弃土坡面不同建植恢复方式的减流减沙效应

赵黎明[1,2], 陈 磊[1,2], 朱昊宇[1,2], 刘旦旦[1,2], 张靖雨[1,2], 夏小林[1,2], 汪邦稳[1,2]

(1.安徽省·水利部淮河水利委员会水利科学研究院,
安徽 合肥 230088; 2.水利水资源安徽省重点实验室, 安徽 蚌埠 233000)

摘　要: [目的] 生产建设项目弃土场进行恢复植被后能够有效防治水土流失,探讨弃土场不同植被恢复方式的水土保持效果,可以为弃土场后续治理与监管提供理论依据。[方法] 选取皖西大别山区生产建设项目弃土,通过人工模拟降雨试验获得不同建植方式(撒播、条播、穴播)和植被恢复阶段(生长期、成熟期、枯萎期)的弃土坡面产流产沙特征,并利用累积距平等方法分析其规律和差异。[结果] 相对裸坡,植被恢复可有效延缓初始产流时间,撒播种植的效果最为明显。不同建植方式均起到一定的减流减沙效应,坡面累积产流产沙量呈现出撒播<条播<穴播<裸坡以及生长期<成熟期<枯萎期的规律;坡面产沙与产流过程存在差异性,减流效应弱于减沙效应。[结论] 建植方式减流减沙效益表现为撒播优于条播,穴播最差,生长期减流减沙效益优于成熟期,枯萎期最差。撒播方式在生长期内呈现出最佳的减流减沙效益,减流率和减沙率分别达到 49.6%,95.5%。

关键词: 弃土场; 人工模拟降雨; 植被建植; 产流产沙; 累积距平方法; 皖西大别山区

文献标识码: A　　**文章编号:** 1000-288X(2024)01-0000-00　　**中图分类号:** S157.1

文献参数: 赵黎明, 陈磊, 朱昊宇, 等.弃土坡面不同建植恢复方式的减流减沙效应[J].水土保持通报, 2024,44(1):-. Zhao Liming, Chen Lei, Zhu Haoyu, et al. Different planting restoration methods affect runoff and sediment redution on an abandoned soil blope [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(1):-.

Different Planting Restoration Methods Affect Runoff and Sediment Redution on an Abandoned Soil Slope

Zhao Liming[1,2], Chen Lei[1,2], Zhu Haoyu[1,2],
Liu Dandan[1,2], Zhang Jingyu[1,2], Xia Xiaolin[1,2], Wang Bangwen[1,2]

(1.*Anhui and Huaihe River Institute of Hydraulic Research*, *Hefei*, *Anhui* 230088, *China*;
2.*Anhui Province Key Laboratory of Water Conservancy and Water Resources*, *Bengbu*, *Anhui* 233000, *China*)

Abstract: [Objective] Vegetation restoration can effectively prevent and control soil and water losses at abandoned production sites and construction projects. Determining the soil and water conservation effects of various vegetation restoration methods in an abandoned dreg field can provide a theoretical basis for subsequent management and supervision of the area. [Methods] An artificial rainfall simulation experiment was set up to obtain the runoff and sediment production characteristics of a slope surface covered with selected waste slags under different planting methods (broadcast sowing, drill sowing, and hole sowing) and vegetation restoration stages (growth, maturity, and withering periods) from the production and construction projects in the Dabie Mountains of Western Anhui Province, and the patterns and differences were analyzed by methods such as cumulative average deviation. [Results] Compared with bare slope, vegetation restoration effectively delayed the initial runoff generation time. The most obvious effect was observed for broadcast sowing. Vari-

收稿日期: 2023-04-18　　**修回日期:** 2023-06-27

资助项目: 安徽省自然科学基金"水科学"联合资助项目"不同土石含量弃渣场的水土流失规律与防治技术研究"(2208085US21);安徽省·水利部淮河水利委员会水利科学研究院青年科技创新资助项目"弃渣场边坡水土流失对植被恢复过程的响应"(KY202002);安徽省·水利部淮河水利委员会水利科学研究院青年科技创新资助项目"安徽省皖南山区和皖西大别山区允许土壤流失量研究"(KY202102)。

第一作者: 赵黎明(1984—),男(汉族),安徽省宿州市人,硕士,工程师,主要从事水土保持与水生态方面的科学研究及技术咨询。E-mail:82186630@qq.com。

通信作者: 汪邦稳(1981—),男(汉族),安徽省合肥市人,博士,正高级工程师,主要研究方向为土壤侵蚀与环境。E-mail:357733852@qq.com。

ous planting methods exhibited varying degrees of effectiveness in reducing runoff and sediment, with the overall runoff and sediment output from a slope following the order of bare slope > hole sowing > drill sowing > broadcast sowing, and withering period < maturity period < growth period. The production of sediment and runoff were characterized by distinct processes, and the effect of reducing runoff was weaker than that of reducing sediment. [Conclusion] The runoff and sediment reduction benefits of planting methods were shown to be greater for broadcast sowing than for drill sowing, with hole sowing being the worst. The efficacy of reducing runoff and sediment during the growth period surpassed that of the maturity period, while the withering period yielded the least benefits. Among the various sowing methods, broadcast sowing exhibited the highest efficiency in reducing runoff and sediment during the growth period, with rates of 49.6% and 95.5% respectively.

