

降雨与植被对大别山“林改园”区土壤侵蚀的影响

李高^{1,2}, 罗敏玄^{1,2}, 霍志涛^{1,2},
陈瑞^{1,2}, 彭毅^{1,2}, 吴鑫^{1,2}, 李振^{1,2}, 向奎^{1,2}
(1. 中国地质调查局长沙自然资源综合调查中心, 湖南 宁乡 410600;
2. 中国地质调查局 黄山水土资源野外科学观测研究站, 安徽 黄山 245000)

摘要: [目的] 探究大别山“林改园”区水土流失的影响机制, 为该地区生态环境治理提供科学支撑。[方法] 选取大别山区一处种植油茶的山坡作为研究对象, 自主设计原位降雨试验系统, 设置了小雨、中雨、大雨以及久旱后大雨等 4 种降雨工况, 并在 20%、40% 和 60% 这 3 种不同植被覆盖度条件下开展降雨试验, 分析土壤含水率、径流量和产沙量等关键要素的变化特征及其响应关系。[结果] 降雨强度是驱动大别山区“林改园”斜坡水土流失的主导因子。当次降雨量超 42 mm 且降雨强度达到 26 mm/h 时, 可突破植被侵蚀缓冲阈值, 削弱其保护作用; 研究区植被覆盖度对水土流失的影响可能存在边际效益。不同降雨条件下, 植被覆盖度从 20% 提升至 40% 时, 平均径流削减 31.33%, 平均产沙削减 70.50%, 植被覆盖度提升至 60% 时, 两者分别削减 38.80% 和 79.90%; 土壤初始含水率对水土流失总量具有显著影响。当次降雨量超 42 mm 且降雨强度达到 26 mm/h 时, 土壤初始含水率降低 5%~10%, 可使径流量和产沙量平均减少 23.86% 和 20.10%。[结论] 降雨强度决定了大别山区斜坡水土流失总量, 植被覆盖度与土壤初始含水率对研究区水土流失起着重要影响作用。

关键词: 土壤侵蚀; 降雨原位试验; 植被覆盖度; 土壤含水率; 大别山

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)01-0012-10

中图分类号: S157.1

文献参数: 李高, 罗敏玄, 霍志涛, 等. 降雨与植被对大别山“林改园”区土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持通报, 2026, 46(1):12-21. Li Gao, Luo Minxuan, Huo Zhitao, et al. Impacts of rainfall and vegetation on soil erosion in Dabie Mountains forest reform area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(1):12-21.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.01.007

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.01.007

Impacts of rainfall and vegetation on soil erosion in Dabie Mountains forest reform area

Li Gao^{1,2}, Luo Minxuan^{1,2}, Huo Zhitao^{1,2}, Chen Rui^{1,2}, Peng Yi^{1,2}, Wu Xin^{1,2}, Li Zhen^{1,2}, Xiang Kui^{1,2}

(1. Changsha General Survey of Natural Resources Center, China Geological Survey, Ningxiang, Hunan 410600, China; 2. Huangshan Observation and Research Station for Land-water Resources, Huangshan, Anhui 245000, China)

Abstract: [Objective] The mechanisms influencing soil erosion in the forest reform areas of the Dabie Mountains were investigated, in order to provide scientific support for ecological and environmental management in this region. [Methods] A slope planted with oil tea trees in the Dabie Mountains was selected as the research object. An in-situ rainfall testing system was independently designed with four rainfall scenarios were simulated as: light rain, moderate rain, heavy rain, and heavy rain following prolonged drought. And the rainfall tests were conducted under three vegetation coverage conditions (20%, 40%, and 60%) to analyze the variation characteristics and response relationships of key elements such as soil moisture content, runoff volume, and sediment yield. [Results] Rainfall intensity is the dominant factor affecting soil and water loss in the forest reform area of the Dabie Mountains. The vegetation erosion-buffering threshold is breached and its protective effect was weakened when single rainfall exceeds 42 mm and intensity reaches 26 mm/h. The impact of vegetation coverage

收稿日期: 2025-09-09

修回日期: 2025-09-19

采用日期: 2025-09-19

资助项目: 中国地质调查局项目“大别山区东段生态修复综合调查”(DD20242416); 中国地质调查局项目“东部平原湖区南部湖泊调查”(DD20230506)

第一作者: 李高(1996—), 男(汉族), 湖北省孝感市人, 硕士, 工程师, 主要从事水土保持机理方面的研究。Email: ligao20226@163.com。

通信作者: 霍志涛(1974—), 男(汉族), 甘肃省天水市人, 硕士, 正高级工程师, 主要从事地质灾害方面的研究。Email: zhuo@qq.com。

on soil erosion in the study area may exhibit diminishing marginal benefits. Under different rainfall conditions, increasing vegetation cover from 20% to 40% reduced average runoff by 31.33% and average sediment yield by 70.5%, and they decreased by 38.80% and 79.90%, respectively when vegetation cover reached 60%. The initial soil moisture content significantly influenced total soil erosion. When rainfall intensity exceeded 42 mm and reached 26 mm/h, 5%—10% reduction of initial soil moisture content resulted in average decreases of 23.86% and 20.10% in runoff and sediment yield, respectively. [Conclusion] Rainfall intensity determines the total soil and water erosion on slopes in the Dabie Mountains, while vegetation coverage and initial soil moisture content exert significant influence on soil erosion in the study area..

Keywords: soil erosion; in situ rainfall experiments; vegetation cover; soil moisture content; Dabie Mountains

水土流失是全球面临的重大生态环境问题,其不仅导致土壤肥力衰退,土地生产力下降,更制约区域社会经济的可持续发展,已成为生态保护领域的核心关注方向之一^[1]。2024年全国水土流失动态监测的结果显示^[2],中国当前水土流失总面积达 $2.60 \times 10^6 \text{ km}^2$,其中,中度及以上土壤侵蚀面积比例为34.26%,生态修复任务十分艰巨。这一问题在大别山集中连片区表现得尤为突出,该区域既是长江中下游重要的生态屏障,又长期面临“生态脆弱性”与“经济发展需求”的双重压力。为提升短期经济收益,区域内大量天然林地被改造为茶园、果园等经果林,而土地利用类型的转变直接导致植被覆盖结构改变、土壤团粒结构破坏、抗蚀性显著下降,极易引发水土流失^[3]。位于大别山西段的湖北省大悟县部分区域因“乱砍滥伐”“毁林开荒”,导致天然坡地植被覆盖锐减,花岗岩风化砂土在暴雨冲刷下大量流失,导致地貌破碎^[4]。河南省光山县西部,大面积荒山因缺乏有效植被覆盖,雨季水土流失模数高达 $2000 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,土壤表层养分流失严重^[5]。截至2024年底,大别山水土保持生态功能区水土流失总面积已达 6902 km^2 ^[6]。研究该区域水土流失的核心驱动机制,量化关键影响因子并提出针对性防控措施,已成为保障区域生态安全与经济协同发展的迫切需求。

