典型黑土区陡坡植草水土流失防治效果研究

杨庆楠，徐金忠，李志飞，侯淑艳，郝燕芳
（黑龙江省水利科学研究院 水土保持研究所，黑龙江 哈尔滨 150080）

摘　要：[目的] 研究陡坡生物防治与影响因素的变化关系，为侵蚀沟治理、水土保持植被措施配置等决策提供科学依据。[方法] 设置 2 个坡度，7 种草本植被配置模式，于 2018 年 6—9 月开展了自然小区水土流失监测。[结果] 1∶1.5 和 1∶1.2 坡比边坡草本建植当年分别较裸地平均减流 27%和 26%，减沙 52%和 21%，坡度由 34°增加到 40°，地表径流虽未增加，但土壤侵蚀量明显增加；影响产流产沙的降雨因子主要有雨量，I_{30}，E，EI_{30}，坡度变陡，相关性增强；建植草无芒雀麦和紫花苜蓿混播减流减沙效果最好，紫花苜蓿、无芒雀麦、早熟禾 3 种草种混播减流效果优于单播；1∶1.2 坡比边坡随着植被盖度的增加减沙效果逐渐增强，且在植被盖度大于 50%时减沙效果接近 1∶1.5 坡比边坡。[结论] 在无芒雀麦和紫花苜蓿混播草本配置下，1∶1.2 坡比削坡在侵蚀沟治理时可采用，能减少 20%的削坡占地面积。

关键词：陡坡；径流；输沙；降雨因子；草本配置
文献标识码：B　　**文章编号**：1000-288X(2019)06-0117-07　　**中图分类号**：S157.1

文献参数：杨庆楠，徐金忠，李志飞，等. 典型黑土区陡坡植草水土流失防治效果研究[J]. 水土保持通报，2019，39(6)：117-123. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2019.06.017；Yang Qingnan，Xu Jinzhong，Li Zhifei，et al. Effects of artificial grass on soil erosion control on steep slope in typical mollisols area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2019，39(6)：117-123.

Effects of Artificial Grass on Soil Erosion Control on Steep Slope in Typical Mollisols Area

Yang Qingnan，Xu Jinzhong，Li Zhifei，Hou Shuyan，Hao Yanfang
（*Institute of Soil and Water Conservation，Heilongjiang Province Hydraulic Research Institute，Harbin，Heilongjiang* 150080，*China*）

Abstract：[Objective] The relationship between biological measures and their influence factors on soil erosion on steep slopes were studied，in order to provide theoretical basis for gully control and vegetation measure allocation of soil and water conservation. [Methods] Two slope gradients and seven herb vegetation models were set up by small plots，and runoffs and soil losses of the plots were monitored from June to September in 2018. [Results] Compared to bare plot，the average runoff at 1∶1.5 and 1∶1.2 ratio slope with herb vegetation was declined by 27% and 26%，and the average soil loss reduced by 52% and 21%，respectively. As the slope steepness increased from 34° to 40°，runoff didn't show significant increase，but the amount of soil loss increased markedly. The dominant rainfall factors influencing runoff and sediment were precipitation，I_{30}，E and EI_{30}. The correlations among runoff，sediment and rainfall increased with the increase of slope steepness. The mixture of *Bromus inermis* and *Medicago sativa* L had the best effect on reducing runoff and sediment. The soil erosion control effect of mixed sowing of *Bromus inermis*，*Medicago sativa* L and *Poa annua* L was better than that of single sowing. With the increase of vegetation coverage，the sediment reduction effect of 1∶1.2 slope was gradually enhanced，and when the vegetation coverage was more than 50%，the effect of sediment reduction was close to 1∶1.5 slope. [Conclusion] Under the mixed herb configuration of *Bromus*

收稿日期：2019-05-09　　**修回日期**：2019-06-26
资助项目：国家重点研发计划重点专项子专题“黑土区典型切沟发育及其驱动因子研究”(2017YFC0504202)
第一作者：杨庆楠(1988—)，女(汉族)，黑龙江省哈尔滨市人，硕士研究生，研究方向为水土保持。E-mail：780423258@qq.com。

inermis and *Medicago sativa* L. the 1∶1.2 ratio slope could be used for gully erosion control, which could save 20% of the gully slope cutting area.

