

北京山区河岸植被的水土保持效益

夏晓平¹, 信忠保^{1,2}, 赵云杰¹, 孔庆仙¹

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学, 北京市水土保持工程技术研究中心, 北京 100083)

摘要: 通过野外简易径流小区的放水冲刷试验, 研究北京山区河岸带不同植被类型水土保持效果差异。试验设计 4, 6, 8 L/min 3 种上方来水流量以及 6 种植被类型小区坡面, 冲刷历时 31 min, 试验过程收集径流泥沙样, 分析不同径流小区的产流产沙特征。结果表明: (1) 各植被类型小区平均总产流产沙量 (43.29 L/m², 0.71 kg/m²) 均显著小于裸坡下平均总产流产沙量 (65.86 L/m², 3.21 kg/m²) ($p < 0.05$)。植被具有明显的减流减沙效益, 且减沙效益 (78.66%) 大于减流效益 (36.16%); (2) 不同植被类型间减流减沙效果不同, 随着放水流量的上升, 坡面产流速率、产沙速率不断上升, 其中以狗牙根小区平均产流速率 (6.16 L/min)、平均产沙速率 (55.50 g/min) 最小, 水土保持效益较好; (3) 不同植被类型小区稳定入渗速率差异显著 ($p < 0.05$), 均大于裸坡条件下的稳定入渗速率 (42 mm/h), 其中以狗牙根小区坡面的径流稳定入渗速率最大 (129.0 mm/h)。综上所述, 植被具有明显的蓄水保土效益, 且不同的植被类型间减流减沙效果差异显著。研究结果为北京山区河岸带进行生态环境安全建设以及生态修复提供了基础理论依据, 并且为河岸边坡的植被修复物种选择提供了参考依据。

关键词: 河岸; 径流; 泥沙; 植被

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)05-0071-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.05.012

Soil and Water Conservation Benefits of Riparian Vegetation in Beijing Mountainous Area

XIA Xiaoping¹, XIN Zhongbao^{1,2}, ZHAO Yunjie¹, KONG Qingxian¹

(1. School of Soil and Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

2. Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract: Through the water discharge scour test in field simple runoff plot, soil and water conservation benefits of different vegetation types in the riparian of Beijing mountain area were explored. 3 kinds of flow discharge and 6 different vegetation types were designed, and the test lasted 31 min. Runoff and sediment samples during the experiment were collected to analyze the characteristics of runoff and sediment production in different runoff plots. The results showed that: (1) The average total amount of runoff and sediment (43.29 L/m², 0.71 kg/m²) were significantly lower than those on the bare slope (65.86 L/m², 3.21 kg/m²) ($p < 0.05$). Vegetation was beneficial for reduction runoff and sediment production, and the benefits of sediment reduction (78.66%) were significantly greater than runoff reduction (36.16%); (2) Soil and water conservation benefits were significant difference among different vegetation types. Specifically, the average flow rate (6.16 L/min) and the average sediment production rate (55.50 g/min) of bermudagrass slope was the smallest among different vegetation slopes, and the benefits of soil and water conservation was the best. (3) Stable infiltration rates were significantly difference among different vegetation types ($p < 0.05$), both were larger than the stable infiltration rate under bare slope conditions. Among them, the stable infiltration rate of bermudagrass was the highest (129.0 mm/h). In summary, vegetation had obvious soil and water conservation benefits, and there were significant differences among different vegetation types. The results provide a theoretical basis for the construction of ecological environment and the ecological restoration of riparian in Beijing mountain area, and also provide a reference for species selection for vegetation restoration.

Keywords: riparian; runoff; sediment; vegetation

河岸带是陆地与水生生态系统的重要生物过渡带,具有独特的生态结构特征和多种生态功能^[1-3]。植被作为河岸带重要的组成部分,在减缓坡面土壤侵蚀、拦截坡面径流^[4]、净化水质、稳固河岸边坡等方面发挥着重要的水土保持效益。

植物措施作为一种重要的水土流失防治措施^[5],已在水土保持领域广泛使用。一方面植被通过茎叶减缓降雨雨滴的动能;另一方面是植被通过根系来固持土壤。在植被对坡面的减流减沙效益方面,国内外学者做过大量研究^[6-7],其中在植被的防蚀机理与功效方面已取得了丰富的成果^[8-10],但多集中于室内模拟试验^[11]以及野外降雨观测试验^[12],且针对草本植物对坡面的水土保持效益研究较多^[13-14]。近年来对于野外条件下自然生长的植被对边坡的防护效益研究较少,尤其以灌木和草本植物为主的河岸带边坡径流产沙试验,而针对自然边坡的侵蚀产沙效益研究更能反映出植被对边坡水土防护的实际效益。张少良等^[15]研究表明,东北黑土区自然植被的恢复能够有效抑制土壤侵蚀和地表径流的发生。因此,开展河岸自然边坡不同植被减流减沙效益研究,对于了解自然植被水土防护效益具有现实意义。

鉴于自然降雨的不可调控性,以及野外人工降雨试验过程中影响因素较多,包括可能出现的雨强不统一和降雨分布不均匀性、河岸较陡以及交通不便等,本试验采用野外放水冲刷的试验方法。以北京市怀九河河岸为研究对象,对河岸边坡 6 种不同的植被类型小区坡面,包括灌木以及草本进行径流小区的布设和放水冲刷试验。通过对试验过程中产流产沙量的定量分析,研究河岸边坡不同适生植物种的减流减沙效益以及水土流失特征。作为怀柔水库重要的水源河流,怀九河河岸带植被水土保持效益研究,有利于合理进行岸坡植被配置,提高怀柔水库水质,同时为北京山区河岸带进行植被修复提供基础的植被物种选择,为河岸边坡生态修复建设提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

