

密云水库周边板栗林下不同水土保持措施效益评价

杨润泽¹, 肖辉杰¹, 冯天骄¹, 王奋忠², 赵泽坤¹,
郭子萱¹, 王世雷², 朱俊英¹, 李世丰¹

(1.北京林业大学 水土保持学院 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室,
北京 100083; 2.北京市密云区水土保持工作站, 北京 101500)

摘 要:为探究密云水库周边板栗林下的土壤侵蚀规律以及适合于当地板栗林下的水土保持措施,选取发生于 2021 年 8 月的 10 次降雨事件作为研究样本,通过对比不同水土保持措施配置下产流产沙对降雨因子的响应,采用径流小区法对不同水土保持措施配置模式的水土保持效益进行了评价,进而筛选出水土保持效果更好的水土保持措施。结果表明:(1)在仅布设植被措施的条件下,减轻地表径流及泥沙运移作用最大的植被类型为卷柏,其次为自然坡面。(2)在同时布设植被措施与工程措施的条件下,工程措施相同、植被措施不同时,自然坡面减流减沙效果最好。工程措施不同、植被措施相同时,减流效果最好的为鱼鳞坑。(3)马齿苋+鱼鳞坑、自然坡面+鱼鳞坑的水土保持效益最佳。(4)对产流产沙量影响最大的因子为降雨量,其与径流量、泥沙量的相关系数分别为 0.533,0.557($p<0.01$)。由此可知,进行密云水库板栗林水土保持工作时,可优先种植卷柏、布设鱼鳞坑,或布设马齿苋+鱼鳞坑、自然坡面+鱼鳞坑等水土保持措施。

关键词:板栗林;土壤侵蚀;水土保持措施;配置模式

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)06-0028-08

Evaluation on Benefits of Different Soil and Water Conservation Measures Under *Castanea mollissima* Bl. Forest Around Miyun Reservoir

YANG Runze¹, XIAO Huijie¹, FENG Tianjiao¹, WANG Fenzhong², ZHAO Zekun¹,
GUO Zixuan¹, WANG Shilei², ZHU Junying¹, LI Shifeng¹

(1.Key Laboratory of Soil And Water Conservation and Desertification Control of

Ministry of Education, College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University,

Beijing 100083, China; 2.Soil and Water Conservation Workstation, Miyun District, Beijing 101500, China)

Abstract: In order to explore the soil erosion law of *Castanea mollissima* Bl. forest around Miyun Reservoir and the soil and water conservation measures suitable for local *Castanea mollissima* Bl. forest, the runoff plot method was used in this study. A total of 10 rainfall events occurred in August 2021 were selected as research samples. By comparing the response of sediment yield to rainfall factors under different water and soil conservation measures configuration, the benefits of soil and water conservation under different water and soil conservation measures configuration modes were evaluated, and the better soil and water conservation measures were selected. The results showed that: (1) Under the condition of vegetation arrangement only, the vegetation type of *Selaginella tamariscina* (P. Beauv.) Spring was the most important to reduce surface runoff and sediment transport, followed by the natural vegetation. (2) Under the condition of vegetation measures and engineering measures at the same time, the effect of sediment reduction on natural slope is the best when the engineering measures are the same and the vegetation measures are different. With different engineering measures and the same vegetation measures, the fish scale pit has the best effect on reducing flow. (3) *Portulaca oleracea* Linn. + fish scale pit and natural vegetation + fish scale pit had the best soil and water conservation benefits. (4) The most influential factor on sediment yield was rainfall, and the

收稿日期:2021-09-23

修回日期:2021-10-14

资助项目:国家林业局林业软科学研究项目(2020101316);北京市水务局横向课题(2021FG2JJSK02)

第一作者:杨润泽(1996—),男,河北石家庄人,硕士研究生,研究方向为土壤侵蚀。E-mail: yangrunze0606@163.com

通信作者:肖辉杰(1978—),男,山东威海人,博士,教授,主要从事林业生态工程研究。E-mail: herr_xiao@hotmail.com

correlation coefficients with runoff and sediment yield were 0.533 and 0.557 ($p < 0.01$), respectively. In conclusion, the soil and water conservation measures such as planting *Selaginella tamariscina* (P. Beauv.) Spring and laying *Portulaca oleracea* Linn. + fish scale pit and natural vegetation + fish scale pit can be preferred in the soil and water conservation work of *Castanea mollissima* Bl. forest in Miyun Reservoir.

Keywords: *Castanea mollissima* Bl.; soil erosion; soil and water conservation measures; configuration mode

北京市密云区石匣小流域属于京郊地区,隶属燕山山脉、潮白河流域,位于密云水库东北方向,是华北地区重要的生态屏障^[1]。密云石匣小流域具备板栗(*Castanea mollissima* Bl.)生长的地域条件,板栗作为当地居民重要的经济来源之一,被大面积种植^[2]。作为石匣小流域的主要经济作物之一,受经济效益驱使,当地已形成了大规模的板栗林,伴随的还有当地较为严重的土壤侵蚀问题^[3]。然而,当地板栗林的经营管理属于粗放型,居民为方便捡拾板栗而将板栗树周围植被破坏,造成地表裸露。除此之外,为了板栗树根系的扩散而翻动根系周围土壤,造成土壤松动。长期不合理的耕作习惯造成了当地严重的土壤侵蚀问题,使得土地生产力下降,进而影响了当地板栗林的质量,给当地经济、生态的可持续发展造成严重的阻碍。除此之外,当地有大量板栗林种植于陡坡,在强降雨发生后会产生大量的径流与泥沙,大量污染物随其汇入密云水库,造成库区内水质下降,给北京市饮用水安全问题造成了严重的威胁^[4]。

