

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.02.027.

熊维彬, 陈志强, 陈志彪, 等. 南方典型红壤区不同枯死率芒萁的水土流失阻控效应[J]. 水土保持研究, 2024, 31(2): 76-83.

Xiong Weibin, Chen Zhiqiang, Chen Zhibiao, et al. Effect of *Dicranopteris pedata* with Different Mortality on Soil and Water Loss Control in Typical Red Soil Region of Southern China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(2): 76-83.

# 南方典型红壤区不同枯死率芒萁的水土流失阻控效应

熊维彬<sup>1,2</sup>, 陈志强<sup>1,2</sup>, 陈志彪<sup>1,2</sup>, 尚艳琼<sup>1,2</sup>, 冯柳俊<sup>1,2</sup>, 李玮晔<sup>1,2</sup>

(1. 福建师范大学 地理科学学院/碳中和未来技术学院, 福州 350007;

2. 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007)

**摘要:** [目的] 探究芒萁植株不同枯死率(100%, 50%和0%)下坡面的产流产沙规律, 揭示不同生长状态下芒萁的水土流失阻控效果。[方法] 采用人工模拟降雨试验, 对不同芒萁枯死率下坡面产流产沙过程随雨强的变化特性进行了定量分析。[结果] (1) 不同降雨强度和芒萁枯死率下径流速率随降雨历时呈前期缓慢或快速增长, 后期趋于稳定。较小雨强下, 侵蚀速率除裸坡外随降雨历时呈前期缓慢增加、后期趋于稳定状态; 较大雨强下, 侵蚀速率随降雨历时变化呈前期快速增加, 中后期逐渐下降趋于稳定。(2) 除2 mm/min雨强下的累积产流量外, 其余处理条件下累积产流产沙量差异明显, 且产沙量随芒萁枯死率的增加而增加。(3) 两种雨强不同处理下坡面累积产流量和累积产沙量关系符合幂函数模型( $R^2 > 0.99$ )。[结论] 两种雨强芒萁植株不同枯死率下径流速率和侵蚀速率随降雨历时变化前期迅速增加、后期逐渐波动稳定, 各处理下累积径流量与累积产沙量的函数关系拟合回归效果良好, 证实了枯死芒萁亦可在我国南方红壤侵蚀区起到良好的水土流失阻控效果。

**关键词:** 模拟降雨; 芒萁; 产流产沙; 水土流失; 南方典型红壤区

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)02-0076-08

## Effect of *Dicranopteris pedata* with Different Mortality on Soil and Water Loss Control in Typical Red Soil Region of Southern China

Xiong Weibin<sup>1,2</sup>, Chen Zhiqiang<sup>1,2</sup>, Chen Zhibiao<sup>1,2</sup>, Shang Yanqiong<sup>1,2</sup>, Feng Liujun<sup>1,2</sup>, Li Weiye<sup>1,2</sup>

(1. College of Geographic Sciences/College of Carbon Neutral Future

Technology, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 2. Key Laboratory for

Subtropical Mountain Ecology, Ministry of Science and Technology, Fuzhou 350007, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to investigate the regularities of runoff and sediment yield on the slope of *Dicranopteris pedata* under different dead rates (100%, 50% and 0%), and to reveal the effect of *Dicranopteris pedata* under different growth conditions on soil erosion control. [Methods] The variation characteristics of runoff and sediment yield on the slope with different dead rates of *Dicranopteris pedata* were quantitatively analyzed through artificial simulated rainfall experiments. [Results] (1) The runoff rate under different rainfall intensity and dead rate of *Dicranopteris pedata* increased slowly or rapidly in the early stage, and tended to be stable in the late stage. Under the light rainfall intensity, the erosion rate, except for bare slope, increased slowly in the early stage and tended to be stable in the later stage. Under the high rainfall intensity, the erosion rate increased rapidly in the early stage, and gradually decreased and stabilized in the middle and late stage. (2) Except for the cumulative runoff under 2 mm/min rainfall intensity, the cumulative runoff and sediment yield were significantly different under the other treatment conditions, and

收稿日期: 2023-05-06

修回日期: 2023-05-27

资助项目: 福建省自然科学基金(2020J01143); 福建省水利科技项目(MSK202201)

第一作者: 熊维彬(1998—), 男, 贵州毕节人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与生态修复。E-mail: QSX20221047@163.com

通信作者: 陈志强(1978—), 男, 福建莆田人, 博士, 教授, 主要从事自然资源与生态修复研究。E-mail: soiltuqiang061@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

the sediment yield increased with the increase of the dead rate of *Dicranopteris pedata*. (3) The relationship between cumulative runoff and cumulative sediment yield on the slope under different rainfall intensities conformed to the power function model ( $R^2 > 0.99$ ). [Conclusion] The runoff rate and erosion rate increased rapidly in the early stage and fluctuated steadily in the later stage with the change of rainfall duration under the different mortality rates of *Dicranopteris pedata* plantation with two kinds of rainfall intensities. A good regression effect is obtained by fitting the functional relationship between cumulative runoff and cumulative sediment yield under each treatment. It is proved that the dead *Dicranopteris pedata* can also play a good role in soil and water loss control in the red soil erosion area in southern China.

