

坡度对浅沟侵蚀产沙的野外放水冲刷试验影响

郭军权¹, 王文龙²

(1.延安职业技术学院, 陕西 延安 716000;

2.中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为了研究坡度对坡面浅沟侵蚀产沙的影响,以黄土丘陵沟壑区坡面浅沟为研究对象,选取野外实地坡面 14.0°, 18.5°, 26.0°, 29.0°坡度和 5, 10, 15, 20, 25 L/min 放水流量进行典型野外坡面浅沟径流小区放水冲刷试验,研究坡度对浅沟径流率、产沙率、含沙量、总径流量、总产沙量的影响。结果表明:5, 10, 15, 20, 25 L/min 不同放水流量下,坡度与径流率、总径流量成正相关,既随着坡度增大径流率、总径流量增大;5, 10, 15, 20, 25 L/min 不同放水流量和 14.0°, 18.5°, 26.0°, 29.0°坡度下产沙率、含沙量和总产沙量随时间变化的规律一致,表现为试验时间内,均出现先增大—到达最大—波动减小—稳定趋势;产沙率、含沙量、总产沙量与坡度的关系表现为产沙率、含沙量、总产沙量随着坡度的增大先增大,达到最大值后减小,最大值出现在 26.0°, 26.0°的产沙率、含沙量和总产沙量分别为 14.0°的 1.06~2.87, 1.31~2.21, 1.08~2.77 倍,产沙率、含沙量、总产沙量均存在临界坡度,临界坡度范围为 18.5°~29.0°。

关键词: 浅沟; 坡度; 侵蚀产沙; 放水冲刷

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)04-0087-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.04.013

Experimental Study on the Effects of Field Scouring Slope on Ephemeral Gully Erosion and Sediment Yield

GUO Junquan¹, WANG Wenlong²

(1. Yan'an Vocational and Technical College, Yan'an, Shaanxi 716000;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming, Institute of Soil and Water

Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: In order to study the effects of slope gradient on sediment yield by ephemeral gully erosion on slope surface, taking the ephemeral gullies on the hilly and gully slopes of the Loess Plateau as the research object, four slope gradients including 14.0°, 18.5°, 26.0° and 29.0°, and five discharge flows of 5, 10, 15, 20, 25 L/min, were selected to study the effects of slope gradients on runoff rate, sediment yield rate, sediment concentration and total runoff and total sediment yield. The results showed that the slope gradients were positively correlated with runoff rate and total runoff at 5, 10, 15, 20, 25 L/min, and the runoff rate and total runoff increased with the increase of slope. Under the different discharge flows and gradients, the sediment yield rate, sediment concentration and total sediment yield had the same trend over time: increasing first-reaching maximum-decreasing fluctuatingly-stabilizing finally. The relationship between sediment yield rate, sediment concentration, total sediment yield and slope gradient: sediment yield rate, sediment concentration and total sediment yield increased first and then decreased with the increasing slope gradients, and the maximum value appeared at 26.0°. The sediment yield rate, sediment concentration and total sediment yield at 26.0° were 1.06~2.87 times, 1.31~2.21 times and 1.08~2.77 times of those at 14.0°, respectively. There were critical gradients for sediment yield rate, sediment concentration and total sediment yield, which ranged from 18.5° to 29.0°.

Keywords: ephemeral gully; slope gradient; erosion sediment; scouring

浅沟侵蚀是黄土高原丘陵沟壑区坡面主要侵蚀方式之一,浅沟侵蚀量占沟间地侵蚀的 35%~70%, 是黄土高原土壤侵蚀的主要根源之一^[1]。浅沟在国外被称为临时性切沟(ephemeral gully),美国东南部

收稿日期:2018-11-20

资助项目:国家自然科学基金项目(40471080);黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室科研专项(10502-T1);延安市科技发展计划项目(2011-KS-02)

第一作者:郭军权(1977—),男,陕西西安人,硕士研究生,副教授,主要从事水土保持、环境生态研究。E-mail: gjqlt88@163.com

通信作者:王文龙(1964—),男,陕西大荔人,博士,研究员,博导,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: wllwang@nwsuaf.edu.cn

