

# 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

阮云钊, 欧泽文, 罗敏玄, 杨涛, 周钊, 胡庚辛

(中国地质调查局长沙自然资源综合调查中心, 湖南长沙 410600)

**摘要:** [目的] 研究降雨等级、种植模式及其交互作用对变质岩地区坡面产流产沙的影响程度, 为大别山区水土保持、土地管理策略和植被配置提供参考。[方法] 在大别山区罗山县潘新镇开展了3种植植模式的径流小区土壤侵蚀监测试验(单种油茶、单种茶树和油茶/茶树间隔式混种), 采用水土流失监测仪、翻斗式自记雨量计等仪器设备, 实时跟踪监测了各径流小区2023年的产流产流及降雨情况, 利用方差分析和相关性分析等方法探究降雨因子和种植模式对产流产沙的影响。[结果] 不考虑降雨等级时, 单种茶树小区的产流量最高, 混种小区的产流量显著低于单种小区, 但各小区的产沙量无显著差异( $p > 0.05$ ); 小雨和中雨等级下, 各小区的产流量无显著差异, 混种小区的产沙量低于其他小区, 尤其在中雨等级下表现明显; 大雨和暴雨等级下, 混种小区的产流量显著低于单种小区( $p < 0.05$ ), 但各小区的产沙量无显著区别; 产流量、产沙量与总降雨量、每小时降雨量均存在显著关联, 且产流量还受最大60 min雨强的影响。[结论] 相比于单种油茶或茶树, 混种模式能显著降低大别山变质岩区的坡面产流量, 且中/小雨等级下的坡面产沙量也能得到有效抑制。未来大别山区水土保持、土地管理策略制定和植被配置时应予以重视。

**关键词:** 水土流失; 种植模式; 产流量; 产沙量; 大别山

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)05-0068-07

中图分类号: 157.1

**文献参数:** 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. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.05.008; 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.

## Impact of Rainfall Levels and Planting Patterns on Runoff and Sediment Yield on Slopes in Metamorphic Rock Area in Dabie Mountains

Ruan Yunzhao, Ou Zewen, Luo Minxuan, Yang Tao, Zhou Zhao, Hu Gengxin

(Changsha Natural Resources Comprehensive Survey

Center, China Geological Survey, Changsha, Hunan 410600, China)

**Abstract:** [Objective] The effects of rainfall levels, planting patterns and their interactions on slope sediment yield and loss in metamorphic rock areas were studied to provide references for soil and water conservation, land management strategies and vegetation allocation in Dabie Mountains area. [Methods] Experimental investigations on soil erosion in runoff plots with three distinct planting patterns (monoculture of *Camellia oleifera*, monoculture of *Camellia sinensis*, and mixed planting of *C. oleifera* and *C. sinensis* at intervals) were carried out in Panxin Town, Luoshan County, Dabie Mountains. Instruments such as soil erosion monitors and tipping bucket rain gauges were used to monitor real-time runoff and rainfall in the year 2023. Variance analysis and correlation analysis were conducted to investigate the impact of rainfall variables and planting configurations on runoff and sediment yield. [Results] The monoculture of *C. sinensis* plot exhibited the highest runoff, and the mixed planting plot demonstrated significantly lower runoff compared to the

收稿日期: 2024-05-14

修回日期: 2024-07-02

资助项目: 中国地质调查局长沙自然资源综合调查中心项目“大别山区东段生态修复综合调查”(DD20242416)

第一作者: 阮云钊(1996—), 男(汉族), 湖南省宁乡市人, 硕士, 助理工程师, 主要从事生态环境修复研究。Email: 107719966@qq.com。

通信作者: 欧泽文(1992—), 男(汉族), 湖南省宁乡市人, 本科, 助理工程师, 主要从事生态环境修复研究。Email: 815712398@qq.com。

monoculture plots, but no significant variance in sediment yield among the plots ( $p > 0.05$ ) without considering rainfall levels. Under light and moderate rainfall, there was no significant distinction in runoff among the plots; however, the sediment yield in the mixed planting plot was notably lower than that in the other plots, particularly under moderate rainfall conditions. During periods of intense and prolonged rainfall, the runoff in the mixed planting plot exhibited a statistically significant decrease compared to the monoculture plots ( $p < 0.05$ ). However, there was no significant variance in sediment yield among the plots. Both runoff and sediment yield showed a significant correlation with total rainfall and hourly rainfall, but runoff was additionally influenced by the maximum 60-minute rainfall intensity. [Conclusion] Compared to the monoculture practices of *C. oleifera* or *C. sinensis*, the mixed planting pattern demonstrated a notable decrease in runoff on slopes within the metamorphic rock regions of the Dabie Mountains. Furthermore, sediment yield under light to moderate rainfall conditions was effectively mitigated. Attention should be paid to soil and water conservation, land management strategy formulation, and vegetation allocation in Dabie Mountains area in the future.