Keywords: steep slope; runoff; sediment transportation; rainfall factor; herbage configuration

东北黑土区已成为我国最大的商品粮基地,年商品粮输出量占全国总量的 1/3[1]。黑土资源由于不合理的过度开发利用,发生了严重的水土流失,导致黑土层变薄,土壤退化,沟壑纵横,其土壤侵蚀程度居世界四大黑土区之首[2]。黑土区侵蚀沟是由坡面上浅沟逐渐发育为切沟,在持续的集流汇水作用下,沟头延伸,沟岸扩张,不断发生上溯侵蚀和下切侵蚀形成的。同时在冻融作用下,侵蚀沟沟岸常发生坍塌。东北黑土区侵蚀沟多形成于坡耕地中,损毁耕地的同时,还造成大片耕地被切割成零散地块,妨碍农业生产时机械作业。侵蚀沟生态修复前需削坡,占用部分耕地,群众积极性和接受度很低,给侵蚀沟治理项目的实施增加难度[3-8]。在陡坡上建植人工草地,恢复植被,稳固沟道,是实现减少削坡占地的一项重要途径,相关研究在东北黑土区鲜有报道。本文通过 1∶1.5,1∶1.2 坡比 2 个坡度,建植 7 种不同草本植被下边坡的水土流失特征及其影响因素的研究,筛选出适于陡坡种植且具有较强的水土保持作用的草本植物,以期为侵蚀沟治理、水土保持植被措施配置等提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地点为黑龙江省水土保持科技示范园内,地理位置位于黑龙江省宾县宾州镇城西 4.5 km (E127°24′47″,N45°44′57″),属丘陵漫岗地貌,土壤类型为白浆土,0—20 cm 土壤容重 1.10 g/cm^3,有机质含量 26.42 g/kg,全氮含量 1.43 g/kg,pH 值为 6.07。属中温带大陆性季风气候区,多年平均降雨量 590 mm,主要集中在 7—9 月份,其降雨量占全年降水量的 70%以上,年平均温度 3.5 ℃,年均日照时数为 2 732 h,≥10 ℃积温 2 400 ℃,年均风速 3.1 m/s,无霜期 128 d。

1.2 试验设置

2018 年 5 月,在两个坡比边坡 1∶1.2(39.81°)和 1∶1.5(33.69°)上分别设置 2 m(长)×1 m(宽)8 个微型径流小区,记为 A 组和 B 组,播种无芒雀麦(*Bromus inermis*)、早熟禾(*Poa annua* L.)、紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)3 种草种,构成 7 种植被配置模式,同时设置裸地小区为对照(表 1)。播种前先浇水浸地,草种按照 50 g/m^2 等重量比例混播方式进行均匀撒播,覆土 0.5 cm 后轻压喷水。

1.3 数据采集与处理

2018 年 6—9 月,人工开展径流小区自然降雨水土流失监测。降雨因子采用小流域综合观测站雨量器观测,径流量和泥沙量通过径流桶收集后,人工处理测定。观测数据均为自然降雨事件,共收集到 48 组,912 个数据,运用 SPSS 和 Origin 等软件进行数据处理分析。

表 1 试验径流小区草本植被配置

组别	$A_1(B_1)$	$A_2(B_2)$	$A_3(B_3)$	$A_4(B_4)$	$A_5(B_5)$	$A_6(B_6)$	$A_7(B_7)$	$A_8(B_8)$
草本配置	无芒雀麦	早熟禾	紫花苜蓿	无芒雀麦+早熟禾	无芒雀麦+紫花苜蓿	早熟禾+紫花苜蓿	无芒雀麦+早熟禾+紫花苜蓿	裸地

注:A 组为 1∶1.2 坡比边坡,B 组为 1∶1.5 坡比边坡。

2 结果与分析

2.1 边坡建植草本植物的保水保土作用

降雨产流次数是产流的一个基本特征,能直观反映土壤流失的次数[9]。研究区 6—9 月降雨量依次为 14.4,95.8,50.5 和 38.9 mm,观测期共监测到 24 次产流事件。由于是陡坡,各试验处理均同时产流,6—9 月依次产流 3,8,7 和 6 次,分别占产流总次数的 13%,33%,29%和 25%。

2.1.1 减流作用 A 组建植植被小区总径流量除 A_3 外均高于 B 组建植植被小区,平均径流量 A 组较 B 组多 10%。同一坡度不同植被配置间径流量差别不明显,但相较无植被裸地小区,植草小区可显著降低地表径流量,A_1—A_7 草本配置分别减流 24%,12%,28%,24%,30%,29%和 32%,平均减流 26%;B_1—B_7 草本配置分别减流 17%,24%,20%,26%,32%,30%和 37%,平均减流 27%(图 1)。坡度变大,产流速度加快、历时变短,易造成降雨强度小于土壤下渗能力、土壤未达到饱和时下渗量减少,产流增多。与温永福等试验研究坡度越大、产流量越大结果相同[10]。不同草本配置径流小区中 $A_7(B_7)$ 径流量最低,其次是 $A_5(B_5)$、$A_6(B_6)$ 和 $A_4(B_4)$,即紫花苜蓿、