和欧洲中部的浅沟侵蚀平均占坡面总侵蚀量的 40% 以上^[2],地中海西北部的浅沟侵蚀量占当地总产沙量的比例超过 80%^[3]。因此浅沟受到越来越多学者的关注和研究。程宏等^[4]利用高精度的全球定位系统(GPS)测量浅沟侵蚀的形态参数,研究坑状浅沟的坡度和上集水区面积的关系;郑粉莉等^[5-6]根据黄土高原陡坡地浅沟地形特征参数,在室内人工建筑浅沟发育初期的锥形模型,研究浅沟发育及其演变过程,同时总结浅沟侵蚀的影响因素,主要包括降雨、上方来水、地下潜流、地形和地表植被;雷廷武等^[7]利用室内水槽试验,研究不同长度侵蚀沟的水流动力特征;Vandekerckhove 等^[8]研究了临时性切沟侵蚀发生的临界地形条件;康宏亮等^[9]研究了冲刷条件下浅沟的侵蚀和产沙特征,产流时间与坡度×放水流量交互项之间的关系;彭艳平等^[10-11]研究干湿两季等高绿篱红壤浅沟坡面土壤水分空间变化和浅沟坡面红壤水分季节变化特征及其影响因子;苏子龙等^[12]研究东北漫岗黑土区防护林带分布对浅沟侵蚀的影响;徐锡蒙等^[13]利用模拟降雨和径流冲刷相结合的试验方法定量研究黄土陡坡地的浅沟形态特征,发现降雨强度和坡度的增加均加快坡面浅沟侵蚀过程,并使浅沟沟槽宽度和深度不断增加。国内对浅沟水动力学参数^[14]、浅沟发生的临界坡度^[15]、浅沟上方来水^[16-17]、耕作^[18-19]等影响浅沟侵蚀产沙因素进行了研究,并取得一定的研究成果。尽管如此,由于浅沟侵蚀受实地因素的影响较大,当前研究大多集中在野外调查和室内人工模拟降雨方面,对野外实地放水冲刷试验研究坡度对浅沟产沙影响的报道较少。因此,本文通过野外典型浅沟径流小区放水冲刷试验,研究坡度对浅沟的径流率、产沙率、含沙量和总产沙量的影响,为建立黄土高原坡面浅沟侵蚀预报模型及水土流失治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验小区位于陕西省延安市燕儿沟流域,地处延安市宝塔区(36°11′—37°09′N,109°21′—110°03′E)。该地区属温带大陆性气候,四季分明、雨热同期、昼夜温差大,平均海拔 798.5 m,年均降水量 550 mm,年均无霜期 170 d 左右,年平均气温 7.7~10.6℃。土壤为黄绵土,土质为壤土,质地松软,暴雨较多,多集中在 7—9 月,经暴雨冲刷很容易携带流失,是我国重要的水土流失保护区。试验土壤容重(1.25±0.15) g/cm³,耕层深度(24±1)cm,孔隙度(58±0.42)%,PH 7.6±0.2,有机质含量(0.85±0.02)%。

1.2 试验布设与过程

于 2017 年 8 月进行小区试验。试验地点为延安市宝塔区燕儿沟流域的油井区天然坡耕地,小区坡面比较完整。为了保证冲刷试验的真实性,试验小区选取有自然发育完好浅沟的坡面,试验中尽量减少对原有浅沟坡面的扰动。取浅沟小区宽 1 m、长 10 m,坡度分别为 14.0°,18.5°,26.0°,29.0°。水源为山上水窖中水,为使水流均匀地流入试验小区,将水从水窖中引入小区上方水箱中缓冲,然后从水箱中引入簸箕形溢流槽内,溢流槽镶入地下,上部紧贴坡面,用纱布平铺溢流槽口部,保证水流从溢流槽流出时不会对溢流槽口造成冲蚀,保证水流均匀流入试验小区。放水 5 min,等水流稳定后,开始记时,试验开始每 1 min 采集 1 次泥沙水样,待试验 3 min 后,每 3 min 采集 1 次泥沙水样。放水流量分别采用 5,10,15,20,25 L/min,试验前对流量进行标定 3 次以上取平均值。每个流量冲刷试验重复 2 次取平均值,烘干法测定含沙量。试验时间为 40 min,流速采用电解质示踪法^[20]测量,不同坡度均采用相同放置方法:在离浅沟上方距沟头 2 m 处放置 KCl 溶液自动注入装置,在距离电解质注入点 0.5 m 处放置第 1 组电导传感器,以后每隔 1 m 放置 1 组,共放置 6 组,当浅沟径流稳定后,开启注入装置注入 KCl 溶液,同时数据采集器开始记录探测到的电解质信号,采样频率为 50 点/s。利用 Excel 2010 与 SPSS 18.0 软件进行数据处理与分析及绘图处理。

2 结果与分析

2.1 坡度对径流率的影响

坡面径流自上而下的流动过程中,对坡面土壤产生剪切冲刷力,从而造成土壤侵蚀,坡度作为重要的地形因素对侵蚀过程具有非常重要的影响。从图 1 可以看出,不同流量和不同坡度下,径流率随时间的变化规律基本一致,呈先增大到一定值后趋于稳定,试验 0~3 min 时出现短暂的从小到大的增大过程,3 min 后增加到一定值后趋于稳定。主要是因为试验初始,浅沟表层土质疏松,孔隙度大,土壤含水量低,导致水流入渗较多,径流减少;3 min 后,当土壤含水量达到饱和后,不在截留水分,这时径流率增大达到一定值后趋于稳定。从图 1 还可看出,流量分别为 5,10,15,20,25 L/min 时,径流率与坡度成正相关关系,各流量下径流率随着坡度的增大而增大。主要是因为坡度越大,水流沿坡面向下运动的分力越大,坡面径流水的势能转化为动能越多,流速越大,径流在坡面停留时间变短,径流入渗时间减少,同一断面的径流量增加,径流率越大。

