

坡面植被格局对坡沟系统能量调控及水沙响应关系的影响

苏远逸¹, 李鹏¹, 李占斌^{1,2}, 任宗萍¹, 肖列¹, 李聪³, 汤珊珊¹, 王添¹, 张祎¹

(1. 西安理工大学, 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 西安 710048; 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; 3. 河南黄河水文勘测设计院, 郑州 450004)

摘要: 通过室内放水冲刷试验, 研究在坡沟系统土壤侵蚀过程中, 不同坡面植被格局对能量的调控作用及其对水沙响应关系的影响, 并建立不同坡面植被格局下基于能量参数的侵蚀产沙方程, 深入了解能量与侵蚀产沙之间的响应关系。结果表明: (1) 相比于裸坡, 在坡面有植被覆盖的情况下, 径流功率大幅度降低, 植被能够有效地削减径流功率, 起到保护土壤的作用; 在不同时刻下, 不同坡面植被格局的单位水流功率在坡面较小, 进入沟道后单位水流功率急剧上升, 呈“N”形曲线分布, 经过 SPSS 软件分析, 坡面植被格局对单位水流功率的影响不显著 ($P > 0.05$); 坡面植被格局对径流能耗的变化基本没有影响, 不同时刻, 不同坡面植被格局下坡面上每个断面的径流能耗在 1 500~2 000 J 保持不变, 在进入沟道后径流能耗急剧上升, 达到 4 800 J 左右; (2) 在坡沟系统的坡面上种植植被可以有效地起到蓄水减沙的作用, 当草带位置距坡顶 2 m 时 (格局 F) 的蓄水效益最好, 达到 19.07%, 当草带位置距坡顶 6 m 时 (格局 B) 的减沙效益高达 69.02%; (3) 不同坡面植被格局下坡沟系统的累积产流量与累积产沙量之间满足 $M=aQ^b$ 的幂函数形式, 而且相关系数 a 和 b 可以作为蓄水减沙效益的指示指标; (4) 在不同坡面植被格局下, 坡面平均输沙率与径流功率满足 $D=c\omega+d$ 线性函数关系。

关键词: 坡面植被格局; 放水冲刷; 坡沟系统; 能量调控; 水沙关系

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)05-0032-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.05.006

Effects of Slope Vegetation Patterns on Energy Regulation and Water-Sediment Response Relations in Slope-Gully System

SU Yuanyi¹, LI Peng¹, LI Zhanbin^{1,2}, REN Zongping¹, XIAO Lie¹,

LI Cong³, TANG Shanshan¹, WANG Tian¹, ZHANG Yi¹

(1. Key Lab Cultivating Base of Eco-hydrology Engineering of Northwest Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau,

Yangling, Shaanxi 712100; 3. Yellow River Hydrological Survey and Design Institute of Henan Province, Zhengzhou 450004)

Abstract: In order to investigate the effects of different slope vegetation patterns on energy regulation and the relationships between water and sediment, an indoor scouring experiment was set up. The erosion and sediment yield equation under different slope vegetation patterns was established based on the energy parameter for the in-depth understanding of the response relationships between energy and sediment yield. The results showed that: (1) Compared to the bare slope, the runoff power greatly reduced under slope vegetation cover condition, indicating that vegetation could effectively reduce runoff power and protect the soil. At different times, unit stream power was small in the slope, but rapidly increased when flowing into the trench, showing a “N” shape curve. SPSS analysis showed that effects of slope vegetation patterns on the unit stream power was not significant ($P > 0.05$), and little effect on the change of the runoff energy consumption was observed. At different times, the slope surface runoff energy consumption on each section in different slope vegetation patterns ranged in 1 500~2 000 J, but increased sharply in the channel, up to about 4 800 J. (2) Planting vegetation on the slope of slope gully system could effectively play an important role of water storage and sediment reduction. When the distance between grasses strip to the slope top was 2 m (pattern F), the water storage efficiency was up to 19.07%, and when the distance was 6 m (pattern B), the

收稿日期: 2017-04-14

资助项目: 国家自然科学基金项目 (41330858, 41471226, 41601291); 国家重点研发计划项目 (2016YFC0402404); 西安理工大学博士创新基金项目 (310-252071505)

第一作者: 苏远逸 (1993—), 男, 陕西宝鸡人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: suyuan yi666@163.com

通信作者: 李鹏 (1974—), 男, 山东烟台人, 教授, 博士生导师, 主要从事水土资源与环境研究。E-mail: lipeng74@163.com

sediment reduction rate was as high as 69.02%. (3) The cumulative runoff yield and cumulative sediment yield in different slope vegetation patterns showed a functional relationship of $M=aQ^b$, and the correlation coefficient a and b could be used as indicators of water storage and sediment reduction efficiency. (4) There was a linear relationship between runoff power and average sediment transport rates in different slope vegetation patterns, the functional form was $D=c\omega+d$.

Keywords: slope vegetation pattern; water erosion; slope-gully system; energy regulation; water sediment relationship

黄土高原是我国水土流失最严重的地区之一,已有研究表明,该地区的侵蚀产沙主要来源于坡沟系统^[1]。作为黄土高原地区独有的问题,坡沟系统的侵蚀产沙特征不同于一般的坡面,因此坡沟系统一直以来是人们关注的重点^[2-8]。大部分学者研究认为,在坡面上种植植被能够有效地抑制水土流失,并且不同植被类型以及不同植被覆盖度对坡面土壤侵蚀的影响也不尽相同^[9]。已有研究表明,植被覆盖度对控制水土流失的效果存在对应关系,但是坡面侵蚀量随着植被覆盖度的增加并不总是呈正相关关系^[10-14]。韩鹏等^[15]以当地的经济状况为基础,结合环境现状分析得出,当地植被覆盖度为25%时,植被能够有效地发挥蓄水保土的作用。并且进一步证实,在相同植被覆盖度下,不同植被格局对坡面侵蚀的影响也有所不同^[16-17],因此在最佳的植被覆盖度下,合理的植被格局是治理水土流失的关键。