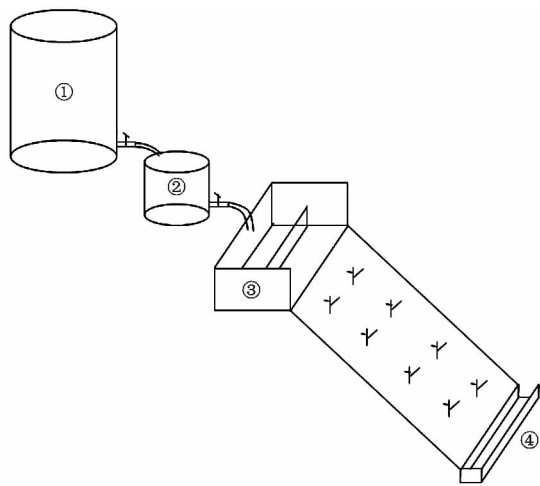
怀九河位于北京市山区怀柔西南部(116°19′54.3″—116°34′3.5″E,40°18′59.5″—40°26′51.6″N),属海河流域潮白河水系,是北京山区的典型山溪性河流,也是怀柔水库重要的入库水源。研究区起点位于怀柔区鳞龙山自然风景区,终点位于怀柔水库,海拔 65~320 m,总段长 37.4 km,总面积 347.2 km²。该地段属于北温带大陆性季风气候,冬夏温差较大,1 月平均气温 -5℃,7 月平均气温 25.3℃,年最高气温 38℃,最低气温 -18℃。地貌类型主要为丘陵,且上游部分河道两岸多依靠丘陵台地;下游部分地势低,主要由众多的小洪积扇坡积群

组成。土壤主要分布有褐土和潮褐土等类型,由于受母质和河流冲刷等影响,河岸坡面的表土层质地一般为砂壤质、轻壤质,且平均土壤层厚度 <20 cm。当地植被主要以加杨(*Populus xcanadensis*)、旱柳(*Salix matsudana*)、榆树(*Ulmus pumila*)和荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*)为主。

1.2 试验设计与材料

本试验于 2017 年 5 月 22 日至 6 月 10 日在怀九河流域中游覆盖有不同植被类型的河岸边坡上进行,该地区人为干扰活动较少且自然坡面坡度较为均匀,坡度为(30.7±0.67)°。土壤类型主要为砂壤土,土层厚度为(24.4±3.3)cm,平均土壤粒径组成主要为:黏粒(<0.002 mm)(3.90±0.67)%,粉粒(0.002~0.05 mm)(55.55±4.60)%,砂粒(0.05~2 mm)(40.55±5.26)%,土壤容重为(1.22±0.03)g/cm³。

本次试验为野外放水冲刷试验,试验前期布设简易径流小区,径流小区长为 4 m,宽为 0.5 m,主要由放水装置、两侧挡板组成。试验的放水装置主要以供水桶、稳压桶、溢流槽、集流槽构成(图 1)。稳压桶稳定水压,使水流出稳定,调控出水口流量,溢流槽使上方来水平稳流出坡面,并在径流小区下方用集流槽收集径流泥沙的混合样。



注:①为供水桶;②为稳压桶;③为溢流槽;④为集流槽。

图 1 放水装置示意

根据试验前样地的植被调查,以及当地野外适生植被生长分布情况,径流小区坡面植被主要选取了荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、茵陈蒿(*Artemisia capillaris*)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)为研究对象,其中荆条+茵陈蒿为 1 个径流小区,以下简称灌草坡面,并以 1 个裸坡为对照组,共 6 个径流小区,每个小区设置 1 次重复性试验,总计 36 场次放水试验。试验标准径流小区特征见表 1。

1.3 试验过程与测定

试验放水流量按照山区所能达到的最大暴雨量 120 mm/h 在试验小区上所产生的单宽流量计算得

到,本次野外放水试验共设置 3 种放水流量,即 4,6,8 L/min,试验前剔除坡面上大块石砾,并对坡面进行平整,防止产流过程中出现股流。对坡面进行洒水致土壤

水分饱和但还未产流,防止由于前期土壤水分含量不同而导致试验结果产生误差。之后利用定水头式方法控制放水流量,多次定流量之后进行放水试验。

表 1 径流小区基本特征情况

径流 小区	植物种 组成	土壤粒径组成/%			坡度/ (°)	植被 盖度/%	株高/ cm
		黏粒	粉粒	砂粒			
1	狗牙根	3.58	53.23	43.19	31.8	68.40	9.8±2.0
2	茵陈蒿	4.89	62.37	32.74	30.6	51.38	10.1±1.6
3	胡枝子	3.18	51.88	44.94	30.5	65.92	9.1±0.7
4	荆条	3.59	51.94	44.47	31.1	48.70	85.2±11.2
5	荆条×茵陈蒿	4.57	60.37	35.06	29.9	37.57	43.5±3.8
6	裸地	3.60	53.52	42.88	30.3		

注:表中数据为平均值±标准误差。下同。

待产流开始后前 5 min 每隔 1 min 收集 1 次泥沙混合样,5 min 后每隔 2 min 收集 1 次泥沙混合样,总共产流时间为 31 min。试验收集的泥沙样,经过滤后放置于露天风干,并在水分完全蒸发后每隔 30 min 测定泥沙质量,称至恒重。以裸坡产流产沙量为对照,计算不同植被类型小区坡面的减流减沙效益,计算公式为:

$$\text{减流(沙)效率}(\%) = \frac{\text{裸坡产流(沙)量} - \text{径流小区产流(沙)量}}{\text{裸坡产流(沙)量}} \times 100\%$$