**Keywords:** simulated rainfall; *Dicranopteris pedata*; runoff and sediment yield; soil and water loss; typical red soil region of southern China

植被是影响土壤侵蚀的敏感性因子<sup>[1]</sup>,同时亦是水土流失阻控的关键因素<sup>[2]</sup>。植物垂直覆盖结构自上而下包括地上冠层、地表枯落物和地下根系,各组分所处的水平和垂直空间不同以及功能性状的差异导致水土保持机制各不相同。其中,地上冠层可截留降雨,削弱雨滴击溅动能,阻滞土壤物理结皮,促进降雨入渗,延缓地表径流生成<sup>[3-6]</sup>;枯枝落叶层蓄水消能,减轻雨滴对土壤的剥离溅蚀,拦截地表径流从而减弱其剥蚀能力<sup>[7-8]</sup>;植株根系可稳定土层结构,改善土壤孔隙,提高土壤水分渗透能力<sup>[9]</sup>,对土壤的缠绕支撑和串联等作用可以促进土壤抗侵蚀效能<sup>[10]</sup>。各组分协同构成植被对水土流失阻控的基本单元,亦是造成不同植被减流减沙效率差异性的主导因素。目前,国内外学者围绕植被与水土保持关系的研究取得了诸多成果,主要集中在植被类型<sup>[11-12]</sup>、植物垂直覆盖结构<sup>[13]</sup>、雨强和植被覆盖度协同作用等<sup>[14]</sup>对坡面产流产沙规律的探究,然而,对枯死植株或是枯死植株与成活植株并存对水土流失阻控效应的研究鲜见报道。

南方红壤区是仅次于黄土高原的典型水力侵蚀区,因其地貌复杂、土壤易蚀及不合理的土地利用,导致该区成为我国水土流失和生态退化最严重的地区之一<sup>[15-17]</sup>。随之而来的土壤酸化、干热化及土壤养分流失等一系列原因,致使普通植物难以存活。芒萁(*Dicranopteris pedata*, 原为 *Dicranopteris dichotoma*)<sup>[18]</sup>作为红壤侵蚀区的水土保持先锋植物,广泛分布于花岗岩、紫色砂页岩水土流失区,具有耐酸、耐瘠、适应性强等特点,形成的群落更具适应性和稳定性<sup>[19]</sup>。芒萁作为多年生蕨类植物,因其特殊的生长繁殖习性即根状茎克隆繁殖,面对生境污染、干旱等逆境胁迫,芒萁群丛会出现枯死分株与成活分株并存的生长状态。基于此,本文以芒萁为研究对象,以人工降雨为手段,探究芒萁群丛不同枯死率下的产流产沙规律,揭示不同生长状态下芒萁的水土流失阻控效果,以期为南方红壤侵蚀区水土保持提供理论参考。

## 1 材料与设计

### 1.1 研究区概况

福建省长汀县(25°18'40"—26°02'05"N, 116°00'45"—116°39'20"E)是南方红壤区的典型代表区域。该区域属中亚热带季风性湿润气候,年均气温 17.5~18.5℃,年降水量 1 500~1 700 mm,降水丰盈但季节分布不均,主要集中在 3—8 月;地貌以低山丘陵为主;土壤以花岗岩风化发育的硅铝质红壤和硅铝铁质红壤为主,酸性较强。该区域长期以来受自然和人为双重因素影响,导致长汀县为中国南方红壤地区最严重的水力侵蚀区,原生植被遭到极大破坏。许多经过治理的水土流失区,芒萁往往成为植被群落的优势种。

### 1.2 实验材料

人工降雨试验中,供试土壤为 2021 年 9 月上旬取自福建省长汀县河田镇野外样地的红壤,装入土槽(长 120 cm×宽 50 cm×高 38 cm)。土壤不过筛,打碎填装,每装 5 cm 压实一次,容重为 1.30~1.41 g/cm<sup>3</sup><sup>[20]</sup>,压实后抓毛土壤表面,再填装上一层,以防土层间出现分层现象。植被为鼓山移栽的当年生芒萁,土槽内芒萁覆盖率为 100%,根据野外样地调查结果<sup>[21]</sup>,将密度设置为 800 株/m<sup>2</sup>,同时设置裸土为对照(CK)。进行为期 2 个月的常规培养,每 2 d 浇水一次(雨天除外)。

### 1.3 试验设计

试验于 2021 年 9—11 月在福州市鼓岭科教园内搭建试验土槽与降雨装置,进行人工降雨模拟试验。

土槽采用塑料制作,下方设置多个漏水孔,避免土壤被沤坏;50 cm 宽的一侧垂直切下 5 cm 并掰弯 90°,作为流失水土的集水槽;两侧用热熔胶贴上 L 型挡板,防止流失的水土侧漏;1/2 PVC 管圆形断面作为引水槽,用于引流径流泥沙。在集水槽和引水槽上方用塑料板盖住,以防止雨水直接降入该部分;用砖头垫起塑料箱未被改造的一端,使箱内土壤坡度为 15°(图 1)。

降雨装置由储水桶、输水管路、水泵、压力表、控制器、喷头、支架及挡风罩组成,喷头有小、中、大 3 种型号,降雨为下喷式,降雨高度为 3 m。在正式降雨前需进行多次率定,确定各喷头型号对应的降雨强度。

试验前,控制浇水量,使土槽内的芒萁分别枯死 0%,50%,100%,每种处理做两个重复以求平均。根据长汀县多年气象观测资料和侵蚀性降雨特征,经过率定,确定降雨强度分别为 1,2 mm/min。第一次模拟降雨试验于正常浇水停止后一周,第二次再间隔一周,以此保证试验土槽的前期水分含量相对一致。降雨历时为 60 min,每次降雨试验过程中记录开始产流时刻,产流后前 10 min 内每 1 min 收集一次径流泥沙样;之后每隔 2 min 收集一次,每次降雨收集 20~26 瓶样品。