上坡来水是影响黄土高原地区坡面侵蚀产沙的重要因素,从能量的角度来看,土壤侵蚀本质是径流沿坡面向下运动过程中,径流克服多种阻力,并且消耗能量做功的过程^[18]。因此,在土壤侵蚀过程中同样也遵循能量守恒定律^[19]。但是,就目前的研究结果来看,针对坡面侵蚀的能量变化特征,尤其是对黄土高原坡沟系统坡面侵蚀能量的变化规律缺少系统的研究。与此同时,作为黄土高原独有的问题,针对坡沟系统在侵蚀产沙过程中的水沙关系研究甚少。因此,本文通过放水冲刷试验,分析在坡沟系统土壤侵蚀过程中,不同坡面植被格局对能量的调控作用及对水沙关系的影响,并建立不同坡面植被格局下基于能量参数的侵蚀产沙方程,深入了解能量与侵蚀产沙之间的响应关系,揭示不同坡面植被格局对水土流失的调控作用,为黄土高原坡沟系统的治理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤选用西安郊区的黄土,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 6.21%,0.002~0.05 mm 的颗粒占 91.39%,土壤质地为粉砂质壤土。

1.2 试验方法

黄土高原沟壑纵横,依据实际情况^[20],建立坡沟

系统概化物理模型(图1)。坡沟系统分为坡面和沟道2部分,试验土槽采用13 m×1 m(长×宽)的钢制土槽,其中坡面部分的坡度为12°,长8 m,沟道部分的坡度为25°,长5 m。将土槽用塑料板隔开,分为左槽和右槽2部分。随后将坡沟系统平均划分为13个过水断面,将坡顶处的第1个过水断面记为1-1断面,沿程依次为2-2断面,3-3断面,……,13-13断面。在模型顶部放置2个20 cm×20 cm×50 cm(长×宽×深)的水槽,控制水流在进入坡沟系统时的流速相同。

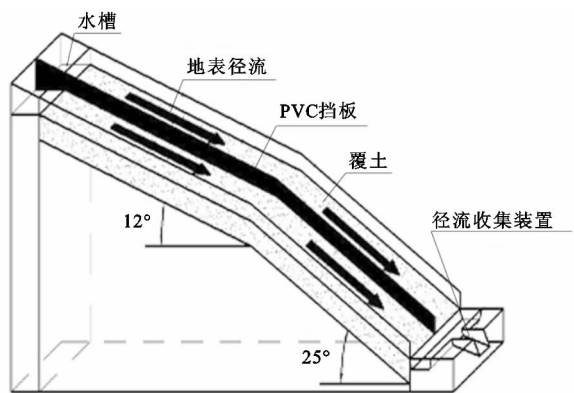


图1 坡沟系统放水冲刷试验示意

在装土之前,先在土槽底部铺20 cm的天然沙,保证土壤的透水性 with 野外相似。然后分层装入试验用土,每层5 cm,共4层,控制土壤容重在1.3 g/cm³左右,初始土壤含水率在20%左右。试验设计6种坡面植被格局(图2),选用马尼拉草,根据黄土丘陵沟壑区干旱缺水的情况,并结合已有植被蓄水保土效益的研究^[15,21],设定放水冲刷试验的植被覆盖度为25%,草带根系深度为20 cm,大小为2 m×1 m(长×宽)。根据试验设计的坡面植被格局,填土时在对应的位置预留10 cm厚的空间,填土结束后将草带移植到该部位,并将连接处的空隙填土压实,防止草带滑动。

试验从2014年4月开始至5月结束,试验场地位于西安理工大学雨洪侵蚀大厅。具体试验设计如表1所示。在率定好放水冲刷流量后,开始进行试验。当集流槽处开始产流后,每分钟收集1次径流泥沙样,先用锥形瓶收集部分样品,再用塑料桶收集其余浑水。试验采用烘干法测得每分钟锥形瓶内的产

沙量,用锥形瓶内浑水总体积减去烘干后称得的泥沙体积得到每分钟锥形瓶内的产流量,根据换算公式计算得出每分钟的总产流量与总产沙量。每场冲刷试验在开始产流后持续 30 min,每个格局分左槽和右槽互为重复,最后采用 2 次试验的平均值。

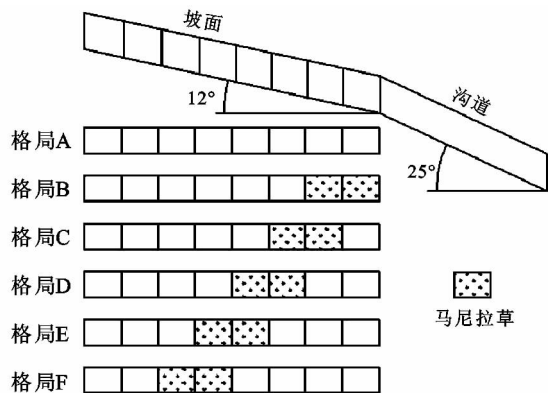


图 2 坡面植被格局布设位置示意

表 1 放水冲刷一坡面植被格局设计

坡面植被格局	冲刷流量/ (L · min ⁻¹)	草带相距坡顶距离/m	植被覆盖度/%	时间/ min
A	16	裸坡	0	30
B	16	6	25	30
C	16	5	25	30
D	16	4	25	30
E	16	3	25	30
F	16	2	25	30

1.3 研究方法

1.3.1 径流功率计算 径流功率是作用于单位面积的水流所消耗的功率,表示了水流在一定高度下顺坡流动时具有的势能,其计算公式为^[22]:

$$\omega = \tau V = \gamma h S V \quad (1)$$

式中: ω 为径流功率[N/(m · s)]; τ 为径流剪切力(N); V 为径流表面流速(m/s); γ 为水流容重(kg/m³); h 为过水断面平均水深(m); S 为地面坡度(°)。

