

\*\*\*\*\*  
试验研究  
\*\*\*\*\*

# 不同植物配置模式对人工边坡减流减沙效益的影响

咎玉亭<sup>1,2</sup>, 奚同行<sup>1,2</sup>, 吴治玲<sup>1,2</sup>, 张华明<sup>1,2</sup>, 龚长春<sup>1,2</sup>, 熊峰<sup>1,2</sup>, 李英<sup>1,2</sup>

(1.江西省水利科学院, 江西南昌 330029; 2.江西省土壤侵蚀与防治重点实验室, 江西南昌 330029)

**摘要:** [目的] 探讨不同植物模式(混草、花草、灌草、乔草)及配置比例对生产建设项目人工边坡水土流失的影响, 为人工边坡植被恢复提供参考。[方法] 采用径流小区定位观测法, 记录2019年1—12月自然降雨, 研究4种植物模式的产流产沙特点, 揭示4种植物模式的减流减沙效益。[结果] ①观测期内总降雨量为1 052.73 mm, 总降雨历时为845.1 h, 7月降雨量最大, 2月降雨历时最长, 降雨集中在1—7月, 以中雨、大雨、暴雨为主。②每场降雨产流差异大, 产流月季差异大, 集中在2—4月及7月, 多发生在中雨、大雨和暴雨情况。③每场降雨及月、季降雨之间产沙差异大, 3月产沙最大, 产沙集中在2—4月及7月, 多发生中雨、大雨和暴雨。④以花草模式为对照, 每场降雨条件下灌草模式的减流率最大, 乔草模式的减沙率最大, 月降雨累计条件下, 混草模式减流率最大, 乔草模式减沙率最大, 不同降雨等级累积和全年累积条件下, 乔草模式的减流减沙率最大。[结论] 植被恢复初期, 受植被覆盖度差异影响, 乔草模式、混草模式的减流减沙率较大, 具有较好的固土保持效益。

**关键词:** 植物配置模式; 人工边坡; 减流减沙; 降雨

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)03-0001-07

中图分类号: S157.1, S157.2

**文献参数:** 咎玉亭, 奚同行, 吴治玲, 等. 不同植物配置模式对人工边坡减流减沙效益的影响[J]. 水土保持通报, 2022, 42(3): 1-7. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.03.001; Zan Yuting, Xi Tonghang, Wu Zhiling, et al. Effects of different plant configuration patterns on flow and sediment reduction of artificial slope [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(3): 1-7.

## Effects of Different Plant Configuration Patterns on Flow and Sediment Reduction of Artificial Slope

Zan Yuting<sup>1,2</sup>, Xi Tonghang<sup>1,2</sup>, Wu Zhiling<sup>1,2</sup>,

Zhang Huaming<sup>1,2</sup>, Gong Changchun<sup>1,2</sup>, Xiong Feng<sup>1,2</sup>, Li Ying<sup>1,2</sup>

(1. Jiangxi Academy of Water Science and Engineering, Nanchang, Jiangxi 330029, China;

2. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Soil Erosion and Prevention, Nanchang, Jiangxi 33029, China)

**Abstract:** [Objective] The impacts of different plant patterns and configuration proportions on soil and water loss of an artificial slope were analyzed in order to provide reference for artificial slope vegetation restoration. [Methods] Natural rainfall from January to December 2019 was measured and the runoff and sediment yield characteristics for runoff plots was simulated using four different vegetation patterns to determine the runoff and sediment reduction benefits of different vegetation patterns. [Results] ① Total rainfall during the observation period was 1 053 mm, and total rainfall duration was 845.1 hours. Rainfall in July was the largest, and rainfall in February had the longest duration. Rainfall was concentrated in January to July, and classified mainly as moderate rain, heavy rain, and rainstorm. ② The variation in runoff yield per rainfall was large, and the variation in monthly and seasonal runoff yield was also large, mainly occurring in February–April and July, in events classified as moderate, heavy rain, and rainstorm. ③ The sediment yield of field rainfall, monthly rainfall and seasonal rainfall was very different. Sediment yield in March was the highest, and the sediment yield was concentrated in February–April and July, with frequent occurrences of moderate rain, heavy rain, and rainstorm events. ④ Compared with the flower-grass pattern, the shrub-grass pattern had