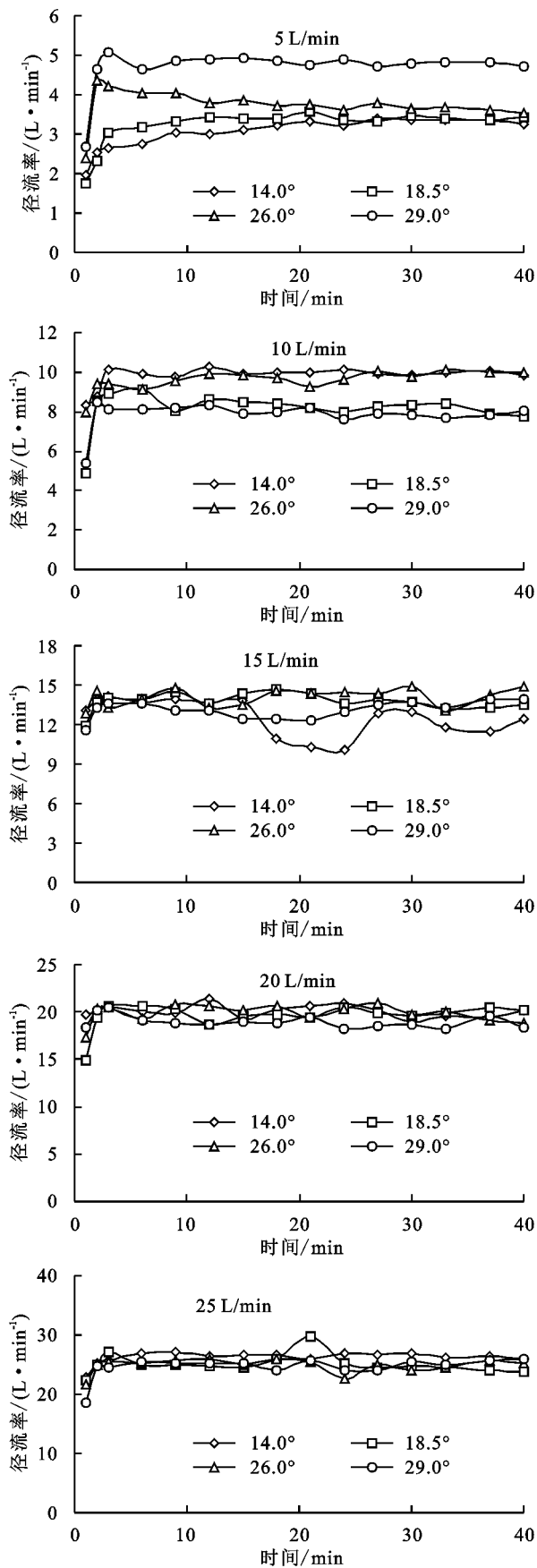


图 1 不同放水流量下坡度对径流率的影响

2.2 坡度对产沙率的影响

从图 2 可以看出,5,10,15,20,25 L/min 流量和不同坡度下,产沙率随时间变化趋势相同,即随着试

验时间的推移,产沙率呈先增大—到达最大—波动减小—稳定的变化规律。产沙率均在 0~10 min 出现最大值,且随放水流量的增大,出现最大值的时间提前。主要是因为试验初始水流对浅沟边坡和沟槽进行渗透,泥沙侵蚀所需的剪切力和剥离力减小,产沙能力弱,产沙率小;当表层土壤达到饱和后,大量的泥沙被径流带入浅沟沟槽,产沙率不断增大,出现最大值,随着表层的泥沙不断被带走后,径流下切到犁底层,由于犁底层土壤密实,较难被径流剥离,结果产沙率不断减小,最后趋于稳定。产沙率最大值提前主要是因为流量增大,土壤饱和和所需时间变短,径流剥离力和携带泥沙能力增强,且流量越大,剥离力和携带泥沙能力越强,产沙率最大值所需时间越短。

从表 1 可以看出,流量为 5,20 L/min 时,产沙率平均值表现为 $26.0^{\circ} > 18.5^{\circ} > 29.0^{\circ} > 14.0^{\circ}$, 26.0° 产沙率为 14.0° 的 1.1~2.7 倍。流量为 10,15,25 L/min,产沙率急剧增加,这时产沙率平均值随坡度的变化表现为 $26.0^{\circ} > 29.0^{\circ} > 18.5^{\circ} > 14.0^{\circ}$, 26.0° 产沙率为 14.0° 的 1.2~2.8 倍,全部试验流量情况下, 26.0° 的产沙率为 14.0° 的产沙率的 1.06~2.87 倍,产沙率最大值均出现在 26.0° ,数值分别为 (471.02 ± 42.32) , (645.45 ± 55.78) , $(2\ 105.39 \pm 82.54)$, $(3\ 113.21 \pm 105.36)$, $(3\ 252.38 \pm 100.32)$ g/min。在 26.0° 存在临界坡度。

从图 3 可以看出,坡度对产沙率影响规律为随着坡度的增大,产沙率呈先增大后减小,各流量的产沙率随坡度的变化均存在 1 个最大值,且最大值出现在 26.0° ,坡度对产沙率的影响存在临界坡度,且临界坡度为 $18.5^{\circ} \sim 29.0^{\circ}$ 。

