DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.06.032 CSTR:32311.14.rswc.2026.06.032
王志伟, 于福科, 李嘉珩, 等. 滇中桉树林地表覆盖对土壤斥水性与产流产沙的影响[J]. 水土保持研究,2026,33(6):20-29,39.
Wang Zhiwei, Yu Fuke, Li Jiaheng, et al. Effects of surface cover on soil water repellency and runoff and sediment yield in *Eucalyptus* plantations in central Yunnan[J]. Research of Soil and Water Conservation,2026,33(6):20-29,39.

滇中桉树林地表覆盖对土壤斥水性与产流产沙的影响

王志伟[1], 于福科[2], 李嘉珩[1], 李 鑫[1], 达思成[1], 黄新会[1]
(1.西南林业大学 水土保持学院, 昆明 650244; 2.云南大学 生态与环境学院, 昆明 650091)

摘 要:[目的]桉树人工林作为滇中地区兼具生态效益与经济效益的重要林分,却因林下植被稀疏、地表覆盖不足而存在加剧水土流失的风险。通过探究不同地表覆盖处理方式对桉树人工林土壤斥水性(SWR)及水土流失的影响,对滇中地区防治水土流失具有重要意义。[方法]在昆明市海口林场设置径流小区,观测保留杂草与枯落物(WL)、仅保留枯落物(L)、清除所有覆盖(O)和计划火烧(F)4种处理的SWR动态与产流产沙特征。[结果](1)地表覆盖显著影响SWR,土壤自然斥水性(NSWR)和土壤潜在斥水性(PSWR)均以WL处理SWR最强,L与F处理次之,O处理最弱,且各处理的NSWR时间变异性大于PSWR;灌草盖度对SWR的影响显著大于现存枯落物生物量($p<0.05$)。(2)O(68.01 mm)和F(63.06 mm)处理的产流量显著大于L(2.34 mm)和WL(4.42 mm)处理($p<0.05$),O(1 784.76 kg/hm^2)处理的产沙量显著大于F(54.66 kg/hm^2)、WL(4.95 kg/hm^2)和L(2.34 kg/hm^2)处理($p<0.05$),WL与L处理能有效抑制水土流失。(3)与SWR相比,灌草盖度与现存枯落物生物量是除降水量之外影响产流产沙的主导因子。[结论]灌草与枯落物覆盖虽然显著增强SWR,但并未因此导致产流产沙的增强,地表覆盖的物理防护作用在水土保持中仍然起主导作用。维持良好的灌草与枯落物覆盖是控制桉树林地水土流失的关键管理措施。

关键词:土壤斥水性; 产流产沙; 径流小区; 地表覆盖; 滇中桉树林
中图分类号:S157.2; S715; S792.39 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-3409(2026)06-0020-10

Effects of surface cover on soil water repellency and runoff and sediment yield in *Eucalyptus* plantations in central Yunnan

Wang Zhiwei[1], Yu Fuke[2], Li Jiaheng[1], Li Xin[1], Da Sicheng[1], Huang Xinhui[1]
(1.*College of Soil and Water Conservation, Southwest Forestry University, Kunming* 650244, *China*;
2.*School of Ecology and Environmental Science, Yunnan University, Kunming* 650091, *China*)

Abstract: [**Objective**] *Eucalyptus* plantations, as important forest stands with both ecological and economic benefits in central Yunnan Province, pose a risk of exacerbating soil erosion due to sparse understory vegetation and insufficient surface cover. Investigating the effects of different surface cover treatments on soil water repellency (SWR) and soil erosion in *Eucalyptus* plantations is of great significance for soil erosion prevention and control in central Yunnan Province. [**Methods**] Runoff plots were established in the Haikou Forest Farm of Kunming City. Four treatments were implemented: retention of understory vegetation and litter (WL), retention of litter only (L), removal of all surface cover (O), and planned burning (F). The dynamics of SWR as well as runoff and sediment yield characteristics were monitored. [**Results**] (1) Surface cover significantly influenced SWR. Both natural SWR (NSWR) and potential SWR (PSWR) were strongest under the WL treatment, followed by the L and F treatments, and weakest under the O treatment. The temporal variability of NSWR was greater than that of PSWR across all treatments. The effect of understory vegetation coverage on SWR was significantly greater than

收稿日期:2025-11-22 **修回日期:**2025-12-28 **接受日期:**2026-01-09
资助项目:国家自然科学基金项目"云南省典型植被的水分适宜性及其生态需水与区域旱灾的关系"(31460191);云南省科技计划项目农业联合专项"杂草和枯落物联动对滇中坡地桉树人工林土壤抗侵蚀的斥水性影响机理"(202401BD070001-114)
第一作者:王志伟(2000—),男,河北衡水人,硕士研究生,研究方向为水土保持与森林水文。E-mail:wang824122021@163.com
通信作者:黄新会(1979—),女,河南内乡人,博士,副教授,从事水土保持与生态水文研究。E-mail:ylhxh2001@163.com

that of existing litter biomass ($p < 0.05$). (2) Runoff volume was significantly greater under the O (68.01 mm) and F (63.06 mm) treatments compared to the L (2.34 mm) and WL (4.42 mm) treatments ($p<0.05$). Sediment yield under the O treatment (1 784.76 kg/hm^2) was significantly higher than that under the F (54.66 kg/hm^2), WL (4.95 kg/hm^2), and L (2.34 kg/hm^2) treatments ($p<0.05$). The WL and L treatments effectively mitigated soil erosion. (3) Compared to SWR, understory vegetation coverage and existing litter biomass were the dominant factors affecting runoff and sediment yield, apart from rainfall. [**Conclusion**] Although understory vegetation cover and litter cover significantly enhance SWR, they do not lead to increased runoff and sediment yield. The physical protective effect of surface cover remains the dominant factor in soil and water conservation. Maintaining adequate understory vegetation and litter cover is a crucial management practice for controlling soil erosion in Eucalyptus plantations.

