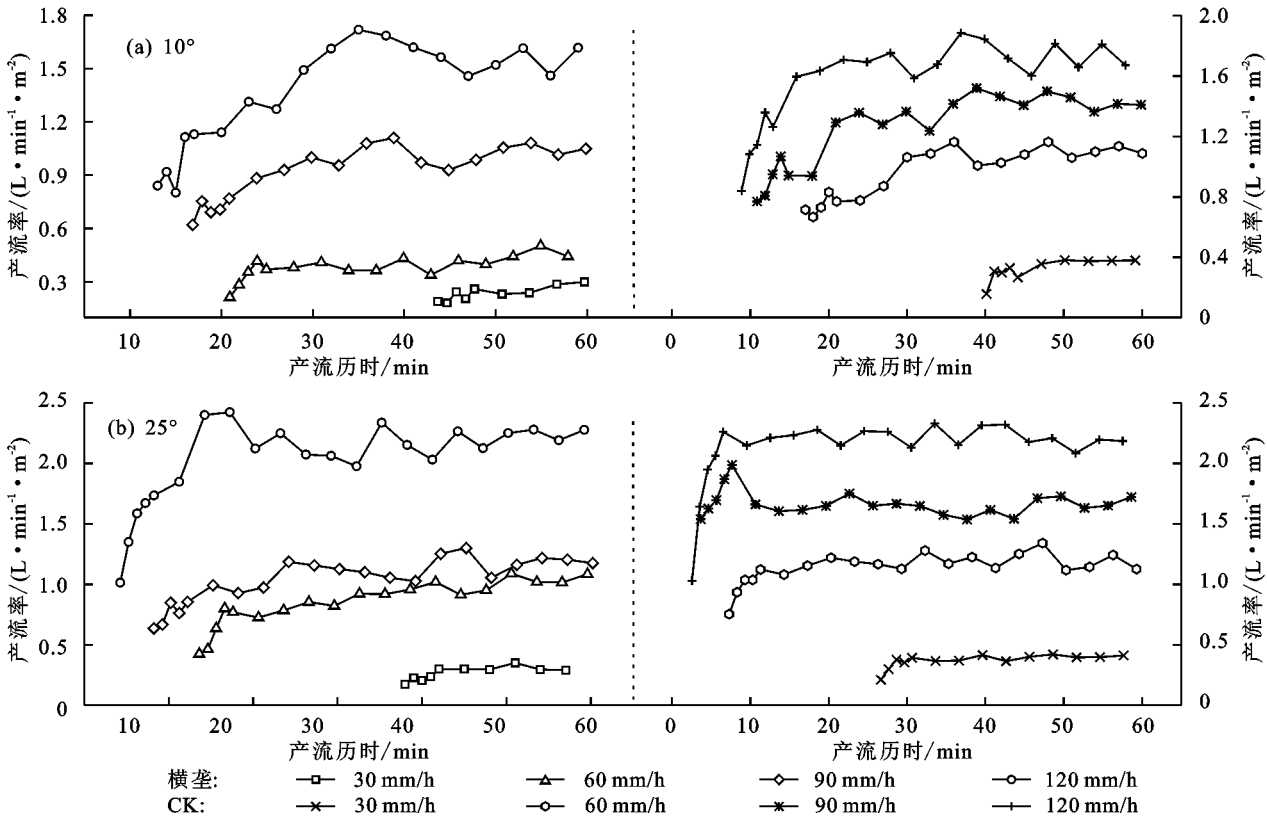


图 2 降雨强度变化对坡面产流过程的影响

2.2.2 降雨强度对横垄坡面产沙过程的影响 由图 3 可知,坡面产沙率随降雨强度的增大而增加。10°坡面,120 mm/h 横垄坡面平均产沙率比 30 mm/h 横垄坡面增加 99.05%;25°坡面,120 mm/h 横垄坡面平均产沙率较 30 mm/h 横垄坡面增加 99.19%。30,60,90,120 mm/h 降雨条件下,10°横垄坡面平均产沙率分别为 CK 坡面的 41.42%,6.03%,102.94%,77.69%,25°横垄坡面平均产流率分别为 CK 坡面的