2.3 坡度对含沙量的影响

从图 4 可以看出,除 5 L/min 外,其他流量下不同坡度径流含沙量随时间变化总的趋势为开始产流时含沙量较小,然后迅速增大,达到最大值后在短时间内减小,且放水流量越大,达到最大含沙量所需时间越短。由于最大含沙量取决于径流侵蚀的强弱和可供侵蚀泥沙的补给量。试验初始时,浅沟坡面径流入渗较强,侵蚀较弱,泥沙含量较小,当土壤含水量逐渐饱和后,入渗逐渐减弱,径流增强,土壤侵蚀剧烈,泥沙含量变大。由于浅沟表面容易被侵蚀的泥沙有限,随着时间的延续,径流含沙量达到最大,大量泥沙被带走,土壤侵蚀到达犁底层,土壤难以剥离,径流含沙量逐渐降低。从图 4 还可看出,不同坡度的含沙量的大小为 $26.0^{\circ} > 29.0^{\circ} > 18.5^{\circ} > 14.0^{\circ}$ 。最大含沙量出现在 26.0° 的浅沟侵蚀径流中,其值为 0.16 g/mL。 26.0° 的含沙量为 14.0° 的 1.31~2.21 倍。流量大于 15 L/min 时各坡度的泥沙量显著升高,此时坡度对

含沙量的影响不显著,这是因为当流量大于 1 个固定值时,其侵蚀强度均较强,这时径流对土壤的侵蚀不明显,含沙量主要取决可供侵蚀的泥沙补给量。

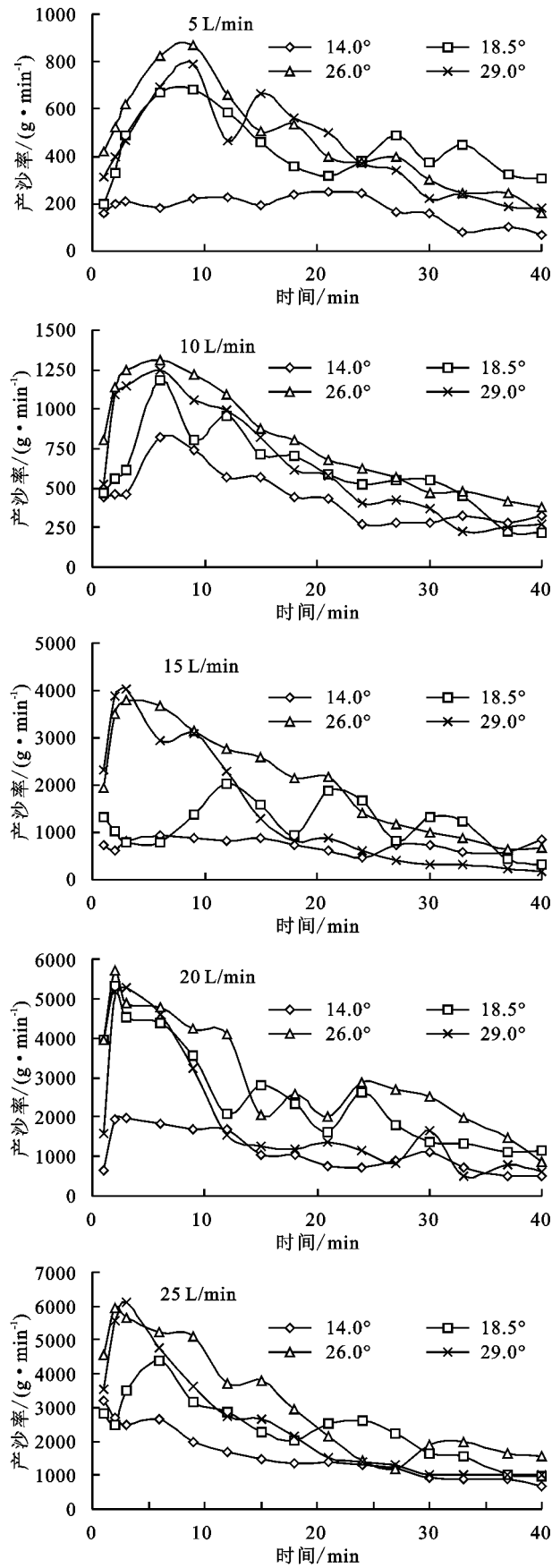


图 2 不同放水流量及坡度下产沙率随时间的变化

表 1 不同流量和坡度下的产沙率
单位:g/min

放水量/ (L·min ⁻¹)	14.0°	18.5°	26.0°	29.0°
5	179.83±39.24	427.58±45.45	471.02±42.32	426.07±48.52
10	357.62±47.36	486.62±41.12	645.45±55.78	535.61±51.14
15	733.81±67.45	1174.23±76.21	2105.39±82.54	1579.43±78.24
20	1137.66±53.21	2658.07±92.14	3113.21±105.36	2049.25±89.21
25	1654.99±68.11	2403.34±85.32	3252.38±100.32	2627.34±90.45