Keywords: soil water repellency; runoff and sediment yield; runoff plot; surface cover; *Eucalyptus* plantations in central Yunnan

桉树因其轮伐期短、木材产量高,是中国南方地区主要的人工用材林树种之一,然而其大规模种植也引发了诸多生态水文方面的争议,特别是其林下地表常出现严重的水土流失现象[1]。除了林下植被稀疏、种植结构单一等传统解释外,土壤斥水性(Soil Water Repellency, SWR)作为影响水分运移的关键因素,近年来逐渐受到研究者的关注[2]。

SWR是指水分不能、或很难湿润土壤颗粒表面的现象,其广泛存在于各种气候背景、土壤类型和植被覆盖条件下[3]。地表植被与枯落物覆盖不仅通过改变温湿度环境影响SWR的变化,其分解过程中输入的有机物质更是SWR形成的直接物质基础[4]。具体而言,桉树富含的挥发性油和蜡质作为典型的疏水性有机物,随其凋落物分解进入土壤,极易增强表土的斥水性。SWR在坡面水土流失中具体起何作用,目前仍存争议。有观点认为,SWR的存在会干扰降雨入渗与水分运移,从而加剧土壤侵蚀,对林地水土调节功能构成潜在威胁[5]。但也有研究指出,SWR虽然抑制了水分入渗,但斥水性物质包裹土壤颗粒后,反而能增强团聚体的稳定性,从而减轻土壤颗粒的剥离与冲刷[6]。这种水文效应与物理效应之间的平衡,受人为管理措施的影响而表现不同,尤其在经常进行计划烧除、抚育除草等人为经营的桉树人工林中,需要辨析SWR与地表覆盖何者对产流产沙具有相对重要的作用。

滇中高原属于典型的生态脆弱区,干湿季分明,且桉树人工林频繁的经营活动改变了地表覆盖方式,令SWR呈现一定的时空异质性,进而引发产流产沙的复杂响应。但是现有研究多关注自然状态下的SWR特征,缺乏针对不同地表覆盖变化、SWR时间变化与产流产沙响应耦合的深入研究[7]。因此,本研究以滇中典型桉树人工林为对象,设置4种地表覆盖处理,开展径流小区观测。重点探讨以下问题:(1)不同地表覆盖方式如何影响桉树人工林的SWR与产流产沙特征;(2)在坡面产流产沙中,SWR的影响与地表覆盖物的物理阻截作用,何者起主导作用。研究成果旨在揭示桉树林下水土流失的相对重要因素,明确SWR在土壤侵蚀中的实际作用,为该区域桉树人工林的合理经营与水土流失防治提供参考。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于云南省昆明市西山区海口林场,背靠滇池西岸,地理位置为东经102°28′—102°38′,北纬24°43′—24°56′。海拔高度1 800～2 400 m,森林覆盖率为80.54%,年平均温度为14.5 ℃,年平均降雨量为909.7 mm,属于亚热带季风气候,年平均日照时间约2 200 h,无霜期240 d以上,土壤类型以红壤为主。研究区内主要乔木树种有华山松(*Pinus armandii*)、云南松(*Pinus yunnanensis*)、栎类(*Quercus spp.*)、圆柏(*Juniperus chinensis*)、桤木(*Alnus cremastogyne*)、滇油杉(*Keteleeria evelyniana*)等[8]。

1.2　径流小区设置

在海口林场选择草被结构相同,人为干扰程度较低的坡面作为试验小区,设置4种试验处理:保留杂草及枯落物现状(WL)、仅除草但保留枯落物(L)、同时除草除枯落物(O)以及计划火烧杂草与枯落物(F,已于2021年、2022年、2023年雨季前连续火烧3次,每次均符合预设的低强度火烧要求,地表凋落物被有效清除,但土壤结构未遭破坏,活体植被仅叶片被焚毁,主体存活),每种处理配置均设立3个径流小区作为重复,以增强数据的可靠性。各小区的基本情况见表1。

表1 径流小区基本概况
Table 1 Basic overview of runoff plots

小区编号	坡向	坡度	面积/m^2	处理方式	主要物种
1	南偏西5°	11°	31	O	本沁桉(*Eucalyptus benthamii*)
2	南偏西5°	10°	33	L	本沁桉
3	南偏西5°	10°	32	WL	本沁桉、紫茎泽兰(*Ageratina adenophora*)、川梨(*Pyrus pashia*)、铁仔(*Myrsine africana*)、喀西茄(*Solanum aculeatissimum*)等
4	南偏西5°	9°	33	O	本沁桉
5	南偏西2°	9°	32	F	本沁桉、紫茎泽兰
6	南偏西2°	10°	33	L	本沁桉
7	南偏西2°	10°	28	O	本沁桉
8	南偏西2°	11°	28	F	本沁桉、紫茎泽兰
9	南偏西7°	10°	32	WL	本沁桉、紫茎泽兰、川梨、铁仔等
10	南偏西7°	10°	29	L	本沁桉
11	南偏西7°	11°	30	F	本沁桉、紫茎泽兰
12	南偏西7°	9°	29	WL	本沁桉、紫茎泽兰、川梨、铁仔、喀西茄等

1.3 观测指标与方法

试验时间为2024-06—2025-05,需要测定的指标如下:

1.3.1 径流深与土壤流失量测定 试验期间结合降雨观测,共记录到23次能够产生地表径流的侵蚀性降雨事件,其呈现明显的季节性差异,主要集中在雨季(6—10月),干季产流次数较少。每次产流事件结束后,立即对所有小区的集流桶进行观测。具体测定方法如下:首先测量集流桶内径流总量,充分搅拌均匀后,用500 ml取样瓶采集径流泥沙样2个,带回实验室静置沉淀、过滤,在105 ℃烘箱中烘干至恒重后称量干土重,计算径流含沙量。采用以下公式计算径流深(R)和土壤流失量(S)[9]:

$$R=\frac{V}{A} \tag{1}$$

$$S=\frac{VC\times 10}{A} \tag{2}$$

式中:R为径流深(mm);V为径流小区径流量(L);A为径流小区面积(m^2);S为土壤流失量(kg/hm^2);C为径流含沙量(g/L)。

1.3.2 土壤采集与斥水性测定 分别在每个径流小区上坡、中坡、下坡的土壤表层(0—10 cm)进行随机少量取样(约为250 g),并在取样结束后及时回填。雨季(6—10月)每月两次(两次间隔15 d左右),干季(11—次年5月)每月一次(两次间隔30 d左右)。将土壤样本过2 mm筛后分为两部分,一部分用于测定NSWR;另一部分样本则取50 g置于85 ℃的烘箱中烘干至恒重后测定自然含水率与PSWR(土壤含水率为0时的斥水性)。

采用MED法测定SWR:MED法具体试验操作为每次测定前配制0 mol/L至5 mol/L浓度的酒精溶液,相应有0 mol/L,0.2 mol/L,0.5 mol/L,0.8 mol/L,1 mol/L,1.2 mol/L,1.5 mol/L,1.9 mol/L,2.3 mol/L,2.6 mol/L,3 mol/L,3.5 mol/L,4 mol/L,5 mol/L等浓度。将50 g的土壤样本移入培养皿中平铺,用滴管吸取不同浓度的乙醇溶液滴在土表,判断液滴完全入渗时间小于5 s的临界乙醇浓度,该浓度即为土样的MED值,将MED值划分为5个等级:不斥水(MED=0 mol/L)、轻度斥水(0.2 mol/L≤MED≤1.2 mol/L)、中度斥水(1.2 mol/L<MED≤2.3 mol/L)、重度斥水(2.3 mol/L<MED<3.5 mol/L)、极端斥水(MED≥3.5 mol/L)。鉴于MED指标本身为离散分级体系,其在量化分析中难以精确反映不同等级之间的渐变特征。为克服这一局限,使该指标更适用于连续数值分析,本研究参考Roy等[10-11]的思路在相邻MED档位间进行插值处理,构建一个连续化的MED指标(interpolated MED, iMED),旨在缓解原分级体系过于粗略的问题,更细致地表征土壤的实际斥水性变化。iMED以固定判定秒数T(本研究取T=5 s)作为通过标准;对每个样品,记首次通过的浓度为C_U,其对应入渗时间为t_U($0<t_U\leqslant T$),并将其下一低档未通过的浓度记为C_L。在区间(C_L, C_U]内,采用开方权重(更贴近入渗时间随浓度的凹形关系)确定连续等效阈值:

$$\mathrm{iMED}=C_L+\sqrt{\frac{t_U}{T}}\left(C_U-C_L\right) \tag{3}$$

式中:C_U为样本第一次通过的乙醇浓度(mol/L);C_L为比C_U低一级的浓度(mol/L);t_U为样本第一次通过的乙醇浓度的入渗时间(s);T为判定秒数(s)。