38.43%,67.87%,52.91%,91.67%,表明 10°横垄坡面减沙能力随降雨强度的增大呈先增强后减弱的趋势,25°横垄坡面减沙能力随降雨强度的增大整体呈减弱趋势。此外,横垄坡面产流率随降雨强度的增大开始出现峰值,且峰值出现时间不断提前。

2.3 坡度对横垄坡面产流产沙过程的影响

2.3.1 坡度对横垄坡面产流过程的影响 由图 4 可知,坡面产流率随坡度的增大总体呈增加的变化

趋势。25°横垄坡面 30 mm/h 降雨条件平均产流率比 10°横垄坡面增加 14.29%，而在 120 mm/h 降雨条件却增加 33.96%。30 mm/h 降雨条件下，10°、15°、20°和 25°横垄坡面平均产流率分别为 CK 坡面的 73.25%、75.95%、73.64%、72.23%；120 mm/h 降雨条件下，10°、15°、20°和 25°横垄坡面平均产流率分

别为 CK 坡面的 86.94%、90.86%、92.27%、95.34%，表明 30 mm/h 降雨强度横垄坡面减流能力随坡度增大处于稳定波动状态，120 mm/h 横垄坡面减流能力随坡度的增大整体呈减弱趋势。此外，120 mm/h 横垄坡面产流率整体出现峰值，且峰值出现时间随坡度增大而提前。