已有研究表明,降雨、地形、土壤及植被是调控水土流失过程的四大核心要素^[7-8],其中降雨作为水土流失的直接驱动力,其强度、历时、频率及总量直接决定降雨入渗效率、地表径流形成速率与土壤侵蚀程度^[9]。国内外学者围绕降雨与土壤侵蚀关系开展了大量研究。Fenta等^[10]针对强降水引发的土壤侵蚀进行了分析,指出频繁的强降水会导致单次侵蚀事件的土壤侵蚀率显著增加。黄俊等^[11]基于200余场实测降雨事件的观测数据,构建了土壤侵蚀模数与次降雨量、降雨侵蚀力及径流量之间的定量关系模型,并通过统计分析证实土壤侵蚀模数与上述3个因子均存在显著的正相关关系。上述研究揭示了降雨

强度、历时、频次等要素对坡面产流产沙的调控机理。此外,水土流失的响应特征也受区域独特气候条件影响,这方面在大别山区表现尤为突出。大别山区作为典型的亚热带湿润季风气候,雨量充沛,雨热同期,常出现久旱后发生大雨现象,并伴随大规模水土流失现象^[12]。已有研究^[13]发现,干旱期间,土壤中的有机质和微生物活动减少,土壤初始含水率降低,久旱后的降雨会迅速改变土壤的物理性质,进而影响水土流失进程。目前学者们在大别山区对于此类典型的降雨类型引发的水土流失问题研究较少。植被覆盖作为抑制水土流失的关键因子,其冠层截留、凋落物持水及根系固土作用已被广泛证实^[14-15]。目前已有学者对大别山区油茶(*Camellia oleifera*)、板栗(*Castanea mollissima*)林等园地开展土壤侵蚀研究。江雯等^[16]基于安徽大别山区水土保持试验站3个径流小区多年的连续观测数据,探究了天然降雨对典型植被水土流失影响,认为降雨侵蚀力对乔木和灌木产流影响最大。杨伟等^[17]通过研究大别山区板栗林地水土流失特性,表明由于林分结构的复杂性,土壤侵蚀程度受多指标共同影响。以上研究基本厘清了不同经果林作物类型对水土流失的影响,但多数成果集中于作物类型差异对水土流失的影响,对同一作物类型下不同植被覆盖度梯度的量化研究存在不足。

综上所述,现有研究已初步阐明降雨与植被对水土流失的影响,但针对大别山林改园背景下,不同降雨类型与植被覆盖度的耦合作用对水土流失的影响仍缺乏深入探讨。基于此,本文自主设计一套降雨试验系统,依据研究区降雨资料,布设4种降雨试验工况开展降雨模拟试验,研究降雨与植被协同作用下的水土流失响应规律,以期为大别山区水土流失精准治理提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于大别山西段河南省信阳市境内的风

化花岗岩斜坡,地处皖鄂豫三省交界的大别山核心区域,东西绵延约 380 km、南北宽约 175 km,区域海拔 400~1 700 m,山地平均海拔约 1 500 m,研究区发育 15~40 cm 厚的粗骨性黄棕壤,砂粒比例 60%~70%,黏粒比例 10%~15%,有机质含量 10~15 g/kg,抗蚀性较弱。区域属北亚热带湿润季风气候,年平均气温 12.5℃,降水量 1 832.8 mm,其中 6—8 月降雨量占全年 60%~70%,且夏季常见久旱骤雨现象,相对湿度 79%,雨热同期且降雨变异性大。经现场调查发现,研究区原生植被以落叶阔叶与常绿针叶混交林为主,植被覆盖度约 70%~90%,受经济发展驱动,部分缓坡林地被改造为茶园,植被覆盖度约 20%~50%。



图 1 原位降雨试验现场

Fig.1 In situ rainfall experiment sites

监测系统由监测传感器和数据采集仪组成(如图 2 所示)。通过流量计算,并在样地下部放置雨量计实时量测雨量(图 2b),保证降雨量符合试验方案要求。在 3 个小区中部分别埋设 1 组 ECH2O-5 土壤含水率传感器,传感器埋设深度分别为 10、20 和 30 cm。利用 NLNS-10-01 水土流失监测系统监测径流及泥沙量(图 2c)。径流量监测原理是,利用水位测量传感器,基于电磁感应定律自动测量水位变化,再结合中心控制计算机软件及参数设置,计算出随时间变化的径流流量,从而得到径流流量的实时变化过程,流量计的测量流速范围为 0.2~19.0 m/s,测量误差为±3%。其泥沙含量监测原理是,采用光电测沙技术,依据浑水消光定律,通过多个红外光源对水流进行红外照射,根据光线在浑水中的衰减情况,连续精确测定水体中的悬移质泥沙含量。泥沙测量范围为 3~100 kg/m³,测量误差小于±5%。利用数据采集终端集成水土流失数据。

1.3 样地布设及试验方案

试验小区为天然样地,占地面积约 270 m²,将其划分为 3 个小区,依次编号 1[#]—3[#]。每小区长 18 m,宽 5 m,占地面积 90 m²,小区的平均坡度均为 15°。试验前于 2022 年 3 月种植油茶树,选用 2 a 生幼苗(撂荒 1 a 后树冠趋于稳定),树冠投影近似为圆形,经前

研究区天然林地年侵蚀模数约 200~300 t/(km²·a),因顺坡种植、频繁翻耕的茶园坡面细沟发育,年侵蚀模数增加至 1 500~2 000 t/(km²·a)^[17]。

1.2 原位降雨试验系统

为进行水土流失原位模拟试验,设计一套操作简便,便于运输,均匀性良好的人工降雨模拟系统。试验系统主要由本体(喷嘴、成雨管路系统)及支撑框架、计量装置(水表、雨量计等)、控制部分(加压泵、水压计、流量计及变频计等)等 4 部分组成,试验布设如图 1 所示。通过调节喷嘴使降雨近似呈雾状,满足《喷灌工程技术规范(GB/T 50085—2007)》^[18]提出的降雨均匀性要求。

期实测,单株高约 1 m,投影面积为 1.5 m²(直径约 1.38 m,后期定期修剪维持稳定)。

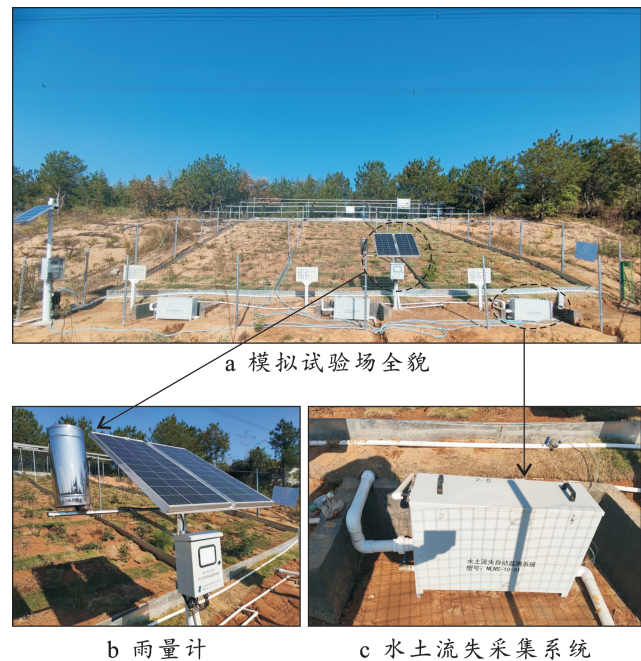


图 2 模拟降雨试验系统

Fig.2 Simulated rainfall experiment system

1[#]小区采用“3行×4株”行列式排布种植 12 株油茶树,2[#]小区采用“4行×6株”行列式排布种植 24 株

油茶树,3[#]小区采用“6行×6株”行列式排布种植36株油茶树,小区四周预留0.5 m保护带不种植油茶树,避免相邻小区植被干扰或边界微环境影响。经测量,各小区油茶树投影面积分别为18,36和54 m²。种植油茶树后撂荒19个月。该期间自然生长杂草,主要种类为狗尾草等,总覆盖度约10%~15%,因本研究主要突出油茶设计覆盖度作为核心变量,故将本次植被覆盖度定为20%,40%,60%。于2023年10月8日开展第1次降雨模拟试验。

