

坡度对黄土坡面产流产沙过程及水沙关系的影响

苏远逸, 李鹏, 任宗萍, 肖列, 王添, 张建文, 刘展

(西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048)

摘要:为了探究次降雨条件下坡度对黄土坡面侵蚀及水沙关系的影响,在室内进行模拟降雨试验,结合能量理论对黄土坡面水沙关系进行了研究。结果表明:(1)在次降雨条件下,坡面产沙强度随产流时间的变化趋势较产流强度更为复杂,并且两者随着产流时间的变化趋势存在不同步性;(2)坡面总产流量与总产沙量随坡度的变化均呈二次函数关系,并且在 $20^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 存在量变的临界值;(3)坡面产流强度与产沙强度呈正相关关系,方程系数 a 随坡度呈现增大后减小的趋势;(4)累积产流量与累积产沙量之间呈正相关关系,相关系数 c 的绝对值与坡度成正比;(5)坡面平均径流能量随坡度的变化呈上升—下降的趋势,在坡面侵蚀过程中,平均径流能量与平均产沙强度之间的关系可用线性方程描述,两者呈正相关关系,平均径流能量可以合理预测黄土坡面的输沙能力。该研究可为完善黄土区的土壤侵蚀机理提供理论依据。

关键词:黄土;坡度;产流产沙;水沙关系;径流能量

中图分类号:S157;P333

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)02-0118-05

Effect of Slope Gradient on the Process of Runoff and Sediment Yield and Water-Sediment Relation on the Loess Slope

SU Yuanyi, LI Peng, REN Zongping, XIAO Lie, WANG Tian, ZHANG Jianwen, LIU Zhan

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of
China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to explore the effect of slope gradient on erosion and water-sediment relationship on the loess slope under a rainfall event, simulated rainfall experiments were carried out in the laboratory, and the water-sediment relationship on the loess slope was studied with energy theory. The results show that: (1) under the condition of a rainfall event, the trend of sediment yield intensity on slope over runoff yield time is more complex than that of runoff yield intensity, and there is the asynchrony between the two trends over the runoff yield time; (2) the relationship between total runoff and sediment yield can be described by quadratic, and there is a critical value of quantitative change between the gradients ranging from 20° to 25° ; (3) there is a positive correlation between runoff intensity and sediment yield intensity, and the coefficient of equation decreases with the increase of slope gradient; (4) there is a positive correlation between cumulative runoff and sediment yield, and the absolute value of correlation coefficient is proportional to slope gradient; (5) the average runoff energy increases or decreases with the change of slope gradient; in the process of slope erosion, the relationship between average runoff energy and average sediment yield intensity is positively correlated, and can be described by linear equation; the average runoff energy can reasonably predict the sediment transport capacity of Loess slope. These results can provide the theoretical basis for understanding the mechanism of soil erosion in Loess area.

Keywords: loess; slope; runoff and sediment yield; water-sediment relationship; runoff energy

我国受土壤侵蚀的影响较为严重,土壤侵蚀面积超过国土面积的 $50\%^{[1]}$ 。在土壤侵蚀过程中,坡度

对其有重要影响,主要表现在土壤入渗及产流、坡面径流流速、坡面承雨面积和土体稳定性等方面。当坡

收稿日期:2019-03-29

修回日期:2019-04-25

资助项目:国家重点研发计划“砒砂岩区多动力复合侵蚀时空分异规律”(2017YFC0504501);陕西省水利科技项目(2017slkj-22)

第一作者:苏远逸(1993—),男,陕西宝鸡人,博士研究生,研究方向为水力侵蚀。E-mail:suyuanyi666@163.com

通信作者:任宗萍(1982—),女,山东潍坊人,博士,副教授,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail:renzongping@163.com