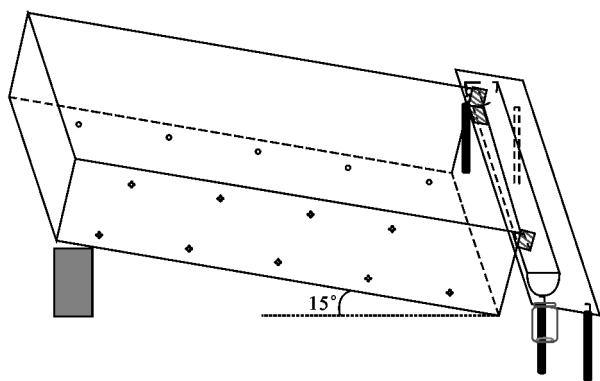


图 1 土槽示意图

Fig. 1 Schematic diagram of soil trough

#### 1.4 样品收集与分析

将所采集样品带回实验室,称量泥沙样的质量;静置后倒出上层清液,分离出来的泥沙置于牛皮纸上,于阴凉通风处风干,称量产沙质量;用泥沙样质量减去产沙质量得到产流量。径流速率和侵蚀速率公式分别为:

$$R = D/t = V/(S \cdot t) \quad (1)$$

$$E = W/(S \cdot t) \quad (2)$$

式中: $R$  为径流速率(mm/min); $D$  为径流深(mm); $t$  为取样持续时间(min); $V$  为每个样品的产流量(L);

$S$  为斜坡面积( $m^2$ ); $E$  为侵蚀速率[ $g/(m^2 \cdot min)$ ]; $W$  为产沙量(g)。

采用 Excel 2010 进行数据整理,采用 SPSS 22 进行方差分析(Duncan 比较),采用 Origin 2018 进行绘图与数据拟合。

## 2 结果与分析

### 2.1 初始产流时间

从表 1 中可以看出,芒萁覆盖下的初始产流时间均滞后于裸地。当降雨强度为 2 mm/min 时,裸地和芒萁覆盖下的初始产流时间均明显超前于 1 mm/min 雨强,此时产流均较快,且不同芒萁枯死率下初始产流时间相差不大。

表 1 不同处理下坡面初始产流时间

Table 1 Start runoff time on slope under different treatments

芒萁 枯死率	降雨强度/ (mm · min <sup>-1</sup> )	初始产流 时间/s	降雨强度/ (mm · min <sup>-1</sup> )	初始产流 时间/s
裸地	1	585	2	58
100%	1	946	2	288
50%	1	837	2	303
0%	1	1297	2	295

### 2.2 产流过程

由图 2A 可知,1 mm/min 雨强下,裸坡及各枯死率芒萁覆盖下坡面径流速率均随降雨历时变化呈前期迅速上升和后期波动稳定趋势。裸坡径流速率在前 30 min 内急剧增长,之后增速放缓并逐渐趋于波动稳定;芒萁不同枯死率(100%,50%,0%)覆盖下径流速率分别在 24,20,43 min 内保持较大增势,之后均呈波动稳定态势。不同处理下径流速率表现为裸坡(CK)显著>100%枯死率>50%枯死率>0%枯死率。由图 2B 可知,2 mm/min 雨强下,100%和 50%芒萁枯死率覆盖下坡面径流速率随降雨历时变化趋势一致,初期急速上升,中后期持续稳定。而裸坡和无枯死率芒萁坡面径流速率在初期快速长,中期波动上升,后期趋于稳定。

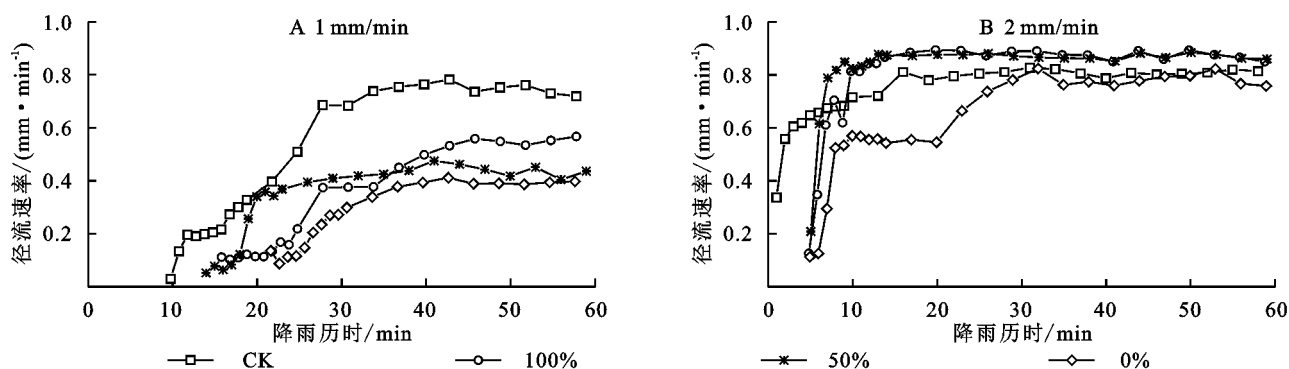


图 2 不同处理下坡面产流变化过程

Fig. 2 Variation process of runoff on slope under different treatments

由图 3 可知,不同处理坡面的径流速率在两个雨强下差异显著,2 mm/min 雨强下径流速率在所有处理坡面均超过 1 mm/min 雨强的 2 倍。1 mm/min 雨强下,裸坡、100% 枯死、50% 枯死和无枯死坡面的平均径流速率分别为 0.48,0.32,0.33,0.28 mm/min;2 mm/min 雨强下分别为 1.46,1.57,1.64,1.23 mm/min。

