

模拟降雨下林下覆被结构对产流产沙过程的影响

朱方方¹, 秦建森¹, 朱美菲¹, 张友焱²

(1.北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2.中国林业科学研究院生态保护与修复研究所, 北京 100091)

摘要: 植被具有良好的水土保持效益, 深入了解覆被结构特征与产流产沙关系是研究植被防蚀功能的基础。以鄂中地区典型森林植被为对象, 通过人工模拟降雨试验研究 5 种覆被结构(灌木、草本、枯落物、灌木+草本、灌木+草本+枯落物)和侵蚀性降雨(60, 90, 120 mm/h)对坡面侵蚀产沙过程的影响。结果表明: (1) 坡面产流率、产沙率随降雨时间先迅速增大, 后缓慢增大, 最后达到稳定趋势。降雨强度是坡面侵蚀产沙的主导因素, 与产流时间、产流率和产沙率呈显著正相关关系($p < 0.01$)。 (2) 在有/无枯落物存在的情况下, 植被覆盖度、植株密度分别是坡面产流产沙的主要影响因素。径流含沙量在不同覆被结构覆盖下表现为: 草本>灌木>枯落物>灌木+草本>灌木+草本+枯落物。 (3) 结构特征参数对产流产沙影响的优先等级为覆盖度、生物量、植株密度、多样性指标, 即水平结构>竖直结构>物种组成>空间格局。研究结果旨在揭示覆被结构对坡面侵蚀产沙的作用机理, 为南方林地土壤侵蚀模型的构建提供科学参考。

关键词: 土壤侵蚀; 覆被结构; 产流产沙; 函数关系

中图分类号: 157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)03-0010-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbxb.2023.03.002

Effect of Mulch Structure on Runoff and Sediment Yield Under Simulation Rainfall

ZHU Fangfang¹, QIN Jianmiao¹, ZHU Meifei¹, ZHANG Youyan²

(1.College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 2.Institute of Ecological Protection and Restoration, Chinese Academy of Forestry Sciences, Beijing 100091)

Abstract: Vegetation has good function of soil and water conservation. Careful understanding the relationship between the structural characteristics of vegetation and the production of runoff is the basis for studying the erosion control function of vegetation. In this paper, the effects of five vegetation structures (shrubs, herbs, litter, shrubs + herbs, shrubs + herbs + litter) and erosive rainfall (60, 90, 120 mm/h) on the process of erosion were investigated by artificial simulated rainfall experiments with typical forest vegetation in Central Hubei. The results showed that: (1) The runoff and sediment yield increased rapidly at first, then increased slowly with the rainfall time, and finally reach a stable trend. Rainfall intensity was the dominant factor of slope erosion and sand production, and showed a significant positive correlation with flow production time, flow production rate and sand production rate ($p < 0.01$). (2) With or without litter, vegetation coverage and plant density were the main factors affecting runoff and sediment yield on the slope. The sediment concentration of runoff under different covering structures was as follows: herb > shrub > litter > herb + shrub > shrub and grass withered. (3) The priority of structural characteristic parameters on runoff and sediment yield was: coverage, biomass, plant density, diversity index, that was, horizontal structure > vertical structure > species composition > spatial pattern. The results of the study aim to reveal the mechanism of the role of vegetation structure on slope erosion, and provide scientific reference for the construction of soil erosion models in southern woodlands.

Keywords: soil erosion; mulch structure; flow production and sand production; functional relationship

收稿日期: 2022-10-08

资助项目: “十四五”国家重点研发计划项目(2022YFF1302504)

第一作者: 朱方方(1993—), 女, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: Fangf0506@163.com

通信作者: 张友焱(1975—), 男, 副研究员, 主要从事林业生态工程研究。E-mail: youyanzh@caf.ac.cn

坡面产流产沙是多种因素作用的结果,影响因素包括降雨类型^[1]、坡度^[2]、植物措施^[3]等。降雨是诱发土壤侵蚀的直接因素,降雨强度是侵蚀产沙量的主要决策因子,产流量、产沙量随降雨强度增加显著增大^[4]。黄莹^[5]研究湖北地区不同暴雨类型下产流产沙特征发现,中低强度的降水导致产沙量有限;张黎明等^[6]研究不同降雨类型下南方典型土壤侵蚀量差异发现,次降雨量>50 mm 时,坡面产沙量差异较小。

针对植被措施对土壤侵蚀影响的研究大多从植被类型、植被格局、覆盖度、分布位置等角度开展。根据赵炯昌等^[7]研究发现,植被减流减沙效益与植被垂直结构组分完整性呈正相关;吴蕾等^[8]研究发现,植被减流效益随盖度增加呈现先增加后减小的趋势,产沙率随植被盖度增加一直增大;丛月等^[9]通过研究植被覆盖度对土壤减蚀量的影响发现,40%为植被覆盖度的临界值;然而,黄健熙等^[10]研究发现,植被覆盖度作为植被唯一指标,不能准确评价植被措施减流减沙效益;赵志斌等^[11]研究发现,坡地径流含沙量和侵蚀量在不同林地表现为:乔灌混合林>灌木林>乔木林>草地>裸地;陶宇等^[12]研究植物群落功能多样性与产流产沙响应关系发现,丰富度指数与坡面产流总量有线性关系。同时,前人^[13]研究表明,群落功能分异度与土壤侵蚀量呈显著负相关关系,多样性较高的植物群落具有更好的水土保持功能。植被对产流产沙过程的影响具有复杂性,具有主要影响的覆被结构特征参数的研究目前没有形成较为一致的结论。