板栗林下土壤侵蚀问题引起了当地政府的高度重视,印发了《25 度以上以裸露坡地为重点的水土保持综合治理方案》,且针对板栗林下土壤侵蚀也进行了相关防治措施的研究与探索。板栗林多种植于陡坡,有研究表明,5°以上的板栗林地土壤侵蚀问题较为严重,且认为 25°以上的板栗林地应当逐步退出板栗种植。为减轻板栗林的土壤侵蚀问题,石匣小流域当地主要采取的措施有植被措施与工程措施,植被措施主要采用适合于当地生长且占用养分较低的植被种类,工程措施包括当地常见且成本较低鱼鳞坑、水平条等措施^[5]。本文通过对比分析不同水土保持措施对当地板栗林的水土保持作用,筛选出水土保持效益最佳且最适用于当地板栗林的水土保持措施。

1 研究区概况

本试验研究区位于北京市密云区石匣小流域(43°32′—43°38′N,117°01′—117°07′E),地处于密云水库东北方向。该流域隶属于燕山山脉,面积约 33 km²,海拔 150~390 m,位于山前冲积平原向山区的过渡地带。研究区属暖温带季风气候。年平均气温 8~10℃,7 月最高气温 25.3℃,1 月最低气温 6.6℃。

年平均降水量约为 662 mm,其中生长季(6—9 月)占 77%。研究区日照充足,无霜期 173 d,年太阳总辐射 322.91 J/cm²,积温 4 073.9℃,有利于间作农业的经营。该流域局部土壤为棕壤,其土壤质地轻、土层深、土质致密、耕作层浅,植被类型以杂草、灌丛为主,覆盖度为 80%。丘陵地带存在的植被多为人工的板栗(*Castanea mollissima* Bl.)、刺槐(*Robinia pseud-oacacia* Linn.)、油松(*Pinus tabulae-formis* Carr.)及其他种类经济林等。土地利用方式主要为林地、坡耕地、草地和裸地。该地区土壤侵蚀模数高于土壤自然形成速度,土壤侵蚀问题严重。在这种情况下,由于不合理的土地利用方式与夏季强降雨的频繁发生,加剧了当地土壤侵蚀的发生。研究区土壤侵蚀面积为 32.22 km²,共占研究区总面积的 97.7%,土壤侵蚀模数为 2 500 t/(km²·a)。

2 材料与方法

2.1 径流小区概况

本研究采用的径流小区布设于石匣小流域板栗林下,以因地制宜为准则,共布设 3 m×3 m,3 m×6 m 两种规格径流小区共 13 个(表 1),对不同径流小区布设不同的水土保持措施。其中植被措施主要选用当地常见、具有一定水土保持效益且成本低廉的植物,包括卷柏[*Selaginella tamariscina* (P. Beauv.) Spring]、马齿苋(*Portulaca oleracea* Linn.)及自然植被。工程措施主要包括水平条、椰丝毯、鱼鳞坑,于 2021 年 8 月份共观测当地 10 场侵蚀性降雨事件下各小区的产流产沙情况。

2.2 数据采集方法

通过虹吸式雨量计和雨量桶收集降雨相关数据,包括降雨量(mm)、平均降雨强度(mm/h)、降雨持续时间(min)、30 min 内最大降雨强度 I_{30} (mm/h)和 60 min 内最大降雨强度 I_{60} (mm/h)。每次侵蚀性降雨事件发生后测量桶内径流深度(mm),结合径流桶底面积与小区面积计算出单位面积径流量(m³/km²);泥沙量的测定需要对每个小区进行 3 次取样,采样前将桶内泥水混合物混合均匀,然后转移至实验室烧杯中沉淀并过滤,再将沉淀物放入电热恒温箱中,在

105℃下干燥至恒重;称重后得到沉淀物质量,结合小区面积计算出 3 个泥沙样本的平均值即单位面积泥沙量(t/km^2)。每次测量后需将径流桶清空,以承接下次降雨产生的径流与泥沙。土壤含水率用 TDR 法在上中下坡位各测一值,取平均值。

表 1 径流小区概况

径流 小区	坡度/ (°)	坡长/ m	植被 措施	工程 措施	配置 模式
1	16.5	3	卷柏	水平条	水平条+卷柏
2	16.5	3	自然坡面	水平条	水平条+自然坡面
3	16.5	3	马齿苋	水平条	水平条+马齿苋
4	16.5	3	自然坡面	无	自然坡面
5	16.5	3	卷柏	无	卷柏
6	16.5	3	马齿苋	无	马齿苋
7	16.5	3	卷柏	椰丝毯	椰丝毯+卷柏
8	16.5	3	自然坡面	椰丝毯	椰丝毯+自然坡面
9	16.5	3	马齿苋	椰丝毯	椰丝毯+马齿苋
10	16.5	3	无	无	裸地
11	16.5	3	自然坡面	鱼鳞坑	鱼鳞坑+自然坡面
12	16.5	3	马齿苋	鱼鳞坑	鱼鳞坑+马齿苋
13	16.5	3	无	鱼鳞坑	鱼鳞坑

2.3 坡度标准化方法

试验区内各个径流小区处于不同的坡度下,由于坡度是影响土壤侵蚀重要因素,因此我们需要将不同坡度小区校正到同一坡度下以消除坡度带来的试验误差,使得试验尽量能在同一条件下进行。我们选择 16.5°作为标准坡度,并将其他坡度地块的监测数据转换为 16.5°进行比较,从而有效消除了坡度对土壤侵蚀的影响。结合以往对坡度标准化和对当地地形特征的研究,本试验采用了之前学者研究出的坡度标准化公式^[6]:

$$\begin{cases} S=10.8\sin\theta+0.03 & \theta<5^\circ \\ S=16.8\sin\theta-0.5 & 5^\circ\leq\theta<10^\circ \\ S=21.91\sin\theta-0.96 & \theta\geq10^\circ \end{cases} \quad (1)$$

$$A_i'=A_i/S_i\times S_{16.5} \quad (2)$$

式中: S 为坡度因子; θ 为坡度(°); A_i' 为第 i 小区校正到 16.5°坡度上的侵蚀量(m^3/km^2); A_i 为第 i 小区的侵蚀量(t/km^2); $S_{16.5}$ 为 16.5°坡度的坡度因子; S_i 为第 i 小区的坡度因子。

