
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¹

何周窈¹ 何淑勤^{1, 2, 3*} 逯传琦¹ 郑子成⁴

(1. 四川农业大学林学院, 四川 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, 四川 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, 四川 成都 611130;

4. 四川农业大学资源学院, 四川 成都 611130)

【摘要】: 为探究干旱河谷区强降水条件下坡耕地水流特性的变化情况, 以汉源县典型坡耕地土壤为研究对象, 采用人工模拟降雨实验, 探究了不同降雨强度(1. 0、1. 5、2. 0 mm/min) 对不同坡度(10°、15°、20°) 的横垄及平作坡面的产沙率和水动力学参数的影响。结果表明:(1) 随着降雨时长的增加, 各坡面的侵蚀产沙率先增后减; 阻力系数则逐渐减小后趋于稳定; 径流剪切力和单位径流功率呈增加趋势, 后维持相对稳定的状态。(2) 随着降雨强度的增加, 不同坡度的横垄坡面产沙率增加了 4. 43 ~ 38. 96 倍, 径流剪切力增加了 0. 49 ~ 3. 40 倍, 单位径流功率增加了 0. 64 ~ 1. 50 倍; 平作坡面产沙率增加了 1. 46 ~ 1. 81 倍, 径流剪切力增加了 0. 94 ~ 1. 30 倍, 单位径流功率增加了 0. 11 ~ 0. 52 倍。而阻力系数随着降雨强度的增加而减小, 但不同坡度坡面间的阻力系数未表现出明显的规律。(3) 不同实验条件下, 横垄坡面的侵蚀产沙率和径流剪切力总体低于平作坡面。而二者间的阻力系数和单位径流功率虽差值较大, 但无明显规律。(4) 降雨强度的增加导致各坡面的径流流态从“层流—缓流区”(Re<500, Fr<1) 转变为“紊流—缓流区”(Re> 500, Fr<1)。综上所述, 在强降水条件下, 不同坡度的坡耕地均可通过横垄措施有效调控水沙过程从而达到良好的减沙效益。

【关键词】: 干旱河谷; 强降水; 横坡垄作; 产沙率; 水流特性

【中图分类号】: S157. 1 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1004-8227(2023) 04-0832-10

【DOI】: 10. 11870 /cjlyzyyhj202304014

¹ **【收稿日期】**: 2022-05-31; **【修回日期】**: 2022-08-02

【基金项目】: 四川省重点研发项目(2019YFS0463)

【作者简介】: 何周窈(1994 ~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为水土保持与土壤侵蚀。 E-mail: thezhouyaom@163. com

【* 通讯作者 E-mail】: angelhsq@163. com

近年来,随着全球气候变化,极端天气事件和相关自然灾害频发,尤其是极端强降水及其引起的大范围灾害与环境风险更是成为全球关注的热点^[1,2]。极端降水不仅给人民财产和生命安全及社会经济带来了不可估量的巨大损失,同时亦造成大范围水土流失、农耕地损毁,给生态安全带来了严重威胁。我国作为农业大国,人均耕地面积却远低于世界平均水平,面对频发的强降水事件,如何减少水土流失,防止现有耕地面积减少和质量下降,保证粮食生产显得尤为重要。

大渡河流域干旱河谷区作为我国西南地区复杂地形和气候条件综合作用下形成的特殊景观类型,具有环境容量小和生态阈值低等特点^[3,4]。区域地形起伏大,多高山峡谷,水热矛盾突出,雨季降水集中,水土流失极为严重,是长江中上游水土流失重点治理区域^[3,5]。该区域作为西南人民的农业活动中心,部分区域坡耕地比例高达80%以上,为减少耕地水土流失^[5]。其中汉源县作为大渡河流域干旱河谷区的典型代表,由于独特的地理位置和地形导致该地区具有年降雨丰沛、降雨时间和降雨量集中、短时强降雨量和连续强多日降雨量大等降雨特征^[6]。与干旱相比,年内多次且集中的强降水对当地的农业发展和土地资源的可持续利用影响更甚。

耕作方式对农业用地的土壤侵蚀状况具有显著影响。其中,横坡垄作作为保护性耕作方式,可通过改变地表局部地形,与坡面形成夹角,提高地表粗糙度等起到拦截水流、增加入渗、降低坡面土壤侵蚀产沙的作用,可有效调控坡面水沙过程,起到良好的截流拦沙效益,在研究区内广泛使用^[7,8,9,10]。但横坡垄作并不只是有益的,横垄系统具有独特的侵蚀特点,垄沟低洼处的积水可诱发壤中流,并造成雨滴打击对土壤剥离的增强与减弱作用并存,这一过程受降雨强度、坡度、垄的形态等多方面因素的影响^[11]。而降雨强度则主要通过影响径流对横垄的冲刷过程和破坏程度,从而影响横垄的水土保持效益^[12]。近年来,越来越多的研究指出,强降水对土壤侵蚀的影响是巨大的,可引起地近地表水文条件突变,并在一定程度上改变了土壤结构、破坏坡面保护性措施,从而加剧坡面的水土流失^[13,14]。而在横垄坡面上,此过程更为复杂。强降水不仅提高了雨滴击溅对横垄的破坏力,还促进了地表径流和壤中流的形成,进而破坏了横垄的完整性^[15]。并且强降水引起的横垄断裂对坡面水沙过程的影响极为复杂,其中的机理还有待进一步研究。因此,为应对全球气候变化下坡耕地资源所面临的严峻形势,在人口稠密、农业发达且依赖程度高的干旱河谷区开展强降水条件下景观单元内定量的研究横坡垄作坡面的水力侵蚀特征具有重要意义。