1.3.3　灌草盖度与现存枯落物生物量调查　测定时间同1.3.2。现存枯落物生物量采用烘干法测定,灌草盖度通过拍照法结合Photoshop软件进行分析。

灌草盖度采用样方调查法与数字图像处理技术测定。具体步骤如下:在每个径流小区的上、中、下坡位各随机设置一个0.5 m×0.5 m的样方;对每个样方进行多角度拍摄,并通过图像拼接与裁剪技术,获取完整的正射投影图像用于分析。盖度的量化通过Photoshop软件实现:首先利用魔棒工具选择全部植被区域,再通过直方图功能统计其像素数量;最后,将植被像素与样方总像素代入公式(4),即可计算得出灌草盖度[12]:

$$G=\frac{N_1}{N}\times 100\% \tag{4}$$

式中:G表示灌草盖度;N_1表示绿色枝叶像素数量;N表示样地像素数量

枯落物生物量测定:在各个径流小区的上坡、中坡、下坡各随机取得30 cm×30 cm面积的全部枯落物,现场立即称量其鲜重,并将等质量的枯落物回填至原处,以减少对径流小区的干扰。将样品带回实验室后,置于85 ℃烘箱中烘干并称量其干重,根据干重和样方面积,计算单位面积的现存枯落物生物量(B),公式为:

$$B=W/S \tag{5}$$

式中:B表示现存枯落物生物量(g/m²);W表示枯落物干重(g);S为样地面积(m²)。

1.3.4　降雨观测　在径流小区周边布置5台自动雨量计(6 465 M,美国DAVIS)记录降雨过程,降雨量测量精度为±0.2 mm,时间间隔设置为10 min。研究期间的降雨情况见表2。

表2　研究区降雨情况

Table 2　Rainfall conditions in study area

项 目	降雨类型						
	小雨 (0.1～9.9 mm)				中雨 (10.0～24.9 mm)	大雨 (25.0～49.9 mm)	暴雨 (50～100 mm)
平均雨强等级/(mm·h⁻¹)	<1	1.0～1.5	1.5～2.0	2.0～2.5	2.5～8.0	8.0～16.0	≥16.0
降雨场数	32	4	8	11	10	4	2
频率/%	45.71	5.71	11.43	15.71	14.29	5.71	2.86
总降雨量/mm	50.6	40.2	37.4	60.4	138.4	164.8	110.8

1.4　数据处理与分析

采用Excel 2023软件对数据进行整理,用SPSS 27.0软件统计和分析数据,用Origin 2024软件绘制图片,用Photoshop 2023软件对所拍摄照片进行处理。用变异系数解释不同处理的灌草盖度、枯落物生物量、表层土壤含水率、NSWR和PSWR随时间变化的波动性,对不同处理的iMED值进行单因素方差分析,对SWR的影响因子进行通径分析并使用Amos软件建立结构方程模型,对不同处理的径流深与土壤流失量进行非参数性检验,对产流产沙的影响因子进行主成分分析。

2　结果与分析

2.1　地表覆盖与土壤水分的时间动态特征

2.1.1　灌草盖度与现存枯落物生物量的变化特征　如图1A所示,灌草盖度仅涉及F处理和WL处理,观测期内两种处理总体表现为雨季大于干季,其中F处理的波动小于WL处理,两种处理在雨季时差异较大,干季时差异逐步缩小。WL处理的平均灌草盖度高于F处理,其全期平均值约为F处理的2.3倍。且在8月达到峰值,最高达57.46%,随后逐渐下降至干季末的20%左右。相比之下,F处理的平均灌草盖度始终保持在较低水平,其最高值出现在8月,仅为WL处理的48.71%,最低值出现在4月,仅为WL处理的41.29%。

3种处理的现存枯落物生物量的时间动态特征如图1B所示。观测期内WL处理的平均现存枯落物生物量最高(567.38 g/m²),分别比L处理(485.70 g/m²)和F处理(408.81 g/m²)高出16.8%和38.8%。从时间动态看,WL处理波动较小(变异系数C_v=13.38%),于8月达到峰值(702.75 g/m²)后逐月下降,在6月出现谷值(375.96 g/m²)后开始回升;L处理波动最为平缓(C_v=9.25%),峰值与谷值分别出现在9月(576.92 g/m²)和4月(422.68 g/m²);F处理波动最为剧烈(C_v=16.70%),其峰值(533.03 g/m²,9月)与谷值(293.32 g/m²,6月)差异最大。

2.1.2　表层土壤含水率的变化特征　图2表明各处理表层土壤含水率呈现一致的变化趋势,表现为雨季含量较高,干季逐渐降低。在相同变化趋势下,各处理间土壤含水率存在一定差异。O处理变异较大(C_v=60.38%),土壤含水率在7月达到最高值,为27.84%,随后持续下降,4月出现最低值,为1.7%;F处理土壤含水率的波动次之(C_v=55.33%),在7月出现一次明

显峰值，其最高土壤含水率达到32.22%，之后逐步下降，4月达到最低值，平均土壤含水率为2.82%；L处理变异较小（C_v=52.23%），在7月达到最高值，其平均含水率为19.3%，雨季后迅速下降，最低值出现在4月，为2.17%，处于各处理中较低水平；WL处理全期表现最为稳定（C_v=39.91%），土壤水分始终维持中高水平，在最高时（7月）平均含水率为19.23%，即使在最低时（4月）仍为5.21%，且在干季时下降较为缓慢。不同处理表层土壤含水率平均值为WL（11.24%）>F（10.49%）>L（10.24%）>O（9.43%），WL处理表现出最优的保水效益，其平均含水率较O处理提升了19.2%，较L处理提升了9.8%。