以往关于植被对水土流失调控机制研究多集中

在黄土高原地区^[14-16],南方低山丘陵区较少,然而该地区近几年短历时、强降雨事件频发,一次大雨造成的土壤侵蚀量可能达到全年的 60%^[17],所以,亟待展开对该区域林下植被对降雨产流产沙特征的影响研究,以探究林地水土流失发生的规律。在植被防蚀功能研究中,对植被特征的描述较为单一,大多研究仅涉及一个层次的特征参数,鲜少涉及空间格局、物种组成等层次,然而单一层次是无法完整诠释性状结构与侵蚀产沙之间的关系。鉴于此,采用植被空间格局和物种组成指标,以南方低山丘陵区典型林下植被群落为对象,通过人工模拟降雨试验,研究植被特征参数与侵蚀产沙的响应关系,为南方地区土壤侵蚀模型植被因子的筛选提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

湖北省中部荆门市京山县太子山林场地处长江中下游地区(112°48′45″—113°03′45″E,30°48′30″—31°02′30″N),位于鄂中低山丘陵区至江汉平原过渡地带。林场内以黄棕壤和黄褐色石灰土为主,还有山地黄棕壤和黄褐土。所选林地土壤为黄土母质发育而成的黏性黄棕壤,呈微酸性。太子山林场地处中纬度地区,属亚热带季风湿润性气候,雨水集中于夏季,年平均降水量 1 094.6 mm。人工植被有马尾松林(*Pinus massoniana*)、柏木林(*Cupressus funebris*)、红果冬青(*Ilex corallina*)等树种,野外观测地典型树种特征见表 1。其中,PML 为针叶纯林,林下植被较为单一,以蕨类等低等植物为主;Cl、Pl、PCin 为混交林,林下植被种类多,植被长势较好。

表 1 野外观测地典型树种特征

样地 编号	典型 树种	密度/ (株·hm ⁻²)	坡度/(°)	坡向	胸径/ cm	树高/ m	郁闭度/%	主要灌木 植被
PML	马尾松	475	15	北	29.64±8.27	18.18±1.95	68	盐肤木、仙茅、蕨类
Cl	柏木、红果冬青	502	14	北	24.19±7.42	10.46±4.73	72	仙茅、双蝴蝶、白楸、金线草
Pl	马尾松、红果冬青	483	14	北	25.73±9.85	7.63±3.51	79	山莓、盐肤木、木莓、猬实、枹栎
PCin	马尾松、樟木	451	15	北	28.49±6.08	6.49±4.16	87	盐肤木、黄连木、仙茅、杜衡

注:表中胸径和树高数据为平均值±标准差。

1.2 试验设计

1.2.1 土槽填充及降雨装置 分别采集 4 个样地土壤,土壤样品经过自然风干、粉碎、筛除石块等过程,按照 1.53 g/m³ 容重进行土槽(长 3 m,宽 1 m,高 0.5 m)填充。过程中在每层土壤表面适量洒水,以达到其与自然状态下土壤含水率一致的目的。采用便双管侧喷模拟降雨系统,喷嘴高度为 6 m,雨滴接近自然降雨能量,降雨均匀度约为 0.8。降雨强度范围为 30~150 mm/h,由喷嘴孔径和水压共同控制。

1.2.2 坡面覆被设计 经过野外调查,在样地内选取典型坡面,在上坡、中坡、下坡分别设置 36 个 1 m×1 m 的样方,每个坡位 12 个样方。依据野外坡面植被原位移动原则拼接,尽量还原植被天然状态。进行样方调查后,选择最具有代表性的样方,记录样方内灌木、草本位置,按照原位移植到土槽内,对应土槽内上部、中部、下部。枯落物按照上、中、下 3 个样方进行采集,风干后称重,试验前均匀撒在土槽内对应的上、中、下位置。由于土槽长 3 m,每 1 m 为 1 个间

隔,划分为坡上、中、下。接缝处采用 2 个样方距离接缝 20 cm 范围内植被数量、植株密度、郁闭度等特征参数的均值选取植被进行布设。4 种林地分别有灌木、草本、枯落物、灌木+草本、灌木+草本+枯落物 5 种覆被结构,共 20 种坡面处理。由于移栽的植被容易死亡,整个过程需要快速进行。在每场人工降雨后,需检查植被生长状况,进行及时补栽。

1.2.3 试验过程 中国南方地区夏季多雨,60 mm/h 降雨强度为该地区较为常见的侵蚀性降雨强度。极端天气条件下,雨强可以达到 120 mm/h。根据湖北太子山地区雨季降雨情况,选取 60,90,120 mm/h 的 3 种雨强,降雨历时 1 h。该区域为低山丘陵区,4 个典型林地所处坡度为 $14^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 。根据观测数据可知,坡度为 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 的坡面容易产生侵蚀沟。因此,选择坡度 15° 进行研究。降雨过程中,前 10 min 内每 2 min 收集径流和泥沙样品,随后 50 min 内每 5 min 进行 1 次样品收集。降雨结束后静置样品,待泥沙沉淀后,测量滤出的上清液体积,将沉积泥沙带进行烘干、称重。结合降雨强度、坡度、覆被结构及 3 个重复,共计 189 场。

1.2.4 群落指标计算 试验开始前,记录植被种类、高度、盖度、植株密度等数据,土槽植被位置及生长状况,绘制点位图,计算坡面植被空间格局、物种组成、水平结构、垂直结构等特征参数。试验结束后,对坡面植被进行烘干处理,测量生物量。选取植被覆盖度和植株密度作为水平结构特征参数。垂直结构指标为灌草枯生物量及生物量比。同时,引入聚集指数(M)、群落多样性指标作为空间格局和物种组成特征参数。