**Keywords: soil and water loss; planting patterns; runoff volume; sediment yield; Dabie Mountains**

水土流失是导致土地退化、土壤肥力降低和农林产品产量降低的主要因素,一定程度上制约了中国(尤其山区)生态环境建设和经济发展。研究发现,水土流失是气候、土壤性质、地形和植被管理等多种因素共同作用的结果<sup>[1-3]</sup>。降雨是导致局部水土流失的关键因子,降雨击溅及产生的地表径流冲刷是引发水土流失的主要驱动力<sup>[4-5]</sup>。王忠禹等<sup>[6]</sup>定量揭示了不同类型降水对土壤径流泥沙的作用,发现侵蚀性降雨是影响中国黄土高原水土流失的重要因素之一。Montenegro等<sup>[7]</sup>分析了热带火山群岛降雨强度、持续时间等不同降雨模式对土壤水分流失的影响。汪海涛等<sup>[8]</sup>发现降雨强度的增加会直接导致边坡水土流失的加剧。然而,反映降雨强度的因子众多(如总降雨量,每小时降雨量,最大60 min雨强等),坡面水土流失是众多降雨因子共同作用的结果,或主要受某单一降雨因子的影响,目前尚不够明确。探究多类型降雨因子对产流产沙量的影响,对于更加精准预测坡面水土流失状况具有重要意义。

植被覆盖在减少地表径流与土壤流失过程中也具有显著作用<sup>[9-12]</sup>,如Zhang Guanhua等<sup>[13]</sup>利用通径分析方法对不同植被分布模式与径流产沙量的定量关系进行对比,发现植被覆盖能显著降低土壤产流产沙量;马少伟等<sup>[14]</sup>研究表明,乡土灌草群落覆盖能有效防止边坡的水土流失。探究不同植被种植模式对坡面产流产沙量的影响和差异,能有效指导特定地区的水土流失治理与植被配置。

大量研究表明水土流失、降雨和植被种植模式之间存在复杂的相互关系<sup>[15-17]</sup>,如何探究与利用其影响关系,是改善水土流失状况的重要挑战。降雨等级和种植模式直接影响坡面的产流产沙过程<sup>[18-19]</sup>。然而,不同种植模式在同一降雨等级下的产流产沙量是否

具有显著差异,或降雨等级与种植模式对坡面产流产沙的综合影响机制(尤其是大别山区的特定地理地质环境中),尚缺乏有效探索。因此,本研究基于河南省信阳市罗山县水土流失监测站2023年的径流小区监测数据,分析不同降雨等级及种植模式对产流产沙的影响机制,探究产流产沙的主要影响因子,以期为大别山区坡面水土流失治理提供参考。

## 1 研究区概况

大别山位于安徽省、湖北省、河南省交界处,西接桐柏山,东延为霍山(也称皖山)和张八岭,东西绵延约380 km,南北宽约175 km。海拔范围400~1700 m,山地平均海拔1500 m左右。地质构造主要由前震旦纪地层和侵入岩构成,以花岗岩、片麻岩等为主。属北亚热带温暖湿润季风气候区,年平均气温12.5℃,年平均降水量1832.8 mm,空气平均相对湿度79%,年日照时数平均1400~1600 h。

径流小区监测试验场位于大别山区罗山县潘新镇九龙村030县道东侧,地形地貌属于丘陵岗地,地势较平缓,地层为中元古代龟山岩组,岩性为白云石英片岩,受区域地质构造影响,岩石节理裂隙较为发育,整体较为破碎;土壤发育良好,土壤类型为黄棕壤,质地以壤土为主;水土流失等级以中度为主,侵蚀类型为面蚀。受人类活动影响,区内植被部分被砍伐,大部分改种油茶(*Camellia oleifera*)、茶树(*Camellia sinensis*)等经济作物,植被覆盖率整体偏低。