试验数据采用 Excel 2016 软件进行处理,并运用 SPSS 23.0 软件进行显著性以及相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同植被类型小区产流产沙量

不同植被类型坡面下平均总产流产沙量(43.29 L/m²,0.71 kg/m²)均小于裸坡条件下平均总产流产沙量(65.86 L/m²,3.21 kg/m²),植被具有减缓坡面径流产沙的能力。通过对不同植被下的产流产沙量分析(表 2)发现,狗牙根坡面在 3 种放水流量下的平均产流产沙量最小(24.40 L/m²,0.08 kg/m²),较裸坡的平均产流产沙量(65.86 L/m²,3.21 kg/m²)分别减少了 62.96%,97.35%,减流减沙效益显著。

总产流量在不同植被类型下的上升幅度具有明显差异,当上方来水流量从 4 L/min 上升到 8 L/min 时,狗牙根小区产流量增长幅度最大(6.36 倍)、产沙量增长幅度最大(2.93 倍),灌草小区的总产流量增长幅度最小(2.31 倍),荆条小区的总产沙量增长幅度最小(1.32 倍)。研究表明,随着径流量的上升,草本植物的减流减沙能力逐渐下降,而灌草坡面在该方面的能力逐渐突出。可能因为流量较小的情况下坡面土壤只产生表层侵蚀,而草本植物在坡上部表现为丛生或是密度较高,且根系分布较浅,对土壤表层具有较好的保护效益。随着上方来水流量的上升,坡面开始产生细沟侵蚀,并逐渐向下侵蚀,而灌木根系较草本植被具有明显的分散性以及深根性的特点,对土

壤的固持能力较强,该条件下灌木可有效的阻碍径流继续向下侵蚀。从而表现出草本植物在小流量情况下具有直接拦沙的水土保持功效,而灌木则表现出在大流量条件下具有蓄水减沙的水土保持功效^[16]。

表 2 不同植被类型小区坡面的产流产沙量

植被 类型	流量/ (L·min ⁻¹)	总产流量/ (L·m ⁻²)	总产沙量/ (kg·m ⁻²)	径流含沙量/ (g·L ⁻¹)
狗牙根	4	21.39	0.37	9.06
	6	30.61	0.62	6.30
	8	70.73	0.76	3.98
茵陈蒿	4	19.36	0.54	19.23
	6	45.94	0.67	21.71
	8	77.51	1.25	16.54
荆条	4	28.98	0.33	69.79
	6	65.77	0.87	20.18
	8	76.84	0.94	30.03
胡枝子	4	5.74	0.03	80.08
	6	25.18	0.08	27.24
	8	42.28	0.13	63.95
荆条×茵陈蒿	4	23.03	0.71	22.31
	6	43.38	1.07	31.60
	8	72.69	2.25	22.02
裸坡	4	33.42	2.23	93.01
	6	75.52	3.39	73.42
	8	88.63	4.01	74.45

土壤侵蚀中径流含沙量是土壤侵蚀研究的基本参数,对水土流失治理研究具有重要意义^[17]。不同植被类型小区在 6,8 L/min 流量下的径流含沙量(21.41,27.30 g/L)均低于 4 L/min 流量条件下的径流含沙量(40.09 g/L),均有下降的趋势。小流量情况下,坡面径流持续进行土壤侵蚀,径流含沙量下降缓慢,随着放水流量的上升,坡面土壤受径流的冲刷作用强烈,产流后期的产沙速率下降较快,导致径流含沙量的下降。

2.2 产流过程

2.2.1 产流速率变化特征 产流速率在不同放水流量条件下表现为相同变化趋势,产流初期迅速递增,随后增长速率下降,坡面产流速率开始趋于稳定并且具有一定波动性(图 2);随着放水流量的增大,不同小