(1)聚集指数(M)是 Clark 等^[18]提出的与距离有关的空间格局指数,公式为:

$$M = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n r_i / \sqrt{\frac{F}{n}} \quad (1)$$

式中: M 为聚集指数(无量纲), $M < 1$ 时,群落有聚集分布趋势, $M = 1$ 时,群落有随机分布趋势, $M > 1$ 时,群落有均匀分布趋势; N 为植株总数(个); r_i 为第 i 棵植株到其最近邻木的距离(cm); F 为土槽面积(m^2)。

(2)物种组成。统计坡面植被群落多样性参考生物多样性的测度方法^[19],Magarlef 丰富度指数(R)、Shannon-Wiener 多样性指数(H)、Pielou 均匀度指数(J)的计算公式为:

$$R = (S - 1) / \ln N \quad (2)$$

$$H = - \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i \quad (3)$$

$$P_i = h_i / h \quad (4)$$

$$J = H / \ln S \quad (5)$$

式中: S 为所在样方内的物种数(个); P_i 为样方中第 i 种植物的相对重要值,即个体数 n_i 占调查物种个体总数的比例(%)。灌丛物种相对重要值 = $1/4$ (相对多度 + 相对频度 + 相对盖度 + 相对高度);草本植物相对重要值 = $1/3$ (相对频度 + 相对盖度 + 相对高度)

2 结果与分析

2.1 坡面产流时间

坡面产流时间是雨滴降落到坡面至坡面径流产生的时间。坡面产流时间越长,坡面覆被结构对产流时间的贡献率越大。由图 1 可知,不同覆被结构坡面产流时间,坡面产流时间在 4 个林地从小到大依次为 PCin、Pl、Cl、PML。从不同降雨强度角度来看,在降雨强度为 60 mm/h 时,坡面平均产流时间为 3.031 min;在降雨强度为 90 mm/h 时,坡面平均产流时间为 2.332 min;在降雨强度为 120 mm/h 时,坡面平均产流时间为 1.586 min。由此可知,坡面产流时间随着降雨强度在增加而减小。裸坡的产流时间范围为 0.65~1.21 min,灌木覆盖坡面产流时间范围为 0.75~2.88 min,草本覆盖坡面产流时间范围为 1.48~3.17 min,枯落物覆盖坡面产流时间范围为 1.55~3.97 min,灌木+草本覆盖坡面产流时间范围为 1.53~3.85 min,灌草枯覆盖坡面产流时间范围为 1.75~4.41 min。植被覆盖可以提高坡面产流时间,从大到小依次为灌草枯、枯落物、灌木+草本、草本、灌木。

2.2 坡面产流产沙过程

2.2.1 坡面产流变化特征 由图 2 可知,在不同降雨条件下,不同覆被结构坡面产流率随降雨时间的变化。从整体而言,不同覆被结构坡面产流率随时间变化趋势一致,呈现上升趋势,可分为迅速增长阶段、迅速减小阶段、波动增长稳定阶段及稳定阶段。在坡面产流初始阶段,土壤含水率最低,土壤水分入渗量大,坡面产流率呈缓慢上升趋势;随着降雨时长的增加,土壤孔隙逐渐达到饱和状态,土壤进入稳渗阶段,坡面产流率处于稳定趋势。PML 林地坡面产流率随时间变化过程中有明显的下降,发生在降雨时间的前 10 min。降雨强度为 60,90,120 mm/h 时,坡面产流率达到稳定时间分别为 30,35,40 min。产流率达到稳定所用时间与降雨强度呈正相关关系($p < 0.01$)。在降雨强度为 120 mm/h 时,坡面产流率变化波动性最大,随着降雨强度降低,坡面产流率变化波动性降低。在 PML、Cl 林地内,灌木、草本坡面产流率大小相近,略高于其他覆被结构坡面产流率;在 Pl、PCin 林地内,灌木坡面产流率最大,远高于其他覆被结构坡面产流率。