## 2 试验设计与研究方法

### 2.1 监测试验场设置

大别山区坡面水土流失主要发生于受人类活动

影响较大的林改经济林区,经济作物以油茶、茶树为主。为探索不同种植模式对坡面产流产沙的影响,径流监测试验场共设置 3 个径流小区,对应 3 种不同的种植模式,分别为油茶小区(单种油茶)、茶树小区(单种茶树)、油茶/茶树间隔式混种小区,小区坡面长 20 m,宽 5 m,坡度为  $15^\circ$ 。种植密度为  $1.5\text{ m}\times 1.5\text{ m}$ ,油茶为 5 a 苗,茶叶为 3 a 苗,每月定期现场看护,每周定时调查监控看管。

径流小区主要有围埂、集流槽、集流桶(图 1)。其中,围埂总体为钢板焊接结构,地表外露  $15\sim 20\text{ cm}$ ,埋入地下  $30\sim 35\text{ cm}$ ;集流槽设置在径流小区坡面下缘,垂直于坡面径流流向,长度与径流小区宽度一致,槽身由两端往中间倾斜,中间最低位置对接导流管,从而起到汇流作用,槽底铺设钢化玻璃,确保光滑而不会引起泥沙淤积导流管上部开口与集流槽最低处紧密连接,下部通向集流桶。

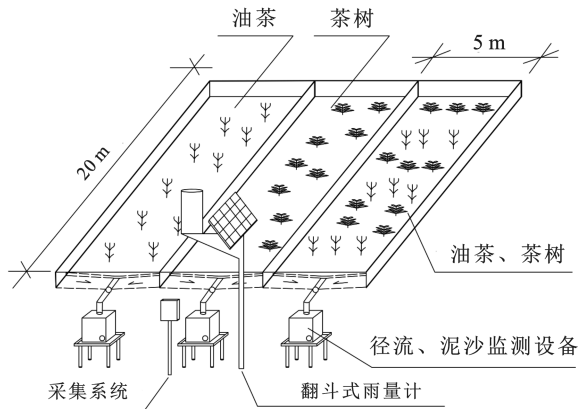


图 1 径流小区设置示意图

Fig.1 Schematic diagram of setting up runoff communities

## 2.2 监测内容与方法

径流小区监测场监测内容主要包括产流、产沙及降雨等项目。安装的设备主要包括翻斗式雨量计,径流泥沙监测仪,土壤温湿度监测仪,中央数据采集器,太阳能供电设备以及监控设备等。每个小区安装 1 套径流泥沙监测仪,主要用于实时监测各小区的径流量和泥沙量,监测数据通过中央数据采集器进行存储与编码,并通过蜂窝网络实时传输至远程监测平台。

翻斗式自记雨量计记录间隔为 5 min,同时人工记录降雨起止时间及降雨期间雨势变化等,以便二者相互验证。一次降雨指连续不断的一个降雨事件,因降雨时断时续,一天可能会发生多场,如果出现的两场降雨的间歇不足 6 h,则作为一场降雨过程,间歇时间若大于 6 h,则视为两场降雨过程。监测过程中,采用水土流失监测仪每 30 min 记录并采集一次降雨产流量、产流含砂量。

水土流失监测仪工作过程中,主要采集水土流失泥沙含量,瞬时流量,瞬时流速等实时数据。其中,流量计的测量范围(流速)为  $0.2\sim 19.0\text{ m/s}$ ,测量误差为  $\pm 3\%$ ;红外泥沙传感器的测量范围为  $3\sim 100\text{ kg/m}^3$ ,测量误差小于  $\pm 5\%$ 。

## 2.3 数据处理与分析

选取 2023 年 1 月 1 日至 12 月 31 日的监测数据,利用 Excel,IBM SPSS Statistics 25 软件进行数据整理,并统计分析总降雨量(total rainfall, TR),降雨时长(rainfall duration, RD),每小时降雨量(hourly rainfall,  $R_{1h}$ ),最大 60 min 雨强(maximum 60 minute rainfall intensity,  $RI_{\max-60}$ )等降雨特征值与各小区产流量(runoff yield, RY),产沙量(sediment yield, SY)的关系,分析不同降雨等级和植物类型坡面的产流产沙特征。

## 3 结果与分析

### 3.1 降雨特征分析与降雨等级划分

收集整理雨量计所得到的降雨数据,2023 年共观测到侵蚀性降雨 68 次,年降水总量为 1 589 mm,年降水日数为 50 d,最大日降水量为 75.6 mm。对各场次降雨的总降雨量、降雨历时、每小时降雨量、最大 60 min 雨强等因子特征进行汇总,结果见表 1。每场降雨的平均降雨总量为 24.07 mm,平均降雨历时 1 739.15 min,平均每小时降雨量为 0.6 mm,平均最大降雨强度为 4.20 mm/h。