因此,本研究选择干旱河谷区大渡河流域汉源县作为研究地,采用室内模拟降雨实验探究不同降雨条件下坡耕地水动力学参数的变化特征,探明强降水对不同耕作措施的坡耕地水流特性的影响和产沙特征,有助于揭示极端降水气候下坡面治理措施的水沙调控效应及其机理提供数据支撑,为干旱河谷坡耕地水土流失综合整治与水土资源高效利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于四川省雅安市汉源县(102° 16' E~103° 00' E, 29° 05' N~29° 43' N),地处长江上游的大渡河流域、横断山脉北段东缘,是川西高原与四川盆地之间的过渡地带,属亚热带山地气候^[16]。境内多高山峡谷,西北高东南低,多山地,坡耕地较为分散且水土流失严重。汉源县海拔在4 021~550 m,年均气温为17.8℃,年均降雨量为741.8 mm,日降雨量最大值为110.0 mm,小时降雨量最大值为39.2 mm,10 min降雨量最大值为21.9 mm^[6]。全年降水集中在5~10月,夏季多暴雨且降水变率大,加之大渡河及其支流汛期影响,导致该地洪涝灾害较多^[6,16]。

1.2 研究方法

(1) 供试土壤

供试土壤采自雅安市汉源县九襄镇坡耕地耕层土壤,该地区为大渡河流域典型干旱河谷区,具有降雨量低、蒸发量高等气候特点。供试土壤类型为当地常见的褐潮土。采样点海拔1 152 m,采用对角线布点法采集土壤混合样,采集深度为0~20 cm,采样时将表层的石块及动植物残体清除。将采集的土样自然风干,使用四分法选取部分土壤研磨至粒径<0.25 mm用于有机质含

量和机械组成测定。机械组成测定使用马尔文激光粒度仪，有机质测定使用元素分析仪进行检测。土壤容重采用环刀法测定。土样基本理化性质见表1。

表1 供试土壤基本理化性质

土壤类型	有机质 (g · kg ⁻¹)	容重 (g · cm ⁻³)	土壤质地	机械组成		
				黏粒含量(%)	粉粒含量(%)	砂粒含量(%)
褐潮土	11.75	1.27	粉质黏土	28.99	56.05	14.96

(2) 降雨试验

采用人工模拟降雨实验。装置采用中科院水土保持研究所生产的SR型移动式人工模拟降雨器，装置喷头系统为美国V-80100。实验前，预先设定降雨强度，并设置降雨高度为6m，利用手持式智能终端进行远程控制，经过反复实验率定，有效降雨面积为35 m²，降雨均匀度≥85%。基于研究区多年平均降雨量(741.8 mm)和10 min最大降雨量(21.9 mm)等降雨特点，设定降雨强度为1.0、1.5、2.0 mm/min。根据大渡河干旱河谷区坡耕地分布特点，试验坡度设置为10°、15°和20°。为了更好地模拟零散坡耕地，试验采用钢制土槽，其规格为2 m×1 m×0.4 m，在土槽底部铺设厚度为10 cm的细沙，并在底部透水孔处填充纱布，以保证良好的透水性。土壤经自然风干后过10 mm筛，并清除杂草、有机残落物，按容重还原法，每10 cm为一层分层装填土壤，同时，压实土槽边坡土壤，以消除边界效应对试验的影响。实验组采用当地常见的横坡横垄，设置垄高8 cm，垄底宽50 cm，垄顶间距60 cm。对照组采用平作，即保持土槽土壤表面平整。为保证土壤初始含水率一致，实验开始前采用0.5 mm/min降雨强度预降雨至坡面土壤水饱和，并用塑料薄膜覆盖24 h。

(3) 数据采集

实验降雨历时为60 min，每组实验均重复3次。实验开始产流的前5 min，每1 min收集一次径流泥沙样品，之后则每3 min收集一次。收集的泥沙样品用于计算产流产沙量。此外，每次实验开始时使用温度计测定水温。产流后每隔5 min测量径流深，以染色示踪法测定径流流速，每组数据重复测定3次。

1.3 数据处理

数据采用Excel和Origin进行数据处理和图表绘制。产沙率、雷诺数、弗劳德数、阻力系数、径流剪切力、单位径流功率的计算公式如下[17, 18]:

$$\text{雷诺数: } Re = vR/\eta \quad (1)$$

$$\text{弗劳德数: } Fr = v/\sqrt{gR} \quad (2)$$

$$\text{阻力系数: } f = 8gRJ/v^2 \quad (3)$$

$$\text{径流剪切力: } \tau = \gamma grJ \quad (4)$$

$$\text{单位径流功率: } P = Jv \quad (5)$$

$$\text{产沙率} = \frac{\text{产沙量}}{\text{产流时间} \times \text{冲刷面积}} \quad (6)$$

式中： Re 为径流雷诺数； v 为径流的平均流速(m/s)； R 为水力半径(m)，实验中径流多为薄层水流，故计算过程中以径流平均深度 h 代替水力半径近 R [17]； η 为水的粘滞系数(cm^2/s)， $\eta=0.01775/(1+0.0337t+0.000221t^2)$ ， t 为水温； g 为重力加速度(m/s^2)； Fr 为弗劳德数； f 为径流 Darcy-Weisbach 阻力系数； J 为水力能坡，取坡面坡度的正弦值或正切值； τ 为径流剪切力(Pa)； P 为单位径流功率(m/s)； γ 为水的容重(Kg/m^3)。