3 结果与分析

3.1 样本降雨事件特征

降雨是土壤侵蚀发生的直接动力,本研究根据密云当地气象站的降雨相关数据,选取 2021 年 8 月份的 10 次降雨作为样本降雨事件(表 2)。10 次降雨事

件的降雨总量为 189.90 mm,次降雨量的变化范围为 0.2~41.3 mm,平均单次降雨量为 18.99 mm;平均雨强、平均降雨历时、平均 I_{30} 、平均 I_{60} 分别为 3.25 mm/h,357 min,17.53 mm/h,11.35 mm/h。本研究选取的 10 场降雨,降雨类型丰富,雨量充足,具有很好的观测价值,在该条件下进行不同水保措施的土壤侵蚀观测也具有重要的参考价值。

表 2 样本降雨事件特征

日期(年-月-日)	降雨 时刻(时:分)	降雨 历时/min	降雨量/ mm	雨强/ ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)	$I_{30}/$ ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)	$I_{60}/$ ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)
2021-08-04 02:43	227	4.1	1.08	5.4	3.5	
2021-08-04 20:15	505	41.3	4.91	47.0	32.9	
2021-08-05 17:18	122	12.7	6.25	21.3	12.5	
2021-08-08 23:46	354	27.6	4.68	17.4	14.1	
2021-08-09 17:09	61	0.2	0.20	0.3	0.2	
2021-08-14 00:25	205	2.0	0.59	3.5	1.8	
2021-08-15 01:57	483	20.4	2.53	14.4	7.3	
2021-08-15 16:35	675	28.8	2.56	33.6	18.4	
2021-08-19 07:05	723	25.6	2.12	4.6	3.7	
2021-08-23 22:20	215	27.2	7.59	27.8	19.1	

3.2 不同植被措施下产流产沙量的对比(未布设工程措施)

在仅种植植被而无工程措施布设的条件下,对各种植被措施的产流产沙量进行对比。如图 1 所示,卷柏、马齿苋以及当地自然植被均具有较好的水土保持效益。其中卷柏、马齿苋、自然坡面的平均单位面积径流量分别为 598.21,650.88,637.08 m^3/km^2 ,径流系数分别为 0.30,0.33,0.35。在减轻地表径流作用方面,卷柏、马齿苋、自然坡面的减流率依次为 61.36%,57.96%,58.85%。卷柏、马齿苋、自然坡面的平均单位面积泥沙量为 71.87,82.64,80.31 t/km^2 ,侵蚀浓度分别为 0.105,0.109,0.103 kg/L。在减轻泥沙量作用方面,卷柏、马齿苋、自然坡面的减沙率依次为 85.61%,83.57%,83.92%。可以看出,在仅布设植被措施的情况下,当地减轻地表径流及泥沙运移作用最大的植被类型为卷柏,其次为自然坡面。

3.3 不同植被措施下产流产沙量的对比(布设工程措施)

3.3.1 工程措施相同、植被措施不同 在布设工程措施条件下,对工程措施相同、植被措施不同径流小区的产流产沙量进行对比,可以看出,本研究所栽种的卷柏、马齿苋两种植被措施以及生长当地天然植被的自然坡面均具有一定水土保持效益。由图 2 可以看出,采取不同植被措施的径流小区单位面积径流量、径流系数、径流深度均不同,不同植被措施下这 3 种指标由大到小排序依次为:裸地、卷柏、马齿苋、自然坡面。

其中自然坡面、马齿苋、卷柏的单位面积径流量分别为 $351.57, 411.03, 480.74 \text{ m}^3/\text{km}^2$, 减流率分别为 $66.93\%, 61.34\%, 54.84\%$ 。可以看出, 生长天然植被的自然坡面减流效果最好, 其次为马齿苋措施。