无芒雀麦、早熟禾三种草种混播减流效果依次优于两种草种混播、单播。

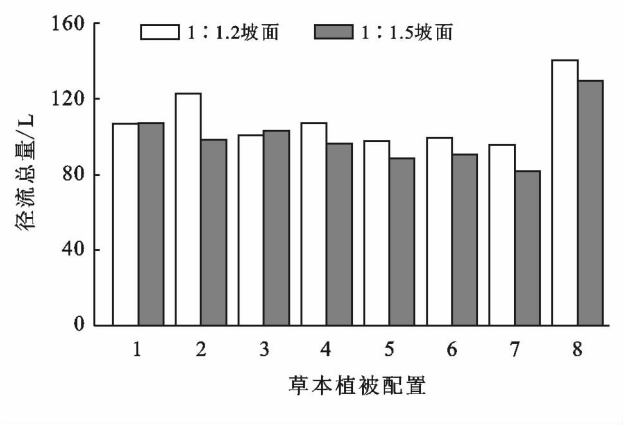


图 1　两种坡比〔1∶1.2(A)和 1∶1.5(B)〕边坡不同草本配置下地表径流总量

2.1.2　减沙作用　A 组建植植被小区总输沙量均高于对应 B 组小区,分别增加 22%,64%,95%,89%,33%,107%和 85%,平均增加 71%。同一坡度不同植被配置间泥沙量差值较小,B 组裸地小区输沙量远高于建植植被小区,B_1—B_7 草本配置小区较裸地小区分别减沙 28%,44%,59%,56%,58%,61%,59%,平均减沙 52%;A 组裸地小区输沙量与建植植被小区输沙量差值较小,A_1—A_7 草本配置小区较裸地小区分别减沙 13%,9%,22%,17%,44%,20%,25%,平均减沙 21%(图 2)。边坡坡度由 33.69°(1∶1.5)增加到 39.81°(1∶1.2),植被减沙能力降低 1/2 以上。

1∶1.5 坡比边坡小区,B_3—B_7 减沙效果接近,以紫花苜蓿单播及两种和 3 种草种混播产沙量低,保土效果较好,优于无芒雀麦、早熟禾单播。1∶1.2 坡比边坡,草种混播和紫花苜蓿单播产沙量低于无芒雀麦、早熟禾单播,其中无芒雀麦＋紫花苜蓿(A_5)减沙效果最好,产沙量明显低于其他各处理。

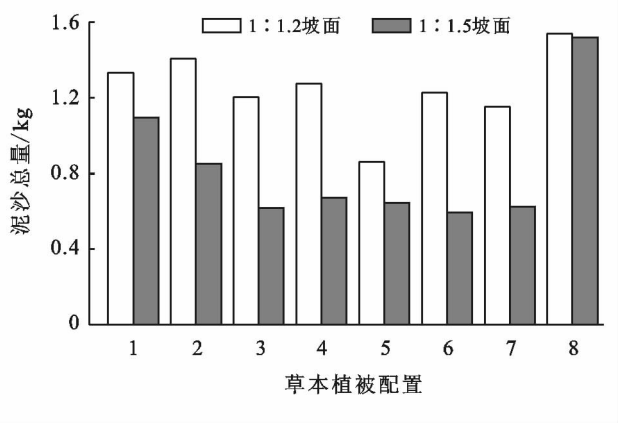


图 2　两种坡比〔1∶1.2(A)和 1∶1.5(B)〕边坡不同草本配置下输沙总量

2.2　降雨及植被对产流和输沙的影响

2.2.1　降雨因子的影响　降雨是造成土壤侵蚀的原动力[11],降雨量、历时和平均雨强、最大 30 min 雨强(I_{30})、降雨动能(E)、降雨侵蚀力(EI_{30})等降雨因子直接影响降雨径流输沙的形成[12-13]。表 2—3 为 A 组和 B 组径流小区径流和输沙与降雨因子 Pearson 相关性分析结果。

表 2　试验小区径流量与降雨因子相关性分析(Pearson)

编号	雨量	历时	平均雨强	I_{30}	E	EI_{30}
A_1	0.520**	−0.262	0.179	0.746**	0.613**	0.605**
A_2	0.558**	−0.216	0.260	0.714**	0.621**	0.580**
A_3	0.624**	−0.188	0.289	0.797**	0.704**	0.669**
A_4	0.633**	−0.195	0.205	0.757**	0.691**	0.656**
A_5	0.637**	−0.253	0.188	0.781**	0.706**	0.675**
A_6	0.572**	−0.267	0.253	0.758**	0.646**	0.620**
A_7	0.583**	−0.246	0.183	0.739**	0.656**	0.620**
A_8	0.508*	−0.266	0.308	0.634**	0.538**	0.470*
B_1	0.574**	−0.218	0.238	0.796**	0.661**	0.631**
B_2	0.571**	−0.237	0.183	0.716**	0.646**	0.643**
B_3	0.612**	−0.254	0.267	0.676**	0.662**	0.638**
B_4	0.526**	−0.199	0.303	0.620**	0.595**	0.589**
B_5	0.578**	−0.293	0.191	0.679**	0.652**	0.642**
B_6	0.548**	−0.229	0.326	0.639**	0.621**	0.614**
B_7	0.560**	−0.232	0.146	0.670**	0.627**	0.609**
B_8	0.538**	−0.230	0.276	0.678**	0.572**	0.519**

注:* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关;** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。下同。

(1) 降雨因子对产流的影响。由表 2 可知，A_1—A_7 和 B_1—B_8 的径流量与雨量，I_{30}，E，EI_{30} 均呈极显著正相关，A_8 与雨量，EI_{30} 呈显著、与 I_{30}，E 呈极显著正相关。A 和 B 组处理与平均雨强呈正相关，与历时呈负相关，相关性较差。同寇馨月[14]等研究乌陂河、朱溪河径流深与 I_{30} 显著正相关，与历时呈负相关结果一致，但与刘钦[15]研究发现径流与平均雨强呈线性相关，且 R^2 达到 0.9 以上不一致。影响径流量的降雨因子主要是雨量，I_{30}，E，EI_{30}，A_1—A_7 和 B_1—B_7 的相关系数大于 B_8。A 和 B 试验组径流量与雨量，I_{30}，E，EI_{30} 的平均相关系数分别高于裸地对照 5%，1%，11%，20%，16%，19%，23%和 34%，表明植被覆盖比地表裸露与雨量，I_{30}，E，EI_{30} 的相关程度加大。相关系数表现为：$I_{30}>E>EI_{30}>$雨量，即 I_{30} 对 1∶1.5，1∶1.2坡比边坡径流量影响最大。A 组和 B 组相比，边坡变陡时，径流量与降雨因子相关性规律较为一致，但试验组和对照组径流量与雨量，I_{30}，E，EI_{30} 相关系数差值分别增大，说明植被覆盖在坡度变大时，对雨量，I_{30}，E，EI_{30} 反应更为明显。

(2) 降雨因子对输沙的影响。由表 3 可以看出，B 组输沙量与降雨因子相关性在不同草本植被配置下表现出明显差异性。

总体上，B 组输沙量与降雨因子 EI_{30} 相关性最高，多存在显著相关，与 E 显著相关较少，与 I_{30} 和雨量相关系数最小，与降雨历时和平均雨强相关性最差。与姜超等[16]研究发现降雨量与产沙量显著相关有差异。B_8 的输沙量与雨量，I_{30}，E，EI_{30} 每个相关系数均大于 B_1—B_7 的，平均分别大 50%，39%，46%，43%，平均相关系数由大到小表现为：$EI_{30}>E>I_{30}>$雨量，EI_{30} 对输沙量影响最大。A 组输沙量，除 A_1 与雨量、I_{30}，E，EI_{30} 输沙量呈显著正相关外，其他均呈极显著正相关。影响输沙量的降雨因子主要是雨量，I_{30}，E，EI_{30}，且 A_8 的相关系数均大于 A_1—A_7 的，分别大 36%，18%，33%，32%，平均相关系数由大到小表现为：$I_{30}>E>EI_{30}>$雨量，即 I_{30} 对泥沙量影响最大。A 组与 B 组相比，边坡变陡时，有植被覆盖泥沙量与雨量，I_{30}，E，EI_{30} 平均相关系数均增大，且无植被的裸地小区输沙量与雨量、E，EI_{30} 相关系数也增大。不同坡度下降雨因子与泥沙量的相关性规律不一致，差异较大，二者关系变为复杂。

表 3 试验小区泥沙量与降雨因子相关性分析(Pearson)

编号	雨量	历时	平均雨强	I_{30}	E	EI_{30}
A_1	0.421*	−0.009	−0.111	0.435*	0.479*	0.474*
A_2	0.670**	0.019	−0.058	0.551**	0.718**	0.724**
A_3	0.760**	0.038	−0.039	0.569**	0.797**	0.801**
A_4	0.716**	0.019	−0.042	0.559**	0.754**	0.757**
A_5	0.291	−0.086	−0.045	0.410	0.352	0.346
A_6	0.697**	−0.031	−0.020	0.577**	0.746**	0.771**
A_7	0.322	−0.070	−0.063	0.407	0.381	0.373
A_8	0.869**	0.051	−0.023	0.613**	0.896**	0.894**
B_1	0.378	−0.049	−0.086	0.464*	0.448*	0.452*
B_2	0.339	−0.077	−0.097	0.281	0.398	0.461*
B_3	0.311	−0.137	−0.038	0.387	0.378	0.403
B_4	0.340	−0.140	−0.026	0.407	0.407	0.432*
B_5	0.366	−0.087	−0.076	0.358	0.431*	0.473*
B_6	0.529**	−0.113	−0.015	0.515*	0.598**	0.633**
B_7	0.370	−0.134	−0.050	0.379	0.441*	0.482*
B_8	0.761**	−0.071	0.018	0.656**	0.821**	0.840**