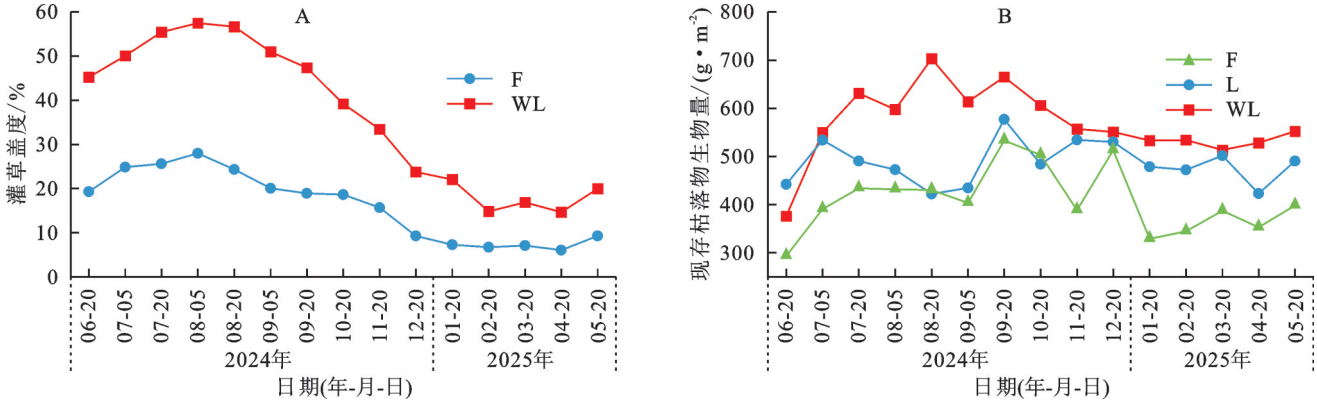


图1 不同处理的平均灌草盖度与现存枯落物生物量

Fig. 1 Average understory vegetation coverage and existing litter biomass under different treatments

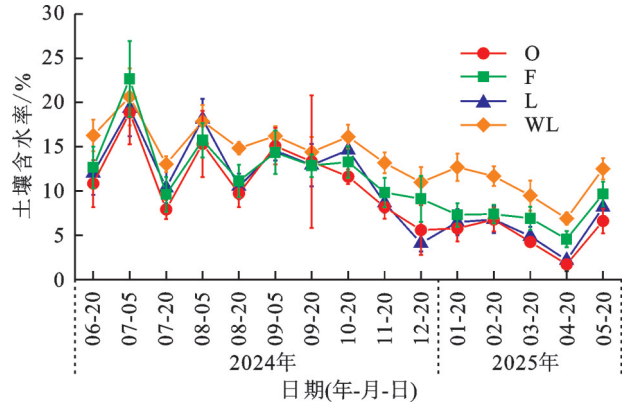
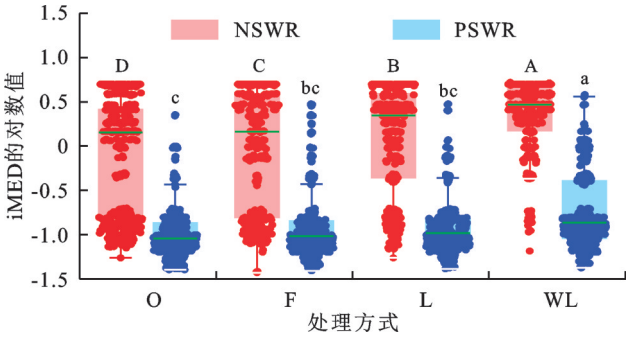


图2 不同处理的表层土壤含水率

Fig. 2 Surface soil water content under different treatments



注：不同大写字母表示不同处理NSWR差异显著（p<0.05）；不同小写字母表示不同处理PSWR差异显著（p<0.05）。

图3 不同处理方式的土壤斥水性

Fig. 3 Soil water repellency under different treatments

2.2 土壤斥水性动态特征及其部分影响因子

2.2.1 不同处理方式的土壤斥水性时间动态特征 图3显示了4种地表覆盖处理下土壤自然斥水性（Natural Soil Water Repellency，NSWR）和潜在土壤斥水性（Potential Soil Water Repellency，PSWR）的总体特征。在NSWR中，O，F，L和WL共4种处理均值分别为1.72 mol/L，2.00 mol/L，2.27 mol/L和2.89 mol/L，其中O，F和L处理属于中度斥水，WL处理达到重度斥水水平；在PSWR中，O，F，L和WL这4种处理分别为0.16 mol/L，0.24 mol/L，0.20 mol/L和0.34 mol/L，O处理表现为不斥水，其余3种处理均为轻度斥水。单因素方差分析表明，不同处理间NSWR存在显著差异（p<0.05）。在PSWR方面，WL处理显著高于F处理、L处理及O处理（p<0.05），而F处理、L处理及O处理之间无显著差异。综上，WL处理平均斥水性最高，O处理最低，F，L处理介于其间。

由图4可知，整体上NSWR普遍高于PSWR。WL处理的NSWR最为稳定，变异系数为45.34%，其NSWR峰值出现在8月（4.53 mol/L），谷值在次年3月（0.77 mol/L）。L处理的波动性略有增加，SWR的C_v值为57.40%。NSWR在9月达到最大值4.48 mol/L，12月出现最小值0.39 mol/L。O处理表现出较强的波动性，其NSWR在9月达到峰值3.91 mol/L，次年5月降至最低0.53 mol/L，波动性较之WL和L处理增大（C_v=67.84%）。F处理的波动性最大，NSWR的C_v值达69.50%，其特征是斥水性峰值在6月（3.82 mol/L），谷值出现在次年2月（0.2 mol/L）。在各项处理中，PSWR的波动性较之SWR明显减小，其标准差分别为WL（0.36 mol/L）>F（0.29 mol/L）>L（0.23 mol/L）>O（0.16 mol/L）。各处理均显示NSWR在雨季达到峰值，干季降至最低的季节性规律，其中O和F处理波动程度大于L和WL处理。而PSWR的季节性规律不明显，其波动总体上较小。