表 1 2023 年降雨因子的主要特征

Table 1 Main characteristics of rainfall factors in 2023

降雨因子	最小值	最大值	平均值	标准差
总降雨量/mm	0.20	184.30	24.07	41.27
降雨历时/min	56.00	8 608.00	1 739.15	1 782.53
小时均降雨量/( $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ )	0.01	2.59	0.60	0.67
最大降雨强度/( $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ )	0.10	31.00	4.20	6.07

参考气象学《降水量等级(GB/28592-2012)》标准,以降雨量为指标,将降雨分为小雨( $p < 10\text{ mm}$ )、中雨( $10 \leq p < 25\text{ mm}$ )、大雨( $25 \leq p < 50\text{ mm}$ )、暴雨( $50 \leq p < 100\text{ mm}$ )、大暴雨( $p \geq 100\text{ mm}$ )共 5 级。各月份的降雨次数及降雨等级情况见图 2,降雨等级中,小雨次数 35 场,占降雨总次数的 53.03%;中雨次数 19 场,占降雨总次数的 28.79%;大雨次数 7 场,占降雨总次数的 10.61%;暴雨次数 5 场,占降雨总次数的 7.57%。各月份降雨中,11 月、4 月分别降雨 8 次、3 次,分别为全年降雨最高、最低月份;大雨及暴雨全部发生在 4—11 月,12—3 月主要以中、小雨为主。

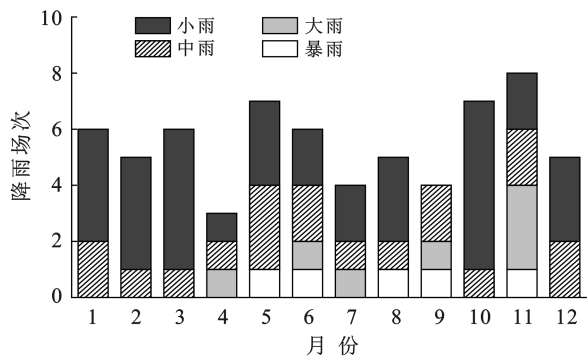
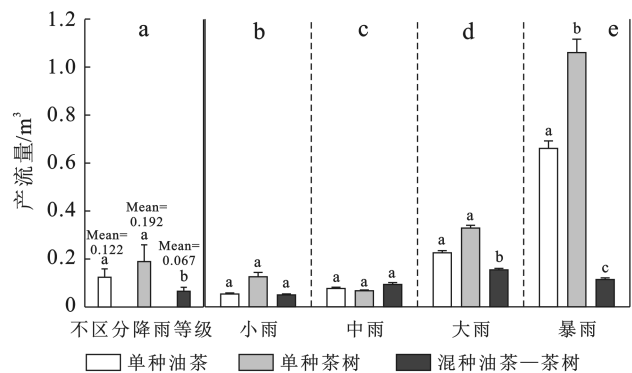


图2 不同月份的降雨等级特征

Fig.2 Characteristics of rainfall levels in different months

### 3.2 不同降雨等级与种植模式下的产流量变化

在区分与不区分降雨等级两种情况下,对采取不同种植模式的径流小区产流量进行多因素方差分析,结果见图3。不考虑降雨等级对产流量影响时,各径流小区的平均产流量(RY)依次为单种茶树小区( $\overline{RY}_{茶} = 0.192 \text{ m}^3$ )>单种油茶小区( $\overline{RY}_{油} = 0.122 \text{ m}^3$ )>混种油茶—茶树小区( $\overline{RY}_{油-茶} = 0.067 \text{ m}^3$ );混种油茶—茶树小区的产流量显著低于单种小区的产流量( $p < 0.05$ );单种油茶小区与单种茶树小区的产流量无显著差异( $p > 0.05$ )。考虑降雨等级对产流量影响时,小雨、中雨等级下的各小区产流量无显著差异( $p > 0.05$ );大雨等级下,混种小区与单种小区的产流量存在显著差异( $p < 0.05$ ),单种小区的产流量无明显区别;暴雨等级下,各小区的产流量相互间存在显著差异( $p < 0.05$ ),且以混种小区的产流量最低;随着降雨等级的提高,各小区的产流量均存在升高趋势,且暴雨等级下的产流量增加尤为明显(其中暴雨下的 $\overline{RY}_{油}, \overline{RY}_{茶}, \overline{RY}_{油-茶}$ 较总平均产流量分别提高了432.3%,455.6%,69.7%)。