区坡面下平均产流速率出现明显上升(1.35, 2.93, 4.40 L/min);不同植被小区坡面下平均产流速率为 2.67

L/min,较裸坡坡面的平均产流速率(4.05 L/min)下降了 34.07%,植被具有延缓径流冲刷的作用。

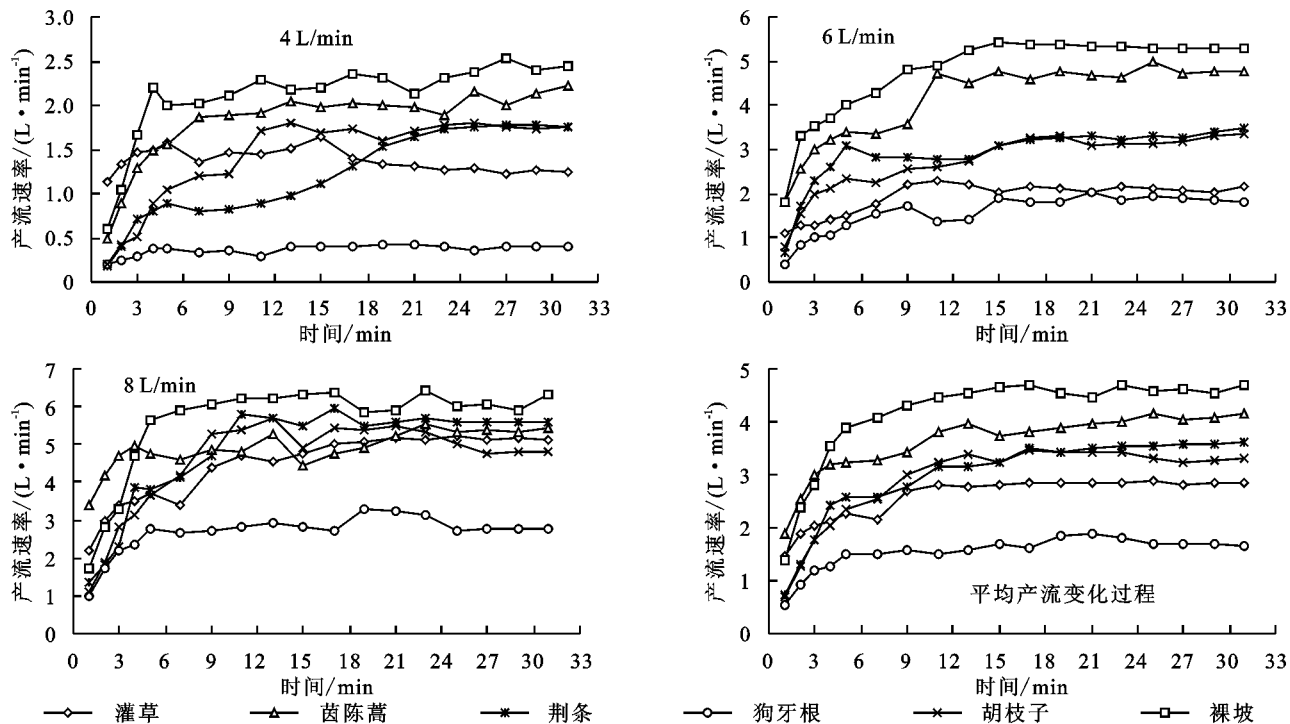


图 2 不同径流小区产流速率变化特征

在 4 L/min 放水流量条件下,对不同植被类型的产流速率进行方差分析,灌草与荆条小区、灌草与胡枝子小区、荆条与胡枝子小区产流速率差异不显著 ($p>0.05$),而灌草、荆条以及胡枝子小区与茵陈蒿、狗牙根小区之间产流速率差异性显著 ($p<0.05$),表现为灌木与草本植物对坡面径流的拦截作用具有明显差异。

进一步比较其他放水流量条件下不同植被类型下的产流速率,在 6 L/min 放水流量条件下,灌草与狗牙根小区、荆条与胡枝子小区产流速率差异性不显著 ($p>0.05$),而其他植被类型下的产流速率均差异性显著 ($p<0.05$),其中灌草与狗牙根小区在延缓径流过程方面效果显著(径流拦截率分别为 59.57%, 67.10%)。在 8 L/min 放水流量下,狗牙根小区与其他植被类型下的产流速率差异性显著 ($p<0.05$),灌草、荆条、胡枝子、茵陈蒿坡面相互之间产流速率差异性不显著 ($p>0.05$)。在大流量条件下,坡面径流速度较快,容易形成超渗产流,致使产流速率上升,不同植被类型下的产流速率开始出现不明显差异。

在坡面产流过程中,灌草小区产流速率先升高后降低,可能是因为径流的冲刷作用导致坡面土壤质地发生变化,土壤细颗粒被搬运,致使土壤质地变轻,增加了土壤入渗能力,从而导致产流速率减小^[18]。随着放水流量的上升,不同植被类型下的平均产流速率也逐渐上升,产流速率的上升幅度也随着放水流量的上升而明显增

加(表 3)。大流量条件下,径流势能较大,冲刷能力较强,坡面表层土壤遭受剧烈冲刷,致使产流速率增加。其中在 3 种流量条件下,不同植被类型以茵陈蒿小区平均产流速率最大(3.56 L/min),狗牙根小区平均产流速率最小(1.51 L/min)。可见相同植被类型,不同植物种之间径流产出差异明显^[19]。

2.2.2 坡面入渗率变化特征 入渗率是评价土壤抗蚀性和涵养水源能力的重要指标^[20],入渗率越大,土壤的渗透性越大,坡面蓄水保土功能就越好。对不同植被类型小区坡面径流入渗率进行统计分析(图 3)。其中裸坡坡面的平均入渗率最小(58.6 mm/h),对径流的拦截能力最差,这是因为裸坡坡面较为光滑平整,径流主要以薄层水流为主,初始径流速率较快,当坡面形成侵蚀细沟时,径流在没有阻拦物的情况下还未完全下渗就开始流失,而在具有植被生长的边坡,茎叶以及枯落物对径流有明显的阻拦作用,从而坡面径流有充足的时间下渗,入渗率上升^[21]。植被的存在明显影响着土壤渗透性的大小^[22]。

为进一步研究不同植被类型条件下坡面土壤入渗率随时间的变化关系,采用 Horton 入渗经验公式对入渗率进行拟合,其表达式为:

$$i = i_c + (i_0 - i_c)e^{-kt}$$

式中: i 为入渗率(mm/h); i_c 为稳定入渗率(mm/h); i_0 为初始入渗率(mm/h); t 为入渗时间(min); k 为入渗系数。拟合结果见表 4。