收稿日期: 2021-10-21

修回日期: 2022-01-12

资助项目: 江西省科技厅重点研发计划项目“江西红壤区工程堆积体水土保持植被优化配置研究”(2016BBG70086); 江西省水利厅科技项目(202123YBKT13, 202123BZKT02); 江西省水利科学院江西省土壤侵蚀与防治重点实验室开放基金项目(KFJJ201804, KFJJ202004)

第一作者: 咎玉亭(1986—), 男(汉族), 山东省峰城区人, 硕士, 高级工程师, 主要从事水土保持及生态恢复研究。Email: 545894942@qq.com。

通信作者: 奚同行(1968—), 男(汉族), 江西省南康区人, 大学本科, 正高级工程师, 主要从事土壤侵蚀与流域治理、生产建设项目水土保持研究。Email: tonghangxi@163.com。

the largest runoff reduction and the tree-grass pattern had the largest sediment reduction rate under each rainfall type. The tree-grass pattern had the largest sediment reduction rate, and the herb pattern had the largest runoff reduction rate under the monthly rainfall accumulation. The tree-grass pattern had the largest runoff and sediment reduction rate under the condition of accumulation of different rainfall classes and annual accumulation. [Conclusion] In the early stage of vegetation restoration, affected by the difference in vegetation coverage, the tree-grass pattern and the herb pattern had a higher rate of flow reduction and sediment reduction, and had better soil conservation benefits.

**Keywords:** plant configuration patterns; artificial slope; runoff and sediment reduction; rainfall

高速公路、风电场等生产建设项目建设备受重视。2020 年全国高速公路里程达到  $1.61 \times 10^5$  km, 江西省高速公路里程达到 6 234.11 km。国家在生产建设项目方面的投资还在逐年增长, 这意味着挖填扰动还会增加, 还将形成大量的人工边坡<sup>[1]</sup>, 造成边坡水土流失, 衍生诸多生态环境问题的同时, 还可能诱发滑坡、泥石流等灾害, 严重威胁公共安全<sup>[2-3]</sup>。

植物措施作为水土保持三大措施之一, 对防止生产建设项目水土流失有积极意义。国内外学者以工程堆积体<sup>[4]</sup>、坡耕地<sup>[5]</sup>、边坡<sup>[6]</sup>为研究对象, 对降雨条件下<sup>[7]</sup>、放水试验下<sup>[8]</sup>, 植物<sup>[9]</sup>或植物篱<sup>[10]</sup>的水土保持效益进行了大量研究, 表明植物措施能够改良土壤性质, 对坡面的减流减沙效益为 13.17%~98.51%, 具有良好的减流减沙效益<sup>[11-12]</sup>。但针对生产建设项目人工边坡采用何种植被搭配, 比例及如何配置才既能在更好地发挥水土保持效益的同时又能降低水土保持措施投资等一系列问题有待进一步探索。因此, 本研究选取了 6 种植物建立 4 种植物配置模式(混草、花草、灌草、乔草)径流小区, 记录 2019 年 1—12 月的自然降雨, 研究 4 种植物模式的产流产沙特点, 探讨 4 种植物模式的减流减沙效益, 以期为建设项目人工边坡水土流失的防治和植被恢复提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

径流小区布设在江西省德安县的江西水土保持生态科技园内(115°42′—115°43′E, 29°16′—29°17′N), 地貌类型以低丘为主, 属于亚热带季风气候区, 海拔在 30~90 m 之间, 多年平均降雨量为 1 350.9 mm, 最大年降雨量为 1 807.7 mm, 最小年降雨量为 865.6 mm, 多年平均蒸发量为 1 558 mm, 多年平均气温 16.7 ℃。

### 1.2 试验设计

观测期为 2019 年 1—12 月, 选择狗牙根、高羊茅、黑麦草、波斯菊、马棘及刺槐等 6 种植物分别配置混草模式、花草模式、灌草模式及乔草模式等 4 种植物模式, 每种模式设 3 个重复。在研究区内的边坡布设 12 个径流小区, 记录观测期内的降雨及各径流小

区的产流产沙情况。各植物配置模式径流小区为 1:1.5, 东西向的边坡, 2018 年 3 至 4 月, 草籽按照比例混合后人工撒播在边坡上。4 种植物模式径流小区的基本情况详见表 1 和图 1。