2.3 产沙过程

由图 4A 可知,1 mm/min 雨强下,裸坡和芒萁枯死率 100% 覆盖坡面在开始产流到降雨历时 40 min 内,侵蚀速率不断增加,之后前者持续波动下降,后者呈波动稳定态势。芒萁枯死率 50% 和 0% 覆盖坡面侵蚀速率变化过程相似,开始产流到降雨历时 20 min 内,侵蚀速率缓慢增加,随后趋于波动稳定。由图 4B 可知,2 mm/min 雨强下,裸坡及芒萁枯死率

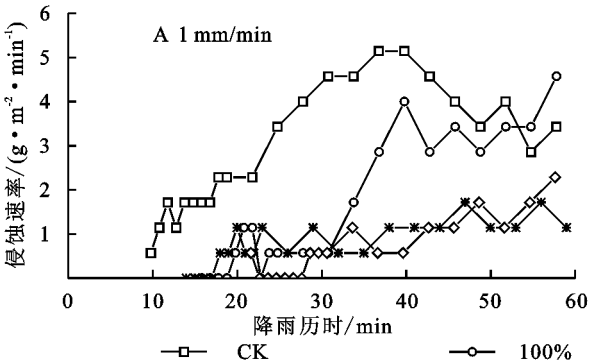


图 4 不同处理下坡面产沙变化过程

Fig. 4 Variation process of sediment yield on slopes under different treatments

由图 5 可知,不同处理坡面侵蚀速率在两个雨强下差异显著,且随时芒萁枯死率的增加,侵蚀速率相差越大。1 mm/min 雨强下,裸坡与芒萁覆盖坡面间略有差别,不同枯死率坡面间差异不显著,裸坡、100% 枯死、50% 枯死和无枯死坡面的平均径流速率分别为 1.93,1.63,0.81,0.72 g/(m²·min);2 mm/min 雨强下,不同处理坡面差异显著,裸坡、100% 枯死、50% 枯死和无枯死坡面的平均径流速率分别为 25.49,17.64,15.91,3.59 g/(m²·min)。

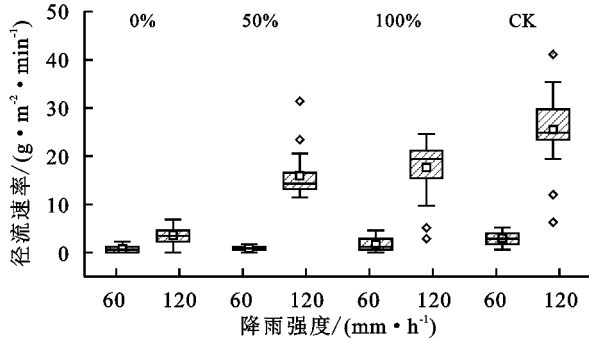


图 5 所有试验处理的侵蚀速率变化

Fig. 5 Erosion rate variation under all experimental treatments

100% 和 50% 覆盖下坡面侵蚀速率随降雨历时变化表现为初期迅速增加,到达定点后快速下跌,之后呈波动下降;而芒萁枯死率 0% 覆盖坡面侵蚀速率初期小幅度增长之后持续波动稳定。

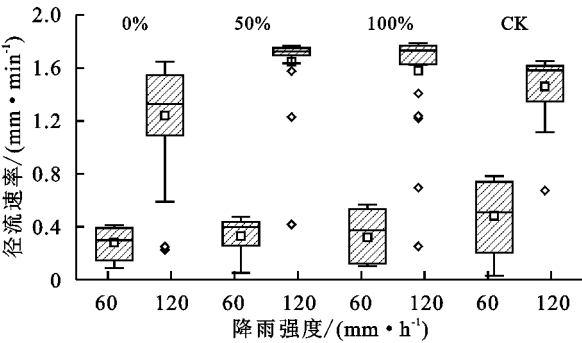
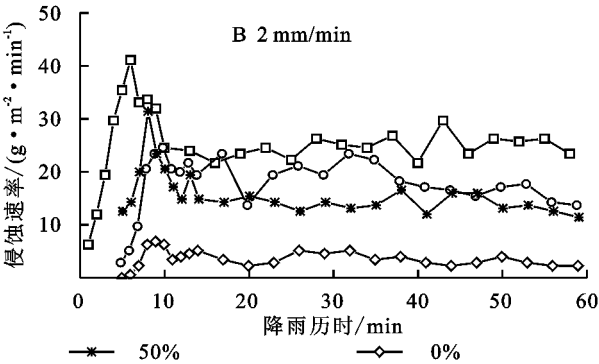


图 3 所有试验处理的径流速率变化

Fig. 3 Changes in runoff rates under all experimental treatments



2.4 累积产流产沙量

从图 6 可以看出,2 个雨强下坡面累积产流量均随降雨历时的变化呈增长趋势,且增长幅度相对稳定。在 1 mm/min 雨强下,不同处理间累积产流量差异明显,裸坡的累积产流量最大,无枯死芒萁的坡面最小,100% 和 50% 枯死的坡面介于二者之间且较为相近。在 2 mm/min 雨强下,裸坡与存在芒萁枯死的坡面累积产流量无明显差异,无枯死芒萁的坡面显著低于三者。

从图 7 中可以看出,2 个雨强下坡面累积产沙量均随降雨历时的变化呈增长趋势,且增长幅度在整个降雨历时过程中相对稳定。在雨强一定时,不同处理间累积产沙量差异明显,且均随芒萁枯死率的增加而增加,但 1 mm/min 下 0% 与 50% 枯死率的坡面累积产沙量相差较小,而 2 mm/min 下是 50% 与 100% 相差较小。