2 结果

2.1 不同降雨条件下坡面水动力学变化特征

2.1.1 坡面径流流态变化特征

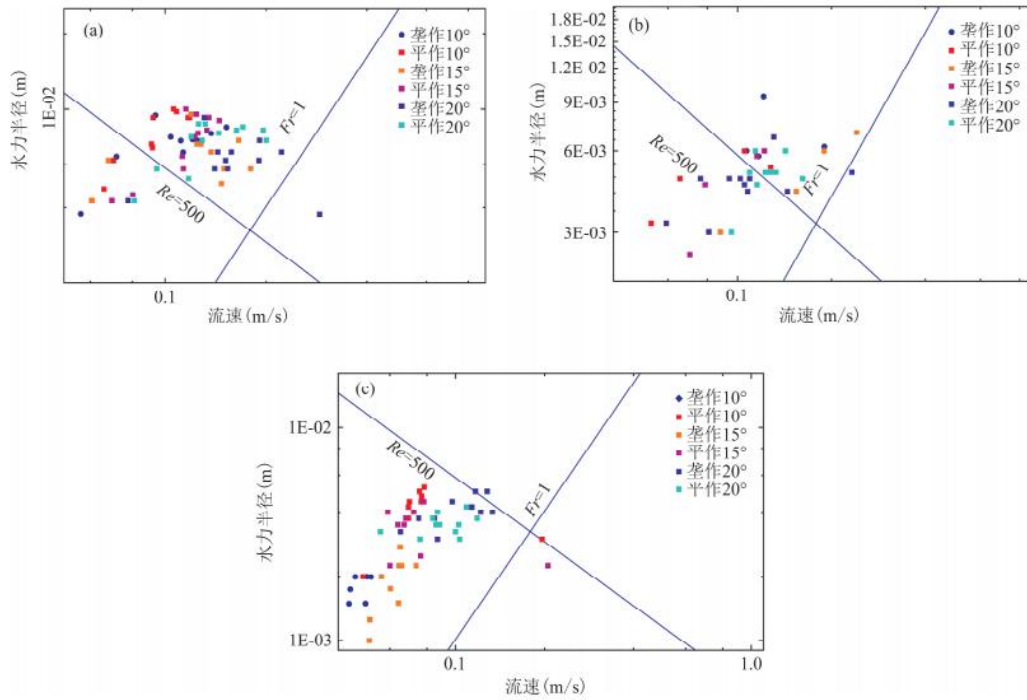
如图 1 所示，2.0 mm/min 降雨强度下的横垄和平作坡面径流均为紊流($Re>500$)，1.5 mm/min 降雨条件下各坡面径流多为紊流，少部分为层流。1.0 mm/min 降雨强度下则均为层流($Re<500$)。而同一降雨条件下，坡面 Re 值总体上随着坡度的增加而增加。其中，2.0 mm/min 降雨强度下横垄坡面 Re 值增幅为 25.21%，平作坡面增幅为 39.31%；1.5 mm/min 降雨强度下平作坡面增幅为 28.10%，横垄坡面降低了 40.21%；1.0 mm/min 降雨强度下，横垄坡面的 Re 值变化剧烈，增幅达 397.16%，平作坡面的 Re 值则较为接近。而在同一坡度下，当降雨强度从 1.0 mm/min 增至 2.0 mm/min 后，各坡面的 Re 值亦随之增加。

不同降雨条件下各坡面径流均处于缓流状态($Fr<1$)， Fr 的总体变化规律与 Re 相似，即相同降雨强度下，不同坡度的坡面 Fr 值大小为： $20^\circ > 15^\circ > 10^\circ$ 。2.0 mm/min 降雨强度下坡度从 10° 增至 20° ，横垄坡面 Fr 值增幅为 73.02%，平作坡面增幅为 54.35%。1.5 mm/min 降雨强度横垄坡面 Fr 值无明显增长，平作坡面则增加了 42.96%。1.0 mm/min 降雨强度下，横垄坡面 Fr 值增幅为 50.47%，平作坡面增幅为 14.25%。同一坡度下，随着降雨强度的增加，横垄坡面 Fr 值逐渐增加；而平作 10° 和 15° 坡面的 Fr 值逐渐降低，但 20° 坡面则逐渐增加。

2.1.2 坡面阻力系数变化特征

图 2 为开始产流后的阻力系数随降雨时长的变化特征(下同)。坡面 f 值随着降雨时长的增加呈现出逐渐降低的趋势，30 min 后波动减小，逐渐趋于稳定。对比发现，在 2.0 mm/min 降雨强度下，横垄坡面 f 值明显低于平作坡面， 10° 、 15° 、 20° 的横垄坡面 f 值较平作分别减少了 31.45%、7.63%、23.57%。这是由于 2.0 mm/min 的降雨强度严重破坏了横垄的完整性，削弱了横垄对径流的阻碍作用。1.5 和 1.0 mm/min 降雨强度下， 15° 横垄坡面 f 值较平作分别减少了 58.60%、26.90%，但 10° 和 20° 坡面横垄和平作坡面 f 值则无明显规律。可见，在本实验条件下，降雨是影响横垄坡面阻力系数的主要原因。

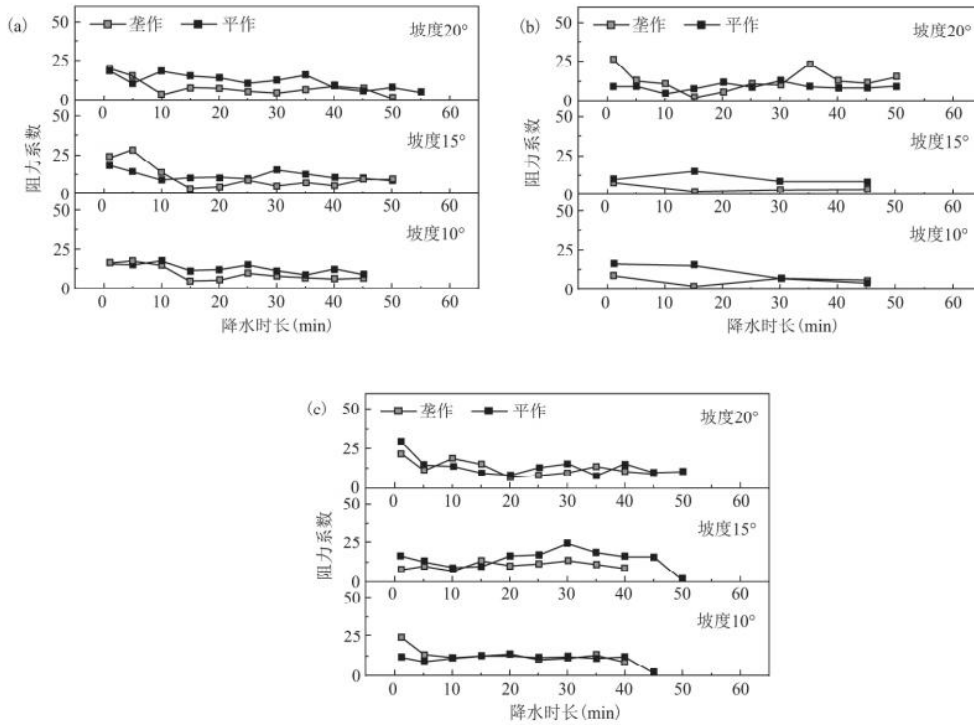
此外， 15° 坡面 f 值总体上随着降雨强度的增加而减小，横垄坡面 f 值降低了 7.07%，平作坡面降低了 15.26%。且随着降雨强度的增加， 15° 横垄坡面 f 值较平作坡面减少了 7.63%~58.64%，而 10° 和 20° 横垄和平作坡面 f 值则无明显规律。



注: a: 2.0 mm/min; b: 1.5 mm/min; c: 1.0 mm/min.