注:不同字母代表在  $\alpha = 0.05$  水平上差异显著,相同则无显著差异,下同。

图3 不同降雨等级下的径流小区产流量  
Fig.3 Runoff yield of runoff plots under different rainfall levels

### 3.3 不同降雨等级与种植模式下的产沙量变化

在区分与不区分降雨等级两种情况下,对采取不同种植模式的径流小区产沙量进行多因素方差分析,结果见图4。不考虑降雨等级对产沙量影响时,各径流小区的平均产沙量依次为单种茶树小区( $\overline{SY}_{茶} = 1.15 \text{ kg}$ )>单种油茶小区( $\overline{SY}_{油} = 0.67 \text{ kg}$ )>混种油茶—茶树小区( $\overline{SY}_{油-茶} = 0.53 \text{ kg}$ );各小区的产沙量均无显著差异( $p > 0.05$ )。考虑降雨等级对产沙量影响时,小雨等级下,单种茶树小区的产沙量显著高于单种油茶小雨和混种小区( $p < 0.05$ ),单种油茶小雨与混种小区的产沙量无显著差异( $p > 0.05$ );中雨等级下,各小区的产沙量相互间存在显著差异( $p < 0.05$ ),且以单种茶树小区的产沙量最高;大雨和暴雨等级下,各小区的产沙量相互间无显著差异( $p > 0.05$ )。随着降雨等级的提高,各小区的产沙量均存在升高趋势,且暴雨等级下的产沙量增加尤为明显(其中暴雨下的 $\overline{SY}_{油}, \overline{SY}_{茶}, \overline{SY}_{油-茶}$ 较总平均产沙量分别提高了440.3%,187.8%,560.4%)。

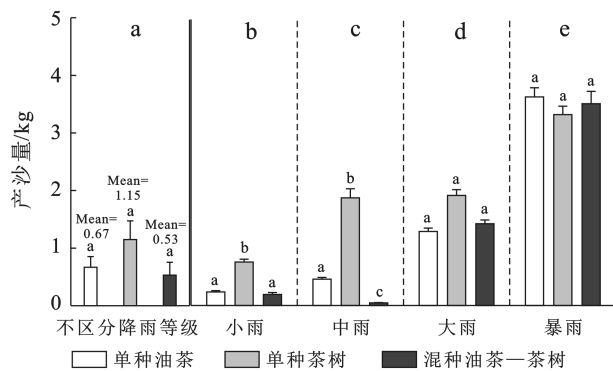


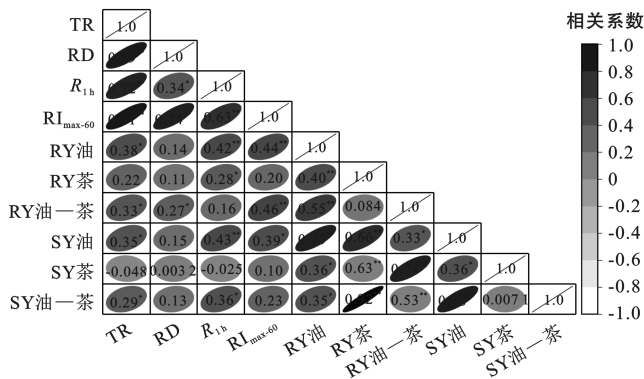
图4 不同降雨等级下的径流小区产沙量  
Fig.4 Sediment yield of runoff plots under different rainfall levels

### 3.4 坡面产流产沙量的影响因素分析

为研究坡面产流产沙量与各因素的关联程度,对66次降雨特征指标与各径流小区的产流量和产沙量进行相关分析,结果见图5。不同径流小区坡面产流产沙量对降雨因子的响应情况存在一定的差异;单种油茶小区的产流产沙量与总降雨量TR、每小时降雨量 $R_{1h}$ ,最大60min雨强 $RI_{max-60}$ 均呈显著正相关;单种茶树小区的产流量与最大60min雨强 $RI_{max-60}$ 呈显著正相关,产沙量与各降雨因子无显著关联;混种油茶—茶树小区的产流量与总降雨量TR、降雨历时RD呈显著正相关,产沙量与总降雨量TR、每小时降雨量 $R_{1h}$ 呈显著正相关;各径流小区的产流量与产沙量均存在极显著相关。总体上来说,坡面产流量主要受总降雨量TR、每小时降雨量 $R_{1h}$ 、最大60min