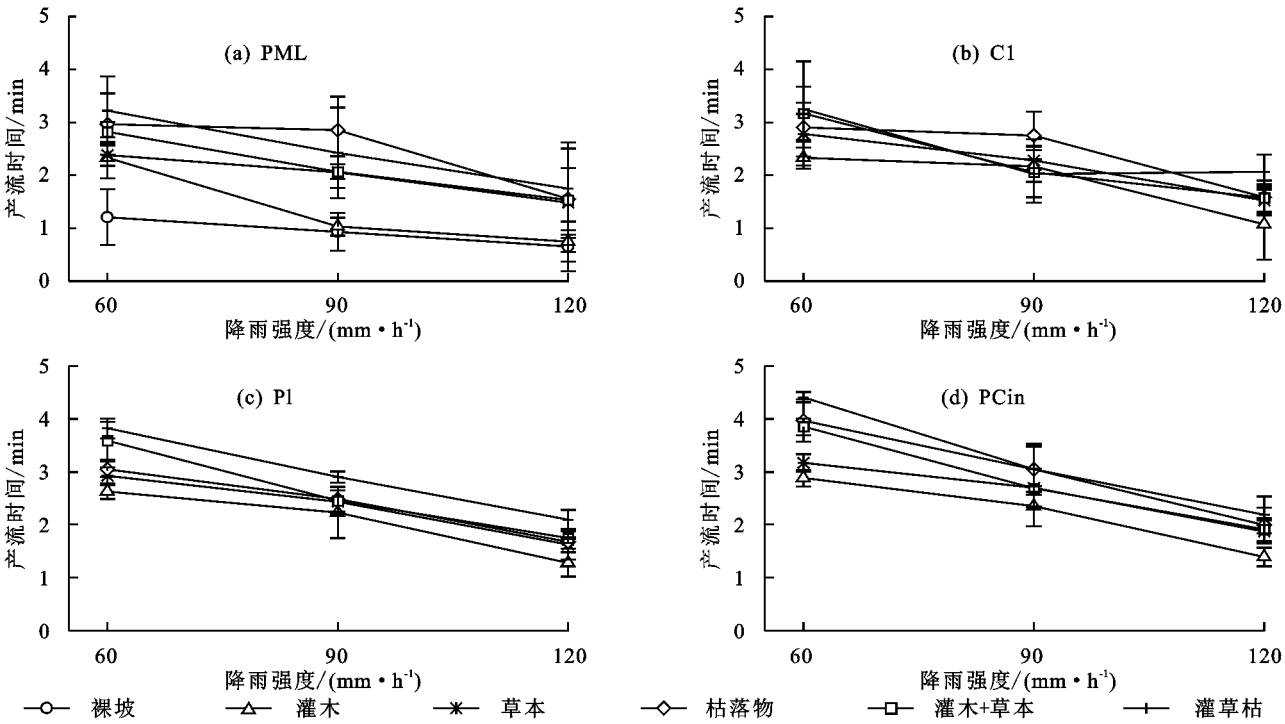


图 1 不同覆被结构坡面产流时间

裸地坡面稳定产流率在降雨强度 60, 90, 120 mm/h 下分别为 0.803, 1.003, 1.857 L/(m² · min)。裸地坡面稳定产流率随着降雨强度增加而增大。裸地坡面稳定产流率为 1.221 L/(m² · min)。植被覆盖坡面稳定产流率在降雨强度 60, 90, 120 mm/h 下分别为 0.618, 0.828, 1.625 L/(m² · min)。相较于裸地坡面稳定产流率分别降低 23.133%, 17.44%, 12.50%。坡面稳定产流率随着降雨强度增加而降低, 植被覆盖可降低坡面稳定产流率。随着降雨强度, 植被减流效果降低。坡面稳定产流率在不同覆被结构下表现为, 灌木 (1.132 L/(m² · min)) > 草本 (1.076 L/(m² · min)) > 枯落物 (1.022 L/(m² · min)) > 灌木+草本 (0.973 L/(m² · min)) > 灌草枯 (0.914 L/(m² · min))。其中, 灌木坡面稳定产流率最大, 与裸地坡面稳定产流率相差 0.089 L/(m² · min); 灌草枯坡面稳定产流率最小, 与裸地稳定产流率相差 0.307 L/(m² · min)。

2.2.2 坡面产沙变化特征 在不同降雨条件下, 不同覆被结构坡面产沙率随降雨时间的变化(图 3)。从整体而言, 产沙率随降雨时间先迅速增大, 后缓慢增大, 最后达到稳定趋势。坡面产沙率在降雨强度为 120 mm/h 时有明显的台阶状增长趋势。在降雨强度为 120 mm/h 时, 坡面产沙率变化波动性最大, 随着降雨强度降低, 坡面产沙率变化范围变小。裸地坡面产沙率高于植被覆盖坡面产沙率。对比不同覆被结构坡面产沙率可知, 在 PML、C1 林地内, 草本坡面产沙率最大, 略高于其他覆被结构; 在 P1、PCin 林地内, 灌木坡面产流率最大, 远高于其他覆被结

构。裸地坡面稳定产沙率为 15.622 g/(m² · min), 在降雨强度 60, 90, 120 mm/h 下分别为 7.977, 10.899, 27.991 g/(m² · min)。植被覆盖坡面稳定产沙率在降雨强度 60, 90, 120 mm/h 下分别为 6.577, 9.116, 23.016 g/(m² · min), 相较于裸地坡面稳定产沙率分别降低 17.54%, 16.36%, 17.77%。不同降雨强度下, 植被减沙作用没有显著差异。坡面稳定产沙率在不同覆被结构下的表现为, 草本 (13.804 g/(m² · min)) > 灌木 (13.797 g/(m² · min)) > 枯落物 (12.909 g/(m² · min)) > 灌木+草本 (12.333 g/(m² · min)) > 灌草枯 (11.672 g/(m² · min))。其中, 草本坡面稳定产沙率最大, 与灌木坡面稳定产沙率相差 0.007 g/(m² · min), 与裸地坡面稳定产沙率相差 1.825 g/(m² · min); 灌草枯坡面稳定产流率最小, 与裸地稳定产沙率相差 3.950 g/(m² · min)。

2.3 坡面产流与产沙关系分析

径流含沙量是评价水土流失程度的重要参数, 可描述坡面水沙关系消长与演变^[20]。由图 4 可知, 不同林地覆被结构下径流含沙量, 降雨强度为 120 mm/h 时, 径流含沙量最大, 与其他降雨强度下径流含沙量变化曲线之间有明显的界限。降雨强度为 90 mm/h 时, 径流含沙量大于降雨强度为 60 mm/h 时径流含沙量。降雨强度为 60, 90, 120 mm/h 时, 径流含沙量分别为 9.944, 10.255, 13.476 g/L。径流含沙量随降雨强度增加而增大。

裸地径流含沙量为 11.983 g/L, 灌木覆盖下径流含沙量为 11.220 g/L, 草本覆盖下径流含沙量为 11.267

素,随着降雨强度增加,坡面产流率、产沙率增大。植被覆盖度、生物量是坡面产流产沙的重要影响因素。在没有枯落物存在的覆被结构下,植株密度是坡面产流产沙重要影响因素,植株密度越大,植被减流减沙效果越明显;植被聚集指数对坡面产流产沙有显著影响($p<0.01$)。