注:表中数据为平均值±标准差。

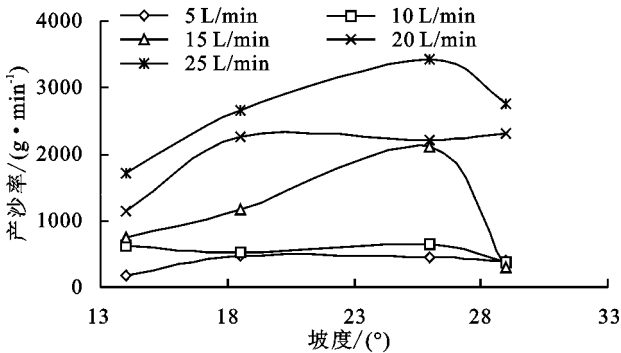


图 3 不同放水量下产沙率与坡度的关系

从图 5 可以看出,各流量下含沙量随着坡度的增加呈先增大后减小的变化趋势。除流量 15 L/min、坡度 18.5°出现最大值外,其他流量、含沙量均在 26.0°出现最大值,分别为 0.06,0.09,0.12,0.16 g/mL,说明坡面浅沟侵蚀含沙量大小存在临界坡度,且临界坡度为 18.5°~29.0°。

2.4 坡度对总径流量、总产沙量的影响

从图 6 可以看出,放水量分别为 5,10,15,20,25 L/min 时,总径流量与坡度呈线性变化关系,即径流量随着坡度的增大而增大,具体表现为各流量下坡度为 14.0°时均出现最小值,分别为 122.21,320.61,457.74,735.42,880.04 L;坡度为 29.0°时均出现最大值,分别为 185.62,386.28,589.68,860.62,1 029.29 L。最小径流量出现在坡度为 14.0°、放水量为 5 L/min,其值为 122.2 L;最大径流量出现的坡度为 29.0°、放水流量为 25 L/min,其值为 1 029.29 L,最大值为最小值的 8 倍左右。对图 6 进行分析可以看出,总产沙量与坡度关系是产沙量随着坡度先增大后减小,总产沙量存在 1 个最大值。

从表 2 可以看出,最大产沙量为 118 744.25 g,出现在坡度为 26.0°、放水量为 25 L/min 时,总产沙量最小值出现在坡度为 14.0°的浅沟、放水量为 5 L/min 时,其值为 7 090.25 g。最大值为最小值的 16 倍左右,坡度 26.0°总产沙量为坡度 14.0°的 1.08~2.77 倍。虽然总径流量随着坡度和放水流量的增大而增大,但总产沙量并没有随着坡度增大而增大,而是在 26.0°存在这 1 个最大