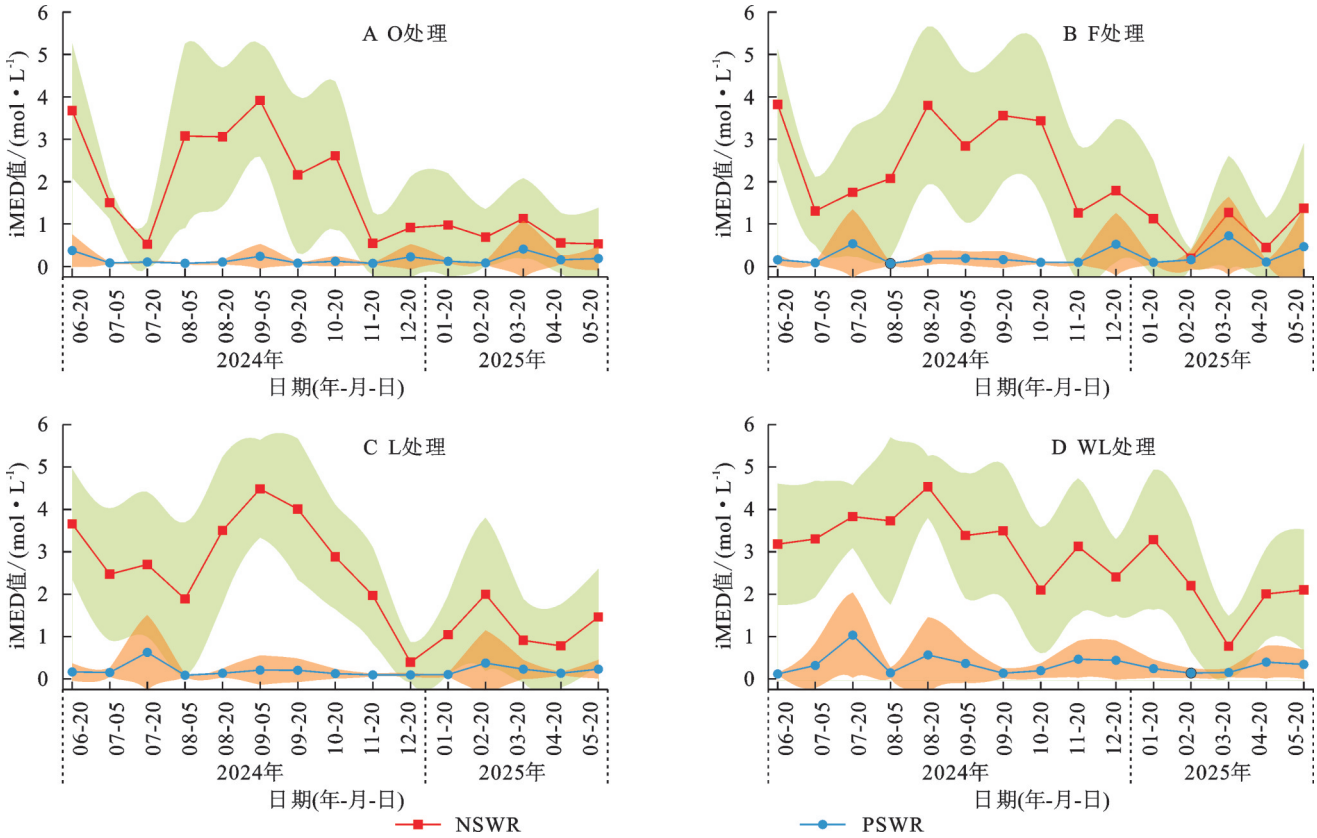


图 4　不同处理的土壤斥水性变化特征

Fig. 4　Variation characteristics of soil water repellency under different treatments

2.2.2　土壤斥水性对灌草盖度、现存枯落物生物量和土壤水分的响应　通径分析与SEM共同揭示了灌草盖度、现存枯落物生物量和表层土壤含水率对NSWR的影响路径与相对重要性(表3,图5)。决策系数表明,表层土壤含水率是影响SWR最大的因子(0.164),其次为灌草盖度(0.036),现存枯落物生物量的影响相对较弱(0.021)。SEM结果对此提供了路径解释:土壤含水率对NSWR具有最强的正向直接效应(路径系数0.38),且通过促进灌草盖度(0.21)与现存枯落物生物量(0.13)产生间接正效应。灌草盖度与现存枯落物生物量虽对NSWR有直接正效应(0.13,0.10),但其作用更多通过相互促进(路径系数0.47)及受表层土壤含水率调控的间接途径实现。

表 3　NSWR影响因子通径分析

Table 3　Path analysis of influencing factors of NSWR

因子	相关系数	直接通径系数	总间接通径系数	间接通径系数			决策系数
				灌草盖度	现存枯落物生物量	表层土壤含水率	
灌草盖度	0.282**	0.127	0.155		0.050	0.106	0.036
现存枯落物生物量	0.214**	0.100	0.114	0.063		0.051	0.021
表层土壤含水率	0.430**	0.381	0.049	0.035	0.013		0.164

注:**表示在$p<0.01$级别差异具有统计学意义。下表同。

表4与图5表明灌草盖度是PSWR最关键的影响因子,其决策系数最高,且以直接效应为主(0.104),SEM也显示其为PSWR唯一的显著影响因子。相比之下,现存枯落物生物量的影响较弱(决策系数0.011),而表层土壤含水率对PSWR的直接与间接路径系数均未达到显著水平,影响较小。

综上,对于NSWR,表层土壤含水率是最重要影响因子,作用以直接效应为主;灌草盖度与现存枯落物生物量主要通过间接效应发挥作用。对于PSWR,灌草盖度是最重要影响因子,作用为直接效应,现存枯落物生物量的影响较弱。

2.3　产流产沙特征及部分影响因子

2.3.1　产流产沙特征　在本次试验中共产生23次产流产沙事件,不同地表覆盖处理下产流产沙如图6所示,A和B图分别为不同处理下的径流深和土壤流失量。总径流深为O(68.01 mm)>F(63.06 mm)>L(2.34 mm)>

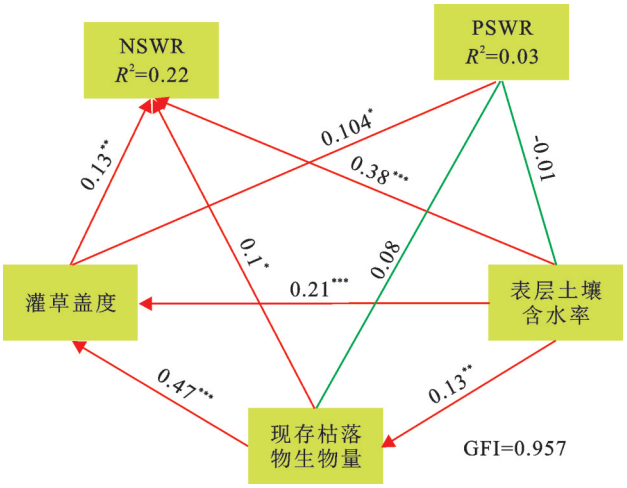
WL(4.42 mm);总土壤流失量为O(1 784.76 kg/hm²)>F(54.66 kg/hm²)>WL(4.95 kg/hm²)>L(2.34 kg/hm²)。不同处理间的产流产沙存在显著差异,WL和L处理的产流量显著小于O和F处理($p<0.05$);WL,L和F处理的土壤流失量显著小于O处理($p<0.05$)。与O和F处理相比,L与WL处理能显著减少径流产生($p<0.05$);在抑制产沙方面,L和WL处理的效果均显著优于O处理($p<0.05$),其中O处理的土壤流失量远超其他处理。

表4 PSWR影响因子通径分析

Table 4 Path analysis of influencing factors of PSWR

因子	相关系数	直接通径系数	总间接通径系数	间接通径系数			决策系数
				灌草盖度	现存枯落物生物量	表层土壤含水率	
灌草盖度	0.142**	0.104	0.038		0.040	−0.003	0.015
现存枯落物生物量	0.132**	0.081	0.051	0.052		−0.001	0.011
表层土壤含水率	0.029	−0.010	0.039	0.029	0.011		−0.0003