度不断增大,土壤入渗量减少,侵蚀量增大,坡面流速增加,单位面积承雨量变小,土体稳定性降低^[2]。早在 1940 年,Zingg^[3]通过总结实测资料得到坡度与侵蚀量的相关关系,认为侵蚀量与坡度的 1.4 次方成正比。国内学者耿晓东^[4]通过对西北黄土坡面、南方红壤坡面和西南紫色土坡面的研究表明土壤侵蚀量与坡度呈正相关关系。但是坡面侵蚀量随坡度增大过程中并不总是呈正相关关系,国外学者 Horton^[5]从理论上得出土壤侵蚀临界坡度为 57°。陈晓安等^[6]通过研究岔巴沟与王家沟径流场的资料分析得出坡度对土壤侵蚀的影响存在一个小于 31°的临界坡度。张会茹等^[7]通过室内模拟降雨试验发现红壤坡面坡度对侵蚀的影响存在着临界坡度,介于 20°~25°。倪九派等^[8]发现紫色土坡面径流侵蚀的临界坡度为 35.93°~40.78°。刘青泉等^[9]根据水力学和土壤稳定性两方面随坡度变化的关系,推导得出坡面土壤侵蚀临界坡度为 41.5°~50°。靳长兴^[10]基于坡面流的能量理论推导得出坡面土壤侵蚀临界坡度为 24°~29°。不过由于坡度与土壤侵蚀之间关系复杂,对于坡面土壤侵蚀临界坡度的研究尚未有统一结论。

从物理学角度来看,土壤侵蚀实际上是水流克服阻力做功的过程,在此过程中,水流冲刷和雨滴击溅是物质转移的主要能量来源。国内外有关坡面能量问题的研究较多,李光录等^[11]通过人工模拟降雨试验得出,在坡度和降雨能一定时,侵蚀泥沙量随着径流能的增加呈对数函数迅速增长。李占斌等^[12]和丁文峰^[13]利用机械能量守恒定理研究放水冲刷条件下在坡面侵蚀过程中径流能耗的问题,并建立径流能耗与侵蚀产沙的关系。李勉等^[14]通过放水冲刷试验分析了坡面流能量变化特征,并指出植被具有减蚀的重要作用。目前,对于黄土区坡度与土壤侵蚀的关系已做了大量的研究^[6,15-19],但是对于黄土区坡度对水沙关系的影响研究较少。因此,本文利用室内模拟降雨试验,结合能量理论研究次降雨条件下坡度对水沙关系的影响,建立能量与侵蚀产沙之间的响应关系,为完善黄土区的土壤侵蚀机理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验选用试验西安郊区黄土,采用激光粒度仪 Malvern 2000 测量泥沙粒径的体积百分比,测得粒径为 0.05~0.1 mm 的颗粒占 38.65%,0.002~0.05 mm 的颗粒占 59.99%,<0.002 mm 的颗粒占 1.36%,土壤质地为粉砂质壤土,经测定土壤有机质含量为(3.0±0.1) g/kg。

1.2 试验设计

将试验用土运回实验室风干后过 1 cm 的筛,填土前在土槽底部铺一层纱布,再装入 2 cm 厚的天然沙,保证土壤的透水性 with 野外坡面相似。装土时将黄土分层装入,每层 5 cm,共 2 层,控制土壤容重在 1.2 g/cm³左右,初始土壤含水率在 15%左右。本试验从 2015 年 4 月开始至 5 月结束,试验场地位于西理工工业大学雨洪侵蚀大厅。试验设计雨强为 1.0 mm/min,降雨空间分布均匀度均控制在 80%以上。设计坡度为 5 个,分别是 9°,12°,15°,20°,25°,每个设计坡度重复 3 次试验,保证每次重复的下垫面条件一致。

1.3 试验方法

模拟降雨试验采用针管式降雨器,降雨器距坡面垂直距离为 13 m,采用控制阀来率定雨强^[20]。试验土槽采用 90 cm×45 cm×15 cm(长×宽×高)的木质土槽,将其放置在可变坡钢制土槽上,变坡范围 0°~30°。降雨前率定雨强,满足要求后进行试验。当坡面出水口开始产流后,记录初始产流时间,每 3 min 收集 1 次径流泥沙样,每场降雨在开始产流后持续 60 min,采用烘干法测得每次的产沙量,用浑水总体积减去泥沙体积得到每次的产流量。