图 1 不同降雨条件下各坡面的径流流态

Fig. 1 Flow regime zones of hilly croplands under different precipitations



注: a: 2.0 mm/min; b: 1.5 mm/min; c: 1.0 mm/min.

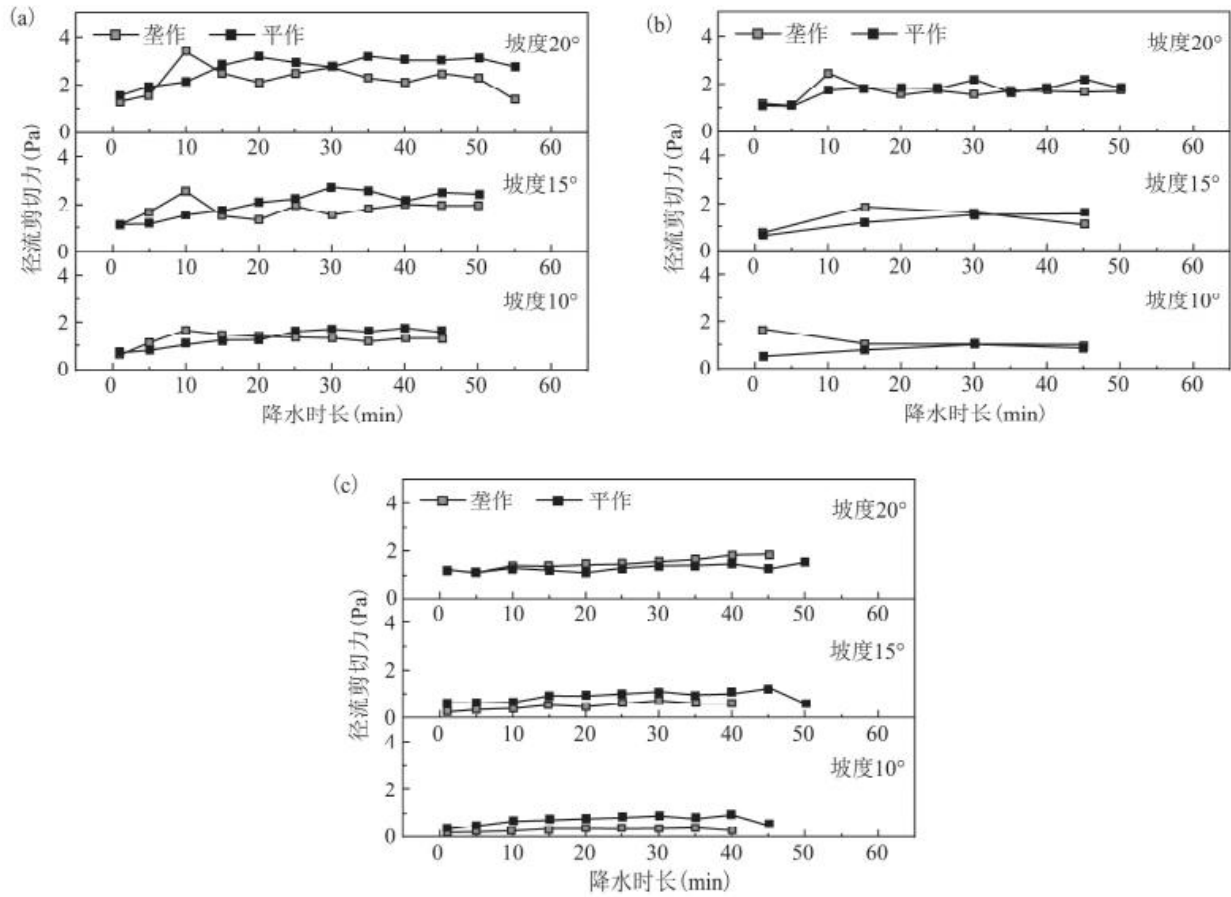
图 2 不同降雨条件下各坡面的阻力系数

Fig. 2 Resistance coefficient of hilly croplands under different precipitations

2.1.3 坡面径流剪切力变化特征

如图3所示,各坡面径流剪切力均随着降雨时长的增加而逐渐增加并最终趋于平稳,且在相同降雨条件下,不同坡度坡面 τ 值大小为: $20^\circ > 15^\circ > 10^\circ$ 。其中,2.0 mm/min降雨条件下,随着坡度的增加,横垄坡面和平作坡面 τ 值增幅分别为70.25%和97.70%;1.5 mm/min降雨条件下,横垄坡面和平作坡面增幅分别为36.47%和103.73%;1.0 mm/min降雨条件下,横垄坡面和平作坡面增幅分别为401.58%和82.93%。表明,坡度越大,径流流速越大,携带的动能越高,因此径流剪切力越大,对土壤的剥离能力增强。

在相同坡度的坡面上,降雨强度的增加导致土壤快速饱和,多余的水以地表径流的形式排出,引起各坡面 τ 值逐渐增加。 10° 、 15° 、 20° 坡面,随着降雨强度的增加,横垄坡面 τ 值分别增加了339.50%、248.93%、49.18%,平作坡面分别增加了93.71%、129.86%、109.35%。且2.0和1.0 mm/min降雨强度下,横垄坡面 τ 值较平作坡面降低了4.87%~58.07%, 15° 坡面上二者差异较小。可见横垄相比平作更能削弱地表径流剪切力,从而阻碍径流对土体剥离和搬运作用。



注: a: 2.0 mm/min; b: 1.5 mm/min; c: 1.0 mm/min.