Keywords: abandoned dreg field; artificial rain-simulation experiment; planting methods; runoff and sediment production; cumulative distance method; Dabie Mountains of Western Anhui Province

近年来随着我国工业化、城市化步伐的加快,生产建设项目造成的水土流失问题已相当突出,引起了全社会的关注。尤其是大中型生产建设项目,弃土场数量多、占地大、立地条件差,弃土结束后基于水土流失和渣场稳定考虑的生态恢复问题尤为突出,在经历暴雨后可能会诱发极其严重的水土流失[1-2]。全国生产建设项目每年产生弃土约 5.00×10^9 m^3,弃土场是最容易发生严重水土流失甚至灾害事件的场所[3]。如果弃土处置不合理,会对生态环境产生巨大的负面影响,甚至对人民的生命财产安全构成威胁,如 2008 年襄汾尾矿库溃坝事故和 2015 年深圳光明新区渣土受纳场滑坡事故均产生了大量的人员伤亡和财产损失。

皖西大别山区是我国典型的集山区、库区、多省交界区、水土流失严重区、贫困区于一体的革命老区,由于自然条件和历史原因,严重的水土流失给当地经济社会和生态环境产生了很大危害[4]。作为水土保持区划之一的皖西大别山山地丘陵水源涵养保土区 2021 年水土流失面积 3 596.85 km^2,占安徽省水土流失面积的 30.3%。皖西大别山区六安市、安庆市 2021 年批复生产建设项目 584 个,设计拦挡弃土量 3.31×10^7 m^3,占比分别达到全省的 11.46%和 11.51%[5]。

草本植被及其枯落物能够有效改变降雨与地表径流、壤中流的关系,增强降雨量对地表径流和壤中流的影响[6],从而减少区域水土流失、维持生态平衡[7]。生产建设项目弃土场坡面恢复植被后土壤侵蚀强度逐步降低,能够有效防治弃土场水土流失[8-9],而且不同植被类型明显影响产流时间、产流和产沙量[10-13]。以往研究多集中在弃土场裸坡侵蚀规律、乔灌草混植条件下的减沙效益等方面。在皖西大别山区,针对生产建设项目弃土场等非自然堆体植被恢复条件下侵蚀规律和水土保持效益研究欠缺,对大别山区及周边同类项目的科学研究和生产建设缺少科学指导依据。本文以大别山区典型生产建设项目弃土为研究对象,通过人工模拟降雨试验,定量分析不同植被恢复条件下的减流减沙作用,揭示植被恢复与水土流失间的内在联系,为该区域水土流失预防、区域监管和生态治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验在安徽省(水利部淮河水利委员会)水利科学研究院新马桥农水水保综合试验站人工降雨大厅开展,利用人工模拟降雨系统进行模拟试验,该系统包括 400 m^2 室内人工模拟降雨小区,分 2 个降雨小区单独控制,单区有效降雨面积 246 m^2,均采用垂直下喷式降雨系统,降雨强度变化范围 10~200 mm/h,雨滴大小为 0.4~6.0 mm,降雨均匀度>0.80,每次降雨试验前利用标定桶(直径为 18.4 cm)均匀放置在降雨范围内进行人工标定,保证降雨均匀度。

1.2 供试材料

试验区域土壤为取自皖西大别山区舒城县境内某在建公路开挖余方(项目区位于东经 116°86′,北纬 31°34′,海拔 85 m)。该地区属于国家水土流失重点防治区,土壤类型以黄棕壤为主,成土母质多为花岗岩、片麻岩及砂页岩的残积坡积物,其土层薄、多石砾、孔隙发达、结构松散、受水蚀砂化危害严重,采用 Mastersizer 3000 激光粒径分析仪测试其粒径组成中砂粒(0.05~0.5 mm)含量为 26.53%,粉粒(0.002~0.5 mm)含量为 50.84%,黏粒(≤0.002 mm)含量为 21.99%。原状土开挖后土壤体积密度由 1.46 g/cm^3 降低为 1.23 g/cm^3,孔隙度由 45.77%升高为 52.36%,自然含水率由 23.2%降至 17.9%(见表 1)。

表 1　原状土和供试土物理特性对比

Table 1　Comparison of physical properties of undisturbed soil and test soil

土壤类型	体积密度/(g·cm^{-3})	孔隙度/%	自然含水率/%
原状土	1.46	45.77	23.2
供试土	1.23	52.36	17.9

1.3　试验设计

方案设计:考虑到种植方式与植被生长周期对植被性状特征及减沙减流功能的显著影响,本试验采用正交试验设计法,应用穴播、条播、撒播 3 种植被建植方式种植(见图 1),在给定 90 mm/h 雨强、30°坡度条件下,观察植被在植被恢复的不同阶段(生长期、成熟期以及枯萎期)对弃土坡面产流产沙的差异性影响,同时设置空白对照组 1 组(模拟自然状态未主动采取任何生态恢复措施),共计需进行 3×3+1=10 次试验。降雨强度基于人工降雨大厅标定调节,坡度采用采用规格为 3 m×1.5 m×0.6 m 的 XHZ-GC101 移动式液压变坡钢槽车(见图 2)调节坡度,坡度变化范围 0°～30°。