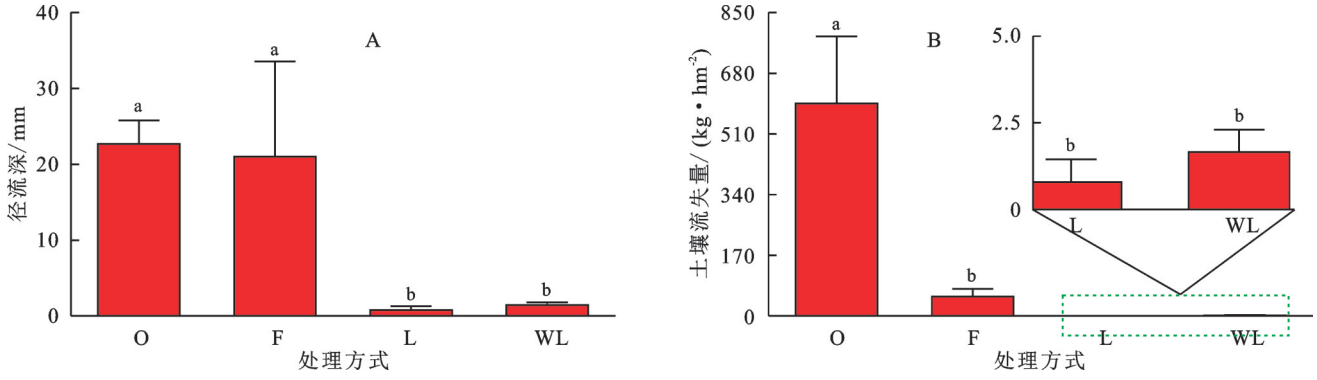
2.3.2 产流产沙对灌草盖度、枯落物生物量和SWR的响应 PCA分析(图7)前两个主成分共同解释了总变异的64.5%,PC1(贡献率42.1%)为水土流失驱动轴,主要由径流深(载荷0.484)、土壤流失量(0.462)和降雨量(0.250)主导。沿该轴分布,O处理位于正向区域,表征较高的产流与产沙;WL处理集中于负向区域,反映其优良的水土保持功能;F与L处理则介于二者之间,呈现中等流失特征。PC2(贡献率22.4%)主要体现环境因子的调节作用,其中降雨量(0.537)、灌草盖度(0.423)、现存枯落物生物量(0.388)及SWR(0.352)为构成要素。从处理分布来看,O与F处理聚集于PC1轴右侧,属于典型的水土流失型处理。O处理的置信椭圆紧邻径流深与土壤流失量箭头,表明其产流产沙量最高;F处理虽处于相近区域,但在PC2轴上略高,指示火烧在破坏地表覆盖的同时诱发了SWR。L与WL处理稳定分布于PC1轴左侧,构成水土保持型处理组。二者置信椭圆形态存在差异:L处理的椭圆大致沿PC1轴延伸,说明其功能主要依赖枯落物的物理截留与缓冲;WL处理的椭圆则向左上方伸展,与灌草盖度和SWR的合力方向一致,表明该处理通过灌草和枯落物复合结构实现最佳水土保持的同时增强了SWR。灌草盖度(−0.428)与枯落物生物量(−0.457)在PC1上均为显著负载荷,说明二者与径流和侵蚀呈显著负相关,是抑制水土流失的核心驱动因子。尽管SWR在PC2上具有一定正载荷(0.352),但其数值较低,提示其在整体产流产沙格局中贡献有限。综上,坡面产流产沙主要受地表覆盖调控,其中灌草盖度与枯落物生物量是抑制水土流失的核心因子,而SWR的直接贡献有限。



注:* $p<0.05$, ** $p<0.01$, *** $p<0.001$。

图5 NSWR与PSWR影响因素的结构方程模型

Fig. 5 Structural equation model of influencing factors of NSWR and PSWR



注:不同小写字母表示不同处理差异显著($p<0.05$)。

图6 不同处理下的产流产沙特征

Fig. 6 Characteristics of runoff and sediment yield under different treatments

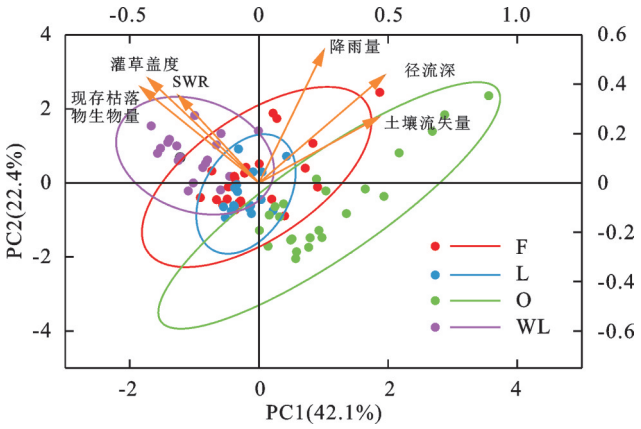


图 7　不同处理方式产流产沙与环境因子的主成分分析

Fig. 7　Principal component analysis of runoff, sediment yield, and environmental factors under different treatments

3　讨　论

3.1　地表覆盖对土壤斥水性的调控作用

4 种地表覆盖处理中,WL 处理的 SWR 最强且最稳定,而 O 处理最弱,且呈现雨季升高、干季降低的季节性规律,PSWR 整体较弱且无明显季节性,其波动性均远小于 NSWR。这与多数研究普遍认为 SWR 的增强通常与植被来源的疏水性有机化合物密切相关相符合,包括枯落物分解产物与根系分泌物等[2-3,7]。本研究证实保留灌草与枯落物显著增强了 SWR,其内在机制可能在于灌草叶片及根系富含油脂、蜡质等疏水性有机化合物;WL 处理下高盖度的灌草与厚层枯落物持续向表层土壤输入这些疏水物质,包裹土壤颗粒,从而诱导重度斥水性的形成[4,7]。此外由雨季到干季时,灌草的盖度逐渐降低,SWR 也随之降低,这从侧面说明了灌草对 SWR 的增强作用,这与王维维在草地恢复研究中发现相似,植被恢复程度与 SWR 呈正相关,即植被盖度的增加,表层土壤的斥水性也随之提高[13];L 处理去除了灌草但保留了枯落物,在一定程度上减少了疏水物质的输入,其斥水性显著低于 WL 处理,但相比之下 O 处理去除了地表覆盖,在两次清理的间隔期内,仅会产生少量的桉树枯落物,这在一定程度上阻断了有机物质来源,加之雨滴打击加速了表层有机质的淋溶流失,导致 SWR 显著低于 WL 和 L 处理。这与 Lichner 等[14]关于提高植被盖度和根系可显著提高 SWR 的结论高度一致,也印证了 Razipoor 等和 Rueda 等所指出的植被覆盖与有机质含量对 SWR 的关键影响[15-16]。除此之外,本研究还揭示了连续三年低强度火烧对 SWR 的影响,即和 O 处理相比,F 处理显著增强了 SWR。这与已有研究中对火烧后 SWR 的结论相符,王严等[17]发现林火显著提高了表层土壤的斥水性,Esteban 等[18]指出火烧处理初期可能通过改变土壤表面结构增加疏水性;虽然火烧去除了大部分地表覆盖物,但其 SWR 仍高于裸地,这可能是残留的根系与火烧过程中有机质的不完全燃烧导致疏水性物质在表土富集有关,加之土壤表面孔隙被燃烧的灰烬填充,导致土壤入渗率降低[4]