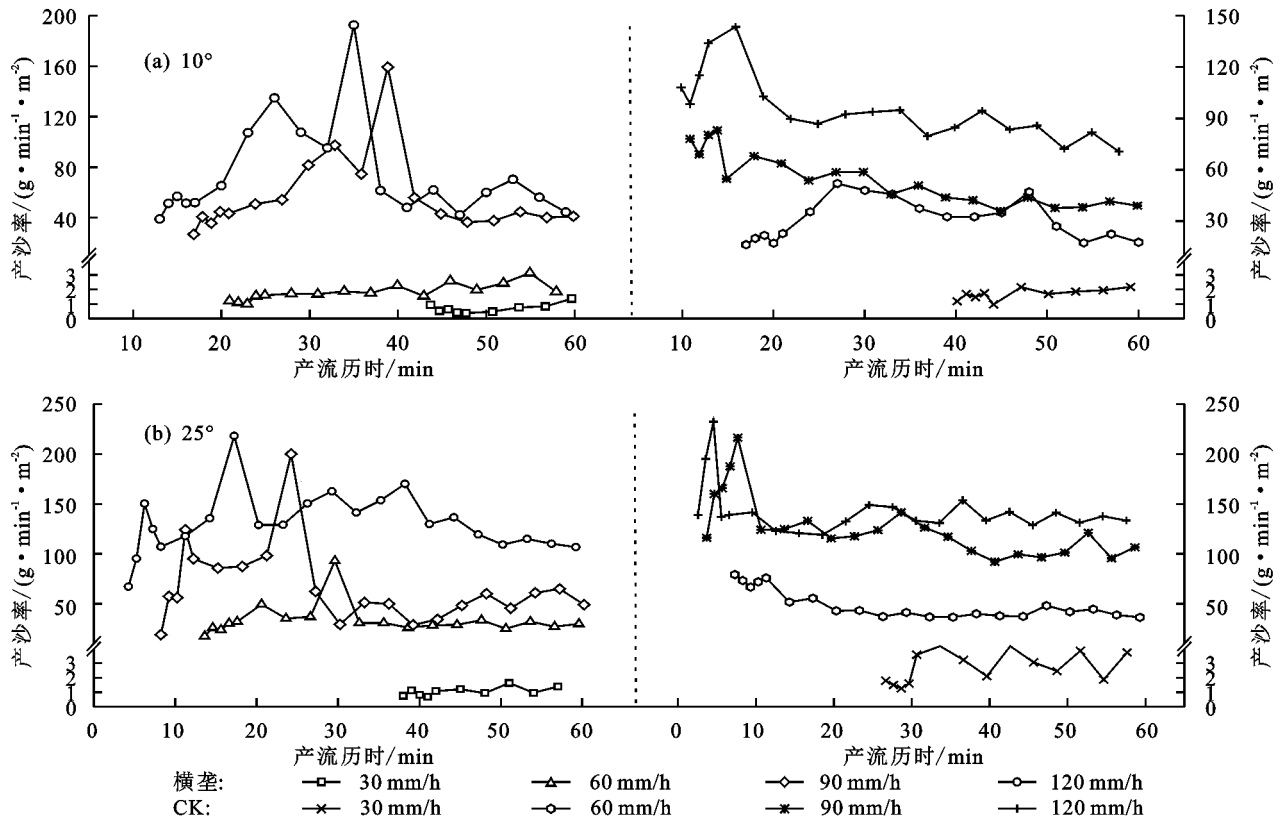


图 3 降雨强度变化对坡面产沙过程的影响

2.3.2 坡度对横垄坡面产沙过程的影响 由图 5 可知，坡面产沙率随坡度的增大总体呈增加的变化趋势。25°横垄坡面 30 mm/h 降雨条件平均产沙率较 10°横垄坡面增加 33.96%，而 120 mm/h 降雨条件下却增加 44.22%。30 mm/h 降雨条件下，10°、15°、20°和 25°横垄坡面平均产流率分别为 CK 坡面的 41.42%、58.26%、31.39%、38.43%；120 mm/h 横垄坡面平均产沙率分别为 CK 坡面的 77.69%、63.80%、87.67%、91.67%，说明 30 mm/h 横垄坡面减沙作用随坡度的增大表现为先减弱后增加的变化趋势，而 120 mm/h 横垄坡面减沙作用则随坡度的增大呈现出先增强后减弱的趋势。在 120 mm/h 降雨强度条件下，各横垄坡面产沙率整体出现峰值，且出现时间随坡度的增大而提前。

2.4 横垄坡面的减流减沙效益

由表 1 可知，不同坡度横垄坡面的减流减沙效益存在明显差异。30 mm/h 降雨强度条件下，减流减沙效益总体随坡度的增加而增加，坡度由 10°增加到 25°时，横垄坡面减流效益由 33.97%增加至 53.24%，减沙效益由 63.96%增加至 76.22%；120 mm/h 降雨

强度条件下，横垄减流减沙效益整体随坡度的增加而减小，坡度由 10°增加到 25°时，横垄坡面减流效益由 17.65%降低为 2.74%，减沙效益由 17.59%降低为 2.45%。可见，较小雨强条件下，坡度的增大能够有效提高横垄坡面的减流减沙效益，而特大雨强条件下，坡度增大则削减横垄坡面的减流减沙效益。

不同降雨强度横垄坡面减流减沙效益也存在明显变化。10°坡面，减流效益峰值为 66.14% (60 mm/h)，谷值为 17.65% (120 mm/h)；减沙效益峰值为 94.81% (60 mm/h)，谷值为 -4.33% (90 mm/h)。25°坡面，减流效益峰值为 53.24% (30 mm/h)，谷值为 2.74% (120 mm/h)；减沙效益峰值为 76.22% (30 mm/h)，谷值为 2.45% (120 mm/h)。可见，横垄坡面减流减沙效益与降雨强度关系复杂，波动幅度大，无明显规律。

3 讨论

降雨强度和坡度是影响水土流失的重要因素，其与坡面侵蚀产流产沙过程关系复杂^[22]。随着降雨强度或坡度的增大，横垄坡面产流时间明显缩短。一方面是因为降雨强度增大使得雨滴击溅动能增加，地表

易于形成结皮,土壤入渗速率快速达到稳定状态,利于坡面径流形成;另一方面,坡度增大导致雨水向下的自重分力也随之增加,坡面径流流速增大,累积入渗量减少,故径流量增加^[11]。研究区横垄坡面产流率和产沙率总体随着降雨强度和坡度的增大而增加,

但部分横垄坡面产流率和产沙率却呈先增加后减小的变化,主要因为坡面部分横垄塌陷断垄,坡面径流量陡增,动能增加,导致径流挟沙能力增强,故产沙率和产流率瞬时增大,这一结果与温云浩等^[23]在东北黑土区相关研究结果相似。