1.4 指标计算及数据处理

1.4.1 径流能量计算 径流能量表达了坡面薄层水流对土壤的剥蚀和搬运能力,单位面积的平均径流能量计算公式如下^[21]:

$$E' = \frac{\rho g}{4} L Q \sin 2\theta \quad (1)$$

式中: E' 为单位面积的径流能量(J/m²); ρ 为水的密度(kg/m³); g 为重力加速度(m/s²); L 为坡长(m); θ 为坡度(°); Q 为产流量(L)。

1.4.2 数据处理与分析 使用 Excel 2016 对试验数据进行统计,并用 Origin 8.5 制作图表。分析数据及建立回归方程采用 SPSS 21.0。

2 结果与分析

2.1 坡度对坡面产流强度与产沙强度的影响

不同坡度条件下产流过程见图 1A,从整体上看各坡度坡面产流强度随产流时间变化的趋势大致相同,但是其变化规律却略有不同。产流强度随产流时间变化趋势大致分为 3 个阶段:一是在产流初期的迅速增长阶段;二是随着降雨的继续呈缓慢增长阶段;三是产流强度趋于相对稳定状态。在 9°~20°坡面下,产流强度随产流时间的增大变化趋势大致相同,0~18 min 为迅速增长阶段,随后经过缓慢增长阶段达到峰值,接着逐渐减小最终趋于稳定。当

坡度为 25°时,相同时间下产流强度均小于其他坡度坡面,0~15 min 为迅速增长阶段,缓慢增长阶段为 15~30 min,稳定阶段为 30~60 min。不同坡度条件下产沙过程见图 1B,从整体上看各坡度坡面产沙强度随产流时间变化的趋势大致分为 3 个阶段:一

是在产流初期的迅速增长阶段;二是随着降雨的继续呈缓慢增长阶段;三是不断交替波动阶段。各个坡度下产沙强度经过迅速增长阶段后都出现了不同程度的下降,随后进入缓慢增长阶段,增长速率小于迅速增长阶段。

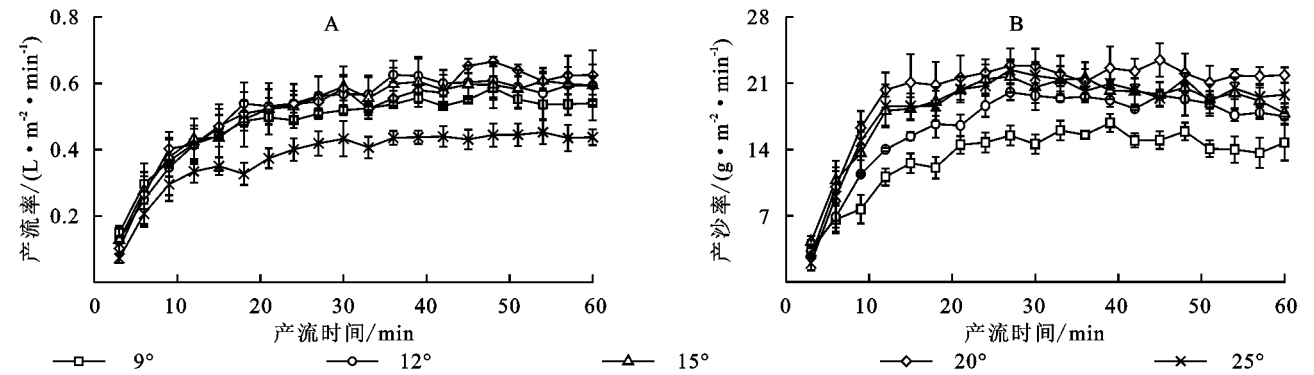


图 1 不同坡度下产流产沙强度随产流时间的变化

2.2 坡度对坡面总产流量与总产沙量的影响

由不同坡度条件下总产流量(图 2A)可以看出,在坡度较缓时,随着坡度的增加,总产流量逐渐增大,20°时总产流量达到峰值,但是在 20°~25°时总产流量减小,这可能与侵蚀过程中存在一个临界坡度有关。通过拟合,坡度与总产流量和总产沙量之间均呈