尽管灌草盖度与现存枯落物生物量对 SWR 具有一定影响,但 SWR 同时受到土壤养分、质地与微生物因子调控。后续研究需进一步结合土壤理化性质分析与微生物群落测定,在不同地表覆盖处理下系统阐释 SWR 形成的驱动机制,并深入研究根系和剩余燃烧物对 SWR 的影响。

3.2　产流产沙对地表覆盖处理的响应

在本研究中,WL 与 L 处理在产流产沙量上无显著差异,说明枯落物是控制水土流失的主导因素;而 O 处理的产流产沙量远高于 WL 与 L 处理,进一步证实保留枯落物对水土保持具有关键作用。高飞在黄土丘陵区的研究表明[19],高植被覆盖可显著降低径流与产沙,与本试验中 WL 处理的效果一致;何玉广等[20]也指出枯落物覆盖能有效抑制坡面产流产沙,与本研究中 L 处理的结果相符。这些结果共同表明,保留杂草与枯落物能有效增强地表的减流减沙能力。

F 处理的径流量与 O 处理差异不显著,但土壤流失量显著低于 O 处理,说明火烧虽会促使径流增加,但其对产沙的促进效应远低于裸地。龚顺清等[21]指出火烧会显著加剧坡面水土流失,与本试验中 F 处理产流产沙高于 WL 与 L 处理的结果一致,Samdaliri 等也认为低强度火烧使 SWR 增强、表层结构劣化,从而增加径流与产沙[22],这主要源于火烧后地表覆盖物损失、土壤结构松散及斥水性增强[23]。然而,与 O 处理相比,F 处理因残留枯落物或植被初期恢复对泥沙具有一定拦截作用,使其产沙量仍显著低于裸地处理,该结果与 He 等[24]关于枯落物覆盖可缓解火烧后土壤侵蚀的结论相符。

本研究主要探讨了不同地表覆盖处理对产流产沙的影响,尚未涉及坡度变化、土壤质地、有机质含量等关键环境因子的交互作用。这些因素对土壤侵蚀同样具有重要影响[25]。另外,本试验在地表覆盖处理上未设置“仅保留灌草”的方案,这一局限使得我们虽初步观察到灌草可能在增强 SWR 等方面作用显著,却无法从机制上明确剥离其与枯落物的各自贡献;另外本研究未涉及产流产沙的过程以及垂直侵蚀,将在后续研究中予以完善,进一步系统分析多因子耦合作用下的水土流失机制。

3.3　土壤斥水性对产流产沙的影响

根据 PCA 分析,SWR 对坡面产流产沙的直接贡

献有限。经典理论认为SWR通过降低入渗速率加剧地表径流[4],但在本研究中,其并未造成径流量或侵蚀量的显著增加;相反,在地表覆盖条件较好的处理中,较高的斥水性反而与较低的产流产沙量并存,这种现象揭示了坡面尺度上覆盖物物理阻滞作用的相对重要性,说明由斥水性产生的实际水文效应受制于其他因素的共同调控。WL处理中较高的灌草盖度与厚层的枯落物形成了物理屏障,极大地增加了地表糙度,延长了径流汇流时间,这种物理截留效应可能掩盖了由SWR引起的初期产流效应,其次,O处理虽然SWR较低,但因缺乏物理保护,雨滴动能直接破坏表层土壤结构,导致土壤分离与搬运受阻极小,从而引发剧烈侵蚀。这得到了既有研究的多角度支持:首先,地表覆盖是调控斥水性水文效应的关键条件。Benito等在对斥水性土壤进行去覆被模拟降雨试验中,观测到产流系数与产沙量显著上升[26],这与本研究中O处理产流产沙率最高的现象高度一致,说明在缺乏覆盖的情况下,即便斥水性程度不高,仍可能引发强烈侵蚀。而WL与L处理中,尽管SWR较高,但由于枯落物与灌草的存在,有效延长了水分在坡面的滞留时间,削弱了斥水性对径流形成的直接激发作用。其次,也有文献研究表明斥水性对侧向侵蚀影响不大但是对于垂直侵蚀可能会有或产生影响,倪世民等[27]认为斥水性对土壤溅蚀有着显著影响,斥水性越大土壤发生溅蚀的程度也越大。Agata等用高速摄影机研究单颗雨滴撞击不同斥水等级土壤,发现由于水分难以入渗,地表瞬间形成水膜,会将干燥的土粒以高速度弹射出去,这可能加剧特定条件下的垂直溅蚀[28]。这些证据共同指向,SWR的作用受到人为管理措施的影响较大,难以作为独立主导因子。此外,SWR对侵蚀的影响具有阶段性与双重性。Doerr等[29]通过人工降雨试验指出,SWR主要影响初始产流时间,而对总产流量无显著影响。本研究虽未监测初始产流时间,但在总产流量方面支持其结论。Fallah等[6]进一步提出,SWR对侵蚀具有水文效应与机械效应的双重作用:一方面通过减少入渗、促进径流而驱动侵蚀,另一方面通过增强团聚体稳定性提高土壤抗蚀性。本研究中,WL和L处理的高SWR可能增强了团聚体稳定性,从而抑制侵蚀;而O处理中斥水性程度虽不高,但因缺乏覆盖与结构保护,土壤更易被剥离与输移。这种双重机制的存在,使得SWR引起的实际侵蚀效应高度依赖具体地表条件与侵蚀动力的匹配关系。

综上,尽管SWR在特定条件下可能影响入渗与产流启动,但在坡面尺度上,其并非决定径流与泥沙输移的核心驱动因子。相对于地表覆盖状况、坡度及管理方式等因素,SWR的作用更多表现为一种协同或从属的调控变量,其最终水文效应取决于多因子耦合作用下的系统行为。未来工作除了明确SWR对产流起始的阈值影响外,还应重点关注斥水性如何改变土壤颗粒的垂直溅射与分离行为,从而阐明其在早期侵蚀阶段的作用。

4 结 论

(1)地表覆盖是影响SWR的关键因素。保留灌草与枯落物能显著增强SWR并维持其相对稳定,其中灌草盖度是除土壤含水率外最主要的影响因子。

(2)不同地表覆盖处理的水土保持效益差异显著,L和WL处理由于保留了良好的地表覆盖,显著发挥了减流减沙效益,O和F处理则因覆盖缺失或受损,导致侵蚀风险显著升高。

(3)灌草和枯落物覆盖会显著增强SWR,但并未因此导致产流产沙的显著增强,相比之下,地表覆盖的物理防护作用在水土保持中仍然起主导作用。

综上,地表覆盖对径流和泥沙的控制作用大于SWR的影响,因此在桉树人工林经营中,应优先维持林下灌草和枯落物覆盖,减少地表清理与火烧,以充分发挥其物理防护功能来实现水土保持目标。

参考文献(References):

[1] 黄国勤,赵其国.广西桉树种植的历史、现状、生态问题及应对策略[J].生态学报,2014,34(18):5142-5152.
Huang G Q, Zhao Q G. The history, status quo, ecological problems and countermeasures of *Eucalyptus* plantations in Guangxi[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(18):5142-5152.