大别山区降雨集中于夏季,水土流失主要由降雨造成。从已有降雨资料发现^[17],大别山区降雨较充沛,小雨、中雨、大雨均有出现,最大单日降水量的多年平均值约40 mm,且常有久旱后发生大雨现象。因此根据降雨资料,试验设计4种降雨工况。主要试

验工况如表1所示。需要说明的是,第4次降雨试验与第3次降雨试验雨强及历时相同,但第4次降雨试验前期对坡面进行干燥处理,干燥期间,通过搭建透明遮雨棚,以避免自然降雨干扰,使坡面在第四次降雨前经历17 d的干旱期,干燥预处理期间记录气温、风速气象数据。平均气温约为19.5℃,平均风速约为2.6 m/s,累计太阳辐射根据晴天天数估算约为285 MJ/m²,监测数据与研究区久旱期气象特征基本一致^[17]。较工况3相比,工况4土壤初始含水率整体低约5%~10%。每次试验结束后,平整试验地表土壤,试验周期内,未进行降雨试验时,用遮雨棚覆盖整个试验场地,避免天然降雨干扰试验,待试验土壤含水率符合试验标准后,开展下一次降雨试验。降雨等级参考气象学《降水量等级(GB/T 28592—2012)》标准。

表1 原位降雨试验工况

Table 1 In-situ rainfall experiment conditions

| 模拟工况 | 降雨量/ mm | 降雨 历时/min | 降雨强度/ (mm·h ⁻¹) | 气温/ 平均气温/℃ | 风速/平均 风速/(m·s ⁻¹) | 太阳辐射/累计太阳 辐射/(MJ·m ⁻²) | 试验日期 |
|------|------------|--------------|--------------------------------|---------------|----------------------------------|---------------------------------------|----------|
| 小雨 | 8.3 | 100 | 5.0 | 17 | 0.8 | 12.42 | 20231008 |
| 中雨 | 21.3 | 100 | 12.8 | 17 | 0.8 | 12.42 | 20231012 |
| 大雨1 | 42.7 | 100 | 25.6 | 18.5 | 1.6 | 12.42 | 20231017 |
| 大雨2 | 42.7 | 100 | 25.6 | 19.5(平均) | 2.6(平均) | 285(累计) | 20231104 |

2 结果与分析

2.1 土壤含水率对降雨的响应

如图3所示,小雨及中雨条件下,1[#]小区各深度土壤含水率分别稳定在17%~25%左右。在大雨条件下,其增加20%~40%。小雨及中雨条件下,2[#]小区各深度土壤含水率稳定在20%~34%左右,大雨条件下,增加至25%~36%左右。小雨及中雨条件下,3[#]小区各深度土壤含水率稳定在26%~34%左右,大雨条件下,稳定至26%~35%。以上结果表明,植被覆盖度是调控土壤含水率的关键因子。在小雨与中雨条件下,较高的植被覆盖度可使土壤维持更高的含水率,体现出更强的基础保水效能。而随着植被覆盖度的增加,土壤含水率在大雨条件下的增幅呈逐渐减小趋势。这一现象表明,植被覆盖能有效缓冲强降雨对土壤水分系统的剧烈扰动,对维持土壤结构稳定性、降低水土流失强度具有显著调控作用。

2.2 坡面径流对降雨的响应结果

如图4所示,不同降雨条件下,各小区的累积径流量呈现显著梯度差异。①小雨条件下,1[#],2[#],3[#]小

区的径流累积量分别约为0.30,0.09和0.06 m³,小区2[#]较1[#]降低70%,小区3[#]较1[#]降低80%;②中雨条件下,1[#]累积量达0.57 m³,2[#]为0.45 m³,3[#]为0.40 m³,小区2[#]较1[#]降低21.05%,小区3[#]较1[#]降低29.82%;③第一次大雨时,1[#]累积量达1.19 m³,2[#]为1.03 m³,3[#]为0.96 m³,2[#]较1[#]降低13.45%,3[#]较1[#]降低19.33%;④第2次大雨时,1[#]累积量达0.96 m³,2[#]为0.76 m³,3[#]为0.71 m³,2[#]较1[#]降低20.83%,3[#]较1[#]降低26.04%。

同一植被条件下,累积径流量随降雨等级的增加而增加。1[#]小区中雨较小雨累积径流量增长90%,第1次大雨较小雨累积径流量增长296.67%,第2次大雨较小雨累积径流量增长220%。2[#]小区中雨较小雨累积径流量增长400%,第1次大雨较小雨累积径流量增长1 044.44%,第2次大雨较小雨累积径流量增长744.44%。3[#]小区中雨较小雨累积径流量增长566.67%,第1次大雨较小雨累积径流量增长1 500%,第2次大雨较小雨累积径流量增长1 083.33%。第2次大雨与第1次大雨试验相比,1[#]小区累积径流量降低0.23 m³,降幅19.33%。2[#]小区累积径流量降低0.27 m³,降幅26.21%。3[#]小区累积径流量降低0.25 m³,降幅26.04%。以上试验结果表

明,在相同降雨条件下,随着植被覆盖度从20%逐步提升至60%,土壤累积径流量呈持续减少趋势,且径流削减率呈逐步增大趋势。但需注意的是,当植被覆盖度从40%提升至60%时,两者对应的径流削减率差值较小。随降雨强度增加,不同植被覆盖度小

区的累积径流量差异显著缩小。降雨增大至大雨级别后,各小区的累积径流量显著增加。第2次大雨与第1次大雨试验相比,各对应小区的累积径流量均有不同程度减小,平均累积径流量降低0.25 m³,平均降幅23.86%。