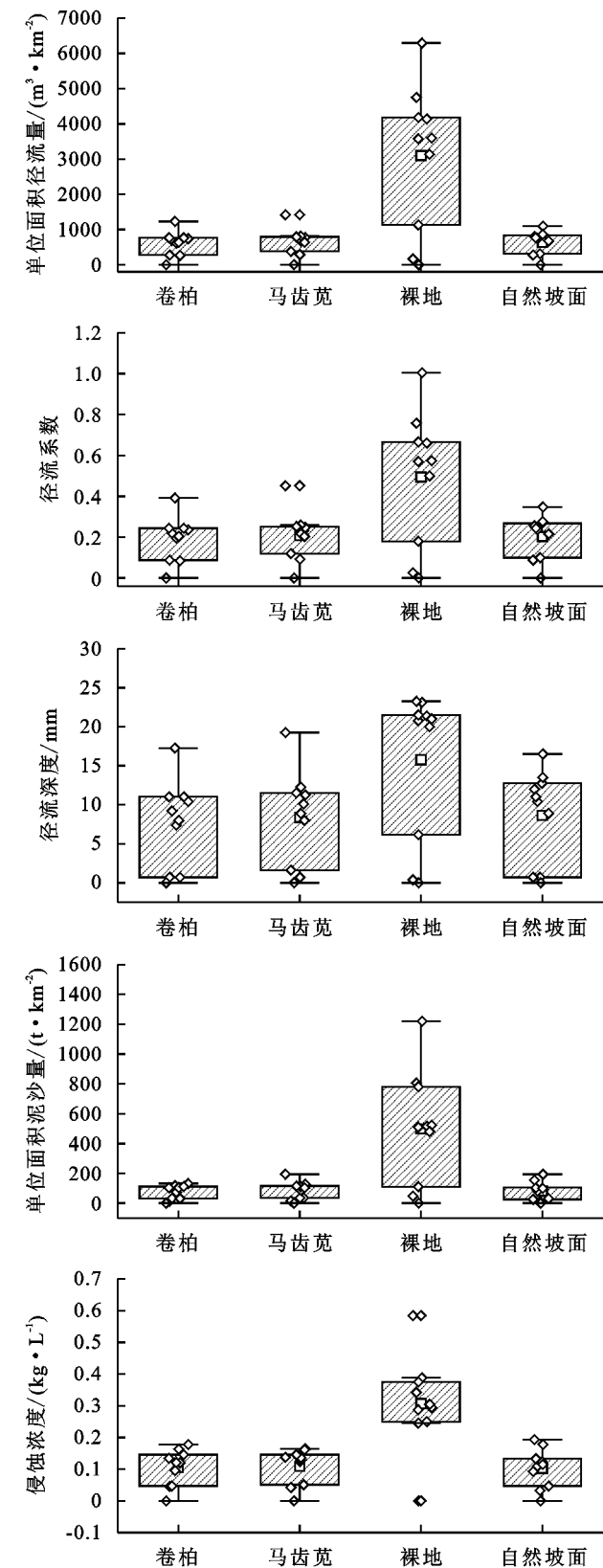


图 1 不同植被措施产流产沙量的对比

卷柏、马齿苋及自然坡面措施均具有一定的减沙

效益。卷柏、马齿苋与自然坡面的单位面积泥沙量依次为 $66.45, 55.47, 46.95 \text{ t}/\text{km}^2$, 减沙率分别为 $80.30\%, 83.55\%, 86.08\%$ 。另外从侵蚀浓度角度分析, 卷柏、马齿苋、自然坡面的侵蚀浓度依次为 $0.12, 0.08, 0.07 \text{ kg}/\text{L}$ 。可以看出, 减沙效果最好的植被措施为自然坡面措施。

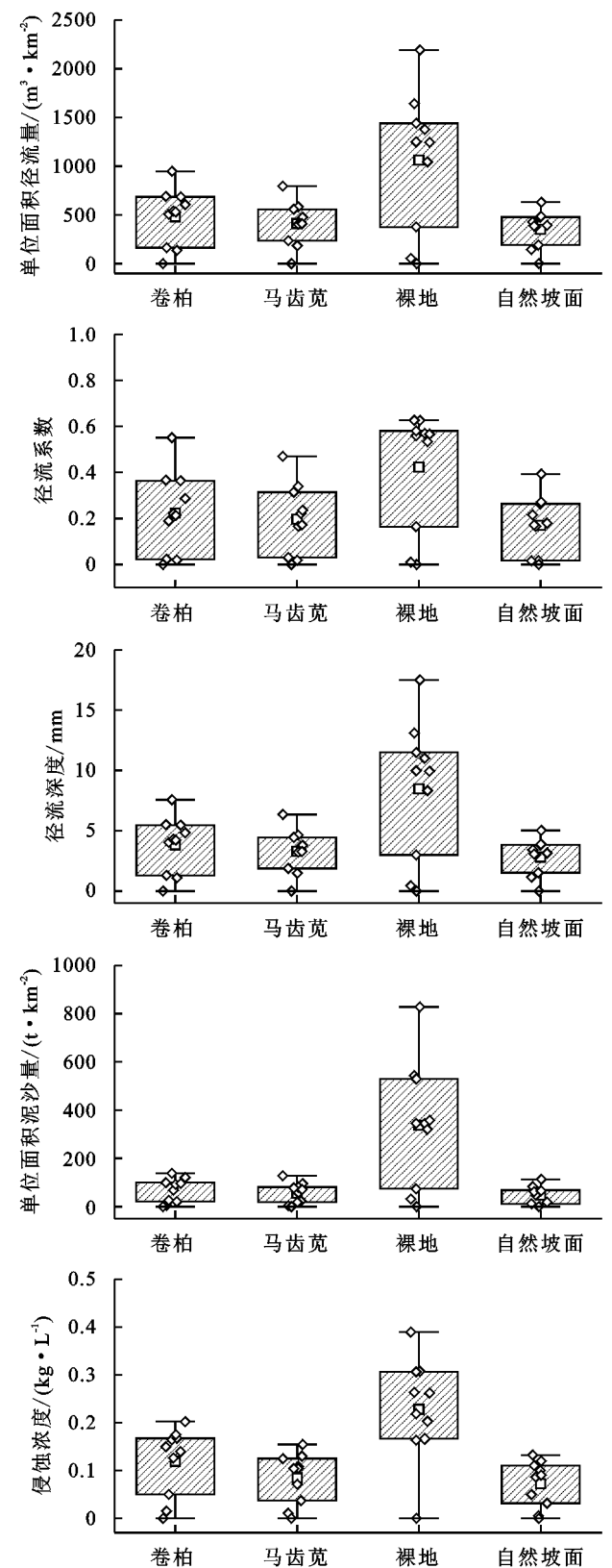


图 2 不同植被措施产流产沙量的对比(含工程措施)

3.3.2 植被措施相同、工程措施不同 在布设工程措施的情况下,对工程措施相同、植被措施不同径流小区的产流产沙量进行对比,可以看出,本研究所采用的水平条、椰丝毯和鱼鳞坑均具有一定水土保持效益。不同种类工程措施参与的径流小区在样本降雨时间下所产生的径流量、泥沙量均不同,即不同水土保持工程措施的水土保持效益不同。由图 3 可以看出,在减轻地表径流的作用大小方面 3 种工程措施的排序依次为:鱼鳞坑、水平条、椰丝毯。不同工程措施单位面积径流量、径流系数、径流深度的排序一致。鱼鳞坑、水平条、椰丝毯在样本降雨时间下产生的单次降雨平均单位径流量依次为 23.20,459.84,482.51 m^3/km^2 ;此 3 种措施参与的径流小区相对于无工程措施布设的小区其减流率分别达到 97.69%,53.92%,51.61%,在减少径流量方面效果最好的是鱼鳞坑措施,其次为水平条措施。