图3 不同降雨条件下各坡面的径流剪切力

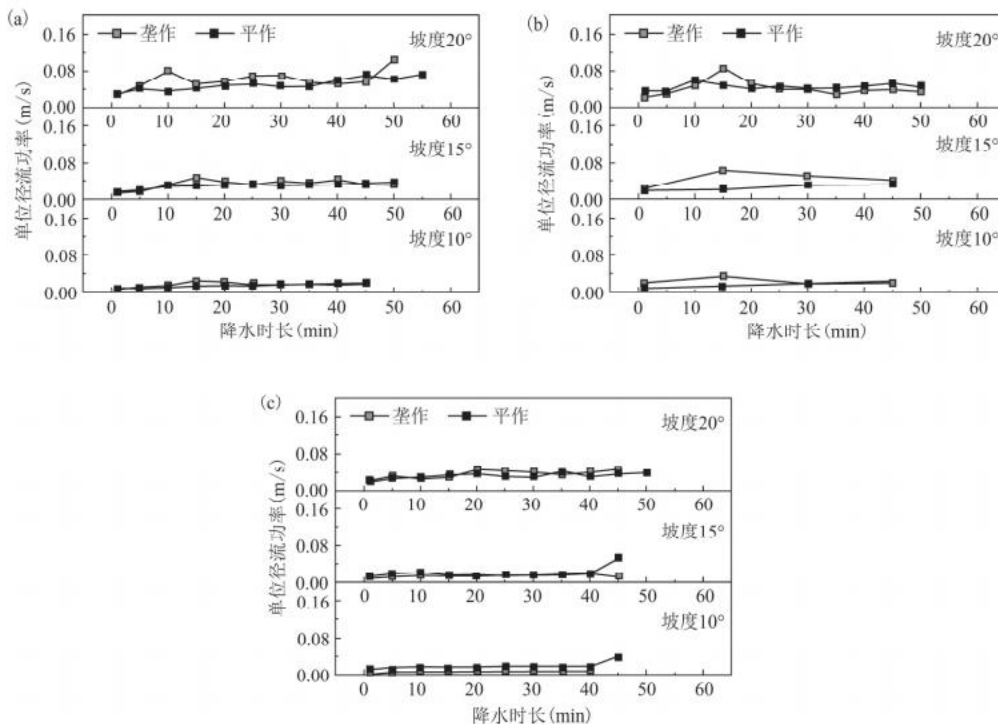
Fig. 3 Runoff shear force of hilly croplands under different precipitations

2.1.4 坡面单位径流功率变化特征

如图 4 所示, 随着坡度和降雨强度的增加, 各坡面单位径流功率总体呈上升趋势, 但不同耕作措施间的单位径流功率并无明显差异。在 2.0 mm/min 降雨条件下, 随着坡度的增加, 横垄和平作坡面单位径流功率增幅分别为 219.52%和 212.56%;在 1.5 mm/min 降雨条件下, 横垄和平作坡面单位径流功率增幅分别为 74.71%和 187.56%;在 1.0 mm/min 降雨条件下, 横垄和平作坡面单位径流功率增幅分别为 385.22%和 129.52%。而在相同坡度上, 随着降雨强度的增加, 10°、15°、20° 横垄坡面单位径流功率增幅依次为: 149.55%、111.04%、64.32%, 平作坡面单位径流功率增幅为 11.15%、38.95%、52.18%。