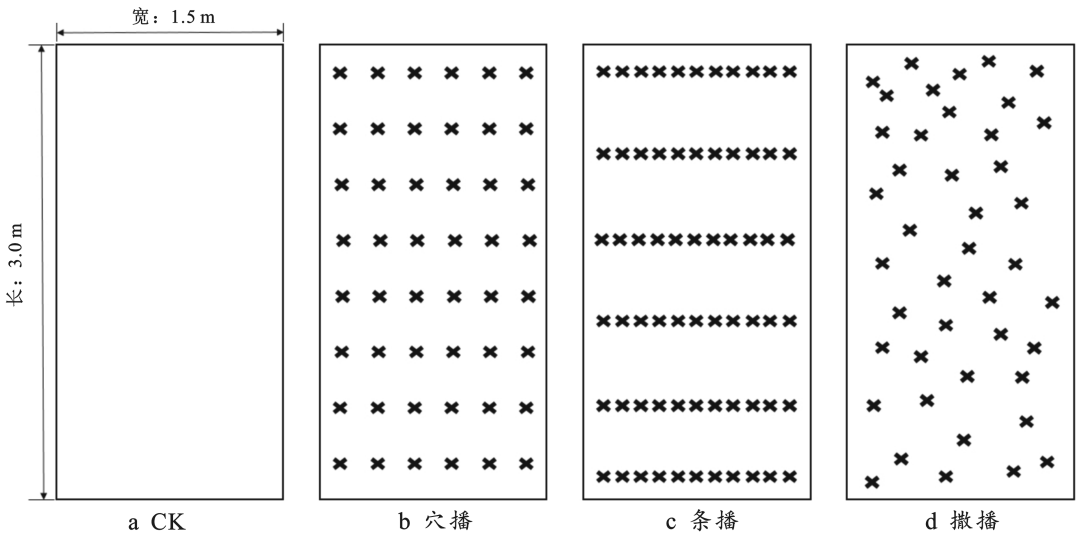

图 1　人工模拟降雨不同坡面种植示意图

Fig.1　Schematic diagram of planting on different slopes under simulated rainfall

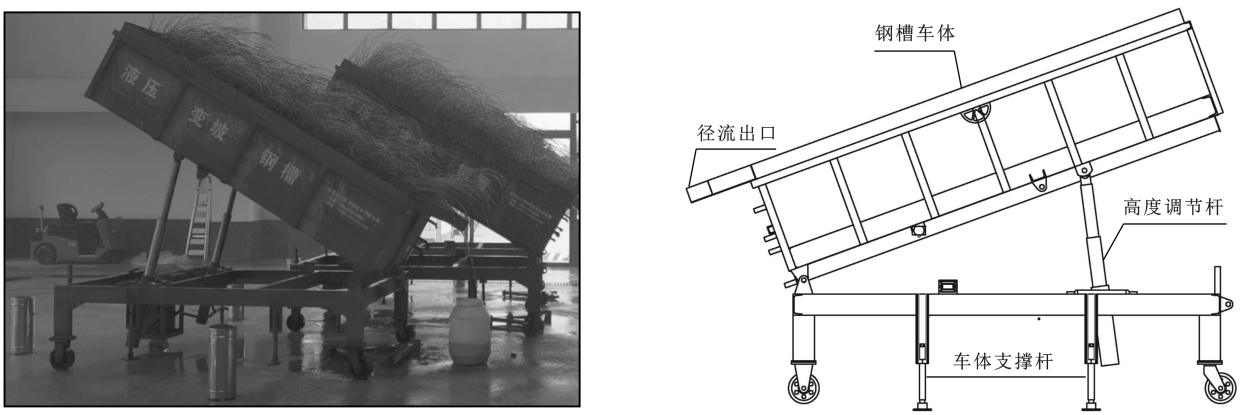

图 2　试验设备钢槽车示意图和实物图

Fig.2　Schematic and physical drawings of steel tank of test equipment

植被选取:选取工程实践中常用的黑麦草(*Lolium perenne* L.)、狗牙根〔*Cynodon dactylon* (L.) Pers.〕作为植被品种,互补特性差异满足不同季节和生长期建植需求,按黑麦草和狗牙根数量比例为1∶1进行混播,每组钢槽车播种等量 55 g 草籽,播种前采用温水浴法对种子进行预处理。狗牙根属禾本科多年生草本植物,低矮草本,秆细而坚韧,下部匍匐地面蔓延甚长,营养繁殖能力强大,其耐践踏性、侵占性、再生性及抗恶劣环境能力极强,耐粗放管理,常应用于堤岸、水库水土保持和高速公路、铁路两侧的固土护坡绿化工程,是极好的水土保持植物品种[14-15]。黑麦草属多年生或一年生草本,生长快、分蘖多、能耐牧,较能耐湿,路旁湿地常见,具有较高的经济价值和饲料价值,同时也具备很好的水土保持能力[16-18]。

预处理：为了保证钢槽车底部的良好透水性，钢槽车底部平铺一层纱布，人工装土深度 60 cm 与钢槽车齐平，经自然沉降后坡面距钢槽车顶约 10 cm。钢槽车四周用铁皮密封，并高出坡面垂直距离 20 cm，以削减侧向入渗和溅蚀的影响，下端安放集流槽，以保证在降雨期间各时段的所有地面径流流入集流桶内。为避免蒸发和自然降雨对试验小区初始含水率产生影响，除试验时间外，钢槽车均放置在室外自然生长，每周人工喷洒喷灌一次至产流时停止，试验开始前采用烘干称重法测定土壤含水率，保证各试验钢槽车内土壤含水率基本一致。

试验过程：试验于 2022 年 4—11 月进行，供试植被达到不同恢复阶段生理特性指标时开展 1 次试验，共计开展 10 次试验。每次试验开始前，测定既定生长周期的植被覆盖度（见表 2），根据试验计划标定试验所需的降雨强度（见表 3），选择降雨强度均匀且适合的区域。降雨过程中，从降雨开始计时，当集流槽出现均匀连续产流时记录初始产流时间，降雨 60 min 后停止降雨，径流泥沙样品的采集及分析工作同步进行，从产流开始每 5 min 收集 1 次径流样品，连续采集至降雨结束。泥沙量采用搅拌取样法，使用搅拌棒充分搅拌均匀，取样 1 L 放置不锈钢盆内，静止 24 h 以上，直到泥沙完全与径流分开，倒掉表面上清液，放置于烘箱内，105°烘 12 h 后称重，获得泥沙干重并记录。

表 2 不同生长周期植被覆盖度统计结果

Table 2 Statistical result of vegetation coverage in different growth periods

植被生长周期	植被建植方式	植被覆盖度/%	备注
生长期	撒播	91	
	条播	88	
	穴播	84	
成熟期	撒播	80	抽穗率达 60%
	条播	76	
	穴播	72	
枯萎期	撒播	43	70%种穗变黄白
	条播	36	
	穴播	27	

表 3 人工模拟降雨系统降雨雨强标定

Table 3 Rainfall intensity calibration of avtificial rainfall simulation system

目标雨强/(mm·h^{-1})	降雨设备喷头类型	压力/kpa	降雨时长/min	标定雨强/(mm·h^{-1})	降雨均匀度/%
90	大	91	10	90.3	92.6