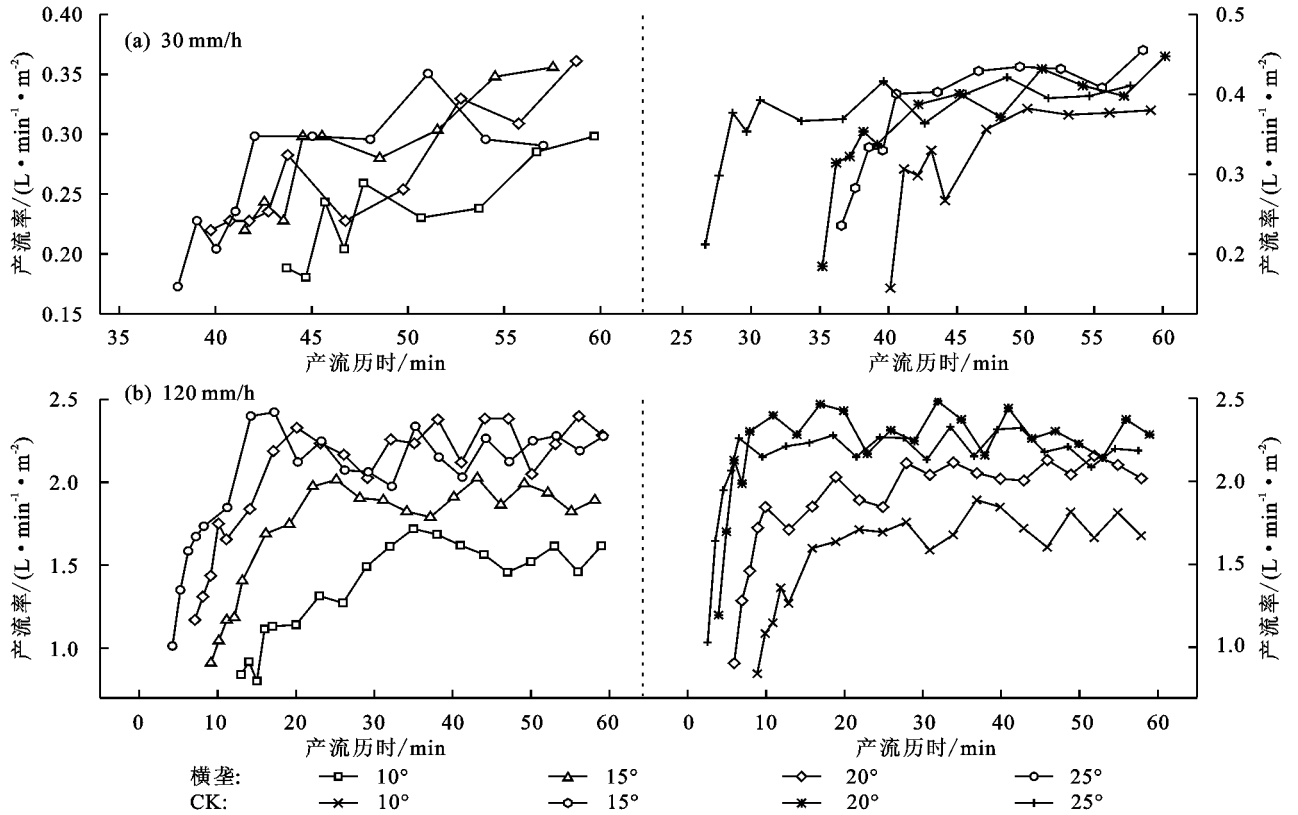


图 4 坡度变化对坡面产流过程的影响

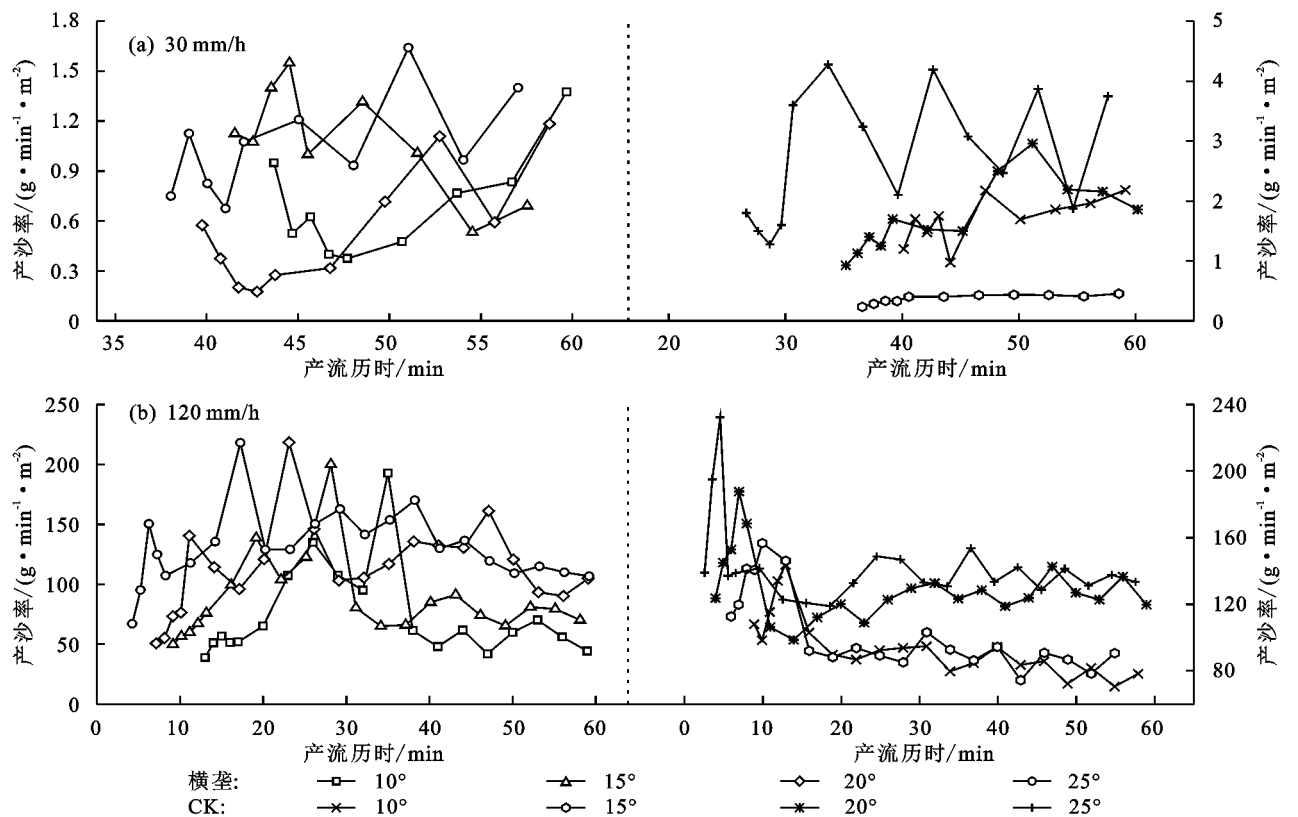


图 5 坡度变化对坡面产沙过程的影响

表 1 暴雨条件下各坡度横垄坡面减流减沙效益

降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	坡度/ (°)	减流量/ (L·m ⁻²)	减流 效益/%	减沙量/ (g·m ⁻²)	减沙 效益/%
30	10	2.73	33.97	23.48	63.96
	15	4.12	44.43	29.05	63.36
	20	4.42	43.93	37.13	73.55
	25	6.52	53.24	73.40	76.22
60	10	29.48	66.14	1372.33	94.81
	15	23.31	45.34	1315.18	73.18
	20	22.94	36.41	1572.10	61.55
	25	19.48	31.54	724.59	30.53
90	10	23.17	35.19	-109.48	-4.33
	15	31.87	36.59	155.81	4.81
	20	39.30	41.73	214.67	5.78
	25	35.10	37.91	3145.68	47.21
120	10	14.59	17.65	787.16	17.59
	15	12.89	12.46	498.28	9.82
	20	13.44	10.56	632.38	9.03
	25	3.34	2.74	189.22	2.45