表 1 4 种植物配置模式径流小区的基本情况

配置模式	植物组合	径流小区投影面积(长×宽)	配置比例/( $g \cdot m^{-2}$ )
混草	狗牙根	10 m×5 m	6.67
	高羊茅		6.67
	黑麦草		6.67
花草	波斯菊	10 m×5 m	4
	狗牙根		5.33
	高羊茅		5.33
灌草	黑麦草	10 m×5 m	5.33
	马棘		8
	狗牙根		4
乔草	高羊茅	10 m×5 m	4
	黑麦草		4
	刺槐		1 m×1 m 株行距
乔草	狗牙根	10 m×5 m	6.67
	高羊茅		6.67
	黑麦草		6.67

### 1.3 研究内容及方法

(1) 降雨观测。记录观测期内的降雨开始及结束时间、降雨场次、次降雨量、次降雨历时, 降雨等级划分参照中国气象局颁布的《降雨等级划分标准(内陆划分)》。

(2) 产流产沙。每个径流小区下设 3 个径流桶, 各径流桶采用七孔分流法收集次降雨的产流产沙。

减流减沙率采用下列公式计算<sup>[13]</sup>:

$$\text{减流率: } R_w = (W_0 - W_1) / W_0 \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{减沙率: } R_s = (S_0 - S_1) / S_0 \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $R_w$  为减流率(%);  $R_s$  为减沙率(%);  $W_0, S_0$  分别为花草小区的径流量、泥沙量( $mm, t/km^2$ );  $W_1, S_1$  为目标坡面冲刷的径流量、泥沙量( $mm, t/km^2$ )。

### 1.4 数据处理

采用 Excel 2016 软件进行数据的统计处理, 用 SPSS 20.0 软件进行统计分析。



注:1为混草混合模式;2为花草模式;3为灌草模式;4为乔草模式。

图1 4种植物配置模式的人工边坡径流小区布设格局(2019年5月拍摄)

## 2 结果与分析

### 2.1 降雨特征分析

观测期内剔除没有产流的降雨(即有效降雨)后,共有30场,总降雨量为1 052.73 mm,总降雨历时为845.1 h,平均雨强为1.25 mm/h。

观测期内30场降雨差异较大。①从降雨量分析,4月25日的降雨量最小,只有8.8 mm,只占总降雨量的0.84%。7月12日的降雨量最大,达到109.1 mm,占总降雨量10.36%,是最小降雨量的12.4倍;②从降雨历时分析,7月20日的降雨历时最小,只有0.75 h,只占总降雨历时的0.09%。2月4日的降雨历时最大,达到125.17 h,占总降雨历时的14.81%,是最小降雨历时的166.89倍;③从平均雨强分析,1月7日的降雨强度最小,仅为0.37 mm/h。8月13日的降雨强度最大,达到33.76 mm/h,是最小雨强的90.43倍。

观测期内各月份的降雨情况详见表2。8,11,12月,各只有1次降雨,仅占总降雨次数的3.33%。4月降雨次数最多,达7次,占总降雨场次的23.33%。

11月降雨量最小,为14.50 mm,只占总降雨量的1.37%。7月降雨量最大,达到215.30 mm,占总降雨量的20.41%,是11月的14.85倍。8月降雨历时最短,只有1.25 h,占总降雨历时的0.15%。2月降雨历时最长,达到284.85 h,占降雨历时的33.63%,是8月的227.88倍。各月份的平均雨强在0.44~33.76 mm/h之间,降雨差异比较大。1—7月的降雨场次为20次,降雨量为982.03 mm,降雨历时为797.18 h,分别占观测期降雨的90%,93.1%,94.12%,说明观测期内的降雨主要集中在1—7月。

观测期内各等级降雨统计分析结果详见表3。观测期内小雨次数最少,只有1次,中雨、大雨次数最多,都有9次。小雨的降雨量最小,只有37.33 mm,仅占总降雨量的3.55%,中雨的降雨量最大,达到293.60 mm,占总降雨量的27.89%,是小雨的7.87倍。特大暴雨的降雨历时最短,只有4.67 h,占总降雨历时的0.55%,中雨的降雨历时最长,长达466.34 h,占总降雨历时的55.18%,是特大暴雨的99.86倍,各等级平均雨强为0.37~16.45 mm/h,说明观测期内各等级的降雨差异较大。中雨、大雨和暴雨