从减沙效果来看,不同工程措施的减沙效益不同。水平条、椰丝毯、鱼鳞坑 3 种措施在样本降雨下的单位面积泥沙量依次为 66.56,67.30,3.21 t/km^2 ,减沙率依次为 72.94%,72.64%,98.70%。除此之外,不同工程措施次降雨平均侵蚀浓度最小的为鱼鳞坑,为 0.02 kg/L 。

3.4 不同水土保持措施配置模式下产流产沙量的对比分析

从不同工程措施与不同植被措施组合而成的水土保持措施配置模式角度来看,本研究所采用的水保措施配置模式均具有一定的水土保持效益。不同水保措施配置模式的减流减沙效果有所差异。除裸地外,本研究共有 12 种水土保持措施配置模式。如图 4 所示,在 10 次样本降雨事件下产流 9 次的配置模式有卷柏、马齿苋、裸地、自然坡面;产流 8 次的包括卷柏+水平条、卷柏+椰丝毯、马齿苋+水平条、马齿苋+椰丝毯、自然坡面+水平条、自然坡面+椰丝毯;产流 5 次的有鱼鳞坑;除此之外,马齿苋+鱼鳞坑、自然坡面+鱼鳞坑两种水保措施配置模式布设的径流小区无产流产沙。

如图 4 所示,从水土保持效益对比,卷柏+水平条、卷柏、卷柏+椰丝毯、马齿苋+水平条、马齿苋、马齿苋+椰丝毯、马齿苋+鱼鳞坑、鱼鳞坑、自然坡面+水平条、自然坡面、自然坡面+椰丝毯、自然坡面+鱼鳞坑的单位面积径流量依次为 413.85,598.21,430.16,497.88,650.88,495.37,0,92.80,509.16,637.08,453.98,0 m^3/km^2 ,减流率依次为 73.27%,61.36%,72.21%,67.84%,57.95%,68.00%,100%,94.01%,67.11%,58.84%,

70.67%,100%;该 12 种配置模式的单位面积泥沙量依次为 61.34,71.87,66.16 t/km^2 ,70.62,82.64,68.62,0,12.82,67.13,80.31,67.12,0 t/km^2 ,减沙率依次为 87.73%,85.63%,86.77%,85.88%,83.47%,86.28%,100%,97.44%,86.57%,83.94%,86.58%,100%。