10°横垄坡面减流减沙能力随降雨强度的增大呈先增强后减弱的趋势,25°横垄坡面减流能力随降雨强度的增大也呈先增强后减弱的趋势,而减沙能力随降雨强度的增大整体表现为减弱趋势。随着降雨强度的增大,雨滴侵蚀动能和坡面产流量增加,加大坡面侵蚀量,横垄单位时间内拦挡径流泥沙量增多,减流减沙能力随之增强,但是降雨强度的增大间接加重横垄负荷,造成部分横垄断垄,横垄减流减沙能力逐渐减弱。此外,随着坡度的增大,横垄稳定性也有所降低,断垄时间提前,故 10°和 25°横垄坡面减沙能力变化趋势各异。30 mm/h 横垄坡面减流能力随坡度的增大波动较小,呈相对稳定的状态,而减沙能力随坡度的增大呈先减弱后增强的变化趋势。主要由于 30 mm/h 降雨强度条件下,横垄坡面未出现断垄现象,减流减沙能力发挥稳定,但是对比平作坡面,横垄坡面产沙率仍处于波动上升趋势,未达到稳定状态,说明坡面松散颗粒未被完全冲刷。而 120 mm/h 横垄坡面减流作用随坡度的增大而减弱,减沙作用随坡度的增大呈先增强后减弱的变化趋势。主要由于 120 mm/h 降雨强度条件下,随着坡度增大,横垄断垄塌陷愈为明显,减流能力随之减弱,但是横垄是从垄身顶部开始塌陷逐渐发育成断垄,15°以下坡面,虽然横垄发生塌陷,但底部较为完整,减沙作用正常发挥,15°以上坡面垄身彻底断裂,减沙能力开始减弱。可见,横垄坡面减流减沙能力主要取决于横垄的塌陷程度和断裂时间。

横垄坡面的减流减沙效益取决于横垄拦水拦沙的作用。径流作为坡面侵蚀过程中的主要动力^[24-25],横垄是通过改变坡面局部微地形实现减流减沙,垄身能够增加地表粗糙度,间接延长坡长,从而改变径流路径,减小径流流速;垄沟蓄积径流泥沙,延长径流入渗时间,增加径流入渗量,从而减少坡面径流量^[26]。有研究^[27-28]表明,横垄坡面减流减沙效益与降雨强度关系复杂,随降雨强度的增加,本研究坡度与横垄坡面减流减沙效益由正相关关系转变为负相关关系,这可能是由于降雨强度的增大造成单位时间内坡面径流量增加,而坡度增大使得横垄蓄积径流泥沙和垄身沿坡面方向重力分力增加^[29],横垄稳定性降低,故在 120 mm/h 降雨强度下横垄坡面减流减沙效益与坡度呈负相关关系。部分横垄坡面减沙效益出现负值,可能是由于径流挟沙能力远超相同条件下平作坡面侵蚀量的塌陷垄身泥沙所致。

4 结 论

(1)不同坡面的产流时间随降雨强度和坡度的增大而提前,产流率和产沙率则均随着降雨强度和坡度的增大而逐渐增加,但横垄坡面产流时间明显滞后平作坡面,产流率和产沙率也显著低于平作坡面。表明横垄坡面能够延长径流形成时间,有效降低坡面产流产沙,减缓坡面侵蚀的发生。

(2)试验结果表明,横垄坡面产流产沙过程不仅受降雨强度和坡度的影响,还与横垄的完整程度密切相关。横垄坡面的减流减沙能力主要取决于横垄的塌陷程度和断裂时间。

(3)坡度与横垄坡面减流减沙效益随降雨强度的增大由正相关系转变为负相关关系,而降雨强度与横垄坡面减流减沙效益关系复杂,无明显变化规律。表明研究区横垄坡面在较小降雨强度和缓坡条件下能够发挥最佳减流减沙作用。

参考文献:

[1] 范建容,杨超,包维楷,等.西南地区干旱河谷分布范围及分区统计分析[J].山地学报,2020,38(2):303-313.

[2] 杨勤业,郑度,刘燕华.横断山地区干旱河谷的自然特点及其开发利用[J].干旱区资源与环境,1988(2):17-24.

[3] 王小康,谷举,刘刚,等.横、顺坡垄作对黑土坡面侵蚀—沉积周期规律的影响[J].土壤学报,2022,59(2):430-439.