3 种等级的降雨场次为 23 次, 降雨量为 803.80 mm, 76.67%, 76.35%, 84.98%, 说明观测期内以中雨、大雨和暴雨为主。

表 2 4 种植物配置模式的人工边坡观测期内各月份降雨情况

月份	场次		降雨量		降雨历时		平均雨强/ (mm·h <sup>-1</sup> )
	次数/次	比例/%	雨量/mm	比例/%	历时/h	比例/%	
1	2	6.67	71.33	6.76	163.75	19.33	0.44
2	5	16.67	196.30	18.61	284.85	33.63	0.69
3	3	10.00	143.30	13.59	67.25	7.94	2.13
4	7	23.33	159.20	15.09	77.00	9.09	2.07
5	3	10.00	64.20	6.09	58.67	6.93	1.09
6	4	13.33	132.40	12.55	102.33	12.08	1.29
7	3	10.00	215.30	20.41	43.33	5.12	4.97
8	1	3.33	42.20	4.00	1.25	0.15	33.76
11	1	3.33	14.50	1.37	14.75	1.74	0.98
12	1	3.33	16.00	1.52	33.92	4.00	0.47
合计	30	100	1 054.73	100	847.10	100	1.25

表 3 4 种植物配置模式的人工边坡观测期内各等级降雨情况

类型	场次		降雨量		降雨历时		平均雨强/ (mm·h <sup>-1</sup> )
	次数/次	比例/%	雨量/mm	比例/%	历时/h	比例/%	
小雨	1	3.33	37.33	3.55	100.00	11.83	0.37
中雨	9	30.00	293.60	27.89	466.34	55.18	0.63
大雨	9	30.00	258.70	24.57	172.84	20.45	1.50
暴雨	5	16.67	251.50	23.89	79.00	9.35	3.18
大暴雨	3	10.00	134.80	12.80	22.25	2.63	6.06
特大暴雨	3	10.00	76.80	7.30	4.67	0.55	16.45
合计	30	100	1 052.73	100	845.10	100	1.25

## 2.2 不同植物配置模式产流特征

观测期内 30 场降雨的产流差异较大。从每种模式来看, 混草模式最小径流量在 5 月 12 日, 径流量为  $0.02 \pm 0.01$  mm, 最大径流量在 3 月 1 日, 为  $4.50 \pm 0.52$  mm, 是最小径流量的 225 倍, 花草模式最小径流量在 5 月 12 日, 径流量为  $0.06 \pm 0.01$  mm, 最大径流量在 2 月 14 日, 为  $24.98 \pm 13.7$  mm, 是最小径流量的 416 倍, 灌草模式最小径流量在 11 月 27 日, 径流量为  $0.06 \pm 0.01$  mm, 最大径流量在 3 月 20 日, 为  $3.35 \pm 1.55$  mm, 是最小径流量的 55 倍, 乔草模式最小径流量在 5 月 12 日, 为  $0.02 \pm 0.01$  mm, 最大径流量在 7 月 4 日, 为  $3.96 \pm 2.81$  mm, 是最小径流量的 198 倍。可以看出, 受降雨及植被恢复情况影响, 各模式次降雨的最大径流量基本不在同场降雨发生。以降雨量较大(127.9 mm)、降雨历时较长(105.17 h)的 2 月 14 日降雨为例, 4 种模式的径流量依次为  $4.5 \pm 0.52$ ,  $24.98 \pm 13.7$ ,  $2.43 \pm 0.56$ ,  $1.6 \pm 0.82$  mm, 可以看出同场降雨, 各植物模式的产流量差异较大, 这主要和各植物模式的恢复情况、植被覆盖度有关。

每种重复之间差异也较大, 各植物模式重复之间变化幅度分别达到 0.52, 13.7, 0.56, 0.82 mm, 这是由于每种重复之间覆盖度的差异引起的。

观测期内不同月份各植物配置模式累积产流情况详见表 4。可以看出 4 种模式 12 月累积产流量均最小, 混草模式和乔草模式在 3 月、花草模式在 2 月、灌草模式在 4 月的累积产流量最大。可以看出各配置模式产流的月季变化较大, 这与降雨的月份分布有关。2—4 月及 7 月各模式的累积产流量分别为 27.22, 61.22, 25.81, 20.20 mm, 分别占各自总量的 83.78%, 90.23%, 78.47%, 80.77%, 说明各植物模式产流的主要在 2—4 月及 7 月。这是因为 2—4 月的降雨量较大, 雨强较强, 再加上植被覆盖度较低, 降雨直接冲击小区坡面, 再加上坡面枯落物较少, 产流量自然较大, 5—6 月降雨量及雨强也比较大, 但进入生长季后, 植被覆盖度较好, 大部分降雨被截留, 混草植被覆盖程度较好, 增加了地表糙率, 延缓了地表径流的发生, 产流量少于 2—4 月, 12 月降雨量比 11 月略大, 但降雨历时较长, 平均雨强小于 11 月, 产流也就小于 11 月。