表 3 不同植被类型小区坡面产流速率

植被类型	放水流量/ (L·min ⁻¹)	初始产流速率/ (L·min ⁻¹)	最大产流速率/ (L·min ⁻¹)	初始产流速率 到峰值时间/min	平均产流速率/ (L·min ⁻¹)
荆条×茵陈蒿	4	1.13	1.65	14.05	1.38±0.13
	6	1.10	2.30	10.18	1.88±0.38
	8	2.20	5.23	18.12	4.37±0.93
茵陈蒿	4	0.50	2.23	30.15	1.77±0.46
	6	1.80	4.98	24.47	4.04±0.94
	8	3.40	5.52	22.72	4.88±0.53
荆条	4	0.18	1.78	26.13	1.16±0.51
	6	0.67	3.47	30.32	2.84±0.70
	8	1.38	5.96	16.10	4.67±1.48
狗牙根	4	0.20	0.43	20.48	0.36±0.06
	6	0.40	2.02	20.03	1.53±0.46
	8	1.00	3.28	18.13	2.63±0.54
胡枝子	4	0.20	1.80	12.28	1.36±0.54
	6	0.80	3.37	30.35	2.65±0.71
	8	1.10	5.68	12.02	4.39±1.34
裸坡	4	0.60	2.53	26.73	2.07±0.50
	6	1.80	5.44	14.55	4.65±1.01
	8	1.70	6.42	22.32	5.43±1.38

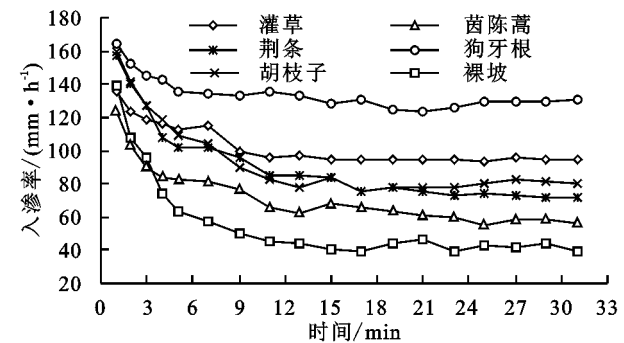


图 3 不同小区坡面径流入渗特征

表 4 不同径流小区坡面径流入渗公式

植被类型	拟合公式	相关系数
荆条×茵陈蒿	$i=93.9+48.6e^{-0.20t}$	0.947
茵陈蒿	$i=59.7+69.3e^{-0.21t}$	0.936
荆条	$i=74.4+98.1e^{-0.21t}$	0.970
狗牙根	$i=129.0+47.1e^{-0.33t}$	0.928
胡枝子	$i=78.3+102.3e^{-0.24t}$	0.985
裸坡	$i=42.0+135.3e^{-0.34t}$	0.990

注: i 为入渗率(mm/h); t 为入渗时间(min)。

拟合结果证实,当坡面存在植被时,径流的稳定入渗率明显大于裸坡,其中不同的植被类型下以狗牙根小区的稳定入渗率最大(129.0 mm/h),茵陈蒿小区的稳定入渗率最小(59.7 mm/h),这是因为植被的根系决定了土壤的结构,在增加坡面径流入渗方面起着重要的作用,且茵陈蒿与地表之间容易形成空层,地表附近植被茎叶的减少将会增加径流流速,致使降雨或径流的入渗速率减小^[11],因此在进行坡面植被恢复时也应该考虑低层植被的配置。

2.3 产沙过程

不同植被类型在 3 种放水流量条件下产沙速率

变化规律相同,均在产沙初期出现峰值,随后不断下降至稳定水平(图 4),主要因为产流初期径流挟沙能力较强,致使产沙速率上升,产沙量增大。随着径流的冲刷以及细沟的发育,坡面松散,细颗粒土壤基本被剥蚀,粗颗粒开始富集,坡面土壤的抗冲性增强,同时地面物质对泥沙的补给能力下降,产沙量下降,坡面输沙量达到稳定^[23]。不同植被类型下平均产沙速率为 55.49 g/min,比较裸地平均产沙速率(244.59 g/min)下降了 77.31%,植被在拦截坡面输沙过程效果明显;3 种放水流量下各坡面产沙速率随着流量的上升在不断增加(53.00,84.61,123.43 g/min)。

坡面产沙速率可以表现土壤受侵蚀速率的大小。不同坡面均在试验前 10 min 内达到峰值(表 5),因此在产流初期防止土壤侵蚀,可有效地抑制水土流失。随着放水流量的上升,坡面产沙速率的波动程度也在不断增加,3 种流量条件下坡面的平均产沙速率分别为 53.00,84.61,123.43 g/min。不同的植被类型以狗牙根小区的平均产沙速率最小(6.16 g/min),胡枝子小区的平均产沙速率最大(103.59 g/min),对比裸坡下的平均产沙速率分别下降了 97.48%,57.65%,灌木与草本植物在减缓径流产沙方面效果不一,可能因为灌木在固持表层土壤方面较弱,致使相同的放水流量下产沙速率高于草本植物。

2.4 不同植被类型的减流减沙效益

由不同植被不同放水流量条件下的总产流产沙量可以算出各个坡面的减流减沙效益。由表 6 可知,不同植被坡面下的平均减沙效益(78.66%)明显大于平均减流效益(36.16%),且随着径流量的上升不同植被类型下的减流减沙效益均出现下降现象,其中不同植被类型下

的平均减流效益从 41.05% 下降到 23.27%，减沙效益从 82.23% 下降到 73.37%。主要是因为大流量条件下径流集中，水流冲刷能力较强，容易形成股流，此时坡面径流量大于径流的人渗量，产流量上升，且伴随着细沟发育过程中土体坍塌、滑落，导致产沙量增加。不同植被类型对河岸边坡的减流减沙能力也各有差异，在不同的放水流量条件下，除荆条(31.26%)与胡枝子小区(30.55%)的平均减流效益差异不明显($p>0.05$)，其他