2.2.2 植被特征的影响 植被冠层可有效截留降雨，降低其对土壤的击溅侵蚀，根系可提高土壤的抗蚀性能，是影响径流输沙量的重要因子，各小区植被盖度情况详见表 4。

(1) 植被对产流的影响。径流系数可以反映降雨量被植物截流、土壤入渗和蒸发对径流量的贡献大小，可综合表达下垫面要素对径流的影响。由图 3 可知，1∶1.5，1∶1.2 坡比边坡径流系数走势大体一致，各月份平均径流系数表现为：7 月<9 月<8 月<6 月。6—9 月，草本不断生长，植被盖度逐渐提高，但并未出现径流系数降低的趋势，如上所述，产流量主要受雨强 I_{30} 等影响。A 组试验小区平均径流系数高于对应 B 组小区，坡度变陡，光、水、热条件、土壤紧实度、土壤孔隙、保水能力等都产生变化，导致草本生长

发育遭受胁迫[17],植被盖度和根系量降低,产流能力变强。6 月降雨量最低,径流系数却普遍较高,且处理间径流系数值差异大,主要是由于各试验径流小区植被盖度低且差异大所致。随着植被生长,7—9 月径流系数变小,各试验处理间差异也较小。是由于进入雨季,随雨量增多和气温升高,植被进入快速生长期,盖度显著提高,草本茎叶截流降雨能力增强,减少到达地面的有效雨量。同时草本根系进一步发育,吸收土壤中水分和养分,为草本地上生物量的生长提供有力保障,改良土壤理化性质,增强土壤下渗、持水能力,植被保水功能逐渐增强。7 月降雨量最大,径流系数却最小,除受植被盖度提高影响,还与前期 6 月少雨干旱,土壤渗透性较高有关。这与辜世贤研究表明径流量受植被覆盖影响的同时,还要考虑前期土壤含水量对径流量的影响相一致[9]。试验结果显示不同草本配置下径流系数差异较小,总体上草种混合配置小区径流系数小于单播小区,A_7 和 B_7 径流系数最小,其次是 A_5 和 B_5。紫花苜蓿出苗早,出苗率高,能够在较短时间内覆盖地面,且植株较高,与禾本科无芒雀麦和早熟禾混播,植株高度和茎叶角度不同,形成层层交错的植被覆盖情况,有利于截流降雨。这与潘声旺等[18]研究认为植被的水土保持性能与群落的物种多样性密切相关:多样性水平越高,水土保持性能越强相一致。此外三种草本植被自身特性也存在差异,紫花苜蓿种子萌发率和对不良生长环境的适应能力强于无芒雀麦和早熟禾,在水热条件不同步条件下即开始相对较好的生长,早期植被盖度相对较高。无芒雀麦分蘖时间集中在夏秋季节,春季分蘖较少[19],植被盖度提升时间滞后于紫花苜蓿,详见表 4,且王琥等认为陡坡无芒雀麦分蘖数降低[20]。早有研究表明早熟禾在土壤紧实、通气透水性差的环境下分蘖少,植株个体较小而稀疏,植被盖度大受影响[21]。

表 4　试验径流小区 6—9 月各处理平均植被盖度

编号	平均植被盖度/%			
	6 月	7 月	8 月	9 月
A_1	2	10	45	50
A_2	3	10	20	30
A_3	20	30	55	70
A_4	3	15	40	45
A_5	20	30	80	85
A_6	28	50	80	80
A_7	25	50	88	90
A_8	0	0	0	0
B_1	4	12	50	55
B_2	2	15	55	60
B_3	30	60	78	80
B_4	2	45	70	70
B_5	20	65	90	95
B_6	50	60	90	92
B_7	35	70	95	100
B_8	0	0	0	0