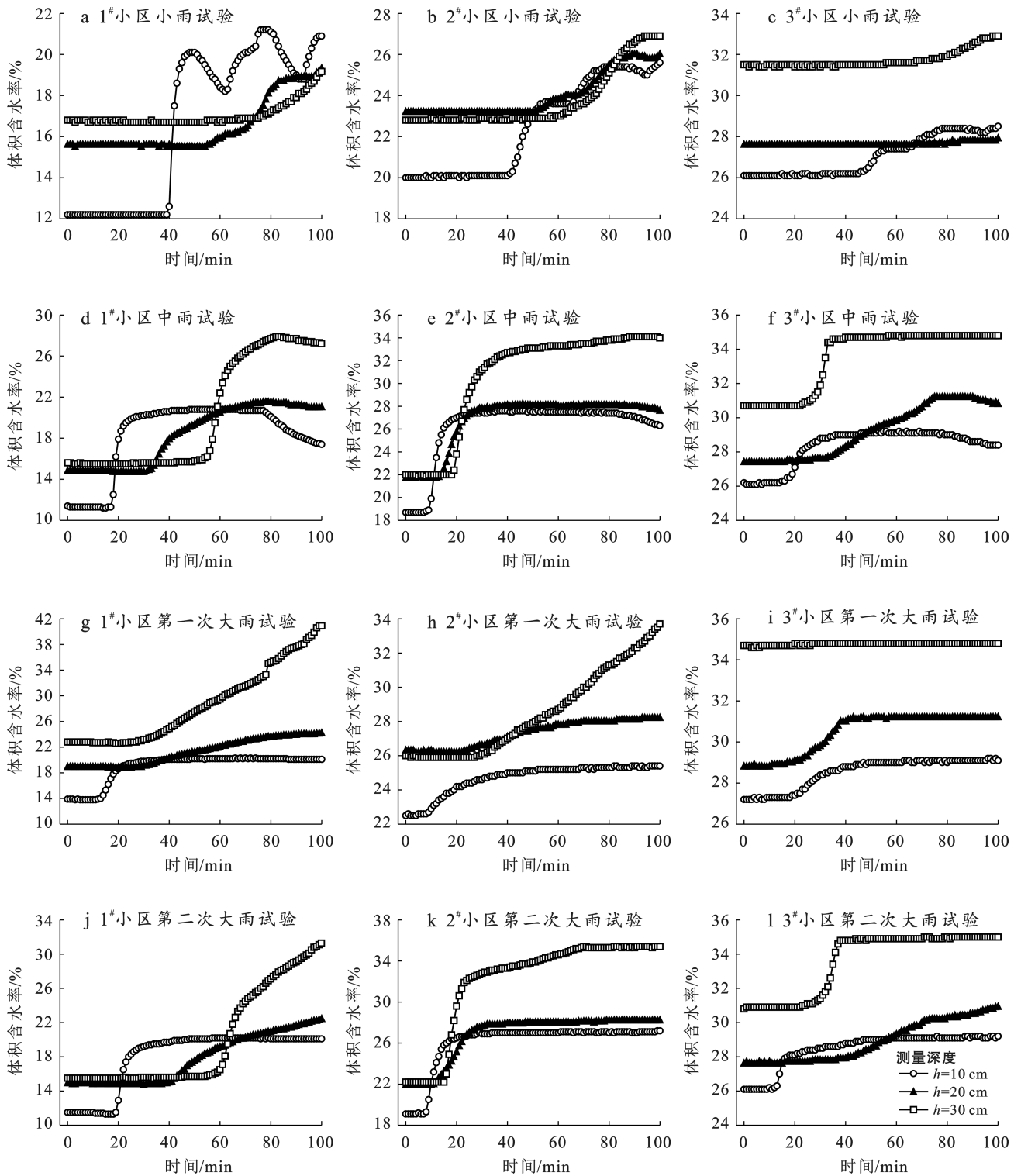
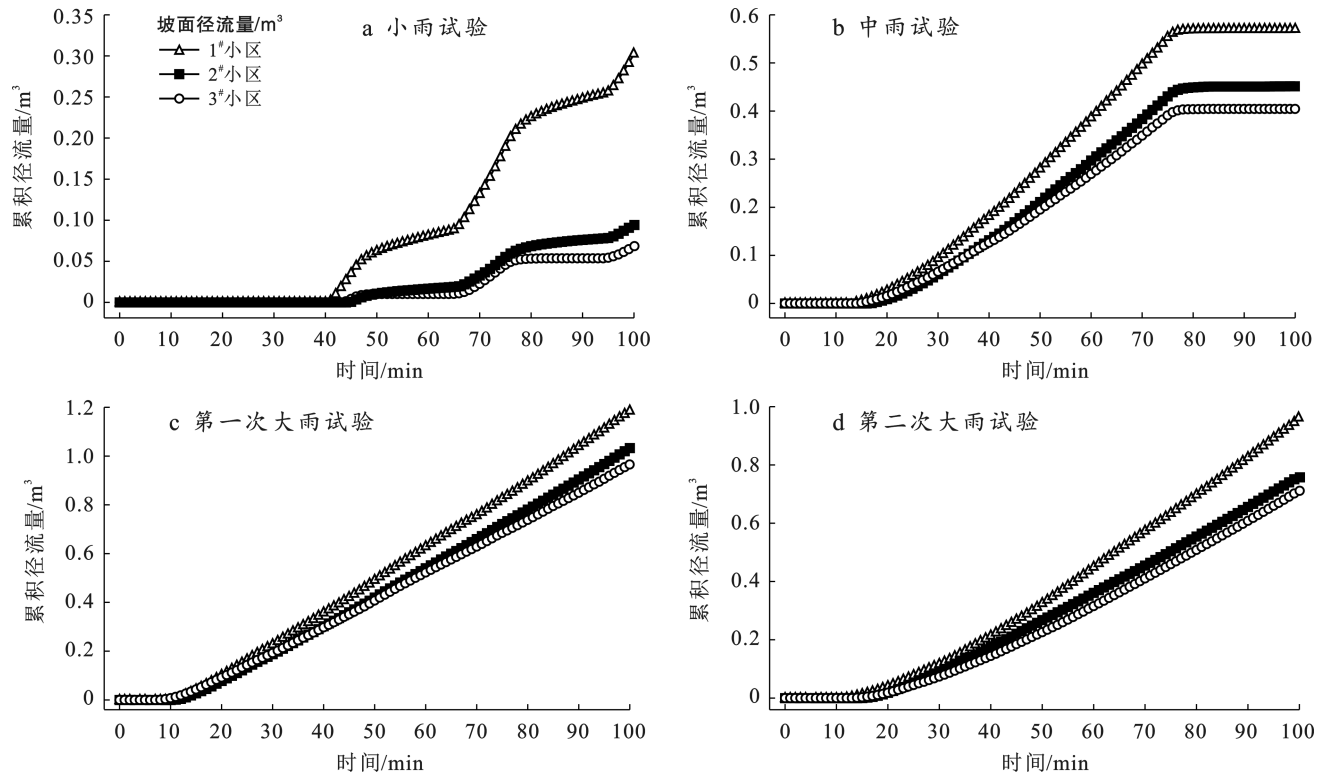


图3 土壤含水率对不同强度降雨的响应

Fig.3 Response of soil water content to rainfalls with different intensity

图4 1[#]—3[#]小区坡面径流量随时间变化Fig.4 Variation of runoff volume within 1[#]—3[#] plots on slopes with time