2 结果与分析

2.1 不同建植方式对坡面产流时间的影响

产流时间是坡面植物修复综合效果的反映，不同建植方式会导致下垫面覆盖度、根系深度以及土壤板结程度等指标出现差异，继而导致产流时间的差异性[19-20]。本次试验首先深入研究了不同建植方式对下垫面覆盖度及坡面产流时间的影响（见图 3），结果表明：①在 10 组试验中，相对于其余 9 组进行坡面植物修复的组别的初始产流时间（穴播：5.52，3.47，2.87 min，条播：6.65，3.55，2.77 min，撒播：8.85，6.23，4.07 min），空白对照组的初始产流时间最快，为第 2.77 min，表明实施坡面植物修复可以显著降低初始产流时间；②就植被恢复阶段而言，生长期、成熟期以及枯萎期的平均植被覆盖度分别为 87.67%，75%，以及 31.67%，枯萎期的植被覆盖度显著低于生长期和成熟期，与此同时枯萎期的平均初始产流时间 3.33 min 也显著低于生长期（7.00 min）和成熟期（4.41 min），表明坡面的初始产流应当与植被生长状况（尤其是植被覆盖度）呈正相关关系，且当植被恢复阶段达到枯萎期时由于植被覆盖度降低等原因，初始产流时间会显著变快；③就建植方式而言，采用撒播建植方式的植被覆盖度（生长期：91%，成熟期：80%，枯萎期：40%）明显高于同时期的其他两种植被建植方式（见图 3A），与此同时不同建植方式的坡面初始产流时间规律为撒播（平均 6.38 min）＞条播（平均 4.42 min）＞穴播（平均 3.95 min）（见图 3B），表明 3 种建植方式中撒播的延缓初始产流的效应最为明显。

2.2 不同建植方式下坡面产流过程

总体上看，降雨过程中的径流量会随降雨历时的增加而增加，但降雨产流过程却并不是简单的线性关系，而是主要分为以下 3 个阶段：首先，由于雨前初始土壤含水率较低，土壤入渗率较大，降雨初损比较大，此时坡面不产流；其次，随着降雨历时的增加，土壤含水率逐渐增大，入渗速率逐渐降低，当入渗率小于降雨强度时，地表开始产流，此后产流逐渐增加；最后，直至土壤含水率达到饱和时，坡面入渗速率趋于稳定，产流也趋于稳定。因此，在雨强恒定的情况下，整个坡面产流过程会呈现出开始产流量逐渐增加，一段时间后在一定幅度范围内稳定波动，主要表现为径流率的变异。

为准确研究坡面产流过程，本研究根据试验获得的每 5 min 的产流数据构建了坡面产流时间过程曲线（见图 4）。结果表明：①坡面径流总体上呈现先快速增大，后趋于稳定的趋势，这与前人的研究结果一

致[21-22]。在本次试验研究中,前期(第 15 min 前)不同建植方式的坡面径流率随产流时间快速增加,约第 25—30 min 后逐渐趋于相对稳定,因此产流过程的变异点应当介于以上两个阶段之间;②对比穴播、条播、撒播以及空白对照组的产流过程可以明显看出,空白对照组最先达到稳定径流率(约在 25 min 左右),且其径流率(约为 5.0 L/min)明显高于其他建植方式,尤其是在植被覆盖度较高的生长期(穴播约为 3.7 L/min,条播约为 3.2 L/min,撒播约为 2.7 L/min)。然而,在植被覆盖度较低的枯萎期,无论是达到稳定径流率的速度还是径流率的量,不同建植方式间的差距明显减小;③从不同植被恢复阶段来看,不同于成熟期和枯萎期,生长期的径流率差异更为明显,可以清晰的呈现出撒播<条播<穴播<空白组的规律。

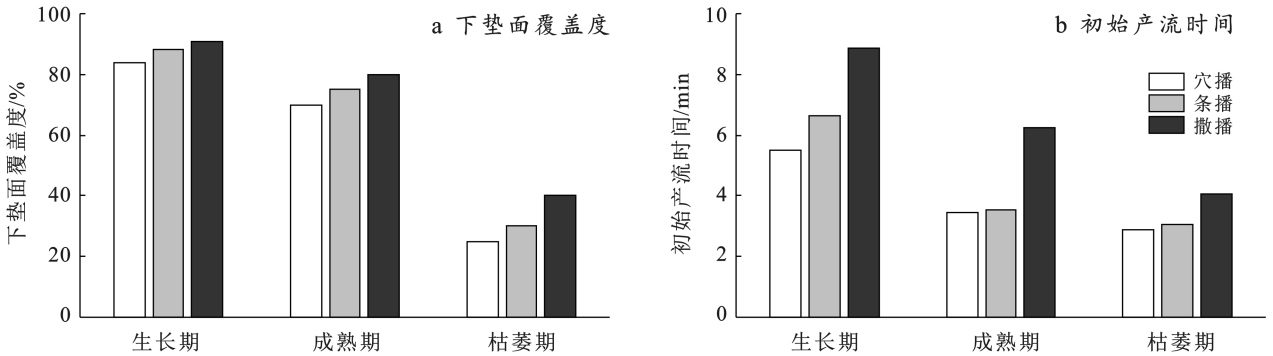

图 3　不同建植方式对下垫面覆盖度及坡面产流时间的影响

Fig.3　Effect of different planting methods on underlying surface coverage and runoff generation time

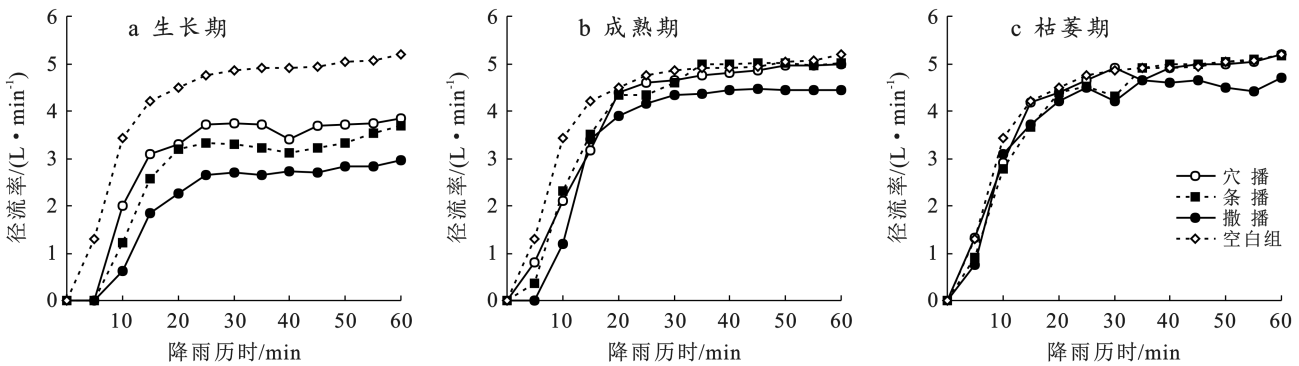

图 4　不同建植方式在植被恢复期的坡面产流过程

Fig.4　Runoff generation process of slope during vegetation restoration with different planting patterns