1.3.2 单位水流功率计算 单位水流功率是作用于表面的单位重量水体消耗的功率,表达了单位重量水体具有的势能随时间的变化率,其计算方法为^[23-24]:

$$P = VS \quad (2)$$

式中: P 为单位水流功率(m/s); V 为径流表面流速(m/s); S 为地面坡度(°)。

1.3.3 径流能耗计算 径流能耗表示水流在坡面侵蚀产沙过程中所消耗的总能量。李鹏等^[25]利用能量守恒定律建立了径流能耗的计算公式。本试验以坡沟系统底部的水平面为零参考,分析水流自坡面顶端到坡面上任意断面间的能量损耗,其计算公式为:

$$\Delta E_{\text{耗}} = \int_0^t \int_0^{(l_1+l_2)} \{ [\rho g q (l_1 \sin \alpha + l_2 \sin \beta) + 1/2 \rho q V_0^2] - [\rho g q (l_1 + l_2 - x) \sin \beta + 1/2 \rho q V^2] \} dl dt \quad (3)$$

式中: $\Delta E_{\text{耗}}$ 为径流能耗(J); t 为试验持续时间(s); l_1 、 l_2

分别为坡沟系统的坡面长度和沟道长度(m); ρ 为水的密度(kg/m³); g 为重力加速度(m/s²); q 为任意断面处的径流量(m³); α 和 β 分别为坡面和沟道的坡度(°); x 为任意断面到坡顶的距离(m); V_0 和 V 分别是坡顶的平均流速和任意断面的平均流速(m/s); l 为坡沟系统的总长度($l = l_1 + l_2$, m)。

1.3.4 数据处理及分析方法 使用 Excel 2016 软件对试验数据进行统计,并用 Origin 8.5 软件制作图表。分析数据及建立回归方程采用 SPSS 21.0 软件。

2 结果与分析

2.1 坡面植被格局对坡沟系统侵蚀能量的调控作用

在坡沟系统土壤侵蚀过程中,因坡面有植被覆盖,会消耗径流沿坡面向下所具有的能量。然而由于植被处在坡面的不同位置,对能量消耗的影响也不同。本研究选择径流功率、单位水流功率和径流能耗 3 个能量参数^[26],分析其时空变化特征。

2.1.1 不同坡面植被格局下能量的时间变化特征 在坡沟系统中,水流经过有植被覆盖的坡面后,能量也发生了改变。图 3 为不同坡面植被格局下坡沟系统 9—9 过水断面和 13—13 过水断面的径流功率、单位水流功率和径流能耗随产流时间的变化特征。9—9 断面是水流进入沟道后经过的第 1 个断面,而 13—13 断面是整个坡沟系统的最后一个断面,因此选择这 2 个特征断面作为研究对象。在坡面侵蚀过程中,裸坡的径流功率高于有植被覆盖的坡面,并且在坡面种植植被后,径流功率大幅降低,但是在不同坡面植被格局下,径流功率的降低幅度不同。不同坡面植被格局下,单位水流功率随产流时间的变化较为复杂,9—9 断面的单位水流功率为 0.1~0.3 m/s,13—13 断面的单位水流功率为 0.15~0.35 m/s。径流能耗随产流时间的变化规律为 13—13 断面的径流能耗普遍高于 9—9 断面,这是因为过水断面所处的位置不同造成的。

为了进一步探究不同断面、不同坡面植被格局下径流功率、单位水流功率和径流能耗的变化规律,分别计算了三者的平均值,并以裸坡(格局 A)为对照,得到其变化幅度。由表 2 可知,相比于裸坡,不同断面、不同坡面植被格局下的径流功率均有大幅降低,其中格局 B 的径流功率的降幅最大,达到 89% 以上。坡面种植植被后,格局 B、C 和 D 在不同断面的单位水流功率均有所降低,但格局 E 和 F 却出现了增大的现象,并且格局 F 在不同断面的增幅均达到 10% 以上。不同断面、不同坡面植被格局条件下,径流能耗的变化幅度极小,但是 9—9 断面的径流能耗保持在 3 350 J 左右,而 13—13 断面的径流能耗保持在 4 750 J 左右,这是因为径流能耗与过水断面所处的位置有关,过水断面所处的位置越高,径流能耗越小。