雨强  $RI_{\max-60}$  的影响;产沙量主要受总降雨量 TR、每小时降雨量  $R_{1h}$  的影响。



注:TR 为总降雨量;RD 为降雨时长; $R_{1h}$  为每 1 h 降雨量; $RI_{\max-60}$  为最大 60 min 雨强;RY 为产流量;SY 为产沙量。

图 5 产流产沙量与各因素的相关性分析

Fig.5 Correlation analysis between runoff and sediment production and various factors

## 4 讨论

大量研究表明,混种或间作能显著降低地表的产流量<sup>[20-21]</sup>,如陈小强等<sup>[22]</sup>发现玉米大豆间作较单作玉米或大豆能减少 25%左右的产流量,韦荣婷等<sup>[23]</sup>对不同种植模式的产流量进行试验,发现多植被套种能显著降低坡耕地的产流量。本研究发现,混种油茶—茶树小区的产流量显著低于单种小区,与已有结论相似。其主要原因是:①油茶和茶树的根系互补作用可能增强了土壤的结构和稳定性,提高了土壤的入渗率<sup>[24]</sup>;②油茶和茶树混种可能促进了有机质的积累和土壤生物活性的提高,从而改善了土壤的水文特性。同时,进一步研究发现了混种模式在极端降雨事件中减少径流的潜力,特别是在类似大别山这样的生态敏感区域。在高强度降雨条件下,植被的作用在减少径流方面尤为重要,因为这时候土壤的入渗能力和水分保持能力对于防止水土流失至关重要。未来的研究可以进一步探索不同植被组合和种植模式对土壤水文特性的影响,以及它们如何在不同的环境条件下发挥作用。

王赫等<sup>[25]</sup>发现降雨量与产沙量呈显著正相关,潘政<sup>[26]</sup>同样发现降雨强度、累计产流量与累计产沙量呈极显著正相关。本研究同样发现各径流小区的产流产沙量均随降雨等级的提高而增加,但不同种植模式对降雨等级的响应程度不一致。如小雨和中雨情况下,单种茶树小区的产沙量最高,其主要原因是茶树具有较浅的根系,这可能导致小/中雨的降雨条件下,土壤颗粒更容易随着水流被冲走。而大雨和暴雨下的产沙量无显著差异,这可能是由于强降雨条件

下,地表的水流强度足以冲走大部分植被类型下的土壤颗粒,从而使得植被类型对产沙量的影响变得不那么明显。

产流量与降雨因子之间的高相关性表明降雨强度对产流量有显著影响。这一发现与其他研究结果相符<sup>[27-29]</sup>,其中降雨被认为是影响径流的主要气象因素,如黄俊等<sup>[30]</sup>研究表明年降雨量对土壤径流量的影响作用最大。同时,产流量与产沙量之间的极显著相关性进一步强调了径流在土壤侵蚀和沉积过程中的作用。这表明在强降雨事件中,增加的径流量可能会导致更多的土壤颗粒被水流带走,从而增加产沙量。

## 5 结论

(1) 在不区分降雨等级的情况下,单种茶树小区的平均产流量最高,其次是单种油茶小区,而混种油茶—茶树小区的产流量显著低于单种小区。当考虑降雨等级时,大雨和暴雨等级下混种小区的产流量同样显著低于单种小区,表明混种模式有助于显著减少坡面产流量。

(2) 不同降雨等级下,各小区产沙量差异相对复杂。小雨、中雨等级下,混种小区的产沙量低于其他小区,且在中雨等级下表现明显;大雨、暴雨等级下,不同径流小区的产沙量无显著差异,表明油茶—茶树混种在一定程度上能有效减少坡面产沙量,但雨量较大的情况下减沙作用微弱。