2.3　不同建植方式下坡面产沙过程

坡面产沙过程与产流过程具有一定的相关性,但存在一定的差异性。对产沙过程,也可以分为 3 个阶段。第一阶段,降雨初期弃土坡面土壤的结构组成较为松散,且坡面上具有一定的浮土以及泥沙小颗粒,抗冲性、抗蚀性较差,雨滴对地表的击溅作用使土壤颗粒分散,地表湿润后土壤颗粒逐渐崩解、剥离、挟带,随径流向下坡方向运移。第二阶段,随着降雨历时的增加,产流逐渐增多,挟沙能力也会增加,产沙量随降雨历时增加而增大。第三阶段,随着降雨过程的持续,坡面松散泥沙小颗粒逐渐被坡面径流冲刷带走,坡面逐渐形成表层结皮,径流剥蚀土壤颗粒的能力减弱,挟沙能力也逐渐稳定并不断降低。

为准确研究坡面产沙过程,本研究根据试验获得的每 5 min 的产沙数据构建了坡面产沙时间过程曲线(见图 5)。结果表明:①坡面侵蚀率先显著增加,达到峰值后波动剧烈,而后逐渐减少并相对趋于稳定,呈现出显著的复杂波动特征。在本次试验研究中,不同建植方式的坡面侵蚀率变化过程相差较大,但基本上呈现前期(第 5—10 min)坡面侵蚀率随产流时间快速增加,中期(约第 10—30 min)逐渐趋于波动稳定,而后逐渐减少的过程,因此产沙过程的变异点应当存在 2 个,分别介于以上 3 个阶段之间;②对比穴播、条播、撒播以及空白对照组的产沙过程可以明显看出,空白对照组的产沙量远远高于实施各类植被恢复措施的其他 9 组,并且最先达到侵蚀率峰值(约在 10 min 左右),侵蚀率(约为 508.5 g/min)明显高于其他建植方式。

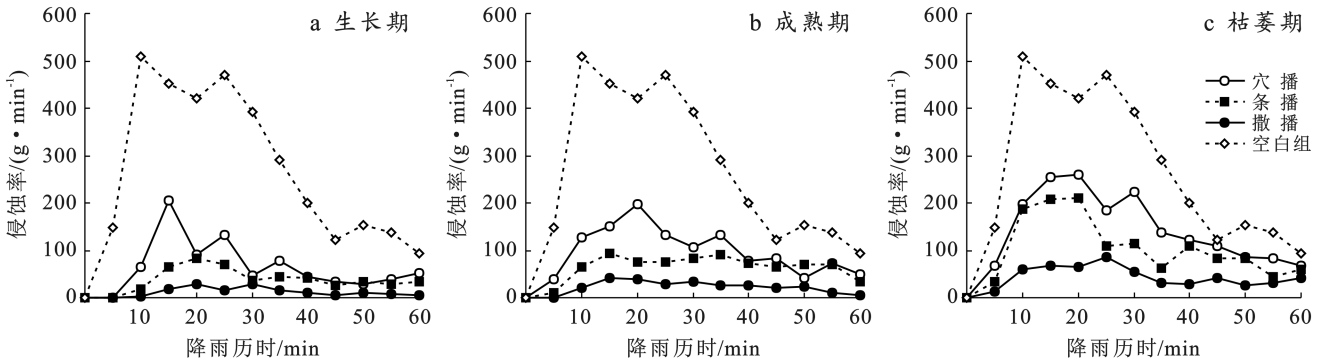

图 5 不同建植方式在植被恢复期的坡面产沙过程

Fig.5 Sediment yield of slope during vegetation restoration period with different planting patterns

3 讨 论

3.1 坡面产流过程变异点和累积产流量

为找寻径流率的变异时间,本研究利用累积距平法讨论了不同建植方式在不同植被恢复阶段的产流过程的变异点(见表 4,图 6)。①不同建植方式不同植被恢复阶段的径流率变异点集中发生在第 10—15 min,其中变异点为第 10 min 的有:空白对照组、穴播的生长期和枯萎期、撒播的成熟期和枯萎期;变异点为第 15 min 的有:穴播的成熟期、条播的生长期、成熟期和枯萎期、撒播的生长期。需要注意的是虽然本次研究中空白对照组的径流率变异点同为第 10 min,但从曲线变化趋势而言,空白对照组的径流率变异点应当在其他组别之前。②空白对照组坡面累计产流量为 265.5 L,穴播、条播、撒播的平均坡面累计产流量分别为 231.9 L,223.2 L,197.3 L,清晰呈现出撒播<条播<穴播<空白组的规律。不同植被恢复阶段的平均坡面累计产流量均表现为生长期(164.1 L)<成熟期(236.8 L)<枯萎期(251.4 L),相较而言,枯萎期和成熟期的累计产流差异明显小于成熟期和生长期的产流差异。③下垫面覆盖度是影响坡面产流的重要因素[23],后期通过优化试验设计组合,进一步研究植被覆盖度对坡面产流过程变异节点的影响。

表 4 不同建植方式下不同生长期产流过程变异点和累积产流量

Table 4 Variation points and cumulative runoff yield in different growing stages under different planting patterns

建植方式	植被恢复阶段	产流过程变异点/min	累积产流量/L
穴播	生长期	10	189.9
	成熟期	15	245.1
	枯萎期	10	260.6
条播	生长期	15	168.4
	成熟期	15	247.3
	枯萎期	15	253.8
撒播	生长期	15	133.9
	成熟期	10	218.0
	枯萎期	10	239.9
空白对照组		10	265.5