从各月累积产流量来看:花草模式>灌草模式>混草模式>乔草模式,各月份产流基本符合这个顺序,除部分月份由于植被覆盖度差异引起的产流略有不同。

表4 不同月份4种配置模式累积产流情况

月份	累积产流量/mm			
	混草模式	花草模式	灌草模式	乔草模式
1	2.36±1.16	4.65±3.29	3.41±2.62	1.06±0.80
2	7.81±2.38	32.34±12.78	7.16±1.85	5.37±1.79
3	8.51±1.08	13.53±9.33	7.24±3.12	6.54±3.16
4	6.79±0.84	12.13±6.44	7.58±2.92	5.11±1.11
5	0.56±0.12	0.42±0.04	0.87±0.10	0.80±0.06
6	1.92±0.88	2.47±1.15	2.35±1.21	1.05±0.14
7	4.11±1.32	3.22±2.13	3.83±2.88	3.18±0.33
8	0.34±0.09	0.39±0.07	0.34±0.10	0.30±0.09
11	0.05±0.02	0.11±0.04	0.06±0.00	0.05±0.02
12	0.04±0.01	0.10±0.03	0.05±0.01	0.04±0.02

观测期内不同等级降雨各植物配置模式的累积产流情况详见表5。小雨时,各植物模式的产流均最小,混草模式、灌草模式和乔草模式的大雨累积产流量最大,花草模式的中雨累积产流量最大。由表5可以看出,不同降雨等级各植物配置模式产流量差异较大。受中雨、大雨和暴雨的分布特征影响,4种植被恢复模式的累积产流量分别为26.47,59.04,26.31,20.03 mm,分别占各自总量的81.47%,87.02%,80.02%,80.09%,说明产流主要集中在这3种等级。从表5还可以看出,4种植物模式的产流量基本顺序为:花草模式>灌草模式>混草模式>乔草模式。每种植物模式的重复间差异也比较大,最大的花草模式达到13.36 mm,这也是由于植被覆盖度不同引起的差异,而各模式采用人工撒播工艺,受降雨影响,在植被恢复初期,各植被小区不同程度地被冲刷至中下坡,尤以花草、灌草模式最为明显,这就导致了相同条件下两种模式重复间的植被覆盖度差异较大,进而影响了产流的差异。

表5 不同等级降雨4种配置模式累积产流情况

降雨等级	累积产流量/mm			
	混草模式	花草模式	灌草模式	乔草模式
小雨	1.05±0.70	1.81±1.22	1.26±0.86	0.42±0.06
中雨	8.24±2.57	33.57±12.99	8.53±3.49	5.56±0.91
大雨	11.34±1.17	17.25±13.36	10.44±3.37	7.29±1.24
暴雨	6.89±0.71	8.22±3.48	7.34±4.04	7.18±1.97
大暴雨	3.36±0.85	4.03±1.39	3.67±1.81	3.15±0.97
特大暴雨	1.61±0.08	2.97±0.89	1.64±0.37	1.41±0.56