[4] 孙艳,李锦彬,吕文龙.坡度和降雨对西南土石山区坡耕地水土流失特征的影响[J].湖南农业科学,2015(10):96-98.

[5] 闫胜军,郭青霞,闫瑞,等.不同土地利用类型下水土流失特征及雨强关系分析[J].水土保持学报,2015,29(2):45-49.

- [6] 申聪颖.两种粮草种植方式对不同坡度暗棕壤水土保持效应的影响[D].长春:吉林农业大学,2019.
- [7] 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(1): e4676.
- [8] Arora S, Bhatt R, Sharma V, et al. Indigenous practices of soil and water conservation for sustainable hill agriculture and improving livelihood security[J/OL]. Environmental Management. [2022-02-05]. <https://doi.org/10.1007/s00267-022-01602-1>.
- [9] Zhao J L, Wang Z G, Dong Y F, et al. How soil erosion and runoff are related to land use, topography and annual precipitation: Insights from a meta-analysis of erosion plots in China[J]. Science of the Total Environment, 2021, 802: e49665.
- [10] 贾腾斌,吴发启,赵龙山,等.坡耕地上耕作形成的微地形复杂度特征与分析[J].水土保持学报,2013,27(4): 152-156.
- [11] 李菲,查同刚,尹婧,等.暴雨下川东黄壤区不同径流路径调控措施对坡面侵蚀特征的影响[J].水土保持学报,2021,35(1):138-144.
- [12] 王志明.横坡垄作坡面径流冲刷条件下产流产沙研究[J].价值工程,2021,40(31):155-158.
- [13] 赵西宁,吴普特,冯浩,等.降雨径流调控利用与流域保水减沙效应研究[J].自然灾害学报,2014,23(4):46-53.
- [14] 徐露,张丹,向宇国,等.不同耕作措施下金沙江下游紫色土区坡耕地产流产沙特征[J].山地学报,2020,38(6):851-860.
- [15] 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.
- [16] 李建明,程冬兵,张长伟,等.三种水土保持措施下红壤坡地径流产沙特性[J].水利水电技术,2017,48(11): 199-205.
- [17] 包昂,范昊明,许秀泉,等.东北半干旱区不同耕作方式下的侵蚀性降雨标准比较[J].土壤通报,2022,53(1): 81-88.
- [18] 耿晓东.主要水蚀区坡面土壤侵蚀过程与机理对比研究[D].陕西 杨凌:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2010.
- [19] Sun C J, Hou H X, Chen W. Effects of vegetation cover and slope on soil erosion in the Eastern Chinese Loess Plateau under different rainfall regimes[J]. Peer J, 2021, 9(3/4): e11226.
- [20] 侯雨乐,刘瑞,赵景波.四川省汉源县大渡河干热河谷区清代洪涝灾害特征[J].水土保持通报,2019,39(1):271-277.
- [21] 吴越.地质生态视角下小气候对山地城镇设计的影响研究[D].重庆:重庆大学,2015.
- [22] 安娟,于妍,吴元芝.降雨类型对褐土横垄坡面土壤侵蚀过程的影响[J].农业工程学报,2017,33(24):150-156.
- [23] 温云浩,刘铁军,马林芊,等.东北黑土区横垄坡耕地的产流产沙过程[J].水土保持通报,2021,41(6):63-70.
- [24] 纪丽静,王文龙,康洪亮,等.黄土区土质与土石质壤土堆积体水力侵蚀过程差异[J].应用生态学报,2020,31(5):1587-1598.
- [25] 杨艳生,史德明,孙志刚.降雨、径流因子的初步研究: II—土壤坡面侵蚀量预报[J].水土保持通报,1985(3): 51-55.
- [26] 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.
- [27] 郑江坤,杨帆,王文武,等.不同降雨等级下耕作措施对坡地产流产沙的影响[J].中国水土保持科学,2018,16(1):38-45.
- [28] 张晶玲.天然降雨条件下横垄和顺垄产流产沙过程研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2018.
- [29] 王治兵,余斌,朱云波,等.雨强与地形(上缓下陡)对坡面入渗影响的初步研究[J].科学技术与工程,2015,15(2):314-317.