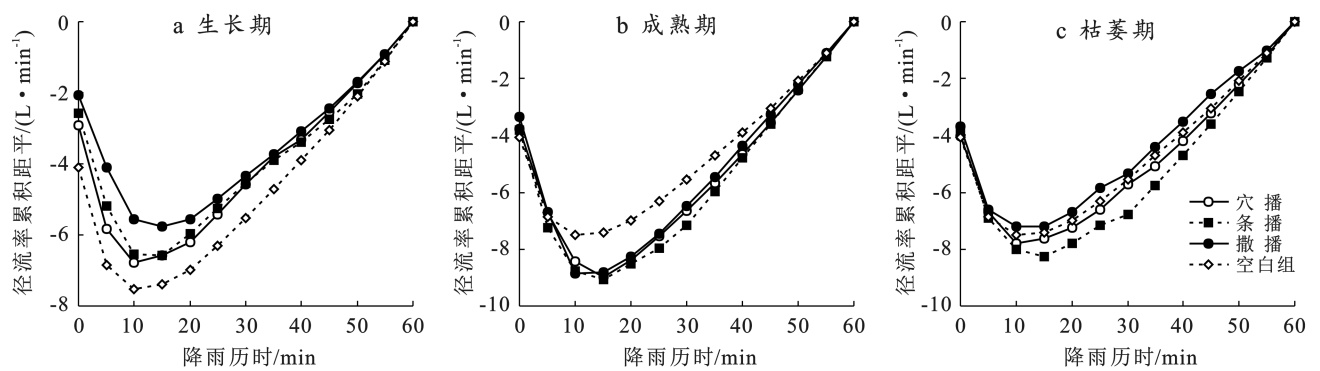

图 6 不同建植方式在植被恢复期的坡面产流累积距平曲线

Fig.6 The cumulative distance curve of runoff from slope during vegetation restoration period

3.2 坡面产沙过程变异点和累积产沙量

为找寻产沙过程的变异时间,本研究利用累积距平法讨论了不同建植方式在不同植被恢复阶段的产沙过程的变异点(见表 5,图 7)。①不同建植方式

不同植被恢复阶段存在两个侵蚀率变异点,分别集中发生在第 5—10 min 和第 30—40 min,从侵蚀率的累积距平图可以看出,空白对照组突变点相对更为明显;②空白对照组坡面累计产沙量为 16 951.8 g,穴播、条播、撒播的平均坡面累计产沙量分别为 6 358.7 g,4 309.1 g,1 617.8 g,与产流情况一致,呈现出撒播<条播<穴播<空白组的规律。不同植被恢复阶段的平均坡面累计产沙量均表现为生长期(2 415.3 g)<成熟期(3 822.1 g)<枯萎期(6 048.1 g);③与产流过程有所不同的是,即使是在植被覆盖度较低的枯萎期,实施各类植被恢复措施 9 组的侵蚀率也远远低于空白对照组,这或许是由于植被恢复措施除了改变覆盖度外,植物根系还改变了土壤特征、板结程度等[24]。

表 5　不同建植方式下产沙过程变异点和累积产沙量

Table 5　Variation points of sediment yield and cumulative sediment yield under different planting patterns

建植方式	植被恢复阶段	产沙过程变异点/min	累积产沙量/g
穴播	生长期	5,35	4 075.7
	成熟期	5,35	6 051.6
	枯萎期	5,35	8 948.7
条播	生长期	10,40	2 401.1
	成熟期	5,55	4 025.4
	枯萎期	5,40	6 500.7
撒播	生长期	10,35	769.1
	成熟期	5,50	1 389.2
	枯萎期	5,30	2 695.0
空白对照组		5,35	16 951.8

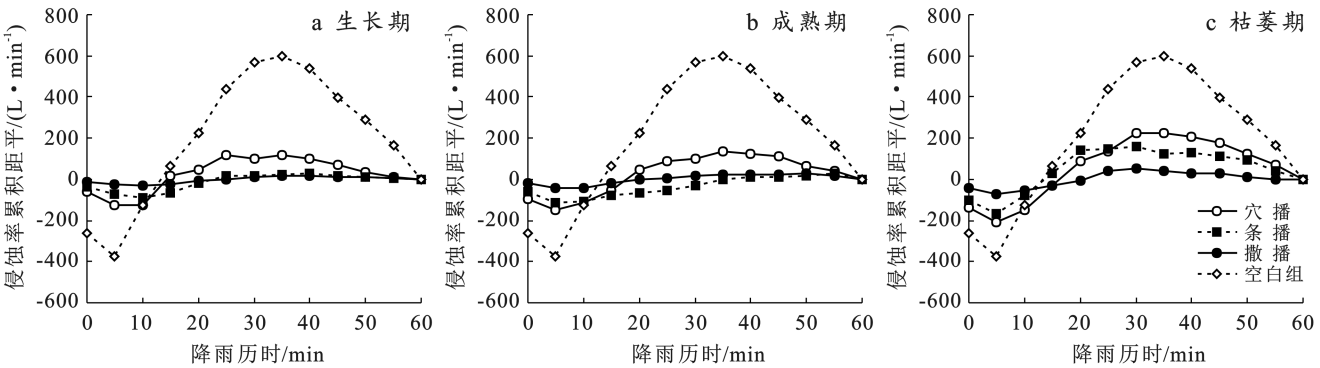

图 7　不同建植方式在植被恢复期的坡面侵蚀率累积距平曲线

Fig.7　The cumulative distance curve of slope erosion rate with different planting patterns during vegetation restoration period

3.3　不同建植方式在各植被恢复阶段的减流减沙效应

以往的研究认为植被种植方式是影响坡面侵蚀重要影响因素[25-28],但对于不同建植方式减流减沙效益的定量讨论较少,因此,有必要通过人工降雨试验,以定量的视角分析产流、产沙与植被建植方式的关系。本研究依据以上试验结果,对不同建植方式的减流减沙效益进行了定量分析(见表 6)。①总体上,不同建植方式均起到一定的减流减沙效应,减流率最低为穴播枯萎期 1.9%,最高为撒播生长期 49.6%;减沙率最低为穴播枯萎期 47.2%,最高为撒播生长期 95.5%,减流减沙效应同步;②从减流减沙效益程度而言撒播>条播>穴播,其中穴播的平均减流减沙效益分别为 12.68%和 62.49%,条播的平均减流减沙效益分别为 15.96%和 74.58%,撒播的平均减流减沙效益分别为 25.71%和 90.46%;③从植物恢复阶段来看,生长期的平均减流效益(38.21%)明显大于成熟期(10.82%)和枯萎期(5.31%),减沙效应亦体现出生长期(85.75%)>成熟期(77.45%)>枯萎期(64.32%)的规律。④对比减流减沙效益,可以明显看出,采用植被恢复措施(穴播、条播、撒播)更大的作用在于减少土壤侵蚀,采用植被恢复措施后的平均减流效益为 18.12%,而平均减沙效益则可以达到 75.84%,与相关研究结果一致[29-30]。不同建植方式下植被不同恢复阶段减流减沙效应的线性拟合关系有待进一步研究。