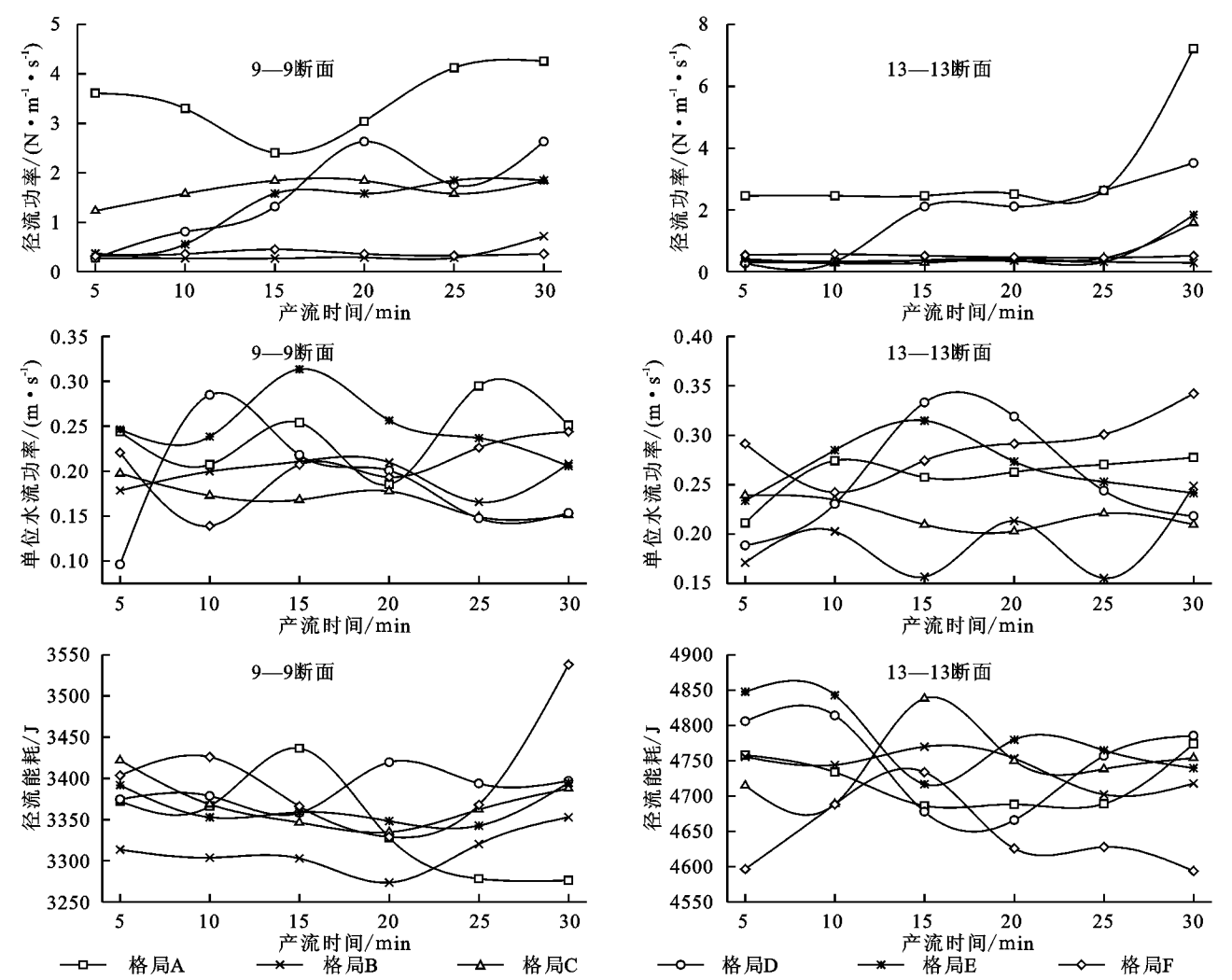


图 3 不同断面、不同坡面植被格局下径流功率、单位水流功率和径流能耗随产流时间的变化

表 2 不同断面、不同坡面植被格局径流功率、单位水流功率和径流能耗的变化幅度 单位: %

能量参数	过水断面	坡面植被格局				
		B	C	D	E	F
径流功率	9-9	89.4	49.8	52.4	60.7	89.0
	13-13	89.9	83.2	44.5	81.8	84.5
单位水流功率	9-9	18.3	29.2	23.3	-4.3	-14.3
	13-13	26.1	15.3	1.3	-3.1	-12.2
径流能耗	9-9	-0.92	0.84	1.35	0.68	1.89
	13-13	0.41	0.56	0.64	1.29	-1.62

注:变化幅度=[格局 B(格局 C、格局 D、格局 E、格局 F)-格局 A]/格局 A,正值表示增加,负值表示减少。下同。

2.1.2 不同坡面植被格局下能量的空间变化特征

在坡沟系统侵蚀产沙过程中,水流流速有 2 个增长突出的趋势,一次是在出现产流后的第 15 min,另一次是在出现产流后的第 25 min,因此选取产流后的第 15 min 和第 25 min 两个代表性的时间点作为研究对象。图 4 为不同坡面植被格局下,坡面开始产流后第 15 min 和第 25 min 的径流功率、单位水流功率和径流能耗在每个过水断面的变化图。在不同时刻下,相同坡面植被格局的径流功率沿程变化趋势相同。水流经过有植被覆盖的坡面,水流流速大幅降低,从而

导致裸坡(格局 A)坡面上的径流功率高于其他坡面。当水流进入沟道后,流速增加,径流功率增大,但是格局 B 和 F 的径流功率在进入沟道后没有明显的变化。格局 B 的草带位置位于坡沟系统的交界处,上方来水来沙经过草带被大量拦蓄,且由于草带的存在增加坡面粗糙度,使水流流速减缓,径流挟沙能力减弱,因此径流功率在进入沟道后没有显著变化。格局 F 的草带位置相距坡顶距离较短,上方来水来沙量相对较少,且由于草带的存在,拦截了上方的来水来沙,使上方来水量多用于下渗而形成的径流较少,同时降低了流速,径流挟沙能力减弱,所以径流功率在进入沟道后也没有显著变化。在不同时刻、不同坡面植被格局条件下,坡沟系统的单位水流功率差别不大,不同时刻的单位水流功率在进入沟道后急剧上升,呈先增大后减小再增大的趋势。不同时刻、不同坡面植被格局下径流能耗沿程变化趋势大致相同,说明坡面植被格局对径流能耗影响不大。

为了进一步探究不同时刻、不同坡面植被格局下径流功率、单位水流功率和径流能耗的变化规律,分别计算了 3 者的平均值,并以裸坡(格局 A)为对照,

得到其变化幅度。由表 3 可知,相比于裸坡,不同时刻、不同坡面植被格局下的径流功率均有大幅降低,并且降幅均保持在 70% 以上,其中格局 F 的降幅最大,不同时刻的降低幅度均达到 92% 以上。坡面种植植被后,不同坡面植被格局下第 25 min 的单位水流功率均有小幅度降低,其中格局 B、C 和 D 的降幅较大为 20% 左右,格局 E 和 F 的降幅较小,分

别为 3.3% 和 4.8%;在第 15 min,格局 B 和 C 的单位水流功率降低,而格局 D、E 和 F 的单位水流功率均有不同程度的增加。在不同时刻、不同坡面植被格局条件下,径流能耗相比于裸坡的变化幅度极小,为-1%~1%,结合不同断面、不同坡面植被格局条件下径流能耗的变化规律,得出坡面植被格局对径流能耗的影响甚微。