(3) 坡面产流产沙量同时受总降雨量、每小时降雨量的显著影响,且产流量的增加一定程度上会加剧坡面沙土的流失。

## 参考文献 (References)

- [1] Borrelli P, Robinson D A, Panagos P, et al. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070) [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2020, 117(36):21994-22001.
- [2] 谭永滨,谢剑亮,冉江华,等.基于 RUSLE 的鄱阳湖流域土壤侵蚀时空特征及影响因素分析[J].西南大学学报(自然科学版),2023,45(9):46-56.  
Tan Yongbin, Xie Jianliang, Ran Jianghua, et al. Analysis of spatio-temporal change and influencing factors of soil erosion in Poyang Lake basin based on RUSLE [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2023, 45(9):46-56.
- [3] 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(中英文),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.
- [4] Feng Jing, Wei Wei, Pan Daili. Effects of rainfall and terracing-vegetation combinations on water erosion in a loess hilly area, China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020,261:110247.
- [5] 张哲,方政,董智,等.鲁中南山区侵蚀性降雨及典型作物对坡面产流产沙影响研究[J].*西南大学学报(自然科学版)*,2024,46(1):69-76.
- Zhang Zhe, Fang Zheng, Dong Zhi, et al. Effects of erosive rainfall and typical crops on slope runoff and sediment yield in mountainous area of central-south of Shandong Province [J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2024,46(1):69-76.
- [6] Sun Congjian, Hou Huixin, Chen Wei. Effects of vegetation cover and slope on soil erosion in the Eastern Chinese Loess Plateau under different rainfall regimes [J]. *PeerJ*, 2021,9:e11226.
- [7] de Assunção Montenegro A A, dos Santos Souza T E M, de Souza E R, et al. Temporal dynamics of soil moisture and rainfall erosivity in a tropical volcanic archipelago [J]. *Journal of Hydrology*, 2018,563:737-749.
- [8] 汪海涛,林洋.降雨强度和植被覆盖对岩石边坡产流产沙的影响研究[J].*地下水*,2024,46(1):268-269.
- Wang Haitao, Lin Yang. Study on the influence of rainfall intensity and vegetation coverage on runoff and sediment yield of rock and soil slope [J]. *Ground Water*, 2024,46(1):268-269.
- [9] 张鹏,李龙,李艳,等.植被斑块格局对砒砂岩坡面土壤侵蚀强度的影响[J].*水土保持学报*,2022,36(5):58-65.
- Zhang Peng, Li Long, Li Yan, et al. Effect of vegetation patch pattern on soil erosion intensity on arsenic sandstone slope [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022,36(5):58-65.
- [10] 石智宇,赵清,王雅婷,等.沂河流域植被覆盖时空演变及其与径流的关系研究[J].*水土保持研究*,2023,30(1):54-61.
- Shi Zhiyu, Zhao Qing, Wang Yating, et al. Temporal and spatial evolution of vegetation cover and its relationship with runoff in Yihe River basin [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023,30(1):54-61.
- [11] 朱谧远.人工植被类型及不同生长阶段对陡坡地水文特性的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2023.
- Zhu Miyuan. Effects of artificial vegetation types and different growth stages on hydrological characteristics in steep slopes [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry,2023.
- [12] 文博瑾,段高辉,温仲明.生物多样性与地形及土壤因素对坡面产流产沙的耦合影响[J].*草地学报*,2023,31(4):1186-1197.
- Wen Bojin, Duan Gaohui, Wen Zhongming. Coupling effects of biodiversity with topographic and soil factors on slope runoff-sediment yield [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023,31(4):1186-1197.
- [13] Zhang Guanhua, Liu Guobin, Zhang Pingcang, et al. Influence of vegetation parameters on runoff and sediment characteristics in patterned *Artemisia capillaris* plots [J]. *Journal of Arid Land*, 2014,6(3):352-360.
- [14] 马少伟,胡慧,包维楷,等.岷江干旱河谷土石混合边坡不同种植处理下乡土植被的生态效益[J].*生态学报*,2024,44(4):1647-1661.
- Ma Shaowei, Hu Hui, Bao Weikai, et al. Ecological benefits of different planting treatments using indigenous species on the road slope in the Minjiang dry valley [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024,44(4):1647-1661.
- [15] 龙思佳,汤媛媛,戴亮亮,等.基于改进 RUSLE 模型的西南土石山区水土流失评价:以湖南省龙山县为例[J].*华南地质*,2023,39(4):704-712.
- Long Sijia, Tang Yuanyuan, Dai Liangliang, et al. Evaluation of soil and water loss in the rocky mountain area of Southwest China based on improved RUSLE model: Taking Longshan County, Hunan Province as an example [J]. *South China Geology*, 2023,39(4):704-712.
- [16] 高磊.黄土丘陵沟壑区不同植被类型及坡面对侵蚀性降雨的响应[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2023.
- Gao Lei. Response of different vegetation types and slopes to erosiverainfall in loess hilly gully areas [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University,2023.
- [17] 熊茂秋,刘晓煌,张雪辉,等.基于 RUSLE 模型的塔里木河流域上游土壤保持时空变化研究[J].*地质通报*,2024,43(4):641-650.
- Xiong Maoqiu, Liu Xiaohuang, Zhang Xuehui, et al. Spatio-temporal variation of soil conservation in the upper reaches of the Tarim River Basin based on RUSLE model [J]. *Geological Bulletin of China*, 2024,43(4):641-650.
- [18] Ouyang Wei, Hao Fanghua, Skidmore A K, et al. Soil erosion and sediment yield and their relationships with vegetation cover in upper stream of the Yellow River [J]. *Science of the Total Environment*, 2010,409(2):396-403.
- [19] Vaezi A R, Ahmadi M, Cerdà A. Contribution of rain-drop impact to the change of soil physical properties