二次函数关系,其表达式分别为:
 $Q = -0.09\theta^2 + 2.76\theta + 11.02 \quad R^2 = 0.86 \quad (2)$
 $M = -0.001\theta^2 + 0.05\theta - 0.06 \quad R^2 = 0.99 \quad (3)$
式中:Q 为总产流量[L/(m²·h)];M 为总产沙量[kg/(m²·h)];θ 为坡度(°);R² 为相关系数。

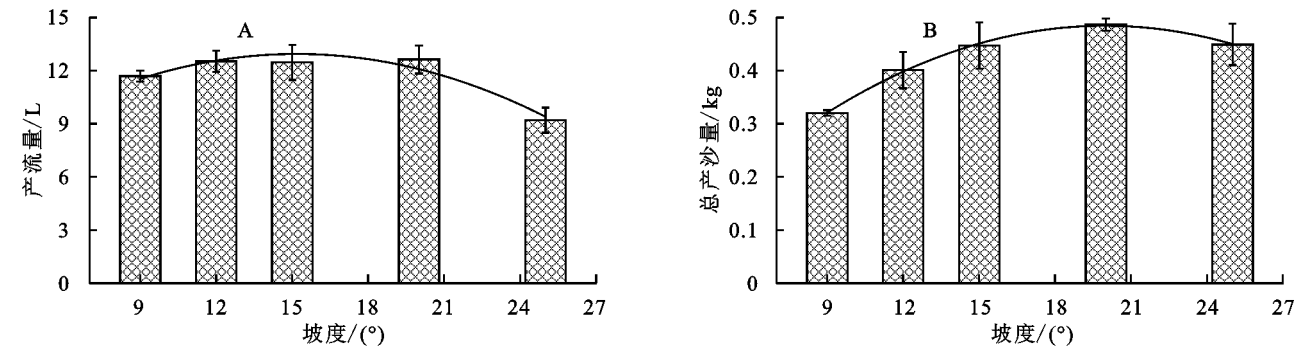


图 2 不同坡度下的总产流产沙量

2.3 坡度对坡面水沙关系的影响

2.3.1 坡度对坡面产流强度与产沙强度关系的影响
将不同坡度条件下单位时间内坡面的产沙量即产沙强度和产流量即产流强度进行回归分析,结果见表 1,可以看出,在不同坡度下,不同坡度条件下坡面产流强度与产沙强度之间均呈线性相关关系,函数关系式如下:

$$y = ax + b \quad (4)$$

式中:y 为产沙强度[g/(m²·min)];x 为产流强度[L/(m²·min)];a,b 为常数。

由图 3 可以看出,在降雨过程中,产沙强度随产流强度的增大而增大,这是由于在坡面侵蚀产沙过程中,随着单位时间内产流量的增加,水流流速增大,水流的搬运能力增强,泥沙更容易被剥离搬运出坡面,最终导致单位时间内产沙量的增大。不同坡度下方程系数 a 的大小为 25°>20°>12°>9°>15°,方程系

数 a 分别在 9°~12°和 15°~25°两个范围内均随着坡度的增大而增大,而系数 b 随坡度的变化没有明显的变化特征。当坡度为 15°时,a 达到极小值,这说明在不同坡度下,产沙强度均随着产流强度的增大而增大,但是其增长趋势不同,方程系数 a 随坡度增大过程中并不总是呈正相关关系。