### 2.3 不同植物配置模式产沙特征

观测期内30场降雨的产沙差异较大。混草模式最小产沙量在5月12日,为0.04±0.03 t/km<sup>2</sup>,最大

产沙量在3月30日,为321.46±130.36 t/km<sup>2</sup>;花草模式最小产沙量在4月25日,为0.01±0.01 t/km<sup>2</sup>,最大产沙量在3月30日,为382.60±257.90 t/km<sup>2</sup>;灌草模式最小产沙量在6月12日,为0.52±0.06 t/km<sup>2</sup>,最大产沙量在3月20日,为317.36±158.31 t/km<sup>2</sup>;乔草模式最小产沙量在12月18日,为0.14±0.06 t/km<sup>2</sup>,最大产沙量在3月20日,为87.62±16.99 t/km<sup>2</sup>。可以看出,4种模式的产沙量3月20日次降雨都达到了最大值,虽然此次降雨量只有55.4 mm,降雨历时为16.67 h,平均雨强比较大,达到3.32 mm/h,再加上各植物模式刚进入生长季,是植被覆盖度最低的月份之一,导致了4种植物模式产沙量均达到最大。而降雨量(63.7 mm)、降雨历时(26.33 h)、平均雨强(2.42 mm/h)接近的6月20日次降雨的产沙量分别为3.64±1.24,4.23±1.34,4.13±3.6,1.16±1.6 t/km<sup>2</sup>,正是由于处于生长季,植被覆盖度较好,4种模式的产沙量均远低于3月20日产沙(见表6)。

观测期内不同月份各植物配置模式累积产沙情况详见表6。可以看出各配置模式产沙的月季变化较大,12月的累积产沙量最小,仅占各自总量的0.04%,0.10%,0.14%,0.03%,3月的产沙量最大,分别占各自总量的63.35%,57.80%,51.32%,39.15%。2—4月及7月4种模式的累积产沙量分别为638.21,881.61,718.61,409.57 t/km<sup>2</sup>,分别占各自总量的94.56%,95.89%,95.12%,94.26%,说明各植物模式产沙的主要集中在2—4月及7月。这和降雨、径流的月份分布有关。

表6 不同月份4种植物配置模式累积产沙情况

月份	累积产沙量/(t·km <sup>-2</sup> )			
	混草模式	花草模式	灌草模式	乔草模式
1	8.64±5.72	21.47±16.17	16.59±7.26	2.73±0.37
2	56.38±24.86	224.86±90.59	137.15±52.83	50.4±37.49
3	427.57±188.11	531.41±339.85	387.71±194.87	170.13±41.33
4	89.86±36.94	159.93±61.64	124.86±62.31	94.95±47.51
5	7.77±1.96	2.51±1.64	5.39±3.67	6.30±2.74
6	16.57±11.52	3.39±1.54	7.10±1.04	7.18±1.94
7	29.4±8.27	35.48±7.18	33.82±23.49	24.09±6.73
8	3.12±1.22	8.16±1.92	6.13±4.69	4.77±2.13
11	0.36±0.09	1.35±0.87	0.59±0.30	0.46±0.28
12	0.26±0.14	0.93±0.49	1.03±0.25	0.14±0.06

观测期内不同降雨等级累积产沙量情况详见表7。小雨时,各植物模式的产沙均为最小,暴雨时,4种模式的累积产沙量均达到最大。可以看出,不同等级降雨,各植物配置模式产沙量差异较大。从每种等级的累积产沙量来看,大小顺序基本为:花草模式>灌草模式>混草模式>乔草模式。受中雨、大雨和暴

雨的分布特征影响,4种植被恢复模式的累积产沙量分别为 598.69,890.88,658.27,346.2 t/km<sup>2</sup>,分别占各自总量的 88.7%,90.16%,87.14%,87.47%,说明各模式的产沙主要集中在这 3 种等级,这和降雨特征、产流主要集中在这 3 种等级降雨有关。

表 7 不同降雨等级 4 种植物配置模式累积产沙情况

类型	累积产沙量/(t·km <sup>-2</sup> )			
	混草模式	花草模式	灌草模式	乔草模式
小雨	4.53±2.90	8.67±4.96	7.39±6.17	1.78±0.70
中雨	59.82±35.91	214.22±93.07	128.07±54.11	44.36±36.19
大雨	189.46±73.33	266.66±85.85	175.20±94.68	135.78±58.41
暴雨	349.41±138.65	410.00±156.18	355.00±70.16	166.06±62.73
大暴雨	35.39±9.95	48.84±6.25	38.82±25.47	20.13±4.98
特大暴雨	36.32±15.81	39.76±12.97	50.95±3.74	27.69±20.53

## 2.4 不同植物配置模式的减流减沙效益分析

以累积产流最多的花草模式为参照,选择减流率为指标,对比分析观测期内各模式的减流效益,结果详见表 8。从次降雨产流量分析,灌草模式的产流量最小(3.35 mm),减流率最大,为 86.59%,其次为乔草模式,混草模式减流率最小;从月累积产流量分析,混草模式的产流量最小(23.83 mm),减流率最大,为 26.31%,乔草模式的最小,为 20.22%;从不同降雨等级累积产流分析,乔草模式的累积产流量最小,7.29 mm,减流率最大为 78.28%,混草模式减流率最小,为 66.22%;从全年累积产流量分析,乔草模式的产流量最小,为 25.01 mm,减流率最大,为 63.14%,混草模式的减流率最小,为 52.11%。总的来看,乔草模式的产流量较小,减流率较大。