值,与产沙率、含沙量随坡度的变化一样,即存在着临界坡度,范围为 $18.5^{\circ}\sim 29.0^{\circ}$ 。

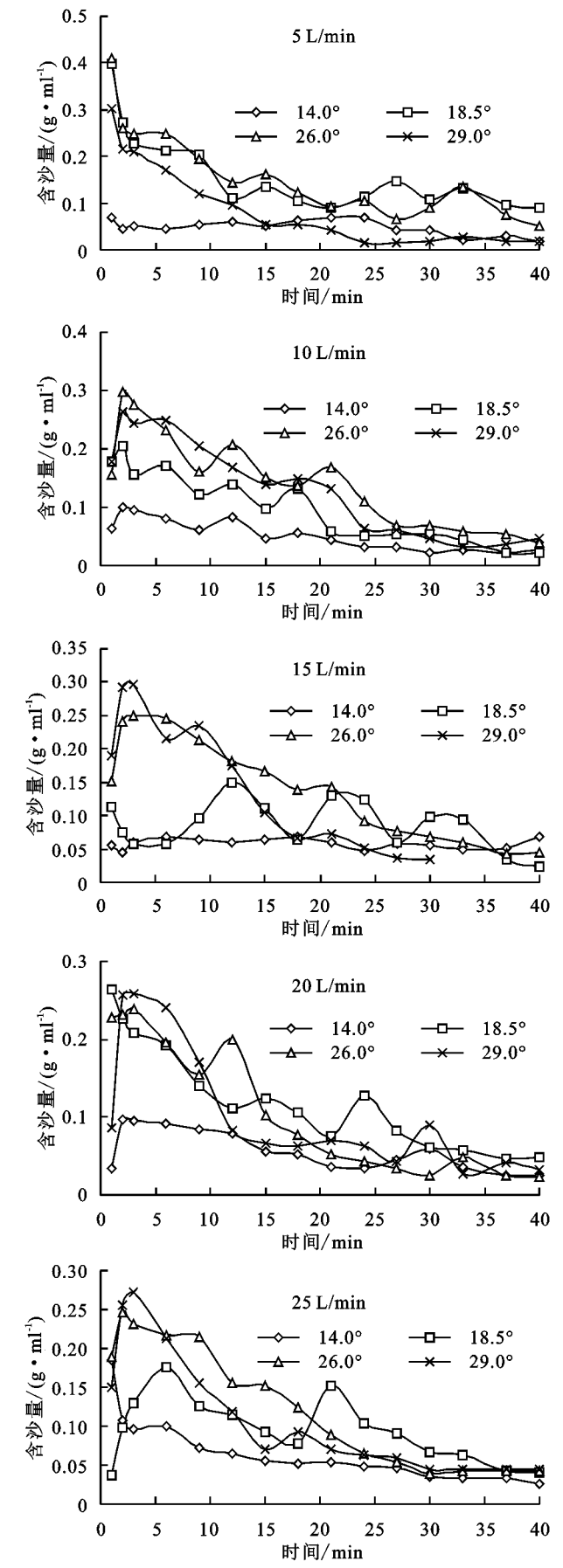


图4 不同坡度和流量下含沙量随时间的变化

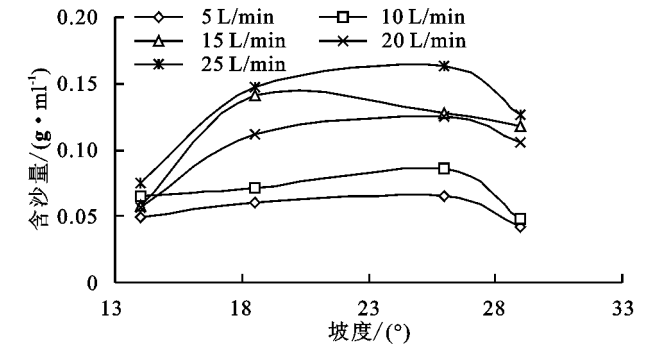


图5 不同流量下含沙量与坡度关系

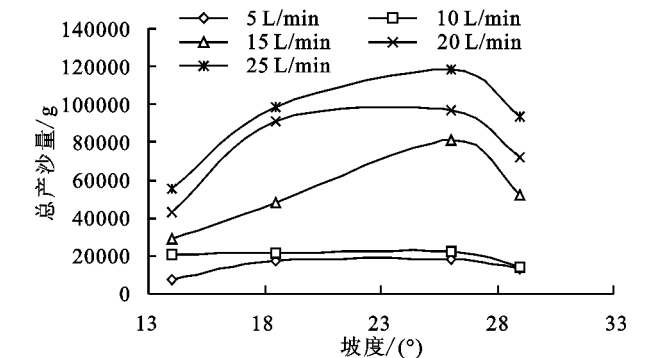
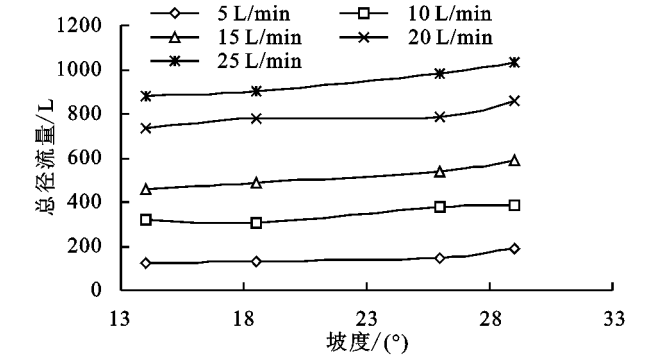


图6 总径流量、总产沙量与坡度的关系

3 讨论

坡度是浅沟侵蚀产沙的重要因素,直接影响浅沟径流侵蚀量的大小,利用野外放水冲刷试验研究坡度对浅沟侵蚀产沙对陕北黄土高原地区农业生产具有重要的指导意义。不同流量下浅沟径流量、径流率均随坡度的增大而增大,这一结果与康洪亮等^[9]的研究结果一致。但又有所不同,当流量较小,为5,10 L/min时,坡度对径流率的贡献率较大,占主导因素,相同放水流量下坡度 29.0° 和 26.0° 径流率明显高于 18.5° 和 14.0° 。流量为15,20,25 L/min时,虽然径流率也随着坡度的增大而增大,但坡度对径流率增大的贡献率明显减弱。主要因为流量较小时,浅沟沟槽中汇聚的水流较小,坡面水流的向下分力对径流率的增加起到主导作用。随着流量的增大,浅沟内的汇流增加,流速增大,径流率增大,放水流量成为径流率增加的主导因素。说明浅沟侵蚀是一个复杂多变的过程,各因素对侵蚀结果的影响可能会在一定条件下有所改变,因此应该因地制宜地控制影响侵蚀的因子,减少水土流失。

表 2 不同流量和坡度下的总径流量、总产沙量

坡度/ (°)	总径流量/L					总产沙量/g				
	5	10	15	20	25	5	10	15	20	25
	L/min	L/min	L/min	L/min	L/min	L/min	L/min	L/min	L/min	L/min
14.0	122.21	320.61	457.74	735.42	880.04	7090.25	21013.17	29319.18	43086.67	55293.45
18.5	128.93	308.74	484.53	778.11	905.32	17049.34	21694.36	48411.95	90975.39	98725.47
26.0	145.94	377.62	539.36	782.15	980.33	18613.15	22699.28	81303.34	97186.92	118744.25
29.0	185.62	386.28	589.68	860.62	1029.29	12841.78	14467.73	52025.70	72125.21	93216.18