[2] 刘立超,杨昊天,李新荣,等.土壤斥水性及其生态水文效应研究进展[J].地球科学进展,2011,26(9):926-932.
Liu L C, Yang H T, Li X R, et al. The advances in soil water repellency and its eco-hydrological effects [J]. Advances in Earth Sciences, 2011,26(9):926-932.

[3] 杨邦杰.土壤斥水性引起的土地退化、调查方法与改良措施研究[J].环境科学,1994,15(4):88-90.
Yang B J. Study on land degradation caused by soil water repellency, investigation methods and improvement measures[J]. Environmental Science, 1994,15(4):88-90.

[4] 李毅,商艳玲,李振华,等.土壤斥水性研究进展[J].农业机械学报,2012,43(1):68-75.
Li Y, Shang Y L, Li Z H, et al. Advance of study on soil water repellency [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(1):68-75.

[5] 闵雷雷,于静洁.土壤斥水性及其对坡面产流的影响研究进展[J].地理科学进展,2010,29(7):855-860.
Min L L, Yu J J. Progress in the research of soil water

repellency and its influences on overland flow generation [J]. Progress in Geography, 2010,29(7):855-860.

[6] Fallah M, Van De Wiel M, Holtzman R. Hydrological *vs*. mechanical impacts of soil water repellency on erosion [J]. Earth-Science Reviews, 2025,261:105022.

[7] Sándor R, Iovino M, Lichner L, et al. Impact of climate, soil properties and grassland cover on soil water repellency[J]. Geoderma, 2021,383:114780.

[8] 郭倩汝,许彦红,杨旭,等.昆明市海口林场栎类林分枯落物层及土壤层水源涵养功能的研究[J].西南林业大学学报(自然科学),2021,41(4):136-143.
Guo Q R, Xu Y H, Yang X, et al. Study on water conservation function of litter layer and soil layer of oak stand in Haikou forest farm of Kunming[J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2021, 41(4):136-143.

[9] 徐露,张丹,向宇国,等.不同耕作措施下金沙江下游紫色土区坡耕地产流产沙特征[J].山地学报,2020,38(6):851-860.
Xu L, Zhang D, Xiang Y G, et al. Runoff and sediment yield of sloping farmland in purple soil area of the lower Jinsha River under different

[10] Roy J L, McGill W B. Assessing soil water repellency using the molarity of ethanol droplet (med) test[J]. Soil Science, 2002,167(2):83-97.

[11] King P M. Comparison of methods for measuring severity of water repellence of sandy soils and assessment of some factors that affect its measurement[J]. Australian Journal of Soil Research, 1981,19(3):275-285.

[12] 任杰,柏延臣,王锦地.从数码照片中快速提取植被覆盖度的方法研究[J].遥感技术与应用,2010,25(5):719-724.
Ren J, Bai Y C, Wang J D. An efficient method for extracting vegetation coverage from digital photographs [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2010, 25(5):719-724.

[13] 王维维.宁夏云雾山草地恢复进程中土壤斥水与影响因素[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2023.
Wang W W. Soil water repellency and influencing factors during the restoration process of grassland in Yunwu Mountain in Ningxia[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2023.

[14] Lichner L, Hallett P D, Feeney D S, et al. Field measurement of soil water repellency and its impact on water flow under different vegetation [J]. Biologia, 2007,62(5):537-541.

[15] Razipoor E, Mukherjee S, Schütt B. Spatiotemporal variability of soil water repellency in urban parks of berlin[J]. Soil Systems, 2025,9(2):31.

[16] Benito Rueda E, Rodríguez-Alleres M, Varela Teijeiro E. Environmental factors governing soil water repellency dynamics in a *Pinus pinaster* plantation in NW Spain[J]. Land Degradation & Development, 2016, 27(3): 719-728.

[17] 王严,胡卸文,杨瀛,等.火烧迹地土壤斥水性和渗透性变化特性[J].水文地质工程地质,2019,46(6):40-45.
Wang Y, Hu X W, Yang Y, et al. Research on the change in soil water repellency and permeability in burned areas[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(6):40-45.

[18] Lucas-Borja M E, Fernández C, Plaza-Alvarez P A, et al. Variability of hydraulic conductivity and water repellency of soils with fire severity in pine forests and reforested areas under Mediterranean conditions [J]. Ecohydrology, 2022,15(8):e2472.

[19] 高飞.黄土丘陵沟壑区植被特征与产流产沙的响应关系[D].北京:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心),2021.
Gao F. The relationship between vegetation characteristics and sediment yield in loess hilly and Gully Region[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Research Center for Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education), 2021.

[20] 何玉广,信忠保,余新晓,等.模拟降雨条件下侧柏林地枯落物对坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2017,31(3):27-32,38.
He Y G, Xin Z B, Yu X X, et al. Influence of litter layer of *Platycladus orientalis* forests on runoff and sediment yield of the slope under simulated rainfall[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017,31(3):27-32,38.

[21] 龚顺清,陈奇伯,黄新会,等.多年连续计划烧除对云南松林坡面水土流失的影响[J].水土保持研究,2022,29(3):18-24.
Gong S Q, Chen Q B, Huang X H, et al. Prescribed burning effects on slope runoff and soil loss in a *Pinus yunnanensis* forest of Yunnan[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(3):18-24.

[22] Samdaliri H, Jourgholami M, Salajegheh A, et al. Runoff and sediment response to different fire intensities in a Hyrcanian mixed broadleaved forest ecosystem[J]. Land Degradation & Development, 2025, 36(15): 5405-5418.

[23] Dogiso D, Muluneh A, Ketema A. Surface runoff and sediment yield responses to land use and cover changes: Implications for watershed management in the gidabo watershed, Ethiopia[J]. Hydrological Processes, 2025, 39(8):e70245.

[24] He Y, Fan Z H, Zhao W, et al. Effects of different vegetation litter cover on hydrodynamic characteristics of soil runoff-sediment yield in Taiyi Mountain area of northern China [J]. International Journal of Sediment Research, 2025,40(4):588-599.

(下转第 39 页)