2.2 不同降雨条件下坡面侵蚀产沙特征

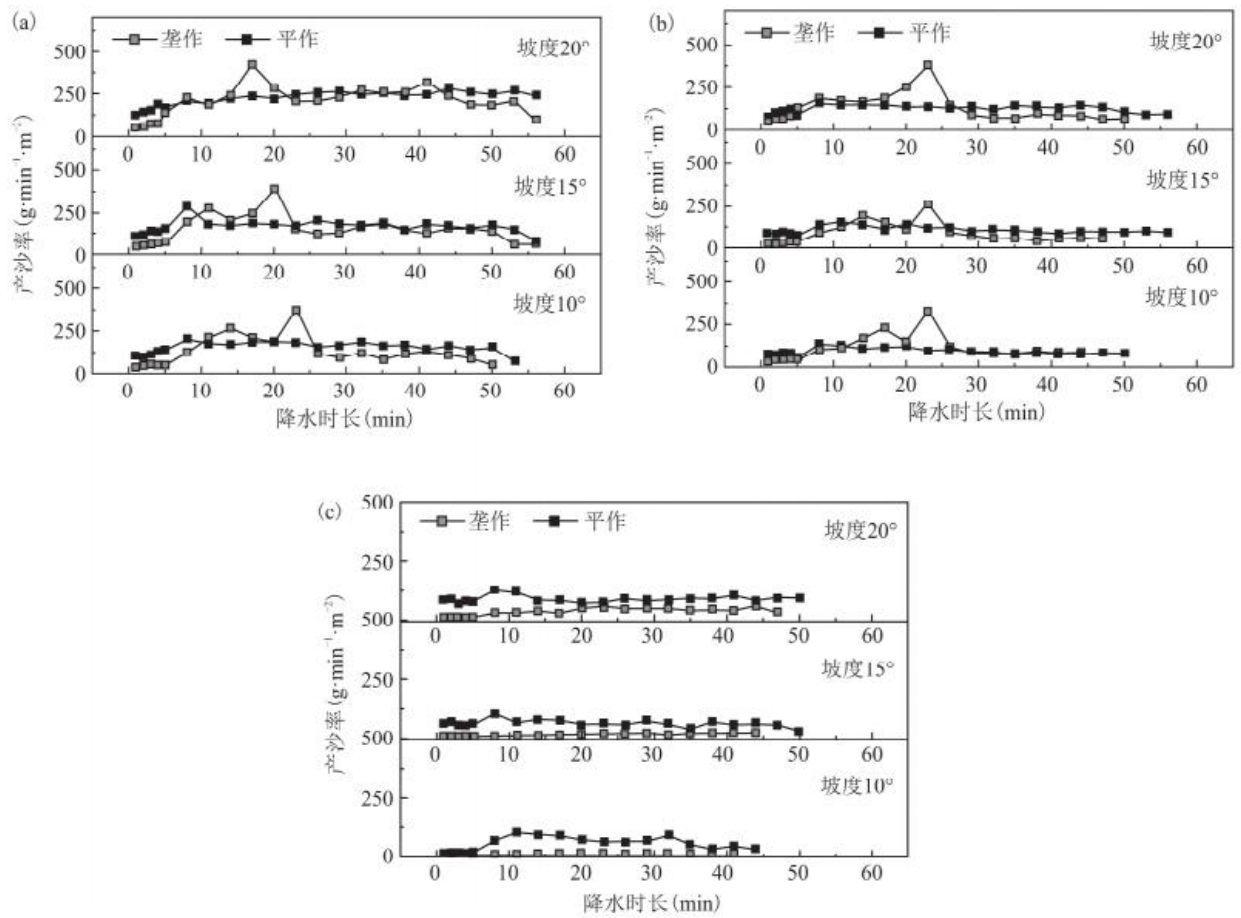
如图 5 所示, 实验初期, 大量表层疏松的土壤被地表径流带走, 导致各坡面产沙率总体呈增加的趋势; 实验中期, 细沟逐渐发育, 导致产沙率波动较大; 实验后期, 坡面细沟发育逐渐趋于稳定, 各坡面产沙率亦逐渐降低并保持相对稳定。但相同降雨下, 不同坡度的横垄和平作坡面侵蚀产沙特征具有一定差异。在 1.5 和 2.0 mm/min 的降雨强度下, 实验前 30 min, 各横垄坡面产沙率波动较大, 并在 20~30 min 之间出现峰值。实验 30 min 之后, 不同坡度的横垄坡面侵蚀产沙过程逐渐稳定, 产沙率波动较小并缓慢下降。与平作坡面相比, 2.0 mm/min 降雨强度, 10°、15°、20° 横垄坡面的产沙率分别降低了 16.81%、11.54%和 10.06%;1.5 mm/min 降雨强度下, 只 15° 坡面横垄的产沙率较平作降低了 21.77%, 10° 和 20° 坡面二者产沙率则差异较小; 1.0 mm/min 的降雨强度下, 10°、15°、20° 横垄坡面产沙率较平作坡面分别降低了 94.14%、73.28%、59.29%。由此可见, 相同降雨条件下, 坡面产沙率随坡度的增加而增加, 但实施横坡垄作可有效降低坡度对土壤侵蚀产沙的影响, 减少坡面产沙率, 起到较好的减沙效应, 但横垄坡面的减沙效益随着降雨强度的增加而逐渐减小。在 10°、15°、20° 坡面上, 降雨强度从 1.0 mm/min 增加到 2.0 mm/min 后, 横垄坡面的产沙率增幅依次为 38.96%、7.55%、4.43 倍, 平作坡面产沙率增幅依次为 1.81%、1.58%、1.46 倍。此现象与强降雨造成横垄的破损甚至断裂有关。



注: a: 2.0 mm/min; b: 1.5 mm/min; c: 1.0 mm/min.

图 4 不同降雨条件下各坡面的单位径流功率

Fig. 4 Unit runoff power of hilly croplands under different precipitations



注: a: 2.0 mm/min; b: 1.5 mm/min; c: 1.0 mm/min.

图5 不同降雨条件下各坡面侵蚀产沙特征

Fig. 5 Characteristics of soil sediment yield of hilly croplands under different precipitation

3 讨论

3.1 坡面侵蚀过程对侵蚀产沙率和水动力参数的影响

降雨对坡面土壤侵蚀过程影响较为复杂,受到降雨、坡度、地表情况等因素的共同影响^[14,19]。本研究中,不同实验条件下各坡面侵蚀产沙率先增后减并逐渐趋于稳定,这可能与坡面的水蚀演化过程有关。降雨初期,地表尚未形成径流,主要以溅蚀为主,但随着地表径流的形成和汇聚,对坡面表层土壤的剥离和搬运作用不断增强,坡面亦在径流的持续冲刷下逐渐形成细沟,土体力学结构的不稳定致使整个过程不停有坑穴的融合贯通和新分枝的形成,导致了产沙率的不稳定增长^[20]。实验后期,细沟发育逐渐稳定,泥沙来源减少,产沙率也随之降低并趋于稳定。

水动力参数的变化对于探究坡面细沟发育过程和阐述坡面水沙过程具有重要作用^[21]。本研究不同处理间,各坡面阻力系数随时间逐渐降低,径流剪切力和单位径流功率随时间逐渐增加,各参数最终维持相对稳定。原因在于,各坡面初始地表粗糙度较大,影响坡面径流流路及细沟发育演化,随着持续降雨作用,坡面细沟合并、内壁逐渐平滑,径流所受阻力减少,因此阻力系数逐渐降低。在此过程中,径流泥沙含量降低、挟沙能力增强,但水流在重力作用下仍不断下切,导致单位土体的流失能耗增加,搬运土壤所需的能量增加,故径流剪切力和单位径流功率随之逐渐增加^[22,23]。

本研究中,随着降雨的持续,横垄坡面的各指标较平作坡面波动更大,这除了与细沟的形成有关外,耕作方式和土壤性质也是其重要的影响因素之一。一方面,横坡垄作不仅可通过垄内蓄水来延缓地表径流的形成,还可通过缩短坡长、拦截径流来降低径流流速并在垄内汇聚泥沙,从而减少土壤侵蚀^[7]。另一方面,雨滴及径流对横垄的破坏削弱了对水沙的拦截作用,也为侵蚀提供了额外的泥沙来源。因此,横垄的破损导致了坡面产沙量和水流特征出现波动。此外,本研究供试土壤为褐潮土,粉粒和黏粒含量占比80%以上,质地较为粘重,渗透性较差,易在坡面形成地表径流,增加了垄内的蓄水量,形成了较大的水头差。横垄的断裂则使这些积水以更快的速度冲刷地表,短时间内加剧了土壤侵蚀的同时也造成水动力参数出现较大波动。