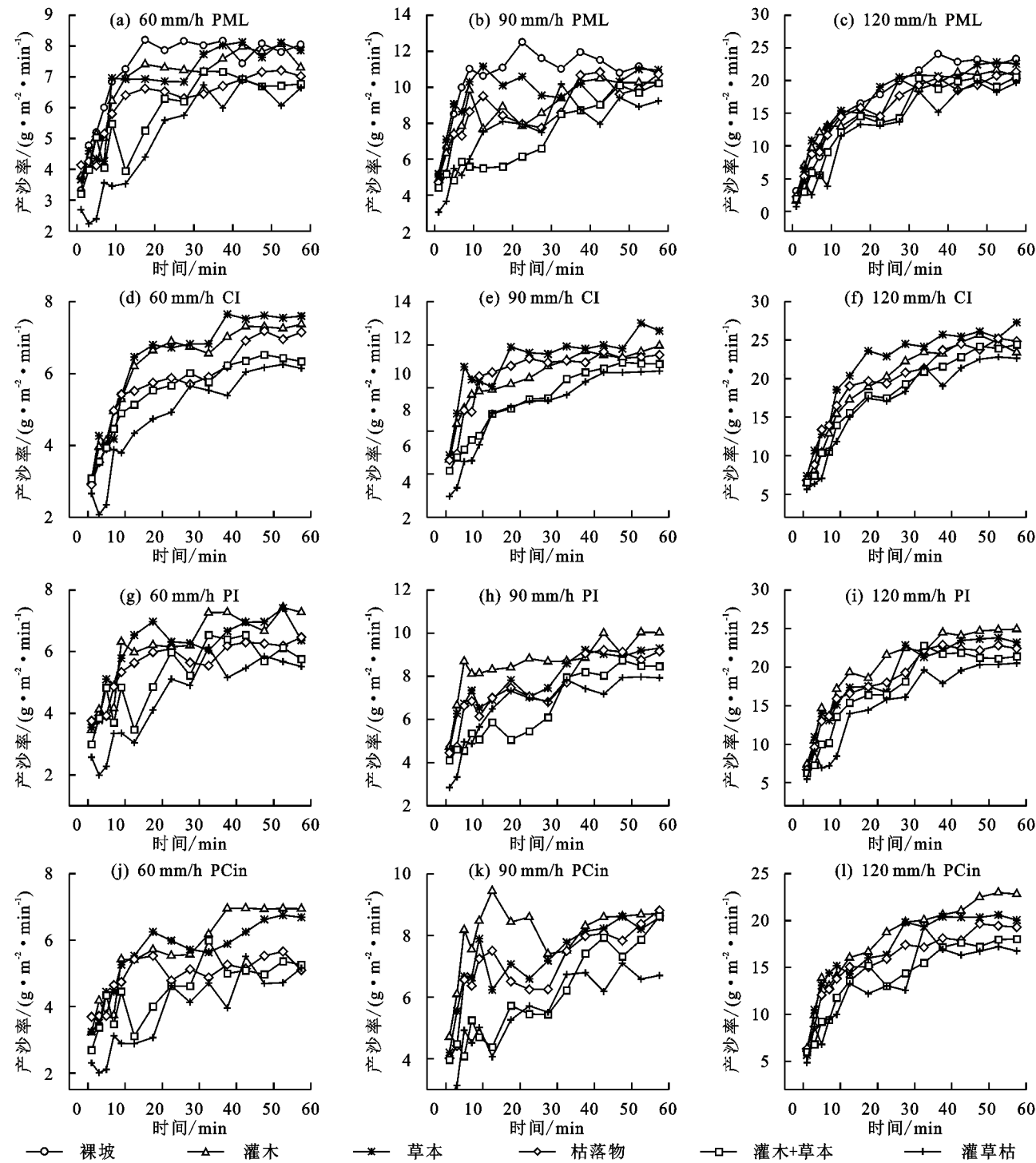


图 3 不同覆被结构坡面产沙率随降雨时间的变化

3 讨论

3.1 降雨对坡面产流产沙过程的影响

降雨是水土流失的主要动力,其中,短历时、高强度的降雨为地表径流的产生提供充足的水源,影响流域产流产沙^[21]。在本研究中,降雨强度是控制初始产流时间的主导因素,在侵蚀性降雨条件下,初始产流时间随着降雨强度增加而降低。降雨为坡面产流产沙提供水分

来源和初始动能,雨滴到达坡面首先被表层土壤吸收,当土壤达到饱和程度,坡面径流产生。因此,降雨强度较大时,土壤快速达到饱和状态,坡面产流时间较短^[22]。同时,降雨强度与雨滴动能呈正相关关系,雨滴击打坡面表层土壤时所拥有的雨滴势能越大,对土壤的打击力越大,产生的泥沙越多。因此,产流率、产沙率均与降雨强度呈正相关关系。