2.3 坡面产沙量对降雨的响应结果

从图5可以看出,不同降雨条件下,各小区坡面的累积产沙量呈现显著梯度差异。小雨条件下,1[#], 2[#], 3[#]小区的坡面产沙累积量分别约为0.27, 0.09和0.06 kg, 小区2[#]较1[#]降低66.7%, 3[#]较1[#]降低77.8%; 中雨时, 1[#]累积量达0.52 kg, 2[#]为0.15 kg, 小区3[#]为0.11 kg, 小区2[#]较1[#]降低71.2%, 小区3[#]较1[#]降低78.8%; 第1次大雨, 1[#]累积量达1.21 kg, 2[#]为0.33 kg, 3[#]为0.21 kg, 2[#]较1[#]降低72.7%, 3[#]较1[#]降低82.6%; 第2次大雨, 1[#]累积量达0.91 kg, 2[#]为0.26 kg, 3[#]为0.18 kg, 2[#]较1[#]降低71.4%, 3[#]较1[#]降低80.2%。同一植被条件下, 累积产沙量随降雨等级的增加而增加。1[#]小区中雨较小雨累积产沙量增长92.6%。第1次大雨较小雨累积产沙量增长348.2%, 第2次大雨较小雨累积产沙量增长237.0%。2[#]小区中雨较小雨累积产沙量增长66.7%。第1次大雨较小雨累积产沙量增长266.7%, 第2次大雨较小雨累积产沙量增长188.9%。3[#]小区中雨较小雨累积产沙量增长83.3%。第1次大雨较小雨累积产沙量增长250.0%, 第2次大雨较小雨累积产沙量增长200.0%。第2次大雨与第1次大雨试验相比, 1[#]小区累积产沙量降低0.30 kg, 降幅24.8%。2[#]小区累积径流量降低0.07 kg, 降幅21.2%。3[#]小区累积径流量降低0.03 kg, 降幅14.3%。本部分试验结果与前文关于径流的研

究结果具有一致性。在相同降雨条件下, 随着植被覆盖度从20%逐步提升至60%, 土壤累积产沙量呈持续减少趋势, 且产沙削减率呈逐步增大趋势, 但当植被覆盖度从40%提升至60%时, 两者对应的产沙削减率差值较小。随降雨强度增加, 不同植被覆盖度小区的累积产沙量差异显著缩小。降雨增大至大雨级别后, 各小区的累积产沙量显著增加。第2次大雨与第1次大雨试验相比, 各对应小区的累积产沙量均有不同程度减小, 平均累积产沙量降低0.13 kg, 平均降幅20.1%。

根据坡面径流、产沙对降雨的响应规律可以看出, 不同降雨条件下, 各小区的累积径流量与累积产沙量的变化趋势高度一致, 均表现出显著的梯度差异。在相同降雨条件下, 随着植被覆盖度从20%提升至40%再到60%, 累积径流量与产沙量均显著减少。植被覆盖度从20%提升至40%所产生的削减效益最为显著。植被覆盖度从40%提升至60%时, 其增量效益减小。累积径流与产沙量均随降雨强度的增加而急剧增加。随着降雨强度增大, 不同覆盖度小区的累积径流与产沙量间的绝对量差值趋于稳定, 但其相对削减率差异缩小。与第一次大雨相比, 第二次大雨各小区的径流和产沙量均降低, 表明土壤初始含水率是影响水土流失的重要因子。在所有降雨条件下, 相同植被覆盖度变化带来的产沙削减

率均高于径流削减率,表明植被对固土的效应优于对减流的效应。基于以上试验结果看出,随着植被覆盖度从 20% 提升至 40%~60%,累积径流与产沙量均逐渐减少,且产沙削减百分比逐步增大,但覆盖度 40% 与 60% 的植被对产沙削减率的差距较小。为检验不同植被覆盖度间径流与产沙削减率的差异是否显著,本研究采用单因素方差分析(one-way ANOVA)进行统计检验。显著性水平设定为 $\alpha=0.05$ 。若 ANOVA 结果显著,则进一步采用 Tukey HSD 法进行事后多重比较,以评估特定植被覆盖度梯度间的差异显著性。数据结果以均值 $\pm 95\%$ 置信区间(Mean $\pm 95\%$ CI)表示。

表 2 统计检验结果表明,不同植被覆盖度下的径

流削减率存在显著差异,Tukey HSD 检验显示,植被覆盖度从 40% 提升至 60% 时,径流削减率的增幅未达到统计显著性水平($p=0.105 > 0.05$),产沙削减率的变化呈现出类似统计特征($p=0.088 > 0.05$)。整体上,植被覆盖度从 20% 提升至 40% 时,其水土保持效益显著,平均径流削减率增加 31.33%,平均产沙削减率增加 70.5%。当植被覆盖度从 40% 继续提升至 60% 时,平均径流与产沙削减率的增幅较小,分别为 7.47% 和 9.40%,且统计不显著。这表明植被覆盖度对水土保持的“增量效益”随植被覆盖度升高而弱化,即研究区存在临界阈值现象。后续研究将进一步讨论关于植被覆盖度的边际效益与临界阈值特征。

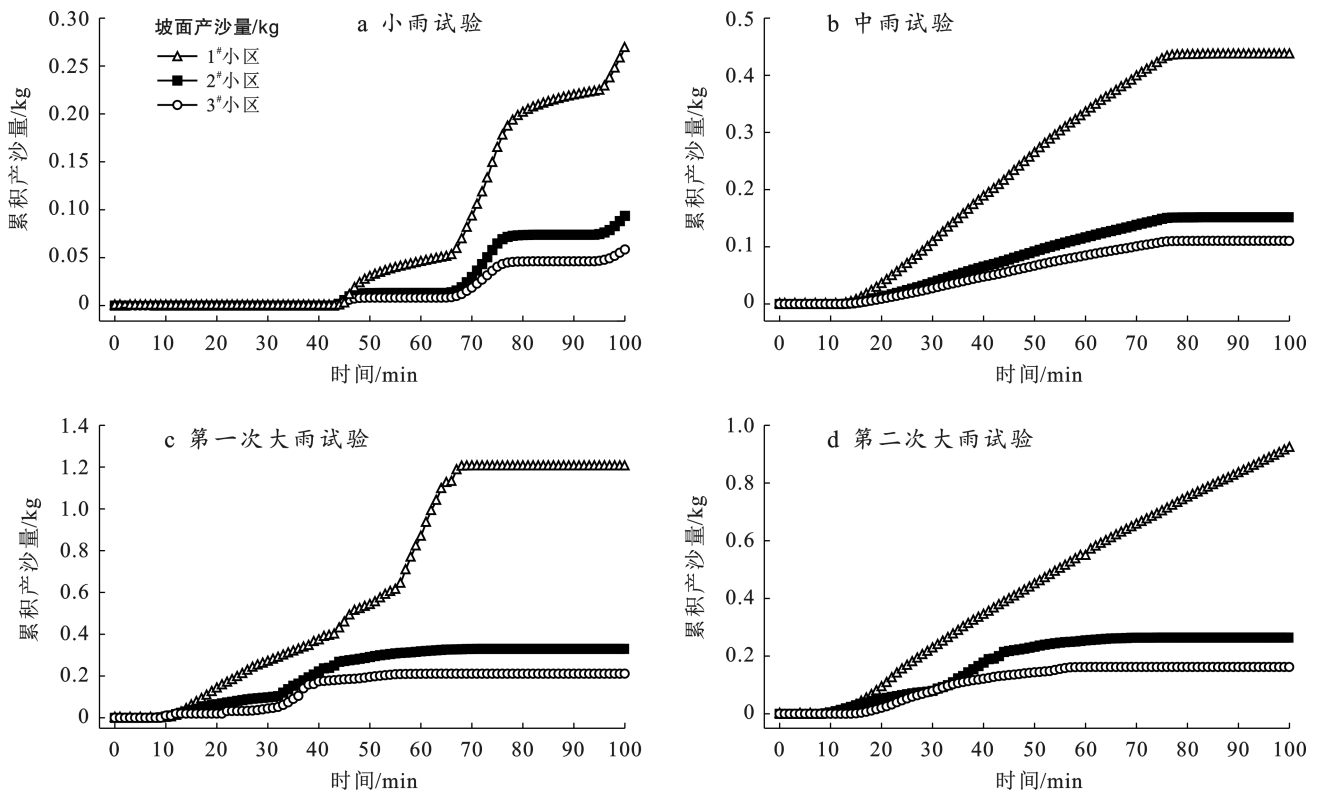


图 5 1#—3# 小区坡面产沙量随时间变化

Fig.5 Variation of sand production at 1#—3# plots on slopes with time

表 2 不同植被覆盖度梯度间径流与产沙削减效益差异

Table 2 Differences in runoff and sediment yield reduction benefits among different vegetation coverage gradients