表 8 4 种不同植物配置模式的减流效益

植物配置模式	次降雨		月累计降雨		各等级累积降雨		全年累计	
	最大产流量/mm	减流率/%	最大产流量/mm	减流率/%	最大产流量/mm	减流率/%	累积产流量/mm	减流率/%
混草模式	4.50	81.99	23.83	26.31	11.34	66.22	32.49	52.11
花草模式	24.98	—	32.34	—	33.57	—	67.85	—
灌草模式	3.35	86.59	24.76	23.44	10.44	68.90	32.88	51.54
乔草模式	3.96	84.15	25.80	20.22	7.29	78.28	25.01	63.14

以产沙最多的花草模式为参照,选择减沙率为指标,对比分析观测期内各模式的减沙效益,结果如表 9 所示。从次降雨产沙量分析,乔模式的产沙量最小(87.62 t/km<sup>2</sup>),减沙率最大,为 77.10%,其次为灌草模式,混草模式减沙率最小;从月季累积产沙量分析,乔草模式的产沙量最小(170.13 t/km<sup>2</sup>),减沙率最大,为 67.99%,混草模式的减沙率最小,为

19.54%;从不同降雨等级累积产沙分析,乔草模式的累积产沙量最小(166.06 t/km<sup>2</sup>),减沙率最大为 59.50%,灌草模式减沙率最小,为 13.41%;从全年累积产流量分析,乔草模式的产沙量最小(434.51 t/km<sup>2</sup>),减沙率最大,为 52.74%,灌草模式的减沙率最小,为 17.84%。总的来看,乔草模式、混草模式的产沙量较小,减沙率较大。

表 9 4 种不同植物配置模式的减沙效益

植物配置模式	次降雨		月累计		各等级累积		全年累计	
	最大值/(t·km <sup>-2</sup> )	减沙率/%						
混草	321.46	15.98	427.57	19.54	349.41	14.78	674.93	26.59
花草	382.60	—	531.41	—	410.00	—	919.43	—
灌草	317.36	17.05	387.71	27.04	355.00	13.41	755.42	17.84
乔草	87.62	77.10	170.13	67.99	166.06	59.50	434.51	52.74

## 3 讨论

观测期内的产流产沙集中在 2—4 月及 7 月 4 个月,有中雨、大雨和暴雨 3 种等级。这是因为这 4 个月份 3 种等级降雨量大、历时长,降雨强度也较大。降雨量、降雨历时、降雨强度等降雨因子是坡面产流产沙的主要因子。一般情况下,降雨初期,降雨量小,

雨强,对土壤表层结构破坏不大,降雨下渗或者被土壤吸收,地表不会或很少产生径流,也就不会出现流失现象。随着降雨时间的累积,降雨量增加,降雨强度增强,表层结构破坏,透水能力下降,含水量也达到了饱和状态,大部分降雨转化为地表径流,也增加了径流的挟沙能力,相同等级的降雨,由于下垫面的不同产流、产沙量存在较大差异<sup>[14-15]</sup>。

植物措施是生产建设项目水土保持常用的三大措施之一,具有较好的水土保持功能。植被冠层和枯枝落叶层可以拦截降雨,大大降低降雨对地表的直接冲击,增加地表糙度,从而抑制降低产流产沙的速度,植被根系和枯枝落叶层能够提高土壤入渗能力,改良土壤养分<sup>[16-17]</sup>。不同的植物模式、恢复阶段、覆盖度会导致植被水土保持效益的差异。一般情况下植被恢复的初级阶段,植被覆盖度较低,水土保持效益相对较低。植被恢复经过一定阶段恢复,植被覆盖度较高,植被类型丰富,水土保持效益自然较好<sup>[18-20]</sup>。而本研究4种植物配置模式恢复时间较短,植被覆盖度较低,刺槐、马棘等乔灌还在生长初期,植被对降雨的拦截、地表径流的延阻等作用还不明显,导致灌草的产流产沙量某些降雨条件下大于混草模式的出现。由于施工工艺、种子成活等引起植被覆盖度的不同,是引起4种植物配置模式、各模式植被间减流减沙效益差异的主要原因。