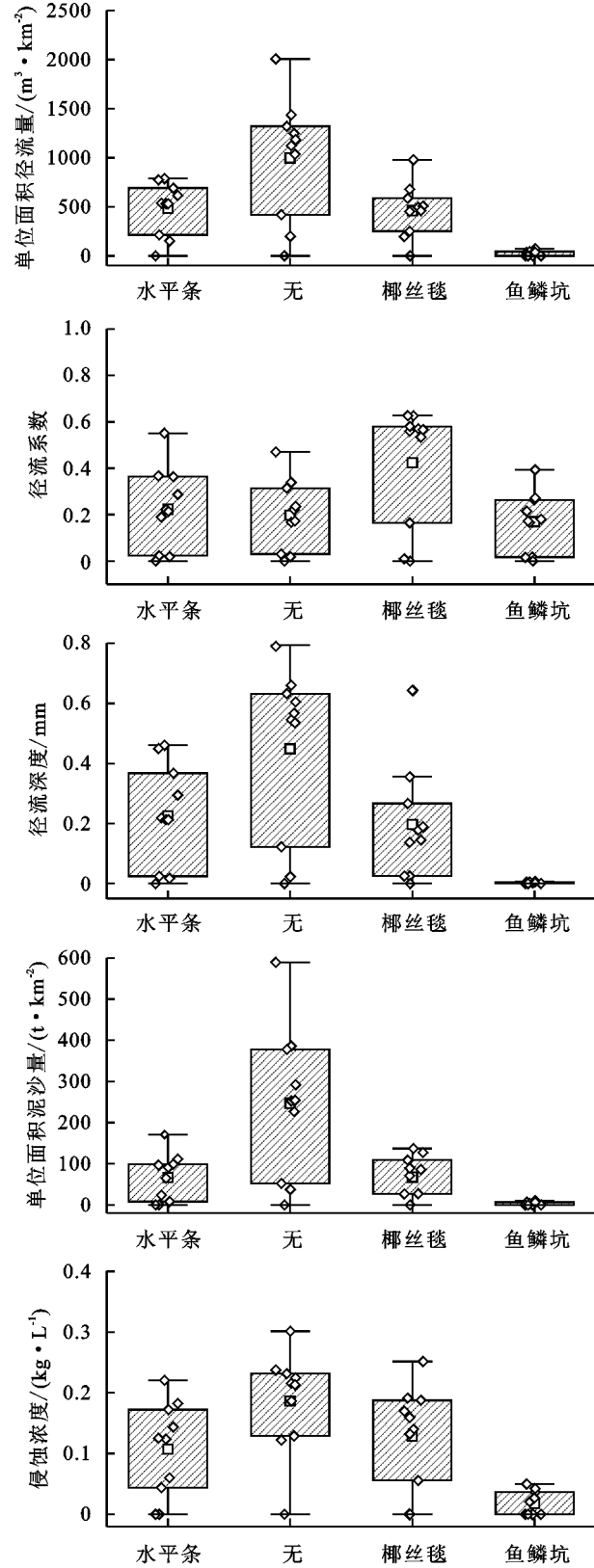


图 3 不同工程措施产流产沙量的对比

可见,本研究所采用的水土保持措施配置模式均具有较好的水土保持效益,其中较为突出的有马齿苋+鱼鳞坑、自然坡面+鱼鳞坑等配置模式,其

次为单独布设的鱼鳞坑措施。值得注意的是,鱼鳞坑措施参与的配置模式均表现出了较好的水土保持效果。

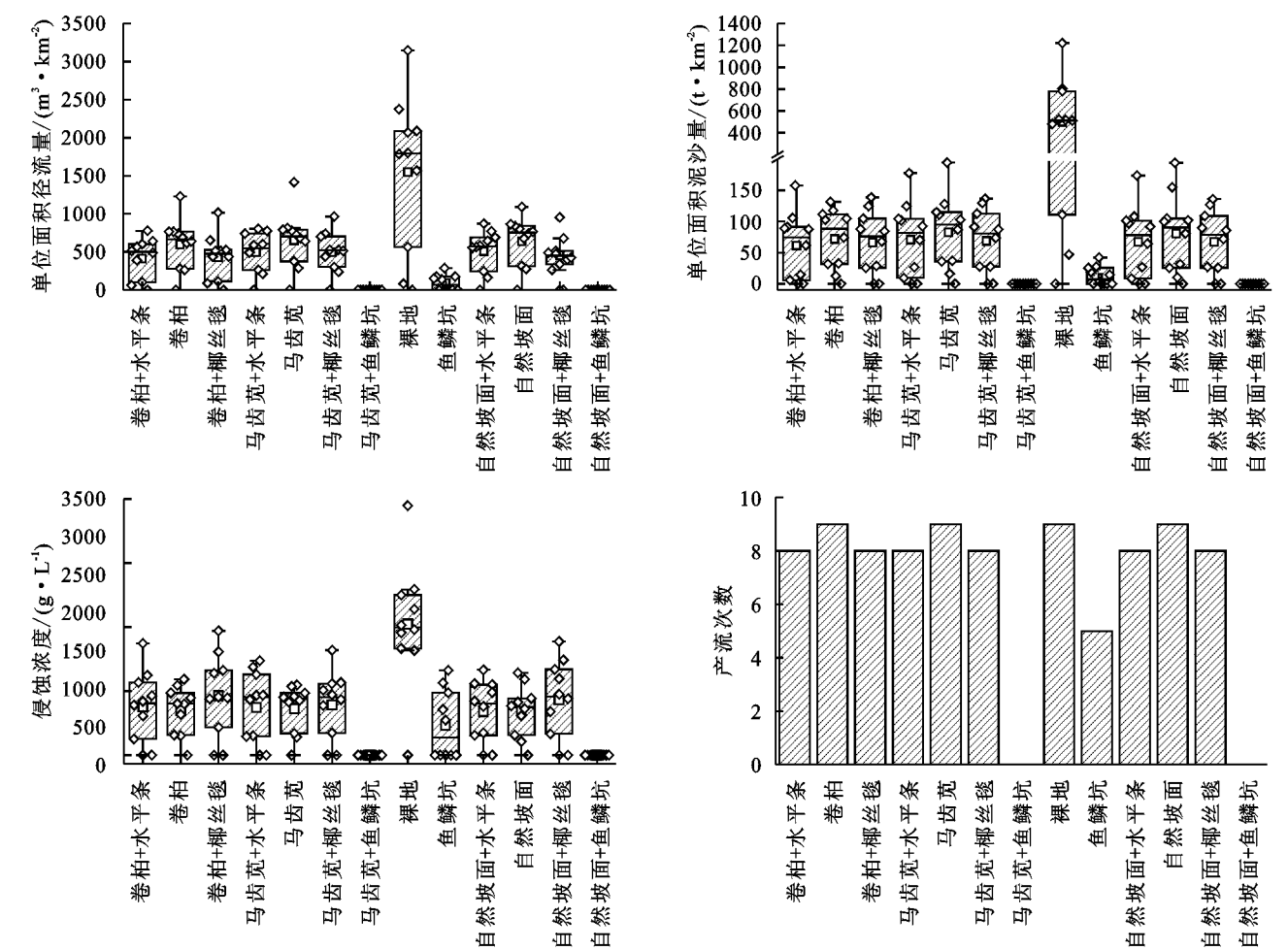


图 4 不同工程措施产流产沙量的对比

3.5 不同水土保持措施配置模式下产流产沙量对不同降雨强度的响应

为探究降雨等其他因子对土壤侵蚀相关因子的影响,对降雨量、雨强等降雨相关因子与产流产沙量等土壤侵蚀因子及土壤含水率进行相关分析。由表 3 可知,产流产沙量与所有降雨相关因子均呈极显著的正相关关系。其中径流量与降雨量、降雨历时、 I_{30} 、 I_{60} 、土壤含水率的相关系数分别为 0.533, 0.455, 0.435, 0.436, 0.827。可以看出,对径流量影响最大的降雨相关因子为降雨量。泥沙量与降雨量、降雨历时、 I_{30} 、 I_{60} 、土壤含水率的相关系数分别为 0.557, 0.419, 0.425, 0.432, 0.812。可以看出,对泥沙量影响最大的降雨相关因子同样为降雨量。值得注意的有,土壤含水率与除降雨历时、侵蚀浓度因子外其他所有因子均呈相关系数高于 0.6 的极显著正相关关系,其中与降雨量、径流量的相关系数分别为 0.804, 0.827。