| 梯度对比 | 指标 | 平均增幅/% | 95% 置信区间 | p 值 (Tukey SD) |
|---------|-------|--------|--------------|----------------|
| 20%~40% | 径流削减率 | 31.33 | [28.1, 34.6] | <0.001 |
| 40%~60% | 径流削减率 | 7.47 | [-1.2, 16.1] | 0.105 |
| 20%~40% | 产沙削减率 | 70.50 | [65.3, 75.7] | <0.001 |
| 40%~60% | 产沙削减率 | 9.40 | [-0.8, 19.6] | 0.088 |

3 讨论

3.1 不同降雨类型下坡面径流与产沙的协同变化特征及驱动机制

从前文结果可以看出,不同降雨类型下,坡面累积径流量与累积产沙量呈现高度协同变化特征。二者随降雨强度从小雨到大雨呈阶梯式递增,其中大雨阶段的增幅远高于中小雨。以 3# 小区为例,其大雨条件下的径流与产沙量较小雨时剧增。在第二次大

雨试验中,因土壤初始含水率降低,二者同步减少。不同降雨类型下坡面径流与产沙的协同变化源于“降雨动力—植被调控—土壤状态”的耦合作用。降雨强度通过改变雨滴动能与水流剪切力主导“动力—输移”驱动,大雨时土壤入渗率骤降、水流剪切力显著提升,最终促使径流与产沙量激增。植被依托冠层拦截降雨、枯落物滞缓径流及根系固持土壤实现“拦截—固土”双重调控,且对产沙的调控效果更为突出。这是因为植被对泥沙的“物理过滤”更直接。植被的枯落物层不仅能延缓径流流速,更能直接截留径流中携带的泥沙颗粒^[19]。其次,根系对土壤结构的加固作用针对性更强。植被根系深入土壤表层,与土壤颗粒紧密缠绕,显著提升土壤的抗剪强度和团聚体稳定性。即使坡面径流形成后对地表产生冲刷力,被根系加固的土壤也相对难以被剥离、分散成泥沙。而植被对径流的调控更多依赖冠层拦截降雨、枯落物滞水,若降雨强度超过拦截能力,仍会有大量雨水转化为径流,相比之下,根系对土壤的加固作用受降雨强度影响更小,对产沙的抑制更稳定^[20]。

3.2 降雨强度对水土流失的核心驱动作用

在小雨和中雨条件下,植被覆盖度差异对水土流失的调控效应十分显著,3[#]小区较1[#]小区的累积径流量分别降低80%和29.82%,产沙量分别降低77.8%和78.8%,表明植被能有效抑制径流形成和土壤侵蚀。然而,当降雨强度进一步增大至大雨时,即当次降雨量超42 mm且降雨强度达到26 mm/h时,这种调控效应明显衰减,3[#]小区较1[#]小区的径流量差异缩小至19.33%,产沙量差异虽仍维持在82.6%,但高植被覆盖度小区的径流和产沙总量已呈指数增长。说明高强度降雨可能已突破植被的缓冲阈值,使其保护作用被显著削弱^[21]。产生以上现象一方面是由于冠层截留达到饱和与动能缓冲功能失效。依据冠层截留动力学原理,植被冠层最大截留容量和降雨再分配过程存在物理上限。当降雨强度超过冠层截留速率与蒸散发速率之和时,冠层会迅速达到饱和状态^[22]。本研究中26 mm/h的高强度降雨已远超当地主要植被类型的冠层饱和阈值^[23],导致大部分降雨直接穿透冠层,无法被有效截留。同时,雨滴终端速度随雨滴增大而增加,其动能呈指数增长^[24]。饱和冠层对大雨滴的拦截和动能消散作用急剧减弱,大量高动能雨滴直接击溅地表,是导致土壤结构破坏和侵蚀启动的关键原因。另一方面是根系固土作用与径流剪切力的失衡。植被根系通过机械固结和生物化学作用增强土壤抗剪强度。然而,地表径流产生的剪切力随径流深度和流速的增加而线性增

加。在高强度降雨下,快速形成的超渗产流使剪切力急剧增大。当剪切力超过由根系增强的土壤临界抗剪强度时,土壤颗粒和团聚体被剥离,根系固土网络发生局部失效^[25]。此时,即使植被覆盖度较高,其固土能力也难以抵抗强大的水动力冲刷。以上研究表明,降雨强度的剧增可直接改变水土流失的驱动机制。进一步还可从两次大雨试验可看出,3[#]小区的单位时间径流量峰值较中雨提升近2倍,其冲刷能力足以剥离表层土壤并携带大量泥沙迁移,此时即使是60%的植被覆盖度,也无法完全抵消强降雨的直接驱动作用。这进一步印证了降雨作为核心驱动因子,其强度变化不仅直接决定水土流失的规模,还通过调控植被作用的有效阈值,间接影响侵蚀过程的发展方向。

3.3 植被覆盖度的边际效益与临界阈值特征

研究区植被覆盖度对水土流失的影响可能存在边际效益。当植被覆盖度从20%提升至40%时,径流与产沙的削减均出现跃升,如小雨条件下径流削减70%,产沙削减66.7%。而植被覆盖度从40%提升至60%时,削减率增幅大幅放缓,径流仅削减33%,产沙削减33.3%,其他降雨条件下也呈现类似特征。结合前文统计检验结果可看出,研究区植被覆盖度对水土保持的“增量效益”随植被覆盖度升高而弱化,这一临界阈值现象与黄土高原生态水文研究结论高度吻合^[26]。张颂扬等^[27]通过长期观测证实40%植被覆盖度是冠层截留效率与根系网络发育的协同拐点,也符合Mello^[28]提出的“临界覆盖度理论”,即当植被覆盖超过30%~40%时,地表径流路径被有效分割,显著降低土壤侵蚀动能。本研究因受场地限制,试验仅设置3个植被覆盖度梯度,可能遗漏更精细的阈值区间(如30%~50%),未来研究可增加植被覆盖度梯度(如10%,30%和50%),为区域水土流失防治中的植被配置提供更精准的理论支撑。需指出的是,本研究提出的临界阈值建议是基于油茶的试验结果,尚未充分考虑不同作物类型或管理措施的交互影响。不同植被类型,如乔木、灌木、草本及其相应管理方式,如间作、修剪、施肥等可能显著改变冠层结构、根系分布及地表粗糙度,进而影响临界植被覆盖度的具体数值。因此,将油茶试验结果直接外推至其他“林改园”系统时应保持谨慎,后续研究将引入多植被类型与多管理情境的对比试验,系统分析作物特异性及人为措施对临界阈值的影响,以增强结论的适用性与推广性。