众多学者对坡度和浅沟关系的研究主要集中在坡面出现浅沟的临界坡度。如唐克利等^[15]发现,坡耕地发生浅沟的临界坡度为 15°~20°, >25°的陡坡耕地浅沟发生的频率最高。据此提出:必须禁止开垦发生浅沟侵蚀强度>25°的陡坡,并尽可能控制在发生浅沟侵蚀的临界坡度 15°~20°以下进行农业生产。张科利等^[21]对黄土丘陵沟壑区坡面浅沟侵蚀发育的特征值进行研究发现,发生浅沟侵蚀的临界坡度约为 18.0°,临界坡长、平均间距和临界汇水面积的最小值所对应的坡度均为 26.0°。从而得出,26.0°的坡面最有利于浅沟侵蚀的发生,与本研究结果基本一致。本研究认为,浅沟侵蚀产沙的产沙率、含沙量和总含沙量均存在临界坡度,临界坡度为 26.0°左右(包括 26°),范围在 18.5°~29.0°,临界坡度对浅沟的侵蚀量贡献最大。由于本试验是野外试验,受较多条件因素限制,还存在着一定的局限性,希望在以后的研究和试验中能得到改进。

4 结论

(1)5,10,15,20,25 L/min 流量下,坡度与径流率、总径流量成正相关关系,随着坡度增大径流率、总径流量增大,坡度越大,坡面径流势能转化为动能越多,流速越大,径流率越大,总径流量越大。

(2)5,10,15,20,25 L/min 流量下,14.0°,18.5°,26.0°,29.0° 4 个不同坡度对产沙率、含沙量和总产沙量随时间变化的影响规律一致,试验时间内,产沙率、含沙量和总产沙量均随时间的变化呈先增大—达到最大—波动减小—稳定趋势。

(3)产沙率、含沙量、总产沙量与坡度的关系为产沙率、含沙量随着坡度的增大先增大,达到最大值后减小,最大值出现在 26.0°,26.0°的产沙率、含沙量、总产沙量分别为 14.0°的 1.06~2.87,1.31~2.21,1.08~2.77倍;产沙率、含沙量、总产沙量均存在临界坡度,坡度范围为 18.5°~29.0°。

参考文献:

[1] 中国科学院西北水土保持研究所.黄土高原杏子河流域自然资源与水土保持[M].西安:陕西科学技术出版社,1986:41-49.

[2] Casali J, López J J, Giráldez J V. A process-based

model for channel degradation: Application to ephemeral gully erosion[J].Catena,2003,50:435-447.

[3] Nachtergaele J, Poesen J, Steegen A, et al. The value of a physically based model versus an empirical approach in the prediction of ephemeral gully erosion for loess-derived soils[J].Geomorphology,2001,40(3/4):237-252.

[4] 程宏,王升堂,伍永秋,等.坑状浅沟侵蚀研究[J].水土保持学报,2006,20(2):39-41.

[5] 郑粉莉,武敏,张玉斌,等.黄土陡坡裸露坡耕地浅沟发育过程研究[J].地理科学,2006,26(4):438-442.

[6] 郑粉莉,徐锡蒙,覃超.沟蚀过程研究进展[J].农业机械学报,2016,47(8):48-59.

[7] 雷廷武,Nearing M A.侵蚀细沟水力学特性及细沟侵蚀与形态特征的试验研究[J].水利学报,2000(11):49-54.

[8] Vandekerckhove L, Poesen J, Oostwoud W D, et al. Thresholds for gully initiation and sedimentation in Mediterranean Europe[J].Earth Surface Processes and Landforms,2000,25:1201-1220.

[9] 康宏亮,王文龙,薛智德,等.冲刷条件下黄土丘陵区浅沟侵蚀形态及产流产沙特征[J].农业工程学报,2016,32(20):161-170.

[10] 彭艳平,高超,张旭,等.干湿两季等高绿篱红壤浅沟坡面土壤水分空间变化[J].华中农业大学学报,2013,32(2):61-66.

[11] 彭艳平,贾金田,付智勇,等.浅沟坡面红壤水分季节变化特征及其影响因子[J].农业现代化研究,2015,36(1):137-143.

[12] 苏子龙,崔明,范昊明.东北漫岗黑土区防护林带分布对浅沟侵蚀的影响[J].水土保持研究,2012,19(3):20-23.

[13] 徐锡蒙,郑粉莉,武敏.雨强和坡度对黄土陡坡地浅沟形态特征影响的定量研究[J].农业工程学报,2017,33(11):124-132.

[14] 龚家国,王文龙,郭军权.黄土丘陵沟壑区浅沟水流水动力学参数实验研究[J].中国水土保持科学,2008,6(1):93-100.

[15] 唐克利,张科利,雷阿林,等.黄土丘陵区退耕上限坡度的研究论证[J].科学通报,2000,43(2):200-203.