4　结 论

选取皖西大别山区生产建设项目弃土,经可调坡度钢槽车装填、沉降,不同建植方式(撒播、条播、穴播)混播种植黑麦草和狗牙根,通过人工模拟降雨试验,获得不同建植方式、植被恢复阶段(生长期、成熟期、枯萎期)的弃土坡面产流产沙特征,并利用累积距平等方法分析其规律和差异。不同类型植被建植方式均有效延长坡面初始产流时间,撒播建植方式明显优于条播和穴播,生长期优于成熟期和枯萎期。

3 种建植方式产流趋势均表现为降雨初期快速增加,后期逐渐趋于稳定,径流率变异点均集中发生在大约第 10—15 min。累积产流量呈现出撒播<条

播<穴播<空白组的规律曲线，生长期累积产流量明显小于成熟期和枯萎期。

坡面产沙过程与产流过程具有一定的相关性，但过程存在差异性。产沙过程表现为快速增加后缓慢下降，后期趋于相对稳定，产沙过程存在两处侵蚀率变异点，分别在第5—10 min和第35—40 min。

表6 各植被恢复阶段不同建植方式的减流减沙效益

Table 6 Benefit of runoff and sediment reduction by different planting methods in different vegetation restoration stages

播种方式	生长阶段	累积产流量/L	减流效益/%	累积产沙量/g	减沙效益/%	平均减流效益/%	平均减沙效益%
穴播	生长期	189.9	28.5	4 075.7	76.0	12.68	62.49
	成熟期	245.1	7.7	6 051.6	64.3		
	枯萎期	260.6	1.9	8 948.7	47.2		
条播	生长期	168.4	36.6	2 401.1	85.8	15.96	74.58
	成熟期	247.3	6.9	4 025.4	76.3		
	枯萎期	253.8	4.4	6 500.7	61.7		
撒播	生长期	133.9	49.6	769.1	95.5	25.71	90.46
	成熟期	218.0	17.9	1 389.2	91.8		
	枯萎期	239.9	9.7	2 695.0	84.1		
空白对照		265.5	0	16 951.8	0	0	0

相对空白对照组，不同建植方式在不同生长时期均表现出一定的减流减沙效益，减流效应弱于减沙效应。减流率最高为撒播生长期49.6%，减沙率最高为撒播生长期95.5%。建植方式减流减沙效益表现为撒播优于条播，穴播最差；生长期减流减沙效益优于成熟期，枯萎期最差。

[参考文献]

[1] 李叶鑫.生产建设项目工程堆积体边坡稳定性分析[D].重庆：西南大学，2015.
Li Yexin. Slope stability analysis of construction project accumulation body [D]. Chongqing: Southwest University, 2015.

[2] 曾红娟，孙宇，王莉.长江流域(片)部批生产建设项目水土保持监督检查发现问题分析[J].中国水土保持，2022(8)：49-51.
Zeng Hongjuan, Sun Yu, Wang Li. Water and soil conservation supervision and inspection of batch production and construction projects in the Yangtze River Basin [J]. Soil and Water Conservation in China, 2022(8):49-51.

[3] 林田苗，孙中峰.弃渣场水土保持合理性探讨[J].中国水土保持，2022(2)：47-52.
Lin Miaomiao, Sun Zhongfeng. Discussion on rationality of soil and water conservation in waste slag yard [J]. Soil and Water Conservation in China, 2022(2).47-52.

[4] 史志刚.皖西大别山区水土流失特征及其综合防治研究[J].水土保持研究，2012，19(5)：39-42.
Shi Zhigang. Study on characteristics and integrated control of soil and water loss in Dabie Mountains district of West Anhui [J] . Research of Soil and Water Conservation, 2012,19(5).39-42.

[5] 安徽省水利厅.2021年安徽省水土保持公报[R].合肥：安徽省水利厅，2022.
Water Resources Department of Anhui Province. Bulletin of Soil And Water Conservation in Anhui province, 2021 [R]. Hefei: Water Resources Department of Anhui Province, 2022.

[6] 汪邦稳，杨洁，汤崇军，等.南方红壤区百喜草及其枯落物对降雨径流分配的影响[J].水土保持学报，2009，23(2)：7-10+36.
Wang Bangwen, Yang Jie, Tang Chongjun, et al. Effects of Bahiagrass and its litter on rainfall and runoff distribution in red soil region of Southern China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009,23(2):7-10,36.

[7] 吴蕾.黄土高原植被水土保持作用的研究[D].杨凌：西北农林科技大学，2020.
Wu Lei. Study on the role of Some Random Place Somewhere vegetation in soil and water conservation [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2020.

[8] 王大为.定西市生产建设项目水土流失分析及弃渣场防治措施研究[D].兰州：甘肃农业大学，2016.
Wang Dawei. Analysis of soil erosion in Dingxi and study on control measures of waste residue field [D]. Lanzho: Gansu Agricultural University, 2016.

[9] 寇龙.山区高速公路建设对水土流失环境影响与防治研究[D].西安：西安理工大学，2019.
Kou Long. Study on environmental impact and prevention of soil and water loss caused by expressway construction in mountain area [D]. Xi'an: Xi'an University

of Technology, 2019.

[10] 仲亚婷.植被及土壤类型对坡面产流产沙特征的影响[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2017.
Zhong Yating. Effects of vegetation and soil types on runoff and sediment yield characteristics on slope [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2017.

[11] 孙佳美,侯沛轩,逄育波,等.植被覆盖坡面土壤侵蚀的水动力学机理[J].水土保持通报,2022,42(2):1-7.
Sun Jiamei, Hou Peixuan, Pang Yubo, et al. Hydrodynamic mechanism of soil erosion on vegetated slope [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(2):1-7.