不同降雨条件下各植被配比模式的产流产沙过程,长时间梯度下不同植被配比模式的恢复效益等问题均有待于进一步研究探讨。

## 4 结论

(1) 2019年1—12月有效降雨30场,总降雨量为1 052.73 mm,总降雨历时为845.1 h,7月的降雨量(215.30 mm)最大,2月降雨历时(284.85 h)最长,降雨主要集中在1—7月;中雨降雨量最大、历时长,降雨以中雨、大雨、暴雨为主。

(2) 4种植物配置模式次降雨产流差异较大,月累积产流分布不均。2月花草模式产流最大,3月混草模式、灌草模式产流最大,4月灌草模式产流最大。产流主要集中在2—4月及7月。大雨时,混草模式、灌草模式和乔草模式的累积产流量最大,而花草模式则在中雨时的累积产流量最大,产流主要集中在中雨、大雨和暴雨。

(3) 4种植物配置模式次降雨产沙差异较大,月季产沙分布不均,12月产沙最小,3月产沙最大。产沙主要集中在2—4月及7月,暴雨累积产沙量最大。各模式产沙主要集中在中雨、大雨和暴雨。

(4) 不同降雨条件下的减流减沙效果各异。次降雨条件下,灌草模式减流率最大。乔草模式的减沙率最大,月累积条件下,混草模式的减流率最大。乔草模式的减沙率最大,不同雨型累积条件下,乔草模式的减流减沙率均为最大,分别为78.28%,59.50%。全年累积乔草模式的减流减沙率分别为63.14%,

52.74%,均为最大。本研究观测期内,植被恢复初期,受植被覆盖度差异影响,乔草模式、混草模式的减流减沙率较大,具有较好的固土保持效益。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] Zhang L T, Gao Z L, Li Z B, et al. Downslope runoff and erosion response of typical engineered landform to variable inflow rate patterns from upslope [J]. *Natural Hazards*, 2016, 80(2): 775-796.
- [2] 张华明, 吴治玲, 咎玉亭, 等. 江西省山地风电项目区水土流失与防治研究[J]. *水土保持通报*, 2018, 38(4): 7-13.
- [3] 袁普金, 张翔, 王万君, 等. 植物篱措施下工程堆积体坡面减流减沙效益研究[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(6): 374-380.
- [4] 齐星圆. 堆积体坡面植被格局减流减沙效益及侵蚀泥沙颗粒研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [5] 杨洁, 莫明浩, 宋月君, 等. 红壤坡地水土保持植物措施下柑橘林地水文生态效应[J]. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(8): 994-999.
- [6] 郑明新, 黄钢, 彭晶. 不同生长期多花木兰根系抗拉拔特性及其根系边坡的稳定性[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(20): 175-182.
- [7] 高磊, 饶良懿, 崔飞波, 等. 太行山土石山区侵蚀性降雨对典型植物措施产流产沙的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(1): 5-11.
- [8] 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.
- [9] 李婷婷, 何铁光, 俞月凤, 等. 桂东北坡地果园生草栽培减流减沙效应[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(2): 31-36.
- [10] 宋科, 秦秦, 郑宪清, 等. 水肥一体化结合植物篱对减缓果园土壤氮磷地表径流流失的效果[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(3): 83-89.
- [11] 李建明, 牛俊, 孙蓓, 等. 两种驱动力作用下植被调控堆积体坡面减水减沙效益[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(11): 76-84.
- [12] 张琳卿, 覃莉, 刘忠仙, 等. 黔中喀斯特地区坡面种植措施对土壤水分及产流产沙的影响[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(3): 15-21, 30.
- [13] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of China. GB15774-2008, Calculation method of benefit in soil and water conservation [S]. Beijing: China Standards Press, 2008.
- [14] 张华明, 咎玉亭, 张晓亮, 等. 降雨因子对粉煤灰产流产渣的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(2): 27-32.
- [15] 张兴奇, 顾礼彬, 张科利, 等. 坡度对黔西北地区坡面产流产沙的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(4): 18-22.
- [16] 王葆, 程金花, 王文凯, 等. 北京北部褐土区2种典型植物措施减流减沙效应[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(3): 56-61, 68.