[16] 郭军权,刘敏,王文龙.上方来水对浅沟侵蚀产沙的野外放水冲刷试验研究[J].水土保持学报,2012,26(3):49-52.

(A2)复垦方式对矿区排土场土壤质量的改善较好,说明杨树林和豆科植物为主混合复垦方式能明显改善研究区的土壤质量。

参考文献:

[1] 吴钢,魏东,周政达,等.我国大型煤炭基地建设的生态恢复技术研究综述[J].生态学报,2014,34(11):2812-2820.

[2] 杨勤学,赵冰清,郭东罡.中国北方露天煤矿区植被恢复研究进展[J].生态学杂志,2015,34(4):1152-1157.

[3] 马从安,才庆祥,王启瑞,等.露天煤矿排土场土壤质地和肥力的分析与评价[J].煤炭工程,2008(5):77-79.

[4] 张丽娟,王海邻,胡斌,等.煤矿塌陷区土壤酶活性与养分分布及相关研究:以焦作韩王庄矿塌陷区为例[J].环境科学与管理,2007,32(1):126-129.

[5] 赵洋,张鹏,胡宜刚,等.黑岱沟露天煤矿排土场不同植被配置对生物土壤结皮拓殖和发育的影响[J].生态学杂志,2014,33(2):269-275.

[6] Haigh M J,Gentcheva-Kostadinova S. Ecological erosion control on coal-spoil banks: An evaluation[J]. Ecological Engineering ,2002,18(3):371-377.

[7] 马云波,牛聪傑,许中旗.不同造林模式对铁尾矿地土壤性质的影响[J].水土保持学报,2015,29(3):242-248.

[8] 樊文华,李惠峰,白中科.黄土区大型露天煤矿不同复垦模式和年限下土壤肥力的变化[J].山西农业大学学报,2006,26(4):313-316.

[9] 曹志平,胡诚,叶钟年,等.不同土壤培肥措施对华北高产农田土壤微生物生物量碳的影响[J].生态学报,2006,26(5):1486-1493.

[10] 方瑛,马任甜,安韶山,等.黑岱沟露天煤矿排土场不同植被复垦土壤酶活性及理化性质研究[J].环境科学,2016,37(3):1121-1127.

[11] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000:22-81.

[12] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,

1986:274-323.

[13] 张洋,倪九派,周川,等.三峡库区紫色土旱坡地桑树配置模式对土壤微生物生物量碳氮的影响[J].中国生态农业学报,2014,22(7):766-773.

[14] Adejuwon J O,Ekanade O. A comparison of soil properties under different landuse types in a part of the Nigerian cocoa bel[J].Catena,1988,15(3/4):319-331.

[15] 张雅楠.黑岱沟排土场复垦地植被类型及土壤理化性质的研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2013.

[16] 张鹏,赵洋,黄磊,等.植被重建对露天煤矿排土场土壤酶活性的影响[J].生态学报,2016,36(9):2715-2723.

[17] 梁爱华,韩新辉,张扬,等.纸坊沟流域退化土壤碳氮关系对植被恢复的时空响应[J].草地学报,2013,21(5):842-849.

[18] 胡宜刚,张鹏,赵洋,等.植被配置对黑岱沟露天煤矿区土壤养分恢复的影响[J].草业科学,2015,32(10):1561-1568.

[19] Wang Z,Liu G B,Xu M X,et al. Temporal and spatial variations in soil organic carbon sequestration following revegetation in the hilly Loess Plateau, China[J].Catena,2012,99:26-33.

[20] 孙泰森,白中科.黄河中游地域露天煤矿排土场复垦方式特殊性的探讨[J].山西农业大学学报,2000,20(4):383-385.

[21] 邱莉萍,张兴昌.子午岭不同土地利用方式对土壤性质的影响[J].自然资源学报,2006,21(6):965-971.

[22] 毕江涛,贺达汉,黄泽勇,等.退化生态系统植被恢复过程中土壤微生物群落活性响应[J].水土保持学报,2008,22(4):195-200.

[23] 胡尧,李懿,侯雨乐.岷江流域不同土地利用方式对土壤有机碳组分及酶活性的影响[J].生态环境学报,2018,27(9):1617-1624.

[24] 马佳慧.黑岱沟矿区排土场植被恢复对复垦土壤性质影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2015.

(上接第 92 页)

[17] 车小力,王文龙,郭军权,等.上方来水来沙对浅沟侵蚀产沙及水动力参数的影响[J].中国水土保持科学,2011,9(3):26-31.

[18] 邓利强,王文龙,郭军权,等.黄土丘陵区耕作对浅沟侵蚀影响的对比研究[J].水土保持学报,2013,27(5):32-36.

[19] 张天宇.垄作耕地浅沟深度的测量和换算[J].中国水土

保持科学,2016,14(5):138-144.

[20] 董月群,雷廷武,张晴雯,等.集中水流冲刷条件下浅沟径流流速特征研究[J].农业机械学报,2013,5(44):96-100.

[21] 张科利,唐克丽,王斌科.黄土高原坡面浅沟侵蚀特征值的研究[J].水土保持学报,1991,5(2):8-13.