坡面之间平均减流效益具有显著差异($p<0.05$)，其中狗牙根小区平均减流效益最好(67.26%)，茵陈蒿小区平均减流效益最差(13.16%)；不同放水流量下的平均减沙效益以狗牙根小区最好(97.61%)，胡枝子小区最差(60.05%)。主要因为植被的护坡功能与其群落特征相关，其中狗牙根在生长过程中由于盖度大、茎叶多，地表枯落物以及地上生物量明显大于其他灌木坡面，因此植被的护坡功能就越强^[24]。

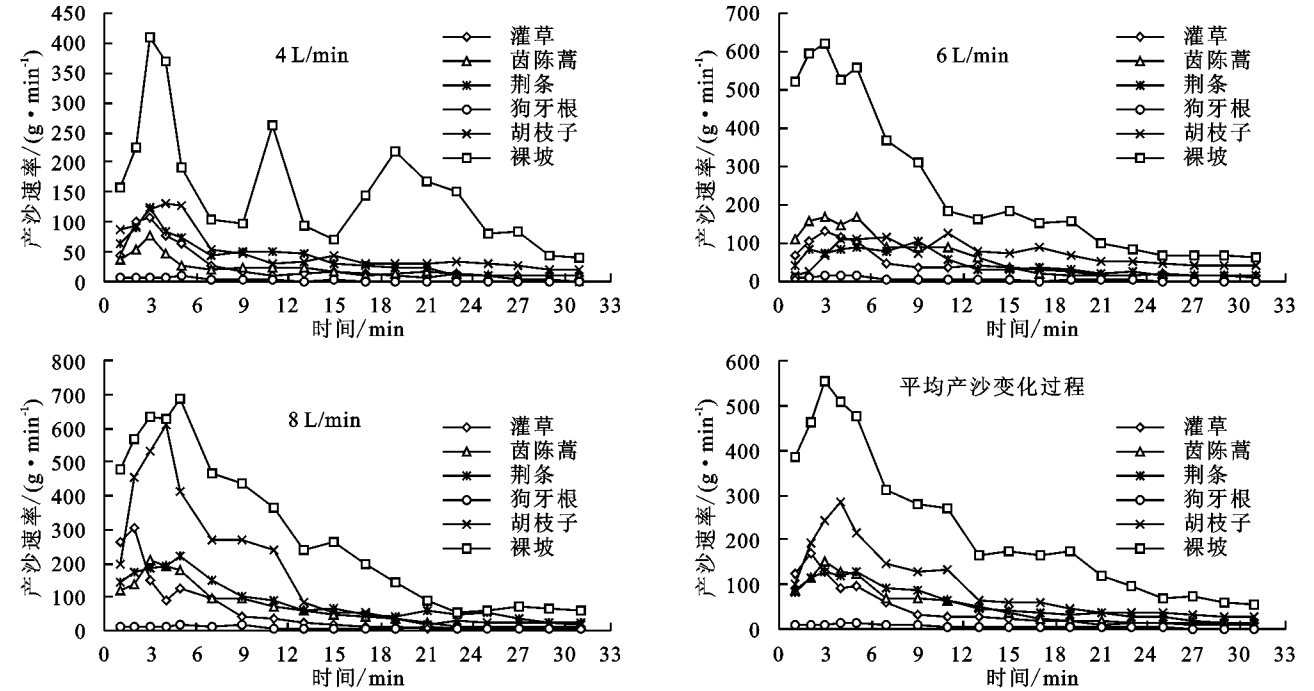


图 4 不同径流小区产沙速率变化过程

表 5 不同植被类型下产沙速率特征统计

植被类型	放水流量/ (L · min ⁻¹)	初始产沙速率/ (g · min ⁻¹)	最大产沙速率/ (g · min ⁻¹)	初始产沙速率 到峰值时间/min	平均产沙速率/ (g · min ⁻¹)
荆条×茵陈蒿	4	44.54	105.79	2.78	31.20±32.78
	6	67.48	133.90	2.23	49.15±38.50
	8	264.03	306.71	1.50	68.44±90.85
茵陈蒿	4	35.92	77.27	2.20	24.95±18.29
	6	107.94	167.97	2.57	69.18±59.02
	8	121.28	210.53	2.13	75.75±67.05
荆条	4	64.34	125.93	2.45	42.24±34.65
	6	40.48	106.73	8.12	47.39±30.49
	8	142.93	219.57	4.83	94.90±64.43
狗牙根	4	7.35	8.41	4.72	2.76±2.76
	6	11.08	17.48	3.47	6.56±5.04
	8	12.87	20.69	4.35	9.15±4.84
胡枝子	4	87.23	131.46	3.88	55.31±38.82
	6	17.36	124.61	10.32	68.90±31.46
	8	195.96	619.00	3.02	186.55±198.66
裸坡	4	158.65	409.67	2.68	161.52±104.17
	6	519.48	620.51	2.33	266.46±206.62
	8	474.83	684.28	4.43	305.79±227.85

表 6 不同植被类型小区坡面减流减沙特征

项目	放水流量/ (L·min ⁻¹)	狗牙根	茵陈蒿	胡枝子	荆条	荆条×茵陈蒿
减流 效益/%	4	82.82	13.27	31.09	42.08	36.00
	6	66.66	12.91	42.56	39.17	59.47
	8	52.30	13.30	17.99	12.55	20.20
减沙 效益/%	4	98.52	85.30	67.99	75.72	83.60
	6	97.54	74.24	68.31	80.25	81.63
	8	96.78	76.48	43.87	68.78	80.98