3.4 土壤初始含水率对水土流失总量的调控作用

从两次大雨试验可知,第2次大雨较第1次大雨

的土壤初始含水率整体降低5%~10%,与之对应,各小区的累积径流量和产沙量均呈现不同程度的减少,整体而言,初始含水率的降低使各小区平均径流量减少0.25 m³,平均降幅23.86%,平均产沙量减少0.16 kg,平均降幅24.14%。充分表明土壤初始含水率的改变可直接驱动水土流失总量发生改变。这是由于土壤初始含水率对水土流失的影响机制主要通过调控土壤入渗能力实现,较低的初始含水率意味着土壤孔隙未被水分充分填充,入渗空间更大,降雨过程中更多水分可通过土壤孔隙下渗而非形成地表径流,从而减少径流对地表的冲刷动力^[29]。

4 结论

(1) 降雨强度是驱动大别山林改园区水土流失的核心因子。其强度变化直接决定水土流失规模,当次降雨量超42 mm且降雨强度达到26 mm/h时,降雨可突破研究区的植被缓冲阈值,削弱植被保护作用。

(2) 植被覆盖是抑制坡面径流与土壤侵蚀的关键因素。不同降雨条件下,植被覆盖度从20%提升至40%时,平均径流削减31.33%,平均产沙削减70.5%。植被覆盖度提升至60%时,平均径流削减38.80%,平均产沙削减79.90%,即研究区植被覆盖度对水土流失的影响可能存在边际效益,研究结果可为区域水土流失防治中的植被配置提供量化依据。

(3) 土壤初始含水率通过调控入渗能力显著影响水土流失总量。当次降雨量超42 mm且降雨强度达到26 mm/h时,研究区土壤初始含水率降低5%~10%,可使各小区平均径流量减少0.25 m³,平均降幅达23.86%,平均产沙量减少0.16 kg,平均降幅达20.10%,这一发现为大别山季节性干旱区水土流失防控提供了理论依据。

参考文献 (References)

- [1] Rashmi I, Ali S, Kumar K, et al. Mid-term effect of soil amendments on soil erosion, crop productivity and soil properties in fragile ecosystem of western India [J]. Soil Security, 2025, 19: 100185.
- [2] 姜春前,任引,张旭东,等.南方低山丘陵区山水林田湖草沙系统治理技术与示范[J].生态学报,2025,45(6): 2932-2937.
Jiang Chunqian, Ren Yin, Zhang Xudong, et al. Technology and demonstration of comprehensive management of mountains, rivers, forests, farmlands, lakes, grasslands and deserts in the hilly and low mountainous region of Southern China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(6): 2932-2937.
- [3] 孙雯杰,杨昕.水土流失分析的地形因子尺度效应:以安徽大别山区为例[J].中国水土保持,2023(7):50-55.
Sun Wenjie, Yang Xin. Scale effect of terrain factors in analysis on soil erosion [J]. Soil and Water Conservation in China, 2023(7): 50-55.
- [4] 乔强林,黄锦彦,罗敏玄,等.基于USLE模型的大别山区西段大悟县水土流失特征及影响因素分析[J].区域治理,2024(14):123-125.
Qiao Qianglin, Huang Jinyan, Luo Minxuan, et al. Analysis of soil erosion characteristics and influencing factors in Dawu County, western Dabie Mountain area based on USLE model [J]. Regional Governance, 2024(14): 123-125.
- [5] 王美娜,范顺祥,舒翰俊,等.河南省土壤侵蚀时空分异特征及土壤保持经济价值[J].生态环境学报,2024,33(5):730-744.
Wang Meina, Fan Shunxiang, Shu Hanjun, et al. Spatio-temporal variations in soil erosion and its economic value of soil conservation in Henan Province [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2024, 33(5): 730-744.
- [6] 黄昱楠,齐斐,袁利,等.大别山北麓林地与园地土壤侵蚀空间分异及驱动分析[J].中国水土保持科学,2025,23(1):51-61.
Huang Yunan, Qi Fei, Yuan Li, et al. Spatial differentiation and driving factors of soil erosion in woodland and garden in the northern Dabie Mountain [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2025, 23(1): 51-61.
- [7] 高歌,陈涛,徐沅鑫.1961—2023年中国降雨侵蚀力变化特征及未来趋势预估[J].农业工程学报,2025,41(4): 50-58.
Gao Ge, Chen Tao, Xu Yuanxin. Variation and trend of rainfall erosivity in China during 1961—2023 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(4): 50-58.
- [8] Akhila R, Pramada S K. Suitability of different Digital Elevation Models in the estimation of LS factor and soil loss [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2025, 197(5): 511.
- [9] Zhang Tao, Che Ailan. The validation and application of electrical measurement for evaluating soil internal erosion under rainfall condition [J]. Environmental Earth Sciences, 2024, 83(9): 276.
- [10] Fenta A A, Tsunekawa A, Haregeweyn N, et al. Improving satellite-based global rainfall erosivity estimates through merging with gauge data [J]. Journal of Hydrology, 2023, 620: 129555.
- [11] 黄俊,金平伟,姜学兵,等.南方红壤区植被覆盖因子估算模型构建与验证[J].农业工程学报,2020,36(17):