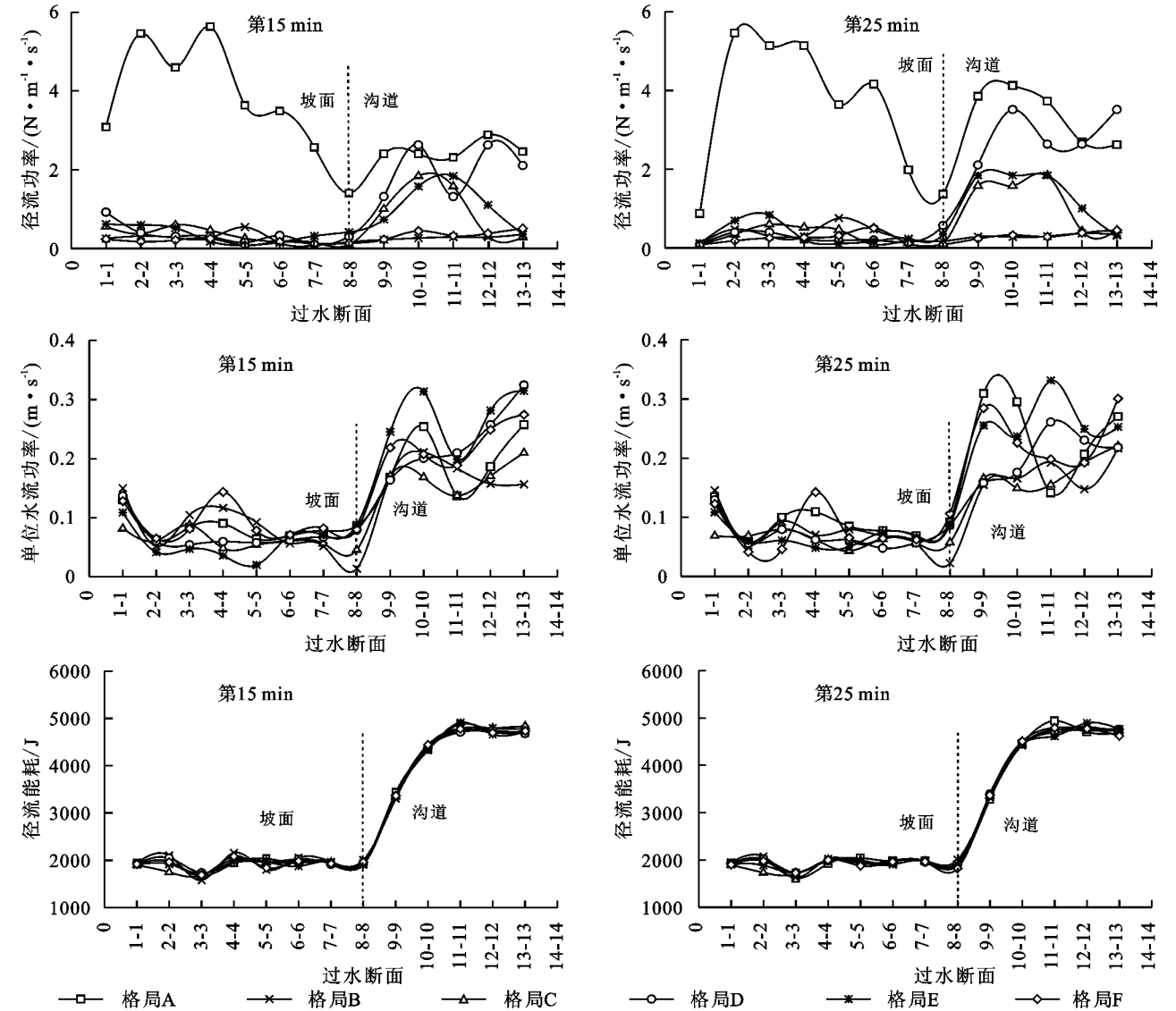


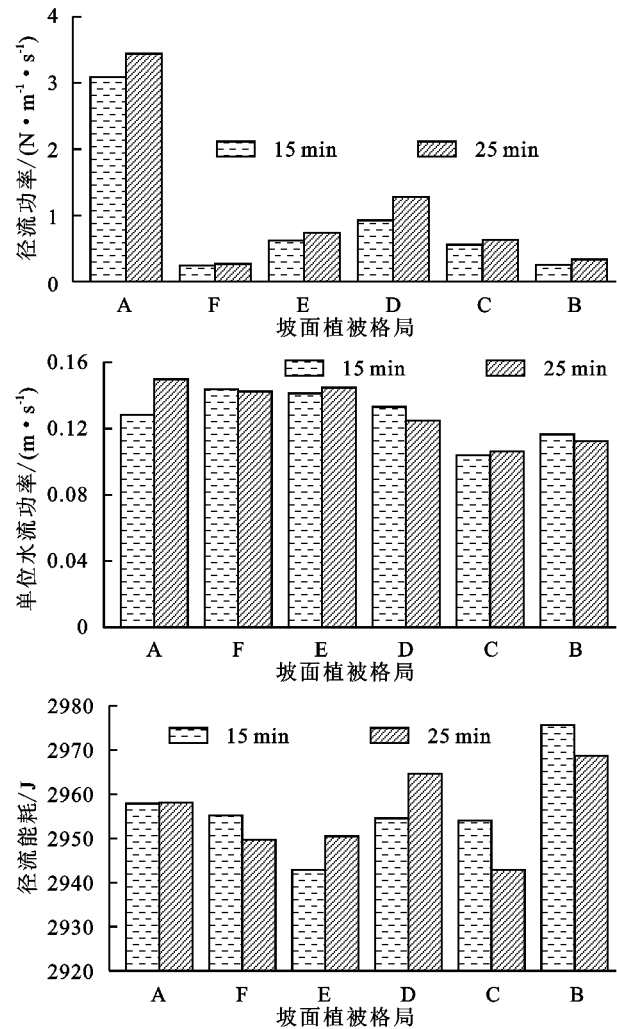
图 4 不同时刻、不同坡面植被格局下径流功率、单位水流功率和径流能耗的沿程变化

表 3 不同时刻、不同坡面植被格局径流功率、单位水流功率和径流能耗的变化幅度		单位: %				
能量参数	产流时间	坡面植被格局				
		B	C	D	E	F
径流功率	第 15 min	91.7	82.0	70.1	79.9	92.2
	第 25 min	90.2	81.7	72.9	78.6	92.2
单位水流功率	第 15 min	9.1	19.0	-3.9	-10.1	-12.0
	第 25 min	24.8	29.0	16.7	3.3	4.8
径流能耗	第 15 min	0.60	-0.13	-0.11	-0.51	-0.09
	第 25 min	0.36	-0.51	0.22	-0.26	-0.29