从以上研究中可以看出,狗牙根在减流减沙方面表现出明显的优势,与夏振尧等^[25]研究出灌草植被在减流减沙效益方面优于草本植物的结果不同。这可能是因为狗牙根坡面植株盖度较大,土壤表层根系发达,导致土壤疏松,孔隙度增大。当有上方来水时,植被对径流的拦截作用显著,减缓了径流流速,降低了径流势能,从而导致径流挟沙能力下降,产流产沙量减少,在拦截径流泥沙方面的能力较强^[11]。

3 结论

(1)不同植被类型小区总产流产沙量均随着上方来水流量的增加而上升。不同植被小区平均总产流产沙量(43.29 L/m²,0.71 kg/m²)小于裸坡下的平均总产流产沙量(65.86 L/m²,3.21 kg/m²),植被具有明显的减流减沙效益。本次试验中植被的减沙效益(78.66%)大于减流效益(36.16%),其中狗牙根坡面在减流效益(67.26%)、减沙效益(97.61%)方面具有明显优势。

(2)不同植被类型小区坡面在 3 种放水流量下,产流产沙速率均出现相同变化特征。产流速率随着径流时间的进行出现先升高后平稳波动的趋势,产沙速率随时间的进行在试验初期出现峰值,随后不断下降至稳定水平,且产流产沙速率均随着放水流量的上升而上升。不同植被类型小区产流产沙速率效果显著差异,5 种涵盖植被小区的平均产流产沙速率(2.67 L/min,55.49 g/min)均小于裸坡条件下的产流产沙速率(4.05 L/min,244.59 g/min)。

(3)根据 Horton 入渗经验公式,不同径流小区坡面的稳定入渗速率以狗牙根坡面最大(129.0 mm/h),渗透性最好,灌草小区坡面次之(93.9 mm/h),裸坡坡面最小(42.0 mm/h)。不同植物种间坡面的径流入渗率各有差异,草本植物与灌木之间差异显著,但均具有着改良土壤通透性的作用。

从本研究中可以看出,野外草本植物对于径流泥沙的拦截作用在流量较小的情况下表现出明显优势,当上方来水流量较大时,灌木则具有较好的蓄水保土效益,因此在进行河岸带植被修复时,应考虑灌草结合的方式进行合理配置。

参考文献:

[1] Hale R, Reich P, Daniel T, et al. Scales that matter: Guiding effective monitoring of soil properties in restored riparian zones [J]. Geoderma, 2014, 228/229: 173-181.

[2] Ella J C, Odríguez-Gonzlez P M, Dufour S, et al. Riparian vegetation research in Mediterranean- climate regions: Common patterns, ecological processes, and considerations for management [J]. Hydrobiologia, 2013, 719(1): 291-315.

[3] Xiu C, Ouyang Z Y, Zheng H. Flora analysis of riparian vegetation in Yong-ding- Haihe river system, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(6): 1535-1547.

[4] 曹梓豪,赵清贺,左宪禹,等. 基于坡面水文连通性的黄河下游河岸缓冲带植被格局优化[J]. 应用生态学报, 2018,29(3):1-12.

[5] Butt M J, Waqas A, Mahmood R, et al. The combined effect of vegetation and soil erosion in the water resource management [J]. Water Resources Management, 2010, 24(13): 3701-3714.

[6] 秦伟,曹文洪,郭乾坤. 植被格局对侵蚀产沙影响的研究评述[J]. 生态学报,2017,37(14):1-9.

[7] Neris J, Jimnez C, Fuentes J, et al. Vegetation and land- use effects on soil properties and water infiltration of Andisols in Tenerife (Canary Islands,Spain) [J]. Catena, 2012, 98: 55-62.

[8] 朱智勇,解建仓,李占斌,等. 坡面径流侵蚀产沙机理试验研究[J]. 水土保持学报,2011,25(5):1-7.

[9] 吕锡芝,康玲玲,左仲国,等. 黄土高原吕二沟流域不同植被下的坡面径流特征[J]. 生态环境学报,2015,24(7):1113-1117.

[10] 易婷,张光辉,王兵,等. 退耕草地近地表层特征对坡面流流速的影响[J]. 山地学报,2015,33(4):434-440.

[11] 李盼盼,王兵,刘国彬,等. 茵陈蒿群落垂直结构对坡面产流产沙过程的影响[J]. 水土保持学报,2017,31(2): 40-44.

[12] 戴金梅,查轩,黄少燕. 不同植被覆盖度对紫色土坡面侵蚀过程的影响[J]. 水土保持学报,2017,31(3):33-38.

[13] 肖培青,姚文艺,申震洲,等. 苜蓿草地侵蚀产沙过程及其水动力学机理试验研究[J]. 水利学报,2011,42(2): 232-237.

[14] 孙佳美,余新晓,樊登星. 模拟降雨下植被盖度对坡面流水动力学特性的影响[J]. 生态学报,2015,35(8): 2574-2580.

[15] 张少良,张兴义,刘晓冰,等. 典型黑土侵蚀区自然植被恢复措施水土保持功效研究[J]. 水土保持学报,2010, 24(1):73-77,81.

[16] 于国强,李占斌,裴亮,等. 不同植被类型下坡面径流侵蚀产沙差异性[J]. 水土保持学报,2012,26(1):1-5,11.