- 106-114.
- Huang Jun, Jin Pingwei, Jiang Xuebing, et al. Model construction and verification of vegetation cover and management factor in southern red soil region of China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(17):106-114.
- [12] 李泮营, 衣强, 顾治家, 等. 河南省降雨侵蚀力的时空变化特征分析[J]. 中国水土保持科学, 2024, 22(3):46-55.
- Li Panying, Yi Qiang, Gu Zhijia, et al. Spatio-temporal variation characteristics of rainfall erosivity in Henan Province [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2024, 22(3):46-55.
- [13] 王之君, 马彦杰, 刘兴荣, 等. 降雨冲刷条件下含水率变化对堆填黄土沟床侵蚀的影响[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2024, 22(5):31-40.
- Wang Zhijun, Ma Yanjie, Liu Xingrong, et al. Effect of water content variation on the gully bed erosion of loess landfill under rain scour conditions [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2024, 22(5):31-40.
- [14] 田培, 毛梦培, 潘成忠. 植被调控水土流失机制研究进展及展望[J]. 中国水土保持科学, 2024, 22(1):131-140.
- Tian Pei, Mao Mengpei, Pan Chengzhong. Research progress and prospect of vegetation control mechanism of soil and water loss [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2024, 22(1):131-140.
- [15] Wang Xiaopeng, Zhuo Zuopin, Zhou Man, et al. Response of the soil bacterial community to soil fertility during vegetation restoration in soil and water loss areas in south China [J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2024, 24(2):3687-3698.
- [16] 江雯, 胡玉乾, 汪军红, 等. 安徽大别山区天然降雨对典型植被水土流失影响研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2021, 57(2):265-273.
- Jiang Wen, Hu Yuqian, Wang Junhong, et al. Natural rainfall affects soil erosion of typical vegetation in Dabie Mountains, Anhui Province [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2021, 57(2):265-273.
- [17] 杨伟, 李璐, 欧阳曙光, 等. 大别山区板栗林地水土流失特性研究[J]. 水土保持通报, 2022, 42(2):259-263.
- Yang Wei, Li Lu, Ouyang Shuguang, et al. Characteristics of soil and water loss at castanea mollissima woodlands in Dabie Mountain area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(2):259-263.
- [18] 葛茂生, 魏福强, 吴普特, 等. 动态水压间歇脉冲灌溉洒水力性能研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(10):294-303.
- Ge Maosheng, Wei Fuqiang, Wu Pute, et al. Hydraulic performance of dynamic water pressure intermittent pulse sprinkler irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10):294-303.
- [19] 王丹丹, 许海超, 单志杰, 等. 黄土高原刺槐林地根系与枯落物对土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37(2):83-89.
- Wang Dandan, Xu Haichao, Shan Zhijie, et al. Effects of *Robinia pseudoacacia* litter cover and roots on soil erosion in the Loess Plateau, China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(2):83-89.
- [20] 甄子云, 赵洋, 姜群鸥, 等. 野外模拟降雨条件下高寒草甸区植被退化和人工植被恢复坡面的产流产沙过程[J]. 水土保持学报, 2024, 38(4):153-161.
- Zhen Ziyun, Zhao Yang, Jiang Qun'ou, et al. Field simulation of runoff and sand production on degraded and revegetated slopes in alpine meadows under rainfall conditions [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4):153-161.
- [21] Oudchaira S, Rhoujjati A, Hanich L, et al. Evaluating soil loss and sediment yield for sustainable management of the Hassan II dam within Morocco's upper Moulouya watershed using RUSLE model and GIS [J]. Environmental Earth Sciences, 2024, 83(7):210.
- [22] Zhao Jiongchang, Yu Yang, Hu Yawei, et al. Measurement and modeling of canopy interception loss of evergreen, deciduous and mixed forests in a subhumid watershed on the Loess Plateau, China [J]. Journal of Hydrology, 2025, 654:132820.
- [23] 阮云钊, 欧泽文, 罗敏玄, 等. 降雨等级与种植模式对大别山变质岩区坡面产流产沙的影响[J]. 水土保持通报, 2024, 44(5):68-74.
- Ruan Yunzhao, Ou Zewen, Luo Minxuan, et al. Impact of rainfall levels and planting patterns on runoff and sediment yield on slopes in metamorphic rock area in Dabie Mountains [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(5):68-74.
- [24] Jeong S, Nanko K, Katayama A, et al. Characteristics of throughfall kinetic energy in an unmanaged Japanese cypress plantation laden with dead branches [J]. Catena, 2024, 243:108181.
- [25] 程虎, 李蒙, 杨劭, 等. 水陆交错带护坡植物固土抗蚀能力比较分析[J]. 中国水土保持科学, 2024, 22(3):56-63.
- Cheng Hu, Li Meng, Yang Shao, et al. Comparative analysis of soil reinforcement and anti-erosion capacity of slope protection plants in land-water ecotone [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2024, 22(3):56-63.

- (2):203-212.
- Gao Pengfei, Zhang Jing, Fan Weifang, et al. Effects of drought stress on root characteristics structure and physiological characteristics of *Potentilla bifurca* var. *glabrata* [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(2): 203-212.
- [25] 孙佳慧,史海兰,陈科宇,等.植物细根功能性状的权衡关系研究进展[J].植物生态学报,2023,47(8):1055-1070.
- Sun Jiahui, Shi Hailan, Chen Keyu, et al. Research advances on trade-off relationships of plant fine root functional traits [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2023, 47(8): 1055-1070.
- [26] 侯扶江,杨中艺.放牧对草地的作用[J].生态学报,2006,26(1):244-264.
- Hou Fujiang, Yang Zhongyi. Effects of grazing of livestock on grassland [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(1): 244-264.
- [27] Qiao Jirong, Chen Xinli, Chang S X, et al. Grazing intensity changes root traits and resource utilization strategies of *Stipa breviflora* in a desert steppe [J]. Plant and Soil, 2024, 503(1): 475-488.
- [28] 杨春娇,陈玳汝,张大才.藏东南高寒草甸不同生境植物根系形态及分布特征[J].中国草地学报,2020,42(4):79-84.
- Yang Chunjiao, Chen Dairu, Zhang Dacai. Root morphology and distribution characteristics of plants in different habitats of alpine meadow in southeast Tibet [J]. Chinese Journal of Grassland, 2020, 42(4): 79-84.
- [29] 张翠梅,师尚礼,吴芳.干旱胁迫对不同抗旱性苜蓿品种根系生长及生理特性影响[J].中国农业科学,2018, 51(5):868-882.
- Zhang Cuimei, Shi Shangli, Wu Fang. Effects of drought stress on root and physiological responses of different drought-tolerant alfalfa varieties [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(5): 868-882.
- [30] Zaher A T, Boroomand N, Sadat-Hosseini M. Physiological and morphological response to drought stress in seedlings of ten citrus [J]. Trees, 2016, 30(3): 985-993.
- [31] 季杨,张新全,彭燕,等.干旱胁迫对鸭茅根、叶保护酶活性、渗透物质含量及膜质过氧化作用的影响[J].草业学报,2014,23(3):144-151.
- Ji Yang, Zhang Xinquan, Peng Yan, et al. Effects of drought stress on lipid peroxidation, osmotic adjustment and activities of protective enzymes in the roots and leaves of orchardgrass [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2014, 23(3): 144-151.
- [32] 夏钦,何丙辉,刘玉民,等.高温胁迫对粉带扦插苗形态和生理特征的影响[J].生态学报,2010,30(19):5217-5224.
- Xia Qin, He Binghui, Liu Yumin, et al. Effects of high temperature stress on the morphological and physiological characteristics in *Scaevola albida* cutting seedlings [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(19): 5217-5224.
- [33] 赵文武,赵鑫,谢文辉,等.干旱胁迫下白刺花幼苗根系生长和生理特性的响应[J].草地学报,2023,31(1): 120-129.
- Zhao Wenwu, Zhao Xin, Xie Wenhui, et al. Response of root growth and development and physiological characteristics of *Sophora davidii* under drought stress [J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(1): 120-129.

(上接第21页)

- [26] 张灿,徐涵秋,张好,等.南方红壤典型水土流失区植被覆盖度变化及其生态效应评估:以福建省长汀县为例[J].自然资源学报,2015,30(6):917-928.
- Zhang Can, Xu Hanqiu, Zhang Hao, et al. Fractional vegetation cover change and its ecological effect assessment in a typical reddish soil region of southeastern China: Changting County, Fujian Province [J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(6): 917-928.
- [27] 张颂扬,张巍,杨鹏辉,等.模拟降雨条件下重构阻水层对坡面风化煤矸石产流产沙的影响[J].水土保持通报,2024,44(2):101-109.
- Zhang Songyang, Zhang Wei, Yang Penghui, et al. Effect of reconstructed water-blocking layers on sediment production from weathered coal gangue on slopes under simulated rainfall conditions [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(2): 101-109.
- [28] de Mello C R, Guo Li, Yuan Chuan, et al. Deciphering global patterns of forest canopy rainfall interception (FCRI): A synthesis of geographical, forest species, and methodological influences [J]. Journal of Environmental Management, 2024, 358: 120879.
- [29] 张转敏,王彬,饶伟,等.初始含水率和降雨能量对黑土团聚体溅蚀特征的影响[J].水土保持学报,2024,38(2):68-75.
- Zhang Zhuanmin, Wang Bin, Rao Wei, et al. Impact of initial soil moisture and rainfall energy on splash erosion characteristics of black soil aggregate [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2): 68-75.