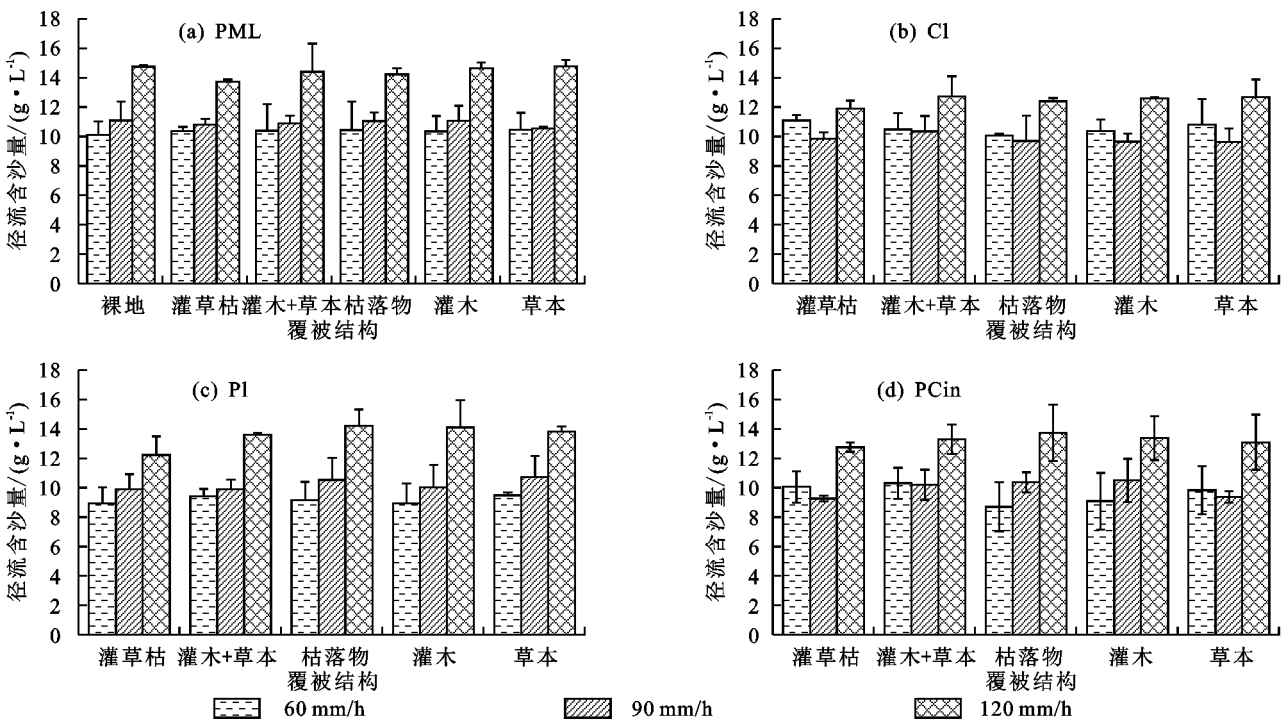


图 4 不同林地覆被结构径流含沙量

表 2 覆被结构特征参数与产流率、产沙率函数关系

覆被结构	拟合方程	<i>p</i>	<i>R</i> ²
灌木	$Ru = -10^{-0.378} Q^{0.940} C^{-0.178} A^{-0.234}$	<0.001	0.849
	$Rs = 10^{0.976} Q^{0.907} M^{0.201} J^{-0.0729}$	<0.001	0.842
草本	$Ru = 10^{-0.471} Q^{0.901} A^{-0.240} S^{-0.134}$	<0.001	0.772
	$Rs = 10^{0.571} Q^{0.900} C^{-0.508} R^{0.153}$	<0.001	0.846
枯落物	$Ru = 10^{0.004} Q^{0.898} C^{-1.507} S^{-0.194}$	<0.001	0.844
	$Rs = 10^{0.761} Q^{0.902} C^{-0.183} S^{-0.384}$	<0.001	0.856
灌木+草本	$Ru = 10^{0.010} Q^{0.903} M^{0.168} R^{-1.027} H^{-0.782}$	<0.001	0.875
	$Rs = 10^{1.101} Q^{0.897} A^{-0.177} H^{-0.115}$	<0.001	0.851
灌草枯	$Ru = 10^{-0.499} Q^{0.907} S^{-0.0435} K^{-0.294}$	<0.001	0.891
	$Rs = 10^{-0.411} Q^{0.903} C^{-0.192}$	<0.001	0.852

当降雨强度为 60,90,120 mm/h 时,坡面产流率分别为 0.504,0.693,1.371 L/(m²·min),坡面产沙率分别为 5.571,7.746,17.928 g/(m²·min)。降雨强度从 60 mm/h 增加到 90 mm/h,坡面产流率提升 37.45%,坡面产沙率提升 39.06%,平均提升 38.26%;降雨强度从 90 mm/h 增加到 120 mm/h 时,坡面产流率提升 97.72%,坡面产沙率提升 131.44%,平均提升 114.58%。坡面产流率、产沙率随降雨强度增加先缓慢增大,后急速增大。由此可知,不同降雨强度下,雨水参与入渗—径流过程的水量比例不同,与 Liu 等^[23]研究结论一致。对比 2 个降雨强度增加过程中坡面产流率提升数值可知,降雨强度在 60~90 mm/h 时,坡面土壤达到饱和所需时间较长,降水对土壤水势梯度的影响较大,土壤入渗增加幅度较大。而在 90~120 mm/h 降雨强度范围内,强降水使表层土壤迅速达到饱和,降水主要参与径流过程。

3.2 覆被结构对坡面产流产沙过程的影响

植被措施可以从根本上减少水土流失,其在水平空间和垂直空间上的水土保持功能分别为:在垂直方向上,利用冠层、枯枝落叶层拦截降雨,削减雨滴动能,减少降雨对表层土壤的击溅侵蚀作用;在水平方向上,利用植被根茎、枯落物层等与土壤表层直接接触的覆被结构,增加土壤水分入渗,阻滞径流产生,降低土壤侵蚀速率^[9]。本研究中,裸地坡面产沙率、产流率远高于植被覆盖坡面,由于植被覆盖可以增大坡面粗糙度,降低径流流速,达到减流减沙的效果。不同覆被结构坡面产流时间从大到小依次为灌草枯、枯落物、灌木+草本、草本、灌木。植被覆盖度和生物量与坡面产流时间呈正相关($p<0.01$),与坡面产流率、产沙率呈负相关($p<0.05$)。植被覆盖度、生物量越大,坡面产流时间越长,坡面产流率、产沙率越小,与吴蕾等^[8]研究结论一致。