- [2] 宋阳,于晓菲,邹元春,等.冻融作用对土壤碳、氮、磷循环的影响[J].土壤与作物,2016,5(2):78-90.
- [3] 王娇月,宋长春,王宪伟,等.冻融作用对土壤有机碳库及微生物的影响研究进展[J].冰川冻土,2011,33(2):442-452.
- [4] 王澄海,靳双龙,施红霞.未来50年中国地区冻土面积分布变化[J].冰川冻土,2014,36(1):1-8.
- [5] 潘延鑫,罗纨,贾忠华,等.基于HYDRUS模型的盐碱地土壤水盐运移模拟[J].干旱地区农业研究,2017,35(1):135-142.
- [6] 邓玲,魏文杰,胡建,等.秸秆覆盖对滨海盐碱地水盐运移的影响[J].农学学报,2017,11(7):23-26.
- [7] 李金刚,屈忠义,黄永平,等.微咸水膜下滴灌不同灌水下限对盐碱地土壤水盐运移及玉米产量的影响[J].水土保持学报,2017,31(1):217-223.
- [8] 齐智娟,冯浩,张体彬,等.河套灌区不同覆膜方式膜下滴灌土壤盐分运移研究[J].水土保持学报,2017,31(2):301-308.
- [9] 张越,杨劲松,姚荣江.咸水冻融灌溉对重度盐渍土壤水盐分布的影响[J].土壤学报,2016,53(2):388-400.
- [10] 张殿发,郑琦宏,董志颖.冻融条件下土壤中水盐运移机理探讨[J].水土保持通报,2005,25(6):14-18.
- [11] 王维真,吴月茹,晋锐,等.冻融期土壤水盐变化特征分析:以黑河上游祁连县阿柔草场为例[J].冰川冻土,2009,31(2):268-274.
- [12] 郭占荣,荆恩春,聂振龙,等.冻结期和冻融期土壤水分运移特征分析[J].水科学进展,2002,13(3):298-302.
- [13] Zhao L, Cheng G, Ding Y. Studies on frozen ground of China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2004, 14(4): 411-416.
- [14] 于博,赵兰坡,高聚林,等.松辽平原高产农田土壤孔性对冻结的响应及机理研究[J].中国农学通报,2012,28(24):80-85.
- [15] 高敏,李艳霞,张雪莲,等.冻融过程对土壤物理化学及生物学性质的影响研究及展望[J].农业环境科学学报,2016,35(12):2269-2274.
- [16] 温美丽,刘宝元,魏欣,等.冻融作用对东北黑土容重的影响[J].土壤通报,2009,40(3):492-495.
- [17] 赵春雷,邵明安,贾小旭.冻融循环对黄土区土壤饱和导水率影响的试验研究[J].土壤通报,2015,46(1):68-73.
- [18] 李琳慧,李旭,许梦,等.冻融温度对东北黑土理化性质及土壤酶活性的影响[J].江苏农业科学,2015,43(4):318-320.
- [19] 冯伟,刘忠宽,刘振宇,等.河北省盐碱地分布成因及改良利用技术研究[J].河北农业科学,2015(1):56-60.
- [20] 王磊.河北省盐碱土防治与综合利用[J].水科学与工程技术,2015(5):93-94.
- [21] 龚振平.土壤学与农作学[M].北京:中国水利水电出版社,2013.
- [22] 李婧.土壤有机质测定方法综述[J].分析试验室,2008,27(增刊1):154-156.
- [23] Larsen K S, Jonasson S, Michelsen A. Repeated freeze-thaw cycles and their effects on biological processes in two arctic ecosystem types [J]. Applied Soil Ecology, 2002, 21(3): 187-195.
- [24] Freppaz M, Williams B L, Edwards A C, et al. Simulating soil freeze thaw cycles typical of winter alpine conditions: Implications for N and P availability [J]. Applied Soil Ecology, 2007, 35(1): 247-255.
- [25] 赵锦梅,张德罡,刘长仲.东祁连山土地利用方式对土壤持水能力和渗透性的影响[J].自然资源学报,2012,27(3):422-429.
- (上接第77页)
- [17] 王美景,王军光,郭忠录,等.放水冲刷对红壤坡面侵蚀过程及溶质迁移特征的影响[J].土壤学报,2016,53(2):365-374.
- [18] 李学增,黄炎和,林金石,等.不同宽度冲刷槽对崩岗崩积体产流产沙的影响[J].农业工程学报,2016,32(9):136-141.
- [19] 王全九,赵光旭,刘艳丽,等.植被类型对黄土坡地产生沙及氮磷流失的影响[J].农业工程学报,2016,32(14):195-201.
- [20] 高婵婵,赵传燕,王超,等.黑河上游天老池流域不同植被下土壤理化性质和入渗特征[J].水土保持学报,2016,30(1):117-121,126.
- [21] 王志刚,杨海龙,刘慧博,等.河岸边坡草被减流减沙效应及其坡面流水动力学特征[J].水土保持学报,2016,30(2):8-13.
- [22] 李建兴,何丙辉,谌芸.不同护坡草本植物的根系特征及对土壤渗透性的影响[J].生态学报,2013,33(5):1535-1544.
- [23] 彭怡,王玉宽,傅斌,等.紫色土流失土壤的颗粒特征及影响因素[J].水土保持通报,2010,30(2):142-144.
- [24] 潘声旺,雷志华,杨丽娟,等.几种典型边坡植被的产流、产沙特征[J].生态环境学报,2013,22(7):1167-1172.
- [25] 夏振尧,梁永哲,张雪娇,等.植被对含碎石土壤坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2015,29(3):92-97.