2.5 累积径流量和累积产沙量之间的关系

为进一步分析 2 个雨强不同处理下坡面产流和产沙之间的关系,将累积产沙量与累积径流量的相互关系进行函数拟合和对比,发现不同处理下累积径流量与累



积产沙量的函数关系均满足幂函数 $Y=AX^B$ (式中: $Y$ 为累积产沙量; $X$ 为累积径流量),方程相关系数 $R^2$ 均在 0.99 以上,回归效果良好。不同处理下累积径流量和累积产沙量之间的关系方程列于表 2 中。

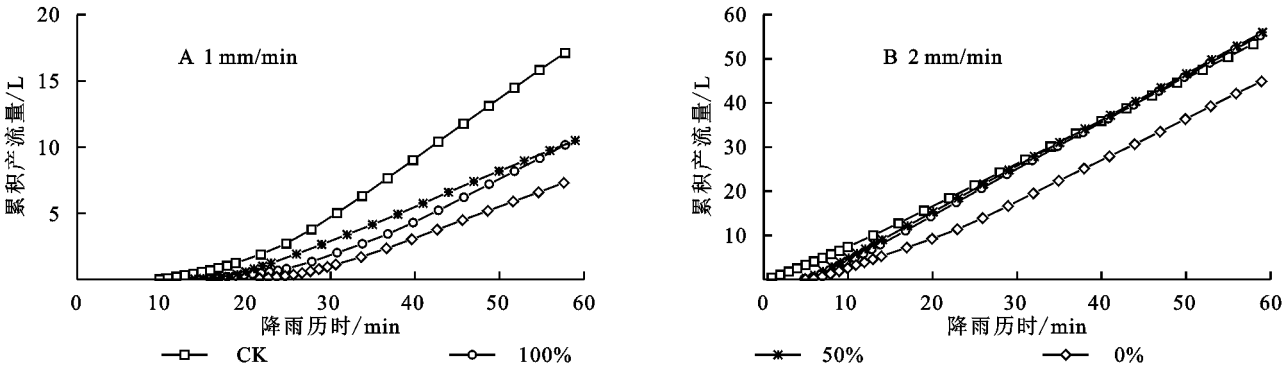


图 6 不同处理下累积产流量变化过程

Fig. 6 Variation process of cumulative runoff and runoff under different treatments

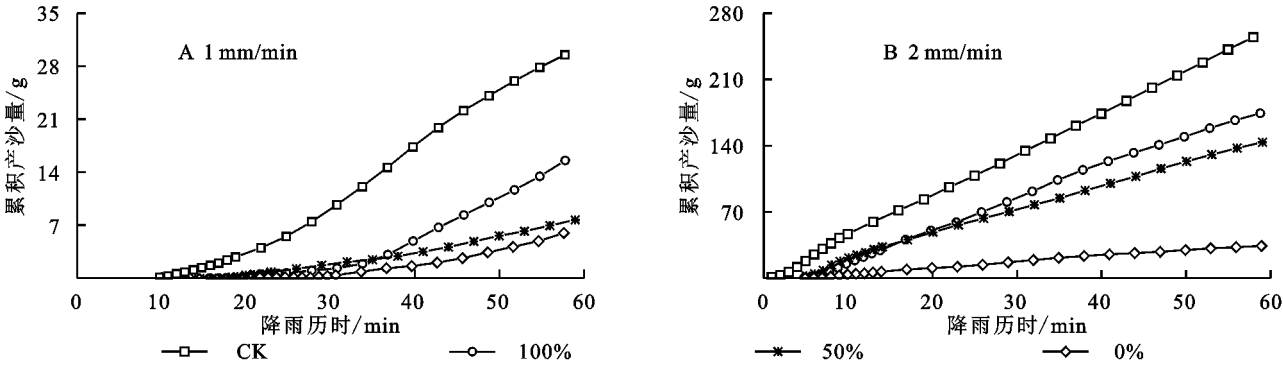


图 7 不同处理下累积产沙量变化过程

Fig. 7 Variation process of cumulative sediment yield under different treatments

表 2 不同处理下累积径流量和产沙量关系

Table 2 Relationship between accumulative runoff yield and accumulative sediment yield under different treatments

降雨强度/ (mm · min <sup>-1</sup> )	芒萁 枯死率	拟合 公式	R <sup>2</sup>
1	裸地	$Y=2.3476X^{0.8995}$	0.9992
	100%	$Y=0.6479X^{1.3750}$	0.9972
	50%	$Y=0.4770X^{1.1711}$	0.9968
	0%	$Y=0.3022X^{1.4838}$	0.9969
2	裸地	$Y=6.8696X^{0.9058}$	0.9988
	100%	$Y=4.3825X^{0.9225}$	0.9992
	50%	$Y=5.0974X^{0.8269}$	0.9987
	0%	$Y=1.9797X^{0.7547}$	0.9980

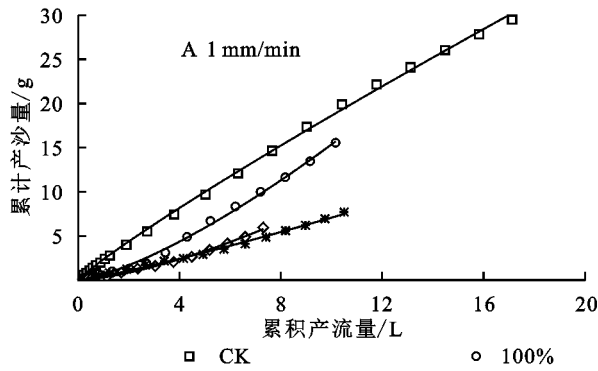
图 8 为两个雨强不同处理下累积径流量与累积产沙量的函数关系,当雨强一定时,随累积径流量的逐渐增加,累积产沙量也逐渐增大。结合实际径流产沙的物理意义,最终定义系数  $A$  为产沙基数系数, $A$  值越大则产沙越多, $A$  值的变化取决于降雨强度、和下垫面特征的影响;定义系数  $B$  为产沙速率系数,根据试验数据确定  $B$  值介于 0.5~1.5,系数  $B$  的大小取决于入渗率的大小。