坡面产流率在不同覆被结构覆盖下表现为灌木>草本>枯落物>草本+灌木>灌草枯;坡面产沙率和径流含沙量在不同覆被结构覆盖下表现为草本>灌木>枯落物>草本+灌木>灌草枯。由此可知,灌木、草本在产流率、产沙率上的表现存在差异。灌木与草本坡面产流、产沙率的主要影响因子均有植株密度与物种组成特征参数,产流率随植株密度增加而降低,结合灌木+草本坡面坡面产沙率也与植株密度有关可知,由于草本植物植株密度和植被盖度较大,可以增大植物对水流重力势能和动能的消耗,有限减小

水流紊动性,达到减流的效果,与朱慧鑫等^[24]研究结果相一致。然而,土壤侵蚀产沙主要发生在雨滴击溅侵蚀阶段,本研究中,灌木植株密度相较于草本低33%,但是植株硬度较大,可以有效吸收雨滴冲击力,减少溅蚀泥沙产生,降低产沙量。

在灌木、灌木+草本坡面,聚集指数、均匀度是产流产沙主要影响因素,聚集指数与均匀度为相反关系,均匀度指数越大,产流、产沙率越小,聚集指数相反,植被聚集型坡面径流阻力系数较小^[25],因此,合理的植被配置对整段坡面径流流速抑制效果较佳。在灌木+草本结构覆盖下,群落丰富度指数、多样性指数与产流、产沙率呈显著负相关关系,且丰富度指数高于多样性指数,说明功能多样性指数具有更高的敏感性。群落中物种所占生态位空间越大,植被生产力越高,其截流作用和入渗作用越大,与陶宇等^[12]研究结果相一致。因此,在无枯落物存在的情况下,植株密度、聚集指数、物种组成对坡面产流产沙过程影响显著。

在有枯落物存在的情况下,植被覆盖度是坡面产流产沙主要影响因素。在水平方向上,植被覆盖度增加使得坡面粗糙度增大,径流侵蚀力降低;在垂直方向上,植被覆盖坡面可以消耗雨滴动能,减少溅蚀泥沙量。在灌草枯覆盖坡面,生物量比值是产流产沙的主要影响因素。灌木、草本生物量与植被枝叶形态成正比,生物量越大,灌木枝叶对降雨雨滴动能削减作用越明显,同时,根茎对径流流动产生阻滞效果,在根部形成壅水现象,增加土壤水分入渗,降低坡面土壤产流产沙。因此,在灌草枯覆盖下,灌木、草本生物量越大,坡面产流率越低。

径流含沙量与植被生物量呈显著正相关($p < 0.01$)。植被覆盖下径流含沙量小于裸地径流含沙量,单一覆被结构坡面径流含沙量要大于复层结构坡面,不同覆被结构径流含沙量相差较小,与植被覆盖度呈负相关关系,说明在侵蚀性降雨条件下,不同覆被结构对泥沙的拦截作用差异性不明显。

4 结论

(1)降雨强度是控制坡面产流时间、产流产沙过程的主导因素,产流时间、产流率、产沙率与降雨强度呈正相关。坡面产流率、产沙率在降雨强度60~90,90~120 mm/h范围内分别以38.26%和114.58%增幅增大,在降雨强度为60~90 mm/h时,降水对土壤水势梯度的影响较大,土壤入渗增加。

(2)径流含沙量在不同覆被结构覆盖下表现为草本>灌木>枯落物>草本+灌木>灌草枯。覆被结构特征参数与产流、产沙率存在函数关系,综合二者

相关性,确定覆被结构特征参数的优先等级尤为重要。在无枯落物层的坡面上,植株密度是产流产沙的主要影响因素;反之,覆盖度对产流产沙的影响大于空间格局对产流产沙的影响,覆盖度是产流产沙主要影响因素。在灌木存在的坡面上,聚集指数与产流率呈显著正相关($p < 0.01$)。在群落多样性指标方面,群落丰富度指数与产流率呈显著负相关关系,且指数值高于多样性指数的指数值,说明功能多样性指数具有更高的敏感性。结构特征参数优先等级依次为覆盖度、生物量、植株密度、多样性指标,即水平结构>竖直结构>物种组成>空间格局。

参考文献:

- [1] 黄凯,刘瑞禄,覃莉,等.不同降雨条件下坡长对喀斯特坡面土壤侵蚀的影响[J].应用生态学报,2021,32(1):271-280.
- [2] Shen H O, Zheng F L, Wen L, et al. Impacts of rainfall intensity and slope gradient on rill erosion processes at loessial hillslope[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 155:429-436.
- [3] 朱燕琴,赵志斌,齐广平,等.黄土丘陵沟壑区不同植被类型次降雨产流产沙特征[J].草地学报,2019,27(1):28-34.
- [4] 霍云梅,毕华兴,朱永杰,等.模拟降雨条件下南方典型粘土坡面土壤侵蚀过程及其影响因素[J].水土保持学报,2015,29(4):23-26.
- [5] 黄萱.植被覆盖和降雨变化对流域水沙过程的影响机制[D].武汉:华中农业大学,2019.
- [6] 张黎明,于东升,史学正,等.不同降雨类型下的南方典型土壤侵蚀量差异研究[J].水土保持通报,2011,31(4):1-6.
- [7] 赵炯昌,卫伟,段兴武.模拟降雨下黄土坡面水沙过程对3种灌草植被垂直结构变化的响应[J].生态学报,2021,41(21):8602-8611.
- [8] 吴蕾,穆兴民,高鹏,等.黄土高原地区植被盖度对产流产沙的影响[J].水土保持研究,2019,26(6):133-138.
- [9] 丛月,张洪江,程金花,等.华北土石山区草本植被覆盖度对降雨溅蚀的影响[J].水土保持学报,2013,27(5):59-62.
- [10] 黄健熙,吴炳方,曾源,等.水平和垂直尺度乔、灌、草覆盖度遥感提取研究进展[J].地球科学进展,2005,20(8):871-881.
- [11] 赵志斌,朱燕琴,齐广平.植被结构类型对产流产沙特征的影响[J].甘肃科技,2018,34(22):139-140,138.
- [12] 陶宇,温仲明,朱朵菊,等.黄土丘陵区植物群落功能多样性/物种多样性与产流产沙响应关系[J].水土保持研究,2018,25(4):120-128.