- and water erosion under semi-arid rainfalls [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 583:382-392.
- [20] 李瑞,刘瑞禄,吕涛,等.贵州省喀斯特地区典型小流域不同种植模式坡面径流产沙研究[J].*水土保持通报*, 2012,32(5):132-135.
- Li Rui, Liu Ruilu, Lü Tao, et al. Runoff and sediment yield on slope with different planting patterns for a typical small watershed in Karst Region of Guizhou Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2012,32(5):132-135.
- [21] 康佩佩,查轩,刘家明,等.不同植被种植模式对红壤坡面侵蚀影响试验研究[J].*水土保持研究*, 2016,23(4):15-18.
- Kang Peipei, Zha Xuan, Liu Jiaming, et al. Analysis of influence of different vegetation planting patterns on soil erosion on the red soil slope [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016,23(4):15-18.
- [22] 陈小强,范茂攀,王自林,等.不同种植模式对云南省中部坡耕地水土保持的影响[J].*水土保持学报*, 2015,29(4):48-52.
- Chen Xiaoqiang, Fan Maopan, Wang Zilin, et al. Effect of different planting patterns on soil and water conservation of sloping cropland in central Yunnan [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015,29(4):48-52.
- [23] 韦荣婷,安吉平,蔡雄飞,等.不同作物种植模式下坡耕地产流产沙的模拟研究[J].*贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2024,42(1)19-26.
- Wei Rongting, An Jiping, Cai Xiongfei, et al. Simulation study on runoff and sediment of sloping farmland under different crop planting patterns [J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2024, 42(1):19-26.
- [24] Xiao Tao, Li Ping, Fei Wenbin, et al. Effects of vegetation roots on the structure and hydraulic properties of soils: A perspective review [J]. *The Science of the Total Environment*, 2024,906:167524.
- [25] 王赫,杨舜成,岳晓峰,等.红壤区裸露坡地不同类型次降雨的产流产沙规律[J].*水土保持学报*, 2023,37(4):61-68.
- Wang He, Yang Shuncheng, Yue Xiaofeng, et al. Runoff and sediment of different rainfall types on bare slope in the red soil region [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023,37(4):61-68.
- [26] 潘政.人工模拟降雨条件下弃渣场边坡水土流失对植被恢复的响应[D].安徽 淮南:安徽理工大学,2022.
- Pan Zheng. The response of soil erosion of slag dump slopetovegetation restoration under rainfall [D]. Huainan, Anhui: Anhui University of Science and Technology, 2022.
- [27] Liu Yaojun, Wang Tianwei, Cai Chongfa, et al. Effects of vegetation on runoff generation, sediment yield and soil shear strength on road-side slopes under a simulation rainfall test in the Three Gorges reservoir area, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2014,485:93-102.
- [28] Bagagiolo G, Biddoccu M, Rabino D, et al. Effects of rows arrangement, soil management, and rainfall characteristics on water and soil losses in Italian sloping vineyards [J]. *Environmental Research*, 2018, 166:690-704.
- [29] 李龙,张尚轩,高鑫宇,等.次降雨下砒砂岩坡面细沟形态发育及其对侵蚀产沙的影响[J].*水土保持研究*, 2023,30(3):1-9.
- Li Long, Zhang Shangxuan, Gao Xinyu, et al. Development of rill morphology on sandstone slopes under individual rainfall event and its effect on erosion and sediment production [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023,30(3):1-9.
- [30] 黄俊,金平伟,姜学兵.径流深和侵蚀量与集水面积、坡度及降雨量关系研究[J].*水土保持研究*, 2024,31(3):135-142.
- Huang Jun, Jin Pingwei, Jiang Xuebing. Study on the relationship between runoff depth, erosion yield and catchment area, slope and rainfall [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024,31(3):135-142.