不同时刻、不同断面条件下,除裸坡(格局 A)外,径流功率均随着草带位置与坡顶距离的增加呈先增加后减小的趋势,并且在距坡顶 2 m 和 6 m 时,径流功率最小,因此格局 B 或 F 能够有效地削减径流功率,起到保护土壤的作用。不同时刻、不同断面条件下,单位水流功率随着草带位置与坡顶距离的增加均呈先增加后减小的趋势,经过 SPSS 分析,坡面植被格局对单位水流功率的影响不显著($P>0.05$)。在不同时刻、不同断面条件下,径流能耗随着草带位置与坡顶距离的增加基本保持不变,说明坡面植被格局对径流

2.1.3 坡面植被格局对能量的影响 由图 5 可知,

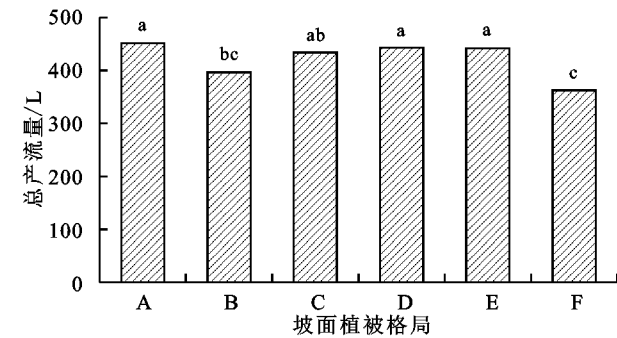
能耗的影响甚微。径流能耗在 9—9 断面和 13—13



断面的差异较大,这是由于断面所处位置造成的。

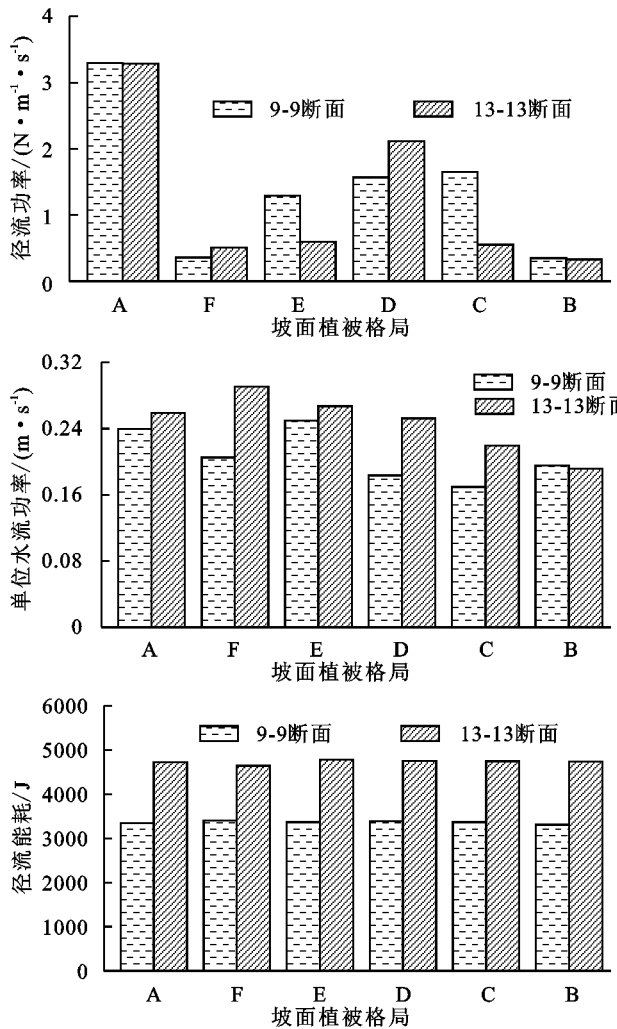
2.2 坡面植被格局对坡沟系统水沙关系的影响

2.2.1 坡面植被格局对坡沟系统总产流产沙量变化的影响 在土壤侵蚀过程中,坡面侵蚀程度可以用总产流量和总产沙量来表示。由图 6 可知,格局 B 和 F 的总产流量与格局 A 有显著差异,其中格局 F 与



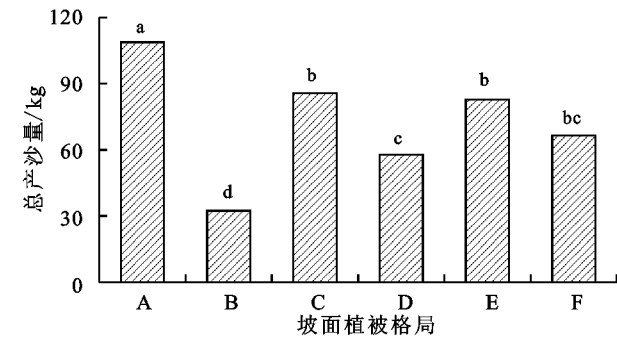
格局 A 的差异性最大。对于有植被覆盖的坡面,不同坡面植被格局下总产沙量与裸坡均有显著差异,其中格局 B 与格局 A 的差异性最大。经分析得出,坡面植被格局对坡面总产流量和总产沙量均有显著性影响。

格局 A 的差异性最大。对于有植被覆盖的坡面,不同坡面植被格局下总产沙量与裸坡均有显著差异,其中格局 B 与格局 A 的差异性最大。经分析得出,坡面植被格局对坡面总产流量和总产沙量均有显著性影响。



格局 A 的差异性最大。对于有植被覆盖的坡面,不同坡面植被格局下总产沙量与裸坡均有显著差异,其中格局 B 与格局 A 的差异性最大。经分析得出,坡面植被格局对坡面总产流量和总产沙量均有显著性影响。

格局 A 的差异性最大。对于有植被覆盖的坡面,不同坡面植被格局下总产沙量与裸坡均有显著差异,其中格局 B 与格局 A 的差异性最大。经分析得出,坡面植被格局对坡面总产流量和总产沙量均有显著性影响。