### 3 讨论

初始产流时间是指降雨开始到地表径流出现后开始从集流槽流入取样瓶的历时。对于某一特定降雨来说,下垫面条件的不同使初始产流时间存在差异,进而使地表径流发生变化,最终导致坡面土壤侵蚀程度、强度及侵蚀方式发生改变<sup>[22]</sup>。裸坡表面相对比较光滑,降雨对径流的阻力作用小,径流形成较快。芒萁覆盖下,叶片削减了雨滴的动能,减弱对土壤的溅蚀与坡面受雨量,茎根与叶柄增大坡面径流阻力系数<sup>[23]</sup>。植被生长使土壤容重减少,根系延伸引起土壤孔隙增大,增强降雨入渗,延缓了径流产生时间。因此,本研究中芒萁覆盖较裸露坡面明显延缓了产流时间,这与常松涛等<sup>[14]</sup>的试验结果一致,且雨强增加时,时间延缓效果有所减弱。

本试验中,裸坡径流速率和侵蚀速率在不同雨强下的变化过程有明显差别,原因是试验开始阶段,侵蚀下垫面情况相似,流速主要受雨强与雨量影响,因此较大雨强下径流速率和侵蚀速率增速较快。不同雨强下裸坡的侵蚀形态随降雨历时发生变化,较大雨强的裸坡前期产沙较大,表面留下不易被搬运的砾石,因此侵蚀速率到达峰值后迅速下降,降幅较大。

这与田培等<sup>[24]</sup>在15°坡面进行不同雨强试验的产沙



率变化过程一致。

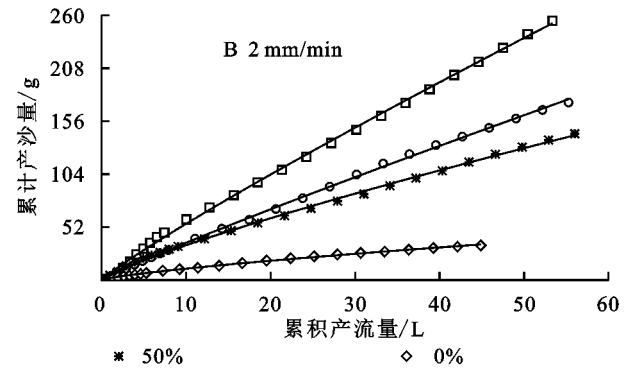


图8 不同处理下累积产流量和产沙量关系

Fig. 8 Relationship between accumulative runoff yield and accumulative sediment yield under different treatments

对于芒萁覆盖坡面的地表径流而言,初期的降雨大部分被土壤吸收,随着土壤含水量增多,降雨的入渗减弱,待土壤水饱和后,入渗速率稳定,径流量变化相对稳定。不同雨强的产流过程区别在于,到达产流峰值前,小雨强的地表径流是缓慢增加,大雨强则增加迅速,原因是不同雨强导致降雨量,大雨强下土壤吸收降水的速度加快,且雨强太大使坡面出现超渗产流,降雨强度超过入渗强度便产生了地表径流。同样地,产沙过程也在不同雨强下有明显区别。较小雨强下,径流增加前期,产沙量未达到峰值,因此径流稳定后,细沙仍然能被径流带出坡面。而较大雨强下,初始产流时间缩短,表层土壤封闭层尚未形成,芒萁覆盖对雨滴溅蚀削弱力度较小,水流剥蚀能力快速提高,且降雨前期形成的超渗产流可以带走大部分砂砾,使得产沙量激增,这与余长洪等<sup>[25]</sup>的研究结果一致。因此大雨强下,产沙过程与裸坡类似。

枯死植物与正常植物的区别在于植被结构、叶片形态和枝干支撑能力不同,对降雨的承接作用也不同。本试验中,枯死芒萁叶片卷曲、支撑能力减小,但叶片卷曲形成的空间结构更为复杂,且吸水率更大,可以在降雨初期可以截留部分降雨。成活芒萁叶片光滑,雨水与叶片接触后散开或迅速滑落,但植株支撑能力更强。因此,试验结果显示较小雨强下100%枯死的坡面累积径流量较50%枯死率坡面增速更小,而较大雨强下枯死芒萁对产流的削减作用几乎没有,成活芒萁的削减作用也十分有限。对泥沙的削减则由雨滴的溅蚀与产流量决定,因此产沙量与芒萁枯死率成反比,成活芒萁越多,产沙量越少,且在较大雨强也有明显区别。这与Duan等<sup>[26]</sup>的研究结论一致,植被对产沙的阻控效果强于产流。

通过对两个雨强不同处理下累积径产流量和累积产沙量之间的相互关系进行函数拟合,均满足幂函数表达式 $Y=AX^B$ ,所有方程相关系数 $R^2$ 均在0.99

以上,回归效果良好。高度契合姚冲<sup>[27]</sup>、张军<sup>[28]</sup>等的研究结果,同时亦能够较好地反映不同雨强和芒萁枯死率下累积产流量和产沙量的变化过程。当雨强一定时,随累积产流量的逐渐增加,累积产沙量也不断增大,呈现出水丰沙多的现象,这与王丽等<sup>[29]</sup>的研究结果一致。究其原因,径流是搬运泥沙的动力,在一般情况下,含沙量的多寡取决于径流量的大小,水沙之间存在着显著的相关关系<sup>[30]</sup>。