[12] 朱永杰,王超,刘自强.降雨和植被覆盖对铁路路基边坡土壤侵蚀的影响[J].水土保持通报,2021,41(6):8-14.
Zhu Yongjie, Wang Chao, Liu Ziqiang. Effect of rainfall and vegetation cover on soil erosion of railway subgrade slope [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(6).8-14.

[13] Shen H O, Hu W, Wang D L, et al. A Field Quantification of Soil Erosion Processes at Chinese Black Soil Hillslopes under Successive Overland Flow Scour Events in Summer and Spring Seasons [J]. Eurasian Soil Science, 2022,55(12).

[14] 齐晓芳,张新全,凌瑶等.我国狗牙根种质资源研究进展[J].草业科学,2011,28(3):444-448.
QI Xiaofang, Zhang Xingquan, Ling Yao, et al. Research progress of the Cynodon dactylon germplasm in China [J]. Pratacultural Science, 2011,28(3).444-448.

[15] 钟荣华,贺秀斌,鲍玉海,等.狗牙根和牛鞭草的消浪减蚀作用[J].农业工程学报,2015,31(2):133-140.
Zhong Ronghua, He Xiubin, Bao Yuhai, et al. Wave-dissipating and erosion-reducing effects of bermudagrass and verbena [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015,31(2):133-140.

[16] 秦嘉惠,程谅,曹丹妮,等.两种草本植物根系对土壤可蚀性的影响[J].水土保持研究,2019,26(2):55-61.
Qin Jiahui, Cheng Liang, Cao Danni, et al. Effects of herbaceous plant roots on soil erodibility [J].Research of Soil and Water Conservation, 2019,26(2):55-61.

[17] 程谅,占海歌,郭忠录.3 种草本植物根系对土壤抗蚀特性的响应[J].草业科学,2019,36(2):284-294.
Cheng Liang, Zhan Haige, Guo Zhonglu. Responses of roots of three herbaceous plant to soil anti-erodibility [J]. Pratacultural sciences, 2019,36(2):284-294.

[18] 占海歌.3 种草本植物根系特征对土壤抗侵蚀性能影响[D].武汉:华中农业大学,2017.
Zhan Haige. Effects of root characteristics of three herbaceous plant on soil anti-erodibility [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017.

[19] 郑子成,林代杰,李廷轩,等.不同耕作措施下成熟期玉米对径流及侵蚀产沙的影响[J].水土保持学报,2012,26(2):24-28.
Zheng Zicheng, Lin Daijie, Li Tingxuan, et al . Effects of maize maturity on runoff and sediment yield under different tillage practices [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012,26(2):24-28.

[20] 盖浩,刘平奇,张梦璇,等.黑土坡耕地横坡垄作对减少径流及土壤有机碳流失的作用[J].水土保持学报,2022,36(2):300-304,311.
Gai Hao, Liu Pingqi, Zhang Mengxuan, et al. Effects of cross ridge cultivation on reducing runoff and soil organic carbon loss in black soil slope farmland [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(2):300-304,311.

[21] 王振龙,杜明成,姜翠玲,等.基于人工降雨试验的淮北地区产流产沙差异性研究[J].水科学进展,2019,30(04):507-514.
Wang Zhenlong, Du Mingcheng, Jiang Cuiling, et al. Study on difference of runoff and sediment yield in Huaibei region based on artificial rainfall experiment [J]. Advances in water science, 2019,30(4):507-514.

[22] Shi Peng, Li Peng, Li Zhanbin, et al. Effects of grass vegetation coverage and position on runoff and sediment yields on the slope of Loess Plateau, China [J]. Agricultural Water Management, 2022,259:107231.

[23] 沈子雅,程金花,赵溦,等.降雨条件下灌草配置方式对褐土坡面径流泥沙特征的影响[J].水土保持学报,2022,36(05):17-23.
Shen Ziya, Cheng Jinhua, Zhao Wei, et al. Effects of irrigation and grass arrangement on runoff and sediment characteristics on cinnamon slope under rainfall [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(5):17-23.

[24] 淡晨希,张琼,刘畅,等.生物结皮与草本植物共生坡面的产流—入渗过程特征[J].应用生态学报,2022,33(7):1853-1860.
Dan Chenxi, Zhang Qiong, Liu Chang, et al. Characteristics of runoff-infiltration process on a herbaceous plant slope [J]. Journal of Applied Ecology, 2022,33(7):1853-1860.

[25] 戴育全,肖理,刘文虎,等.西南山区土质边坡防护措施的减流减沙效益评估[J].中国水土保持科学,2023,21(1):73-82.
Dai Yuquan, Xiao Li, Liu Wenhu, et al. Benefit evaluation of soil slope protection measures for flow and sediment reduction in southwest mountain area [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2023,21(1).73-82.

[26] 焦若禺,宋孝玉,赵新凯,等.黄土沟壑区黑麦草植被冠层与根系坡面水沙效益及水力特性[J].干旱区地理,2022,45(1):208-218.
Jiao Ruoyu, Song Xiaoyu, Zhao Xinkai, et al. Water and sediment benefit and hydraulic characteristics of ryegrass vegetation in Loess Gully region [J]. Arid Land Geography, 2022,45(1):208-218.

[27] 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(03):56-61,68.
Wang Bao, Cheng Jinhua, Wang Wenkai, et al. Effect of two typical plant measures on sediment and flow reduction in northern Beijing brownsoil area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017,31(3):56-61,68.

[28] 昝玉亭,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):1-7,22.
Zan Yuting, Xi Tonghang, Wu Zhiling et al.Effects of different plant allocation patterns on the efficiency of flow and sediment reduction in artificial slope [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(3):1-7,22.

[29] 刘纪根,张昕川,李力,等.紫色土坡面植被覆盖度对水土流失影响研究[J].水土保持研究,2015,22(3):16-20,27.
Liu Jigen, Zhang Xinchuan, Li Li, et al. Study on the effect of vegetation coverage on soil erosion on purple slope [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015,22(3):16-20,27.

[30] Zhang Yifan, Zhao Qinghe, Cao Zihao, et al. Inhibiting Effects of Vegetation on the Characteristics of Runoff and Sediment Yield on Riparian Slope along the Lower Yellow River [J]. Sustainability, 2019,11(13).