为了更加直观地显示不同坡面植被格局对坡沟系统蓄水减沙的效果,以裸坡(格局 A)作为对照,计算不同格局下蓄水减沙的效益(表 4)。不同坡面植被格局下的总产流和总产沙量与裸坡相比均有不同程度的降低,说明坡面种植植被,可以有效的起到涵养水源、拦蓄泥沙的作用。不同格局的蓄水效益大小依次为格局 F>格局 B>格局 C>格局 E>格局 D,即格局 F 的蓄水效果最好,蓄水效益达到 38.53%。不同格局的减沙效益大小依次为格局 B>格局 D>格局 F>格局 E>格局 C,即格局 B 的减沙效益最

好,减沙效益高达 69%以上。

表 4 不同坡面植被格局下蓄水减沙效益

单位: %		
植被格局	蓄水效益	减沙效益
B	11.71	69.02
C	3.95	19.80
D	0.51	46.48
E	0.94	23.14
F	19.07	38.53

2.2.2 坡面植被格局对坡沟系统累积产流量与累积产沙量关系的影响 坡沟系统径流和泥沙的关系较为复杂,但是在不同坡面植被格局下都存在较好的水沙关系^[27]。本研究将不同坡面植被格局下的累积产流量与累积产沙量进行函数拟合和对比,发现累积产流量与累积产沙量之间均呈幂函数关系(表 5),函数关系式为: $M=aQ^b$ 。式中: M 为累积产沙量(kg); Q 累积产流量(L); a 和 b 为相关系数。

表 5 累积产流量与累积产沙量的关系

植被格局	拟合方程	拟合度 R^2
A	$M=1.151Q^{0.7981}$	0.9749
B	$M=0.7099Q^{0.5625}$	0.8983
C	$M=0.7425Q^{0.7849}$	0.9996
D	$M=1.0426Q^{0.6609}$	0.9992
E	$M=0.896Q^{0.7571}$	0.9916
F	$M=0.6867Q^{0.7539}$	0.9766

结合不同坡面植被格局下累积产流量与累积产沙量的关系(表 5、图 7)以及植被对坡沟系统蓄水减沙的实际意义,可以定义系数 a 为蓄水能力系数, a 值越小则蓄水能力越强。由表 5 可知, a 值的大小为 $F < B < C < E < D < A$, 即蓄水效果为格局 F > 格局 B > 格局 C > 格局 E > 格局 D > 格局 A。 b 为减沙能力系数, 一般为 0.5~1.0, b 值越小则减沙能力越强, 由表 5 可知, b 值的大小为 $A < B < D < F < E < C$, 即减沙效果为格局 B > 格局 D > 格局 F > 格局 E > 格

局 C > 格局 A。通过对比发现,以 a 和 b 作为相关系数得到的蓄水减沙效益与不同坡面植被格局下的实际蓄水减沙效益完全相符。因此,不同坡面植被格局下坡沟系统累积产流量与累积产沙量的相关关系可用幂函数拟合,而且相关系数 a 和 b 可以作为蓄水减沙效益的指示指标。

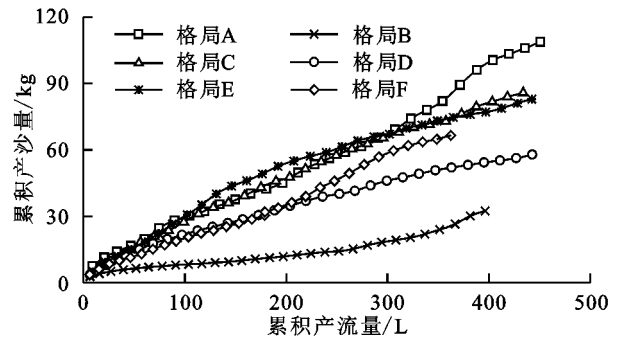


图 7 不同坡面植被格局条件下累积产流量与累积产沙量的关系

2.3 不同坡面植被格局下坡沟系统侵蚀能量与侵蚀产沙响应关系

在土壤侵蚀过程中,径流搬运泥沙需要消耗能量,消耗能量的过程中功率也在变化。由于坡面植被格局对径流能耗的影响甚微,因此在不同坡面植被格局条件下,选择径流功率和单位水流功率两个能量参数,分别建立与坡面平均输沙率的响应关系。

由图 8 可知,坡面平均输沙率总体上随着径流功率的增大而增大。统计分析结果表明,径流功率与平均输沙率的关系可用线性方程描述:

$$D=0.62\omega+1.84 \quad R^2=0.63 \quad (4)$$

式中: D 为平均输沙率(kg/min); ω 为径流功率[N/(m·s)]。

通过线性回归分析,发现单位水流功率与坡面平均输沙率的拟合度较低。因此,在不同坡面植被格局条件下,径流功率与坡沟系统侵蚀动力学过程的拟合关系较好,可以合理预测坡沟系统坡面的输沙能力。

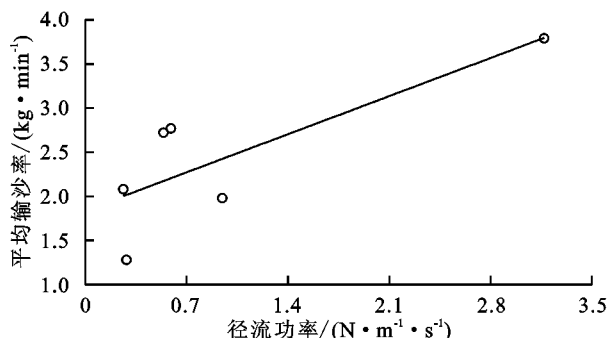


图 8 平均输沙率与径流功率和单位水流功率的关系

3 结论

(1)与裸坡相比,在坡面有植被覆盖的情况下,径流功率大幅度降低。在不同断面下,格局 B 的径流功率相比于裸坡降幅最大;在不同时刻下,相同坡面

植被格局的径流功率沿坡面变化趋势相同,并且格局 F 降幅最大,达到 92%以上。在坡面上种植植被,能够有效地削减径流功率,起到保护土壤的作用。

(2)在不同断面下,不同坡面植被格局的单位水

流功率随产流时间的变化较为复杂。在不同时刻下,相同坡面植被格局的单位水流功率变化趋势基本相同;不同坡面植被格局的单位水流功率在坡面较小,进入沟道后单位水流功率急剧上升,呈“N”形曲线分布。在不同时刻、不同断面条件下,单位水流功率随着草带位置与坡顶距离的增加均呈先增加后减小的趋势。经过 SPSS 分析,坡面植被格局对单位水流功率的影响不显著($P>0.05$)。