4 讨论

4.1 水土保持措施对板栗林下土壤侵蚀的影响

受经济利益驱动,板栗林被广泛种植于山区丘陵地带,且较多板栗林栽种于坡度较大的陡坡。板栗林是密云区的主要经济树种之一,在当地被大量种植,然而由于当地居民长期不合理的耕作习惯,造成了板栗林下植被的严重破坏,大量地表裸露。与此同时,部分居民为促进板栗根系扩散而频繁对板栗林下土壤进行疏松,这些行为破坏了林下土壤的性质,降低了土地生产力,也加剧了板栗林下的土壤侵蚀问题。除此之外,陡峭的坡面也加剧了土壤侵蚀的发生。

目前,板栗林下常用的水土保持工程措施包括水平条、树盘、蓄水池等,其主要通过拦蓄降水、促进降水入渗、减轻径流对坡面的冲刷而减轻林下土壤侵蚀^[7]。除此之外,鱼鳞坑、宾格网、石笼措施亦可减轻径流与泥沙对坡地的冲刷^[8-10]。然而,工程措施由于仅起到拦挡水

土等外力作用,未必能具有最大限度的水土保持效益,因此还需要配合以植被措施对土壤进行改良,以达到水土保持效益的最大化。研究表明,植被覆盖可以降低雨滴击溅的动能,并且可以减缓地表径流的流速,进而减轻土壤侵蚀^[11]。因此,对于板栗林下土壤侵蚀的防治应当提高植被覆盖率。研究表明,卷柏、马齿苋可有效降低地表径流量与泥沙量^[12-13]。取得这些结果的原因是植被的冠层部分对降雨进行了截留,降低了雨滴击溅对土壤结构的破坏。且植被地上部分对径流与泥沙有一定拦截作用。除此之外,植被的根系增加了土壤团聚体的稳定性,改善了土壤结构,进而

提高了土壤的渗透性与抗蚀性。本研究的结果表明,石笼、鱼鳞坑、卷柏、马齿苋及自然植被等措施均有一定水土保持效益,且马齿苋+鱼鳞坑、自然坡面+鱼鳞坑两种配置模式可将其水土保持效益最大化。对于板栗林下土壤侵蚀的防治问题,除了需要考虑水保措施的防治效果外,还需要平衡生态防护与居民增收之间的关系,在选取工程措施及植被措施时,应尽可能节约成本。未来应当进一步提高当地居民的生态保护观念,普及水土保持相关知识。同时应当加大对当地水土保持措施防治效益的研究,以筛选出最适用于当地的水土保持措施配置模式。

表 3 降雨因子、土壤侵蚀因子、其他因子之间的相关性

相关参数	降雨量	降雨历时	雨强	I_{30}	I_{60}	径流量	泥沙量	径流系数	侵蚀浓度	土壤含水率
降雨量	1	0.685 *	0.605	0.819 **	0.847 **	0.533 **	0.557 **	0.531 **	0.353 **	0.804 **
降雨历时	0.685 *	1	-0.042	0.345	0.309	0.455 **	0.419 **	0.306 **	0.302 **	0.533 **
雨强	0.605	-0.042	1	0.666 *	0.699 *	0.349 **	0.333 **	0.405 **	0.175 *	0.689 **
I_{30}	0.819 **	0.345	0.666 *	1	0.982 **	0.435 **	0.425 **	0.502 **	0.237 **	0.705 **
I_{60}	0.847 **	0.309	0.699 *	0.982 **	1	0.436 **	0.432 **	0.504 **	0.250 **	0.748 **
径流量	0.533 **	0.269 **	0.349 **	0.435 **	0.436 **	1	0.843 **	0.919 **	0.659 **	0.827 **
泥沙量	0.357 **	0.219 **	0.233 **	0.325 **	0.332 **	0.843 **	1	0.576 **	0.668 **	0.612 **
径流系数	0.531 **	0.306 **	0.405 **	0.502 **	0.504 **	0.919 **	0.876 **	1	0.620 **	0.786 **
侵蚀浓度	0.353 **	0.302 **	0.175 *	0.237 **	0.250 **	0.659 **	0.668 **	0.620 **	1	0.433 **
土壤含水率	0.804 **	0.533 **	0.689 **	0.705 **	0.748 **	0.827 **	0.812 **	0.786 **	0.433 **	1

注:**表示在 $p<0.01$ 水平上显著相关,*表示在 $p<0.05$ 水平上显著相关。

4.2 降雨因子对板栗林下土壤侵蚀的影响

土壤侵蚀是指在降雨产生的地表径流的冲刷下,造成土壤颗粒被剥离,泥沙运移与沉积的过程^[14]。板栗林下土壤侵蚀过程十分复杂,影响因素较多,主要包括降雨相关因子与下垫面因子,其中降雨因子主要包括降雨量、雨强等因素,下垫面主要包括地表植被、土壤理化性质等因素^[15]。根据之前的研究表明,对土壤侵蚀因子影响最大的降雨因子为降雨侵蚀力因子,即降雨动能 E 与 I_{30} 的乘积 EI_{30} 。而本研究结果表明,影响产流产沙量最大的降雨因子为降雨量,这种结果可能是板栗林下土壤侵蚀特殊的过程与机理导致的,因此未来需要加大对板栗林下土壤侵蚀过程与机理的研究。除此之外,有研究表明,未来强降雨发生的频率有增加的可能性^[11]。未来需要对强降雨可能造成的土壤侵蚀加以警惕,同时对强降雨条件下水土保持效益较好的防治措施进行筛选与推广。

5 结论

(1) 在仅布设植被措施条件下,卷柏、马齿苋以及生长天然植被的自然坡面均具有较好的水土保持效

益。卷柏、马齿苋、自然坡面的减流率依次为 61.36%, 57.96%, 58.85%, 减沙率依次为 85.61%, 83.57%, 83.92%。在仅布设植被措施、无工程措施布设的条件下,当地减轻地表径流及泥沙运移作用最大的植被类型为卷柏,其次为自然坡面。