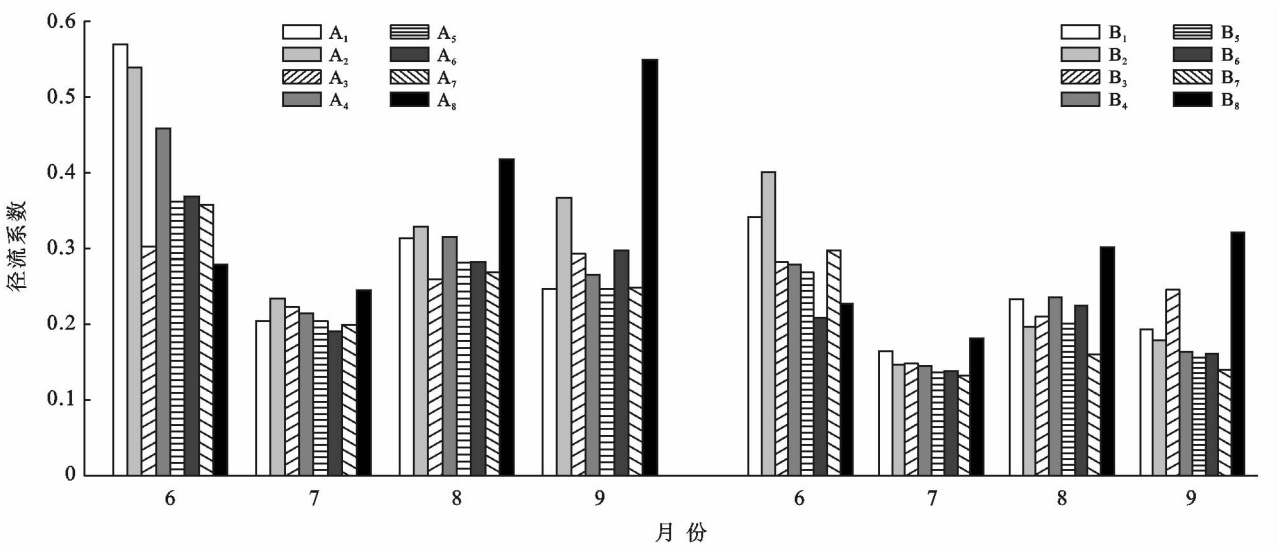


图 3　两种坡比〔1∶1.2(A)和 1∶1.5(B)〕边坡试验小区径流系数

(2) 植被对输沙的影响。6—9 月根系发育程度和植被盖度不断提高,建植植被小区减沙效果显著,与已有研究表明种草和裸露坡地相比泥沙量可有效降低结果一致[22]。由图 4 可知,B 组侵蚀模数逐渐降低,尤其 7 月降雨量是 6 月的 6.7 倍,侵蚀模数却大幅度下降,但不同草本配置减沙效果差异并不大。是由于进入水热同期,营养物质优先满足根系向更深土层推进的需要,使得根系在土壤中机械穿插形成根

网,化学分泌和死亡腐解[21],增强土体抗冲抗蚀性能,保土作用逐渐突显。同时根系发育促进草本地上茎叶生物量的提高,可加强机械阻挡降雨对坡面的击溅侵蚀[23]。与蔡庆等[24]研究认为植被快速生长后,土壤侵蚀量有效减少结果一致。6,8,9 月 A 组各处理土壤侵蚀模数逐渐降低并略高于 B 组,7 月 A 组土壤侵蚀模数高于其他月份,且大幅度高于 B 组,分析其原因可能是由于陡坡紫花苜蓿主根长度和生物量减小,侧根Ⅰ级和Ⅱ级根直径变小,锚固和加筋作用减弱,无芒雀麦和早熟禾须根数量和表面积降低,根系抗拉力和土体粘聚力降低,造成侵蚀模数偏高[25]。如上降雨因子与产沙量的分析,产沙量主要受雨强 I_{30} 等影响,7 月降雨量大,击溅坡面的雨强和雨量增大,侵蚀模数随之大幅增大。植被根系的充分发育直接促进草本地上茎叶繁茂,至 8 月,9 月绝大多数处理植被平均盖度大于 50%时,1∶1.2 坡比边坡植草减沙效果显著增强,减沙效率甚至超过了 1∶1.5 坡比边坡。说明合理的植物措施配置可在 1∶1.2 坡比边坡起到很好的减沙作用。1∶1.2,1∶1.5 坡比边坡分别 A_5 和 B_6 侵蚀模数最小,紫花苜蓿的直根系较长,可达到较深的次表层土壤,锚固土壤能力优于须根系一般处于土壤表层的无芒雀麦和早熟禾。豆科植物护坡效益好于禾本科植物,与刘玉花[26]、袁雪红[27]等研究结果一致。但紫花苜蓿与禾本科草种混播,横纵向形成的根系网范围大,优于另两种草种混播或单播。