(3)在不同断面下,不同坡面植被格局的径流能耗变化幅度极小;在不同时刻下,不同坡面植被格局径流能耗沿坡面的变化趋势大致相同;在不同时刻、不同断面条件下,径流能耗随着草带位置与坡顶距离的增加基本保持不变,综合得出坡面植被格局对径流能耗的影响甚微。

(4)不同坡面植被格局下的总产流和总产沙量与裸坡(格局 A)相比均有不同程度的降低,通过单因素方差检验,分析得出坡面植被格局对坡面总产流量与总产沙量均有显著性影响,说明在坡面种植植被,可以有效的起到涵养水源、拦蓄泥沙的作用。不同坡面植被格局下坡沟系统累积产流量与累积产沙量的相关关系可用幂函数拟合,结合函数关系以及植被对坡沟系统蓄水减沙的实际意义,可以定义系数 a 为蓄水能力系数, a 值越小则蓄水能力越强; b 为减沙能力系数,一般为 $0.5\sim 1.0$, b 值越小则减沙能力越强。

(5)在不同坡面植被格局下,径流功率与坡面平均输沙率呈线性函数关系,并且径流功率与坡沟系统侵蚀动力学过程的拟合关系较好,可以合理预测坡沟系统的输沙能力。

参考文献:

- [1] 魏霞,李占斌,李勋贵.黄土高原坡沟系统土壤侵蚀研究进展[J].中国水土保持科学,2012,10(1):108-113.
- [2] 魏霞,李勋贵,李占斌,等.淤地坝对黄土高原坡沟系统重力侵蚀调控研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2009,41(6):856-861.
- [3] 李强,李占斌,鲁克新,等.黄土丘陵区不同植被格局产流产沙实验研究[J].中国农村水利水电,2008(4):100-103.
- [4] 李勉,姚文艺,陈江南,等.坡面草被覆盖对坡沟侵蚀产沙过程的影响[J].地理学报,2005,60(5):725-732.
- [5] 李占斌,朱冰冰,李鹏.土壤侵蚀与水土保持研究进展[J].土壤学报,2008,45(5):802-809.
- [6] 刘贤赵,黄明斌,康绍忠.黄土沟壑区小流域水土保持减水效益分析[J].应用基础与工程科学学报,2005,8(4):354-361.
- [7] 任海,彭少麟,陆宏芳.退化生态系统恢复与恢复生态学[J].生态学报,2004,24(8):1756-1764.
- [8] 程圣东,李鹏,李聪,等.降雨-植被格局耦合作用对坡沟系统水沙特征影响[J].应用基础与工程科学学报,2016,24(2):230-241.
- [9] 李鹏,李占斌.植被保持水土有效性研究进展[J].水土保持研究,2002,9(1):76-80.
- [10] 吴卿,杨春霞,甄斌,等.草被覆盖度对黄土坡面径流产沙影响的试验研究[J].中国水土保持,2010(9):56-58.
- [11] 张晓明,余新晓,武思宏,等.黄土区森林植被对坡面径流和侵蚀产沙的影响[J].应用生态学报,2005,16(9):1613-1617.
- [12] 肖培青,姚文艺,申震洲,等.植被影响下坡面侵蚀临界水流能量试验研究[J].水科学进展,2011,22(2):229-234.
- [13] 杨春霞,肖培青,甄斌,等.野外不同被覆坡面产流产沙特征[J].水土保持学报,2012,26(4):28-31.
- [14] 李元寿,王根绪,王一博,等.长江黄河源区覆被变化下降产的产流产沙效应研究[J].水科学进展,2006,17(5):616-623.
- [15] 韩鹏,李秀霞.黄河流域土壤侵蚀及植被水保效益研究[J].应用基础与工程科学学报,2008,16(2):181-190.
- [16] 亢伟,李占斌,李鹏,等.不同植被配置对坡面土壤侵蚀的影响[J].西安理工大学学报,2007,23(3):261-264.
- [17] 游珍,李占斌,蒋庆丰.坡面植被分布对降雨侵蚀的影响研究[J].泥沙研究,2005(6):40-43.
- [18] 魏霞.黄土高原坡沟系统侵蚀产沙动力过程与调控研究[D].西安:西安理工大学,2008.
- [19] 鲁克新.陡坡薄层水流侵蚀动力过程试验研究[D].西安:西安理工大学,2001.
- [20] 高建恩,杨世伟,吴普特,等.水力侵蚀调控物理模拟试验相似律的初步确定[J].农业工程学报,2006,22(1):27-31.
- [21] Rey F. Effectiveness of vegetation barriers for marly sediment trapping [J]. Earth Surface Processes and Landforms,2004,29(9):1161-1169.
- [22] 丁文斌,史东梅,何文健,等.放水冲刷条件下工程堆积体边坡径流侵蚀水动力学特性[J].农业工程学报,2016,32(18):153-161.
- [23] 蒋芳市,黄炎和,林金石,等.坡面水流分离崩岗崩积体土壤的动力学特征[J].水土保持学报,2013,27(1):86-89,229.
- [24] 赵海滨,闫国新,姚文艺,等.黄土坡面径流输沙能力试验研究[J].水土保持学报,2009,23(6):41-44.
- [25] 李鹏,李占斌,郑良勇,等.坡面径流侵蚀产沙动力机制比较研究[J].水土保持学报,2005,19(3):66-69.
- [26] 李聪.植被格局对坡沟系统侵蚀输沙过程调控作用试验研究[D].西安:西安理工大学,2015.
- [27] 郑明国,蔡强国,王彩峰,等.黄土丘陵沟壑区坡面水保措施及植被对流域尺度水沙关系的影响[J].水利学报,2007,38(1):47-53.