3.2 强降雨条件下垄作对坡面侵蚀过程的影响

实验中,1.0 mm/min的降雨条件下,各坡面并未出现断垄现象,而1.5和2.0 mm/min的降雨条件下,在实验开始后的20~40 min内,各坡面相继发生断垄,且降雨强度越大、坡度越大,断垄发生的时间越早。发生断垄的原因一是与土壤含水量的变化有关。在强降雨下,短时间内大量雨水下渗,横垄坡面的土壤水分逐渐饱和,产生超渗产流,土壤结构力稳定性降低,横垄在水力梯度和重力作用下发生崩塌。而外营力的持续作用则是另一因素。雨滴的打击和垄内积聚的雨水的不断冲刷致使结构稳定性降低的横垄逐渐发生断裂^[11]。实验发现断垄现象的发生导致了坡面产沙量和水动力参数产生较大波动,水沙调控过程随着发生变化。本研究中,各坡面的产沙率随降雨强度的增大而增加,但横垄坡面产沙率均低于平作坡面。主要由于径流对坡面微地形的重新塑造常伴随着大量泥沙的流失,降雨强度越大,单位时间内坡面承雨量越大,增加了坡面有效供水量,径流对坡面微地形的改造作用越强,产沙量也越大^[22,24]。与平作坡面相比,横垄坡面对地表径流的蓄存和对输沙过程的拦截作用降低了径流的挟沙能力,从而导致坡面产沙率下降。但在强降水下,随着断垄的发生,横垄降低甚至丧失了对输沙过程的拦阻作用,坡面产沙率波动剧烈并出现峰值。因此,本研究中强降雨对横垄的破坏是导致横垄坡面侵蚀产沙率剧增的主要原因。

一般而言,地表糙度越大,汇流路径分布越分散,径流阻力系数越大^[22]。但在本研究中,强降雨条件下,横垄坡面的阻力系数与平作之间并未出现明显变化规律。一方面可能与阻力系数的计算有关,Darcy-Weisbach计算公式主要运用于小面积无措施裸露平整坡面,对于横垄这种较复杂的坡面,可能难以较好反映其的水流阻力问题^[25]。另一方面,水流所受到的阻力主要来自下垫面和径流携带的泥沙物质本身对水流的阻碍作用^[21]。实验中,强降水致使横垄断垄,降低甚至丧失了横垄坡面对水流的阻碍作用,引起坡面径流泥沙含量的剧烈波动,故而弱化了横垄坡面与平作之间的阻力系数规律。可见,在降雨强度较大的情况,横垄对径流的阻碍作用具有一定的局限性。

随着降雨强度的增加,各坡面径流剪切力和单位径流功率逐渐增加。横垄坡面的径流剪切力总体上低于平作坡面,表明坡面垄作可有效阻碍地表径流的冲刷作用,降低坡耕地的土壤流失速率,达到良好的拦沙截留作用。但横垄措施对坡面的单位径流功率的削弱却作用并不稳定。强降水条件下,横垄消耗了径流携带的一部分能量,但消能成效随着横垄的断垄而降低,并在断垄处为径流提供了集中流路,提高了汇流路径的连通性,导致径流流速和径流深度的增加,单位径流功率亦逐渐增加^[8]。由于本实验中,横垄断垄的时间、位置和断口数量具有一定的随机性和不可预测性,影响了径流的汇聚过程,因此横垄与平作坡面的单位径流功率之间无明显规律。表明,横垄耕作通过改变地表微地形格局影响坡面水流特性,进而降低坡面径流的冲刷作用,但在强降水条件下,也可能会因断垄而呈现出一定的负效应。

4 结论

(1)各坡面产沙率总体呈现出随着降雨时长的增加而减小的趋势,除1.5 mm/min降雨条件下,横垄坡面的产沙率均低于平作坡面。表明坡面细沟发育过程伴随着大量泥沙的流失,而对坡面进行横垄处理可有效降低降雨和坡度对土壤侵蚀产沙的影响,起到良好的减沙效应。

(2)随着降雨强度的增加,各坡面的径流流态从“层流-缓流区”(Re<500,Fr<1)转变为“紊流-缓流区”(Re>500,Fr<1)。且在2.0 mm/min降雨条件下,横垄和平作坡面的雷诺数和弗劳德数差异并不明显,表明强降水条件下,横垄对坡面地表径流的调控能力较差,此时径流流态主要受降雨强度和坡度的共同影响。

(3)不同实验条件下,各坡面阻力系数总体表现为随降雨时长的增加而逐渐降低并趋于稳定的趋势,径流剪切力和单位径流功率则随时间的增加而缓慢增长并趋于稳定。

(4)不同实验条件下,各坡面径流剪切力和单位径流功率随着坡度和降雨强度的增加而逐渐增加。且横垄坡面的径流剪切力显著低于平作坡面,而二者的阻力系数和单位径流功率则无明显规律。表明横垄可有效减轻地表径流对坡面土壤的冲刷作用,但其消能作用受降雨强度的强烈限制。