芒萁作为南方湿热气候条件下酸性土或酸性岩石的一种指示植物,同时其盘根错节的地下茎及庞大且深扎土层的根系使得其成为治理南方红壤侵蚀区强度、极强度水土流失区的重要草本植物<sup>[31]</sup>。因其独特的生长繁殖习性即根状茎克隆繁殖,面对土壤养分含量贫瘠、生境污染、干旱等逆境胁迫,芒萁群丛会出现枯死分株与成活分株并存的生长状态。枯死芒萁地上部分或凋落或直立,叶片卷曲形成的空间结构复杂,吸水率更大,降雨初期时可以截留部分降雨,消减雨滴动能对地层表面土壤颗粒的打击;地下部分未分解之前与活根纵横交织穿插在土壤中,一定程度上增强土体的抗剪强度和抗蚀性发挥固坡效应;而枯死细根的分解产物则是土粒团聚的胶结物质,促进了土壤团聚体的形成和孔隙状况的改善。本研究中除2 mm/min雨强下的累积产流量外,其余处理条件下均显著发挥减流减沙效益。由此可见,枯死芒萁亦可在我国南方红壤侵蚀区起到良好的水土流失阻控效果。

## 4 结论

(1) 径流速率和侵蚀速率随降雨历时变化趋势因降雨强度和芒萁枯死率的不同而存在差异。径流速率随降雨历时变化基本呈前期缓慢或快速增长,后期趋于稳定状态。在较小雨强下,侵蚀速率除裸坡外随降雨历时基本呈前期缓慢,后期趋于稳定状态;在较大雨强下,侵蚀速率随降雨历时变化呈前期快速增

加,中后期逐渐下降趋于稳定。

(2) 除 2 mm/min 雨强下的累积产流量外,其余处理条件下累积产流产沙量差异明显,且产沙量随芒萁枯死率的增加而增加。芒萁在不同雨强与不同枯死率下的阻控效果表现为减沙量大于减流量。

(3) 两个雨强不同处理下累积径流量与累积产沙量满足幂函数模型( $R^2 > 0.99$ )。

(4) 枯死芒萁亦可在我国南方红壤侵蚀区起到良好的水土流失阻控效果。

#### 参考文献(References):

- [1] 焦菊英,王万忠.人工草地在黄土高原水土保持中的减水减沙效益与有效盖度[J].草地学报,2001,9(3):176-182.  
Jiao J Y, Wang W Z. The Benefits of Runoff and Sediment Reducing & Effective Cover Rate for Soil and Water Conservation of Artificial Grassland on Loess Plateau[J]. Acta Agrestia Sinica, 2001,9(3):176-182.
- [2] Peng X D, Dai Q H, Ding G J, et al. Impact of vegetation restoration on soil properties in near-surface fissures located in karst rocky desertification regions[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 200:104620.
- [3] 马金龙,许欢欢,王兵,等.黄土高原坡耕地土壤物理结皮对坡面产流产沙过程的影响[J].水土保持学报,2022,36(1):45-49.  
Ma J L, Xu H H, Wang B, et al. Effect of soil physical crust on runoff and sediment yield on sloping form land of the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(1):45-49.
- [4] 秦东远,肖培青,郝仕龙,等.黄丘区野外坡面产流产沙过程对不同植被覆盖结构的响应[J].水土保持学报,2019,33(2):73-78.  
Qin D Y, Xiao P Q, Hao S L, et al. Response of slope runoff and sediment yield to different vegetation cover structures in the loess hilly region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019,33(2):73-78.
- [5] Rungee J, Bales R, Goulden M. Evapotranspiration response to multiyear dry periods in the semiarid western United States[J]. Hydrological Processes, 2019,33(2):182-194.
- [6] Duan L X, Huang M B, Zhang L D. Differences in hydrological responses for different vegetation types on a steep slope on the Loess Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2016,537:356-366.
- [7] Han D D, Deng J C, Gu C J, et al. Effect of shrub-grass vegetation coverage and slope gradient on runoff and sediment yield under simulated rainfall[J]. International Journal of Sediment Research, 2021,36(1):29-37.
- [8] Adekalu K O, Olorunfemi I A, Osunbitan J A. Grass mulching effect on infiltration, surface runoff and soil loss of three agricultural soils in Nigeria[J]. Bioresource Technology, 2007,98(4):912-917.
- [9] 张志铭,赵河,杨建涛,等.太行山南麓山区不同植被恢复类型土壤理化和细根结构特征[J].生态学报,2018,38(23):8363-8370.  
Zhang Z M, Zhao H, Yang J T, et al. Soil physico-chemical properties and fine root characteristics of different restored vegetation types in southern Taihang Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(23):8363-8370.
- [10] 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.  
Xiao P Q, Yao W Y, Shen Z Z, et al. Experimental study on erosion process and hydrodynamics mechanism of alfalfa grassland [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011,42(2):232-237.
- [11] Zhang X X, Song J X, Wang Y R, et al. Effects of land use on slope runoff and soil loss in the Loess Plateau of China: A meta-analysis[J]. Science of the Total Environment, 2021,755:142418.
- [12] 于国强,李占斌,张霞,等.野外模拟降雨条件下径流侵蚀产沙试验研究[J].水土保持学报,2009,23(4):10-14.  
Yu G Q, Li Z B, Zhang X, et al. Experimental study on law of runoff-erosion-sediment yield under field simulated rainfall condition [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009,23(4):10-14.
- [13] 邵奕铭,高光耀,刘见波,等.自然降雨下黄土丘陵区草灌植物垂直覆盖结构的减流减沙效应[J].生态学报,2022,42(1):322-331.  
Shao Y M, Gao G Y, Liu J B, et al. Effects of vertical cover structure of grass and shrub on reducing runoff and soil loss under natural rainfall in the loess hilly region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(1):322-331.
- [14] 常松涛,黄少燕,查轩,等.雨强和植被覆盖度对红壤坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2019,33(3):58-63.  
Chang S T, Huang S Y, Zha X, et al. Effects of rainfall intensity and vegetation coverage on runoff and sediment yield on red soil slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019,33(3):58-63.
- [15] 赵其国,黄国勤,马艳芹.中国南方红壤生态系统面临的问题及对策[J].生态学报,2013,33(24):7615-7622.  
Zhao Q G, Huang G Q, Ma Y Q. The problems in red soil ecosystem in southern of China and its counter-measures[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(24):7615-7622.
- [16] 窦晓琳,李铭,王伟波,等.福建红壤区不同侵蚀强度马尾松林地土壤营养元素变化特征[J].植物科学学报,2012,30(2):161-168.  
Dou X L, Li M, Wang W B, et al. Changes in soil nutrients