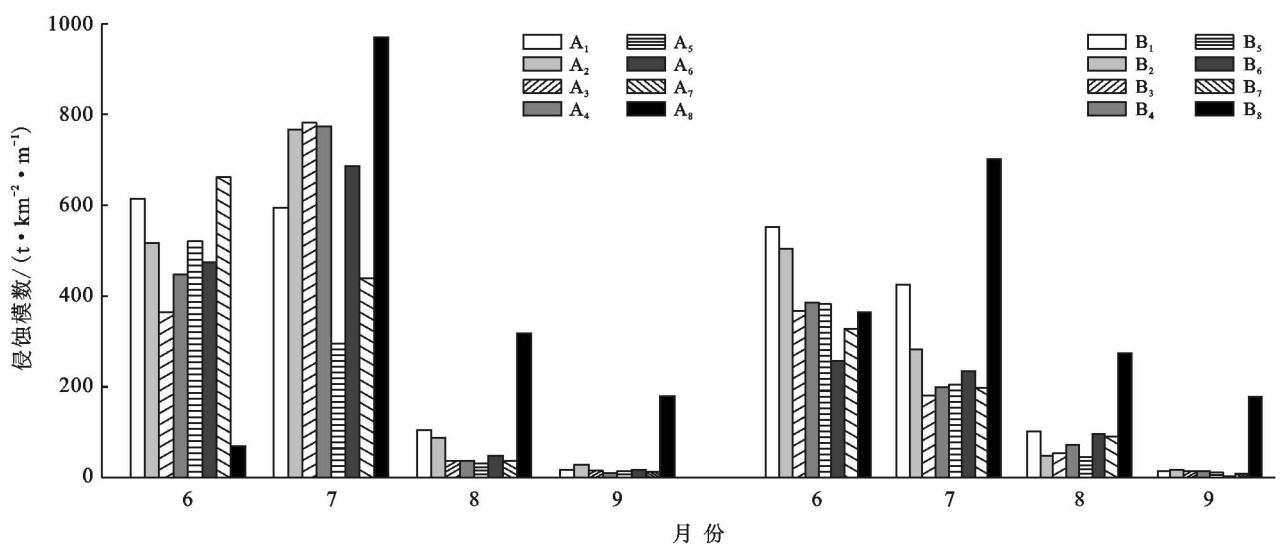


图 4 两种坡比〔1∶1.2(A)和 1∶1.5(B)〕边坡试验小区侵蚀模数

3 结 论

(1) 1∶1.5,1∶1.2 坡比边坡草本建植当年分别较裸地平均减流 27%和 26%,分别较裸地平均减沙 52%和 21%,表明坡度由 34°增加到 40°,地表径流虽未增加,但土壤侵蚀量明显增加,影响产流产沙降雨因子主要有雨量、I_{30},E,EI_{30},坡度变陡,相关性增强。

(2) 建植草无芒雀麦和紫花苜蓿混播综合减流减沙效果最好,紫花苜蓿、无芒雀麦、早熟禾三种草种混播减流效果优于单播。

(3) 1∶1.2 较 1∶1.5 坡比边坡能减少 20%的削坡占地面积,随着植被盖度的增加减沙效果逐渐增强,且在植被盖度大于 50%时减沙效果接近 1∶1.5 坡比边坡。

[参 考 文 献]

[1] 孟令钦,李勇. 东北黑土区坡耕地侵蚀沟发育机理初探[J]. 水土保持学报,2009,23(1):7-11.

[2] 孟令钦. 东北黑土区沟蚀机理及防治模式的研究[D]. 北京:中国农业科学院,2009.

[3] 孔令冉,董雯昕,杨天一,等. 东北黑土区沟道侵蚀机理及防治研究进展[J]. 国土与自然资源研究,2018(4):1-4.

[4] 贯从,张树文,王让虎,等. 三岔河流域坡耕地垄向与侵蚀沟分布耦合分析[J]. 资源科学,2019(2):394-404.

[5] 黄萌. 辽宁省侵蚀沟发育特征与影响因素研究[D]. 辽宁沈阳:沈阳农业大学,2018.

[6] 李志飞,单洪伟,杨薇. 黑龙江省东南部山地小流域侵蚀沟基本特征分析[J]. 中国水土保持,2018(6):47-49.

[7] 董一帆,聂勇,熊东. 红基于 Google Earth 影像的横断山区沟蚀及侵蚀沟类型调查研究[J]. 国土与自然资源研究,2018(3):151-157.

[8] 秦一博. 生态袋护坡系统在侵蚀沟综合治理工程中的应用[J]. 水利技术监督,2019(2):167-169.

[9] 辜世贤. 紫色土侵蚀特征及允许侵蚀量化学法确定[D].