- [13] Zhu H X, Fu B J, Wang S, et al. Reducing soil erosion by improving community functional diversity in semi-arid grasslands[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2015, 52(4): 1063-1072.
- [14] 李盼盼, 李彬彬, 王兵, 等. 模拟氮沉降对白羊草地群落特征及其坡面流水动力特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(16): 52-61.
- [15] 陈科兵, 吴发启, 姚冲. 黄土高原南部地区人工模拟暴雨条件下不同坡度谷子坡耕地产流产沙过程[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(3): 90-95.
- [16] 张科利, 蔡强国, 柯奇画. 中国土壤侵蚀研究重大成就及未来关键领域[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(4): 373-380.
- [17] Ben-Hur M, Faris J, Malik M, et al. Polymers as soil conditioners under consecutive irrigations and rainfall[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2015, 53(4): 1173-1177.
- [18] Clark P J, Evans F C. Distance to nearest neighbor as a measure of spatial relationships in populations[J]. *Ecology*, 1954, 35(4): 445-453.
- [19] Mason N W H, Mouillot D, Lee W G, et al. Diversity functional richness, functional evenness and functional divergence: The primary components of functional diversity[J]. *Oikos*, 2005, 111(1): 112-118.
- [20] Liu J E, Wang Z L, Yang X M, et al. The impact of natural polymer derivatives on sheet erosion on experimental loess hillslope[J]. *Soil and Tillage Research*, 2014, 139: 23-27.
- [21] 李瑞栋, 王文龙, 姜义宝, 等. 模拟降雨条件下砾石含量对壤土工程堆积体坡面产流产沙的影响[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(11): 3027-3036.
- [22] 陈泽勋, 刘廷玺, 王怡璇, 等. 模拟降雨条件下典型草原坡面初始产流时间及产流产沙量[J]. *生态学杂志*, 2022, 41(7): 1316-1323.
- [23] Liu X N, Fan D X, Yu X X, et al. Effects of simulated gravel on hydraulic characteristics of overland flow under varying flow discharges, slope gradients and gravel coverage Degrees [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: e19781.
- [24] 朱慧鑫, 胡晓静, 程金花, 等. 草被覆盖下坡面流土壤侵蚀水动力学特征[J]. *东北农业大学学报*, 2018, 49(7): 48-57.
- [25] 杨坪坪, 李勇, 宋涛, 等. 典型喀斯特区侵蚀性降雨特征及坡面生物措施水土流失防控效应[J]. *生态环境学报*, 2021, 30(1): 53-62.

(上接第 9 页)

- [59] Cade M B J, Berch S M, Preston C M, et al. Phosphorus forms and related soil chemistry of Podzolic soils on northern Vancouver Island. I. A comparison of two forest types[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2000, 30: 1714-1725.
- [60] Romany J. Effects of slash burning on soil phosphorus fractions and sorption and desorption of phosphorus[J]. *Forest Ecology and Management*, 1994, 65(2/3): 89-103.
- [61] 谷会岩, 金靖博, 陈祥伟, 等. 不同火烧强度林火对大兴安岭北坡兴安落叶松林土壤化学性质的长期影响[J]. *自然资源学报*, 2010, 25(7): 1114-1121.
- [62] 耿玉清, 周荣伍, 李涛, 等. 北京西山地区林火对土壤性质的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2007, 5(5): 66-70.
- [63] 杨玉盛, 俞新妥, 何智英, 等. II 炼山初期土壤肥力变化初步研究[J]. *福建林学院学报*, 1989, 9(3): 248-255.
- [64] Durgin P B, Vogelsang P J. Dispersion of kaolinite by water extracts of Douglas-Fir ash[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1984, 64(3): 439-443.
- [65] Clark R L. Pollen as a chronometer and sediment tracer, Burrinjuck Reservoir, Australia[J]. *Hydrobiologia*, 1986, 143: 63-69.
- [66] Nosrati K, Govers G, Ahmadi H, et al. An exploratory study on the use of enzyme activities as sediment tracers: Biochemical fingerprints? [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2011, 26(2): 136-151.
- [67] Reiffarth D G, Petticrew E L, Owens P N, et al. Sources of variability in fatty acid (FA) biomarkers in the application of compound-specific stable isotopes (CSSIs) to soil and sediment fingerprinting and tracing: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 565: 8-27.
- [68] 刘发林, 向鹏. 火干扰后土壤多环芳烃时空分布特征[J]. *土壤通报*, 2016, 47(4): 973-979.
- [69] Fernández I, Cabaneiro A, Carballas T. Organic matter changes immediately after a wildfire in an atlantic forest soil and comparison with laboratory soil heating[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1997, 29(1): 1-11.