参考文献

- [1] 孔锋, 史培军, 方建, 等. 全球变化背景下极端降水时空格局变化及其影响因素研究进展和展望[J]. 灾害学, 2017, 32(2):165-174. KONG F, SHI P J, FANG J, et al. Advances and prospects of spatiotemporal pattern variation of extreme precipitation and its affecting factors under the background of global climate change[J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(2):165-174.
- [2] ZHANG W, LI W, ZHU L, et al. Anthropogenic influence on 2018 summer persistent heavy rainfall in central western China[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2020, 101(1):S65-S70.
- [3] 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. FAN J R, YANG C, BAO W K, et al. Distribution scope and district statistical analysis of dry valleys in southwest China[J]. Mountain Research, 2020, 38(2):303-313.
- [4] SUN L, CAI Y, YANG W, et al. Climatic variations within the dry valleys in southwestern China and the influences of artificial reservoirs[J]. Climatic Change, 2019, 155(1):111-125.
- [5] 孙辉, 唐亚, 黄雪菊, 等. 横断山区干旱河谷研究现状和发展方向[J]. 世界科技研究与发展, 2005(3):54-61. SUN H, TANG Y, HUANG X J, et al. Present situations and its R&D of Dry Valleys in the Hengduan mountains of SW China[J]. World Sci-Tech R&D, 2005, 27(3):54-61.
- [6] 王涛, 王嘉昆, 潘冬. 四川汉源康家坡滑坡形成机理与滑坡—堰塞坝—泥石流灾害链分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(1):1-7. WANG T, WANG J K, PAN D. Analysis on mechanism of Kangjiapo Landslide and consequent debris flow in Hanyuan County of Sichuan Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(1):1-7.
- [7] 张晶玲, 周丽丽, 马仁明, 等. 天然降雨条件下横垄与顺垄坡面产流产沙过程[J]. 水土保持学报, 2017, 31(5):114-119. ZHANG J L, ZHOU L L, MA R M, et al. Runoff and sediment yield process on longitudinal and cross ridge slopes under natural rainfall[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(5):114-119.
- [8] 李陶陶. 黄土坡耕地几种典型耕作措施的蓄水保土效益及其对细沟特征的影响研究[D]. 陕西: 西北农林科技大学, 2020. LI T T. Study on the benefits of soil and water conservation of several typical tillage practices and its effect on rill erosion on sloping farmland in loess plateau, China[D]. Shanxi: Northwest A&F University, 2020.
- [9] 江娜, 史东梅, 曾小英, 等. 土壤侵蚀对紫色土坡耕地耕层障碍因素的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59(1):105-117. JIANG N, SHI D M, ZENG X Y, et al. Influence of soil erosion on the obstacle factors of cultivated layer in purple sloping farmland[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(1):105-117.

-
- [10] LUO J, ZHENG Z, LI T, et al. Characterization of runoff and sediment associated with rill erosion in sloping farmland during the maize-growing season based on rescaled range and wavelet analyses[J]. *Soil & Tillage Research*, 2019, 195:104359.
- [11] 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.
- [12] WU L, LIU X, MA X. How biochar, horizontal ridge, and grass affect runoff phosphorus fractions and possible tradeoffs under consecutive rainstorms in loessial sloping land? [J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 256:107121.
- [13] 路培, 王林华, 吴发启. 不同降雨强度下土壤结皮强度对侵蚀的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(8):141-146. LU P, WANG L H, WU Q F. Effect of soil crust strength on erosion under different rainfall intensity[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(8):141-146.
- [14] 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. AN J, YU Y, WU Y Z. Effects of rainfall patterns on hillslope soil erosion process of cinnamon soil in contour ridge system [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(24):150-156.
- [15] 李坤衡. 极端降雨条件下黑土垄作坡耕地侵蚀过程模拟研究[D]. 辽宁: 工程技术大学, 2021. LI H K. Simulation study of erosion process for ridge sloping farmland in Mollisol region of northeast China under extreme rainfall[D]. Liaoning: Liaoning Technical University, 2021.
- [16] 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. HOU Y L, LIU R, ZHAO J B. Characteristics of flood disasters in Dry-Hot valley of Dadu river in Hanyuan county, Sichuan province in Qing dynasty [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(1):271-277.
- [17] 张宽地, 王光谦, 孙晓敏, 等. 坡面薄层水流水动力学特性试验[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(15):182-189. ZHANG K D, WANG G Q, SUN X M, et al. Experiment on hydraulic characteristics of shallow open channel flow on slope [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(15):182-189.
- [18] ZHANG L, GAO Z, YANG S, et al. Dynamic processes of soil erosion by runoff on engineered landforms derived from expressway construction: A case study of typical steep spoil heap [J]. *Catena*, 2015, 128:108-121.
- [19] ZHANG J, ZHOU L, MA R, et al. Influence of soil moisture content and soil and water conservation measures on time to runoff initiation under different rainfall intensities [J]. *Catena*, 2019, 182:104172.
- [20] 安妙颖, 韩玉国, 王金满, 等. 黄土丘陵区坡面薄层水流水动力学特性及其对土壤侵蚀的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2020, 25(2):142-150. AN M Y, HAN Y G, WANG J M, et al. Hydrodynamic characteristics of overland flow and its impact on erosion in Loess Hilly Region [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(2):142-150.
- [21] 郝好鑫, 杜一凡, 曹丹妮, 等. 红壤缓坡水流水动力学特性及其对侵蚀影响的试验研究[J]. *中国水土保持科学*, 2018, 16(2):1-8. HAO H X, DU Y F, CAO D N, et al. Experimental study of flow hydraulic characteristics and soil erosion

on red soil hilly-slope[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(2):1-8.

[22] SU Z A, HE Z Y, ZHOU T, et al. Impacts of native vegetation on the hydraulic properties of the concentrated flows in bank gullies[J]. Journal of Mountain Science, 2021, 18(4):907-922.

[23] 杨鸿琨, 苏正安, 朱大鹏, 等. 集水区耕作对干热河谷冲沟沟头溯源侵蚀过程的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(21):151-157. YANG H K, SU Z A, ZHU D P, et al. Effect of cultivation in upstream catchment on gully headcut erosion process in Dry-Hot valley [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(21):151-157.

[24] LUO J, ZHENG Z, LI T, et al. Spatial variation of microtopography and its effect on temporal evolution of soil erosion during different erosive stages [J]. CATENA, 2020, 190:104515.

[25] 吴淑芳, 吴普特, 原立峰. 坡面径流调控薄层水流水力特性试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3):14-19. WU S F, WU P T, YUAN L F. Hydraulic characteristics of sheet flow with slope runoff regulation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(3):14-19.