重庆:西南农业大学,2004.
[10] 温永福,高鹏,穆兴民,等.野外模拟降雨条件下径流小区产流产沙试验研究[J].水土保持研究,2018,25(1):23-29.
[11] 邵臻,张富,陈瑾,等.西部黄土丘陵区不同草地土壤侵蚀对侵蚀性降雨的响应 [J].水土保持通报,2017,37(6):9-15.
[12] Bi Huaxing, Liu Bin, Wu Jie, et al. Effects of precipitation and landuse on runoff during the past 50 years in a typical watershed in the loess plateau, China [J]. International Journal of Sediment Research, 2009,24(3):352-364.
[13] 杜波,唐丽霞,潘佑静,等.贵州喀斯特地区侵蚀性次降雨产流产沙特征研究[J].西南林业大学学报,2016,36(5):111-117.
[14] 寇馨月,姜学兵,黄俊,等.红壤区小流域次降雨产流产沙因素分析及模型构建 [J].水土保持通报,2017,37(6):34-42.
[15] 刘钦.纸坊沟流域暴雨侵蚀与坡面人工降雨产流产沙试验研究[D].甘肃 兰州:兰州大学,2016.
[16] 姜超.三峡库区王家桥流域降雨与侵蚀产沙关系研究[D].湖北 武汉:华中师范大学,2013.
[17] 祝顺波.坡度对植被混凝土生态修复的影响[D].湖北宜昌:三峡大学,2012.
[18] 潘声旺,袁馨,雷志华,等.乡土植物生活型构成对川渝地区边坡植被水土保持效益的影响[J].生态学报,2016,36(15):4654-4663.
[19] 李存福.无芒雀麦、紫花苜蓿繁殖特性及种子生产技术研究[D].北京:中国农业大学,2005.
[20] 王琥,李向林,万里强,等.灌溉对华北农牧交错带无芒雀麦生物学特性的影响 [J].草原与草坪,2007(5):32-36.
[21] 张春华,丁原春.松嫩平原东北部草地早熟禾种群生殖分蘖构件数量特征的研究[J].草原与草坪,2005,14(1):62-64.
[22] Burwell R E, Timmons D R, Holt R F. Nutrient transport in surface runoff as influenced by soil cover and seasonal periods1 [J]. Soil Science Society of America Journal, 1975, 39(3):523-538.
[23] 游珍,李占斌一,蒋庆丰.植被在坡面的不同位置对降雨产沙量影响[J].水土保持通报,2006,26(6):28-31.
[24] 蔡庆,唐克丽.植被对土壤侵蚀的动态分析[J].水土保持学报,1992,6(2):47-51.
[25] 徐洪雨.坡度对岩石边坡植物根系分布及抗拔力的影响[D].北京:北京林业大学,2013.
[26] 刘玉花.G111 公路讷嫩段 18 种护坡植物根系固土特性研究[D].黑龙江 哈尔滨:东北林业大学,2011.
[27] 袁雪红,高照良,张翔,等.护坡植物根系分布及抗拉力学特性[J].南水北调与水利科技,2016,14(5):117-123.

(上接第 116 页)

[4] 高建恩.确保渭河生态基流首先要考虑农业节水[J].中国水利,2009(19):34-34.
[5] 王红.水土保持典型措施对地下水补给生态基流的影响研究[D].北京: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),2014.
[6] 王宏杰.保障渭河生态基流的宝鸡峡灌区节水调控技术研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2017.
[7] 李娟,高建恩,张元星,等.黄土高原泾河流域梯田对河道径流及生态基流影响[J].水土保持通报,2015,35(5):106-110,116.
[8] 何兵,高凡,覃姗,等.基于多种水文学方法的干旱区内陆河流健康流量重构[J].水土保持通报,2019,39(1):160-166.
[9] 陈浩,徐宗学,侯昕玥,等.考虑海水入侵影响的漳卫新河河口生态基流研究[J].水力发电学报,2019,38(7):11-20.
[10] 徐宗学,程涛.城市水管理与海绵城市建设之理论基础:城市水文学研究进展[J].水利学报,2019,50(1):53-61.
[11] 邵辉.渭河流域水土流失变化对梯田措施响应的模拟研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2013.
[12] 石永强,左其亭.基于多种水文学法的襄阳市主要河流生态基流估算[J].中国农村水利水电,2017(2):50-54,59.
[13] 雷向杰,李茜,王娟,李化龙,李红梅,雷天骄.陕西关中地区旱涝演变规律和 21 世纪旱涝特点分析[J].灾害学,2016,31(3):101-109.
[14] 车蓉,吕明明.牡丹江流域生态环境需水量[J].黑龙江科技信息,2009(11):145.
[15] 罗固源,卜发平,许晓毅,等.三峡库区临江河回水区总氮和总磷的动态特征[J].土木建筑与环境工程,2009,31(5):106-111.
[16] 毛倩倩,邱小杰,杨蔚为.基于海绵城市理念的河道生态系统构建方法初探[J].水利规划与设计,2019(5):17-19,26.
[17] 班乃明,赵建勋.基于海绵城市理念的城市生态河道建设研究[J].建材与装饰,2017(49):286-287.