(2) 在同时布设植被措施与工程措施条件下,各种水保措施也均具有较好的水土保持效益。工程措施相同、植被措施不同时,卷柏、马齿苋、自然坡面减流率分别为 66.93%, 61.34%, 54.84%, 减沙率分别为 80.30%, 83.55%, 86.08%。生长天然植被的自然坡面减流减沙效果最好。工程措施不同、植被措施相同时,鱼鳞坑、水平条、椰丝毯减流率分别达到 97.69%, 53.92%, 51.61%, 减沙率依次为 72.94%, 72.64%, 98.70%。在减少径流量方面效果最好的是鱼鳞坑措施,其次为水平条措施。本研究所采用的水保措施配置模式均具有一定的水土保持效益。不同水保措施配置模式的减流减沙效果有所差异。

(3) 综合比较所有水保措施及配置模式,可以看出,卷柏+水平条、卷柏、卷柏+椰丝毯、马齿苋+水平条、马齿苋、马齿苋+椰丝毯、马齿苋+鱼鳞坑、鱼鳞

坑、自然坡面+水平条、自然坡面、自然坡面+椰丝毯、自然坡面+鱼鳞坑的减流率依次为 73.27%,61.36%,72.21%,67.84%,57.95%,68.00%,100%,94.01%,67.11%,58.84%,70.67%,100%,减沙率依次为 87.73%,85.63%,86.77%,85.88%,83.47%,86.28%,100%,97.44%,86.57%,83.94%,86.58%,100%。马齿苋+鱼鳞坑、自然坡面+鱼鳞坑配置模式的水土保持效益最佳,其次为单独布设的鱼鳞坑措施。

(4) 对板栗林下产流产沙量影响最大的因子为降雨量因子,降雨量与径流量、泥沙量的相关系数分别为 0.533,0.557,呈极显著的正相关关系。径流量与泥沙量、径流系数、侵蚀浓度、土壤含水率的相关系数分别为 0.843,0.919,0.659,0.827,呈极显著相关关系。

参考文献:

[1] 徐佳佳.北京密云石匣小流域坡面径流泥沙及雨水溶解物的研究[D].北京:北京林业大学,2020.

[2] 王瑞波,兰彦平,周连第,等.北京密云水库库区板栗生产调查[J].中国果树,2010(5):68-69,74.

[3] 王世雷,王奋忠,李民义,等.密云区板栗林下水土流失防治初探[J].中国水土保持,2020(6):64-66.

[4] Liu J, Pang S, He Y, et al. Critical area identification of phosphorus loss based on runoff characteristics in small watershed[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017,33(20):241-249.

[5] 张秋锋.密云水库石匣小流域水土保持措施效应研究[J].广东农业科学,2013,40(8):146-148.

[6] 刘宝元,毕小刚,符素华,等.北京土壤流失方程[M].北京:科学出版社,2010.

[7] 尚润阳,张亚玲.燕山山区板栗林林下水土流失危害及防治建议[J].海河水利,2015(3):12-14,35.

[8] 丁新辉,刘孝盈,刘广全.基于改进 TOPSIS 法的南方岩溶区石漠化生态治理模式评价[J].泥沙研究,2021,46(2):54-58,20.

[9] 刘立桥.浅谈生态宾格网在护坡设计中的选择与应用[J].江苏水利,2014(8):37-38,41.

[10] 姜丽.石灰石老矿山水土保持设计理念及防治措施[J].水土保持应用技术,2012(3):36-38.

[11] Zhao C, Gao J, Huang Y, et al. The contribution of *Astragalus adsurgens* roots and canopy to water erosion control in the water-wind crisscrossed erosion region of the Loess Plateau, China[J]. Land Degradation & Development, 2017,28(1):265-273.

[12] 杜勇强,汤崇军,刘英亮,等.生草措施对红壤区果园水土流失和氮素流失的影响[J].江西水利科技,2021,47(4):296-302.

[13] 费晓.密云板栗林地水土流失治理措施及其效果研究[D].北京:北京林业大学,2019.

[14] 彭旭东,戴全厚,李昌兰.中国西南喀斯特坡地水土流失/漏失过程与机理研究进展[J].水土保持学报,2017,31(5):1-8.

[15] Chen H, Zhang X, Abila M, et al. Effects of vegetation and rainfall types on surface runoff and soil erosion on steep slopes on the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2018,170:141-149.

(上接第 27 页)

[13] 杨吉山,姚文艺,郑明国,等.原状砒砂岩坡面产流产沙规律试验研究[J].人民黄河,2017,39(1):98-101,109.

[14] 胡剑汝,饶良懿,申震洲.基于 WEPP 的砒砂岩坡面复合侵蚀治理生态水文效应评价[J].水土保持学报,2020,34(2):123-129,238.

[15] 陈鹏,张铁钢,董智,等.灌草格局对砒砂岩区产流产沙特征的影响[J].干旱区资源与环境,2020,34(9):116-121.

[16] 汤珊珊.覆沙坡面水蚀产沙动力过程与微地貌变化的响应研究[D].西安:西安理工大学,2018.

[17] 郑粉莉,高学田.坡面汇流汇沙与侵蚀—搬运—沉积过

程[J].土壤学报,2004,41(1):134-139.

[18] 吴发启,赵西宁,崔卫芳.坡耕地耕作管理措施对降雨入渗的影响[J].水土保持学报,2003,17(3):115-117.

[19] 赵龙山,张青峰,王健,等.黄土坡面不同微坡位上糙度对降雨侵蚀的响应[J].土壤学报,2013,50(4):637-642.

[20] 唐辉,李占斌,李鹏,等.模拟降雨下坡面微地形量化及其与产流产沙的关系[J].农业工程学报,2015,31(24):127-133.

[21] 赵斯琦,王晓红,舒天竹,等.喀斯特地区区域尺度土壤侵蚀地形因子研究[J].干旱区资源与环境,2018,32(5):97-103.