表 1 产流强度与产沙强度的相关关系

坡度/(°)	拟合方程	R²
9	$y = 31.27x - 1.86$	0.9095
12	$y = 32.96x - 0.50$	0.9516
15	$y = 31.01x + 2.49$	0.8520
20	$y = 33.55x + 2.59$	0.8461
25	$y = 47.48x + 0.50$	0.8862

2.3.2 坡度对累积产流量与累积产沙量关系的影响
不同坡度条件下的累积产流量与累积产沙量呈极

显著线性相关关系,研究结果与其他研究学者相一致^[22-23]。结合函数关系以及产流产沙的物理意义可知, $c>0$,表示坡面累积产沙量均随着累积产流量的增长而增长,定义系数 c 为产沙能力系数, d 为常数。由表 2 可以看出, c 的大小与坡度呈正相关关系,即坡面产沙能力系数随着坡度的增加而增大。函数关系式如下:

$$M'=cQ'+d \quad (5)$$

式中: M' 是累积产沙量(g); Q' 是累积产流量(L); c , d 为常数。

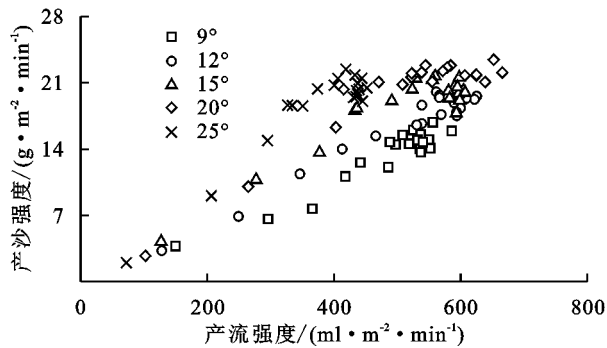


图 3 产流强度与产沙强度的关系

表 2 累积产流量与累积产沙量的相关关系

坡度/(°)	拟合方程	R^2
9	$M'=28.07Q'-11.43$	0.9995
12	$M'=32.42Q'-2.18$	0.9997
15	$M'=36.19Q'+17.80$	0.9984
20	$M'=38.90Q'+17.98$	0.9980
25	$M'=49.40Q'+8.87$	0.9986

2.4 径流能量与侵蚀产沙的响应关系

通过径流能量的公式计算得出各坡面下整个侵蚀过程中径流能量的平均值,并建立不同坡度条件下各坡面对应的平均径流能量与平均产沙强度的关系(图 4)。可以看出,平均产沙强度总体上随平均径流能量的增大而增大。通过拟合,坡面平均径流能量与平均产沙强度之间呈线性函数关系,其表达式为:

$$\overline{M}=0.02 \overline{E'}+0.524 \quad R^2=0.87 \quad (6)$$

式中: \overline{M} 为平均产沙强度(kg/m^2); $\overline{E'}$ 为坡面平均径流能量(J/m^2)。

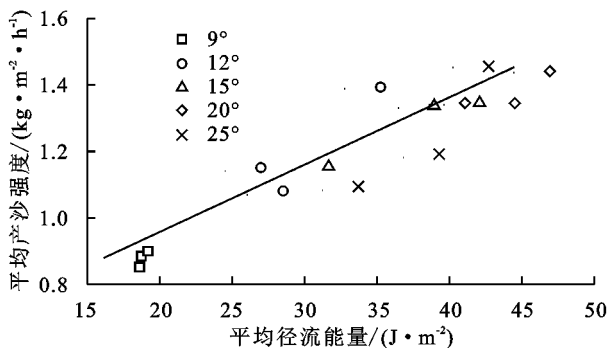


图 4 平均径流能量与平均产沙强度的相关关系

3 讨论

在本试验中,不同坡度条件下坡面产流产沙强度随产流时间的变化均分为 3 个阶段,但是两者变化趋势存在不同步性。对于产流过程而言,在降雨初期,土壤层迅速达到饱和,雨滴落在坡面形成径流,产流强度在这个阶段内迅速增大;随着降雨的继续,坡面局部形成结皮,产流强度不断增大但增速变缓;在降雨后期结皮发育稳定,产流强度趋于相对稳定状态。对于产沙过程而言,在降雨初期,雨滴击溅使得坡面表层的粗颗粒不断被打散且被坡面径流挟带至坡面出口处,形成产沙高峰,产沙强度处于迅速增长阶段;随着降雨的继续,地表形成结皮^[24-26],增加土壤的抗侵蚀性,使降雨产生的土粒减少,产沙强度进入缓慢增长阶段。但是由于坡面径流的冲刷以及雨滴降落打击坡面会破坏结皮,导致产沙强度增大,随后新的结皮生成又使产沙强度减小^[27],在新老结皮的交替过程中使产沙强度呈交替波动趋势直至试验结束。

坡面总产流量受坡面承雨量和入渗量影响。在 $9^\circ \sim 20^\circ$ 的坡面上,当坡度逐渐增大,径流沿坡面方向的重力分力不断增大,径流速度也随着增大,使入渗时间变短,入渗量逐渐减小,因此产流量不断增大。然而在 $20^\circ \sim 25^\circ$ 坡面上总产流量下降,原因是 25° 坡面承雨面积减少,导致坡面承雨量减少,因此在 $20^\circ \sim 25^\circ$ 坡面上总产流量随着坡度的增大呈减小的趋势。其次,坡面入渗量还受到土壤孔隙度、地表结皮和降雨特征等多方面因素的影响,所以受影响因素的不同在试验观测期间坡面总产流量的变化存在差异^[28-29]。坡面产沙量受降雨侵蚀力和径流搬运能力的影响。在 $9^\circ \sim 20^\circ$ 坡面上,当坡度不断增大,坡面土壤稳定性降低,容易受侵蚀,因此总产沙量与坡度呈正相关关系;而在 $20^\circ \sim 25^\circ$ 坡面上,总产沙量减少,原因是 25° 时总产流量下降导致径流搬运能力下降,径流挟带的泥沙减少,造成总产沙量显著减少。

研究表明^[11],降雨能导致泥沙剥离,径流能是泥沙搬运的主要能量来源。在不同坡度条件下,各坡面在整个侵蚀过程中径流能量的平均值与平均产沙强度呈线性函数关系,并且平均径流能量与平均产沙强度的拟合关系较好,因此平均径流能量可以合理预测黄土坡面的输沙能力。

4 结论

(1) 不同坡度条件下,坡面产流强度与产沙强度

随产流时间的变化均分为 3 个阶段,但是两者随产流时间的变化趋势存在不同步性。

(2) 坡面总产流量与总产沙量随坡度的变化均呈现先增大后减小的趋势,并且在 $20^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 存在一个量变的临界值。

(3) 在次降雨过程中,坡面产流强度与产沙强度之间呈正相关关系,产沙强度随产流强度的增大而增大,方程系数 a 随坡度呈现增大后减小的趋势;累积产流量与累积产沙量之间呈正相关关系,坡度越大,产沙能力系数越大,坡面产沙能力越强。

(4) 坡面平均径流能量与平均产沙强度呈正相关关系,平均产沙强度总体上随着平均径流能量的增大而增大,并且平均径流能量可以合理预测黄土坡面的输沙能力。

参考文献:

- [1] 王占礼.中国土壤侵蚀影响因素及其危害分析[J].水土保持科技,2000(2):15-17.
- [2] 张晴雯,雷廷武,潘英华,等.细沟侵蚀可蚀性参数及土壤临界抗剪应力的有理(试验)试验求解方法[J].中国科学院大学学报,2004,21(4):468-475.
- [3] Zingg A W. Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff[J]. Agricultural Engineering, 1940, 21(2):59-64.
- [4] 耿晓东.主要水蚀区坡面土壤侵蚀过程与机理对比研究[D].北京:中国科学院研究生院,2010.
- [5] Horton R E. Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology[J]. Journal of the Japanese Forestry Society, 1945, 56(3):275-370.
- [6] 陈晓安,蔡强国,张利超,等.黄土丘陵沟壑区坡面土壤侵蚀的临界坡度[J].山地学报,2010,28(4):415-421.
- [7] 张会茹,郑粉莉,耿晓东.地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响研究[J].水土保持研究,2009,16(4):52-54.
- [8] 倪九派,魏朝富,谢德体,等.坡度对三峡库区紫色土坡面径流侵蚀的影响分析[J].泥沙研究,2009(2):29-33.
- [9] 刘青泉,陈力,李家春.坡度对坡面土壤侵蚀的影响分析[J].应用数学和力学,2001,22(5):449-457.
- [10] 靳长兴.论坡面侵蚀的临界坡度[J].地理学报,1995,50(3):234-239.
- [11] 李光录,吴发启,庞小明,等.泥沙输移与坡面降雨和径流能量的关系[J].水科学进展,2008,19(6):868-874.
- [12] 李占斌,鲁克新.黄土坡面土壤侵蚀动力过程试验研究[J].水土保持学报,2002,16(2):5-7.
- [13] 丁文峰.黄土区坡面径流侵蚀动力过程试验研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2001.
- [14] 李勉,姚文艺,陈江南,等.草被覆盖下坡沟系统坡面流能量变化特征试验研究[J].水土保持学报,2005,19(5):13-17.
- [15] 耿晓东,郑粉莉,张会茹.红壤坡面降雨入渗及产流产沙特征试验研究[J].水土保持学报,2009,23(4):39-43.
- [16] 盛贺伟,郑粉莉,蔡强国,等.降雨强度和坡度对粘黄土坡面片蚀的影响[J].水土保持学报,2016,30(6):13-17.
- [17] 王刘华,姚超伟,宋飞.黄土边坡坡面冲刷的临界坡度[J].灾害学,2012,27(4):25-27.
- [18] 田凤霞,王占礼,牛振华,等.黄土坡面土壤侵蚀过程试验研究[J].干旱地区农业研究,2005,23(6):141-146.
- [19] 谭宽祥.黄土高原黄土土流与坡度关系的研究[J].水土保持通报,1990,10(4):13-15.
- [20] 范荣生,李占斌.用于降雨侵蚀的人工模拟降雨装置试验研究[J].水土保持学报,1991,5(2):38-45.
- [21] 魏霞,李勋贵,李占斌.黄土凸型复合坡面径流能量变化特征试验研究[J].水土保持学报,2014,28(6):71-76.
- [22] Xu G, Tang S, Lu K, et al. Runoff and sediment yield under simulated rainfall on sand-covered slopes in a region subject to wind-water erosion[J]. Environmental Earth Sciences, 2015,74(3):2523-2530.
- [23] 张辉,李鹏,汤珊珊,等.多场次降雨条件下覆沙坡面的径流产沙特性试验研究[J].泥沙研究,2016(6):59-65.
- [24] 陈正发,夏清,史东梅,等.基于模拟降雨的土壤表土结皮特征及坡面侵蚀响应[J].水土保持学报,2011,25(4):6-11.
- [25] 程琴娟,蔡强国,李家永.表土结皮发育过程及其侵蚀响应研究进展[J].地理科学进展,2005,24(4):114-122.
- [26] 吴发启,范文波.土壤结皮对降雨入渗和产流产沙的影响[J].中国水土保持科学,2005,3(2):97-101.
- [27] Gómez J A, Nearing M A. Runoff and sediment losses from rough and smooth soil surfaces in a laboratory experiment[J]. Catena, 2005,59(3):253-266.
- [28] 王茹.不同坡度条件下紫色土坡面土壤侵蚀特征研究[D].重庆:西南大学,2013.
- [29] 王瑄,李占斌,尚佰晓,等.坡面土壤剥蚀率与水蚀因子关系室内模拟试验[J].农业工程学报,2008,24(9):22-26.