- in different eroded soils in *Pinus massoniana* forest ecosystems in Fujian Province, China[J]. Plant Science Journal, 2012, 30(2):161-168.
- [17] 马志阳, 查轩. 南方红壤区侵蚀退化马尾松林地生态恢复研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(3):188-193, 196.
- Ma Z Y, Zha X. Research on ecological recovering of erosive degraded *Pinus massoniana* woodland in red soil region of Southern China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(3):188-193, 196.
- [18] Wu Z Y, Raven P H, Hong D Y. Flora of China: Vol. 2-3 Gleicheniaceae[M]. Beijing: Science Press & Missouri Botanical Garden Press, 2013.
- [19] Jiao J Y, Tzanopoulos J, Xofis P, et al. Can the study of natural vegetation succession assist in the control of soil erosion on abandoned croplands on the Loess Plateau, China[J]. Restoration Ecology, 2007, 15(3):391-399.
- [20] 张德谦. 模拟降雨下崩岗侵蚀区几个表层土壤细沟侵蚀研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.
- Zhang D Q. Study on Rill Erosion of Several Topsoil in the Hillock Erosion Area Under Simulated Rainfall [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019.
- [21] 张巧玲, 陈志强, 林强, 等. 南方离子型稀土矿区芒萁的稀土提取能力[J]. 稀土, 2020, 41(4):73-81.
- Zhang Q L, Chen Z Q, Lin Q, et al. Rare earth element extraction ability of *Dicranopteris dichotoma* in ionic type rare earth mining area, Southern China[J]. Chinese Rare Earths, 2020, 41(4):73-81.
- [22] 张光辉, 梁一民, 黄土丘陵区人工草地径流起始时间研究[J]. 水土保持学报, 1995, 9(3):78-83.
- Zhang G H, Liang Y M. Study on Runoff Beginning time of artificial grassland in loess hilly region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1995, 9(3):78-83.
- [23] 戴矜君, 程金花, 张洪江, 等. 植被覆盖下坡面流阻力变化规律[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2):44-49.
- Dai J J, Cheng J H, Zhang H J, et al. The changing law of overland flow resistance under vegetation covers [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(2):44-49.
- [24] 田培, 仇浩然, 冯宇, 等. 雨强和坡度对红壤坡面产流产沙及侵蚀动力过程影响[J]. 水土保持研究, 2020, 27(6):1-8.
- Tian P, Qiu H R, Feng Y, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on runoff and sediment production and erosion dynamic process on red soil slope[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(6):1-8.
- [25] 余长洪, 李就好, 陈凯, 等. 强降雨条件下砖红壤坡面产流产沙过程研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2):7-10, 54.
- Yu C H, Li J H, Chen K, et al. Study on process of runoff and sediment on laterite slope in condition of strong rainstorm[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(2):7-10, 54.
- [26] Duan J, Liu Y J, Wang L Y, et al. Importance of grass stolons in mitigating runoff and sediment yield under simulated rainstorms [J]. Catena, 2022, 213:106132.
- [27] 姚冲, 查瑞波, 黄少燕, 等. 模拟降雨条件下第四纪红黏土坡面侵蚀过程[J]. 水土保持学报, 2018, 32(3):10-15.
- Yao C, Zha R B, Huang S Y, et al. Study on processes of erosion on hillslopes of quaternary red clay under simulated rainfall[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(3):10-15.
- [28] 张军, 李占斌, 李鹏, 等. 移动降雨条件下坡面产流产沙过程试验研究[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1):1-4, 11.
- Zhang J, Li Z B, Li P, et al. Experimental study on the process of runoff and sediment yield under moving rainfall[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(1):1-4, 11.
- [29] 王丽, 王力, 王全九. 前期含水量对坡耕地产流产沙及氮磷流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(11):2171-2178.
- Wang L, Wang L, Wang Q J. Effect of antecedent soil moisture on runoff and sediment and nitrogen and phosphorus losses from slope cropland[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(11):2171-2178.
- [30] 王玲玲, 姚文艺, 王文龙, 等. 黄土丘陵沟壑区多尺度地貌单元输沙能力及水沙关系[J]. 农业工程学报, 2015, 31(24):120-126.
- Wang L L, Yao W Y, Wang W L, et al. Sediment transport capacity and flow-sediment relationship in different topographical units of different spatial scales in hilly loess region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(24):120-126.
- [31] 邓恢, 林沁文, 滕华卿, 等. 强度水土流失区芒萁生长规律分析[J]. 福建林学院学报, 2004, 24(3):262-264.
- Deng H, Lin Q W, Teng H Q, et al. Analysis on the growth regularity of *Dicranopteris dichotoma* in areas of intensive soil erosion[J]. Journal of Fujian College of Forestry, 2004, 24(3):262-264.