DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.06.022 CSTR:32311.14.rswc.2026.06.022
左继超, 沈发兴, 谢林波, 等. 红壤丘陵区林草覆被类型对坡面产流产沙及氮磷流失的影响[J]. 水土保持研究,2026,33(6):1-11.
Zuo Jichao, Shen Faxing, Xie Linbo, et al. Effects of forest and grass cover types on runoff, sediment yield, and nitrogen and phosphorus losses on slopes in red soil hilly regions[J]. Research of Soil and Water Conservation,2026,33(6):1-11.

红壤丘陵区林草覆被类型对坡面产流产沙及氮磷流失的影响

左继超[1,2], 沈发兴[1,2], 谢林波[1,2], 莫明浩[1,2], 石芬芬[1,2]
(1.流域水土保持江西省重点实验室 江西省水利科学院, 南昌 330029;
2.江西省鄱阳湖流域生态水利技术创新中心, 南昌 330029)

摘 要:[目的]明确红壤丘陵区不同林草覆被类型在不同降雨条件下对坡面产流产沙及氮磷流失的调控作用,探究降雨特征与林草覆被类型对坡面产流产沙及氮磷流失的影响机制,为红壤丘陵区水土保持与生态修复提供理论依据。[方法]以江西省赣州市兴国县蕉溪小流域内5个坡度15°的标准径流小区为研究对象,于2023年3月23日—2024年7月26日,对逐场次自然降雨下的产流、产沙及氮磷流失情况开展了监测,并运用K均值聚类法将降雨划分为3种类型,比较了不同林草覆盖类型下各雨型的产流产沙及氮磷流失特征。[结果](1)雨型Ⅰ(高频次、小雨量、短历时、大雨强)是引发水土流失的主导类型,观测期内发生频率达60.94%,贡献了50.76%的径流量和51.40%的泥沙流失量,不同林草覆盖类型径流小区累积径流量、泥沙流失量总体表现为草地(T_4)<针阔混交林(T_2)<经果林(T_5)<针叶林(T_3)<裸露小区(T_1);(2)不同林草覆盖措施均具有明显减流、减沙效益,试验期内T_2,T_3,T_4,T_5综合减流效益分别达94.28%,80.96%,99.16%,85.59%,综合减沙效益分别达99.35%,96.45%,99.90%,96.36%,且减沙效果大于减流效果;除T_4处理外,各处理的径流深、侵蚀量与降雨量、最大30 min雨强、降雨侵蚀力均呈极显著正相关($p<0.01$);(3)氮磷流失与径流、泥沙极显著相关(相关系数0.799~0.987),泥沙携带是氮磷流失主要途径,各处理泥沙氮磷消减率多超过91%,以T_1为对照,T_2—T_5在径流、泥沙中氮磷流失量显著降低,T_4成效最佳,总氮、总磷随泥沙流失占比远高于随径流损失占比。[结论]降雨特征与林草覆被类型对坡面产流产沙及氮磷流失影响显著,雨型Ⅰ会加剧水土流失,草地和针阔混交林水土保持效果突出。

关键词:红壤丘陵区; 降雨特征; 林草覆被类型; 坡面产流产沙; 氮磷流失
中图分类号:S157.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-3409(2026)06-0001-11

Effects of forest and grass cover types on runoff, sediment yield, and nitrogen and phosphorus losses on slopes in red soil hilly regions

Zuo Jichao[1,2], Shen Faxing[1,2], Xie Linbo[1,2], Mo Minghao[1,2], Shi Fenfen[1,2]
(1.*Jiangxi Key Laboratory of Watershed Soil and Water Conservation, Jiangxi Academy of Water Science and Engineering, Nanchang* 330029, *China*; 2.*Jiangxi Province Poyang Lake Basin Ecological Water Conservancy Technology Innovation Center, Nanchang* 330029, *China*)

Abstract: [**Objective**] This study clarifies the regulatory effects of different forest and grass cover types on slope runoff, sediment yield, and nitrogen and phosphorus losses under different rainfall conditions in red soil hilly regions, explores the mechanisms by which rainfall characteristics and forest and grass cover types influence runoff, sediment, and nutrient losses on slopes, and provides a theoretical basis for soil and water conservation and ecological restoration in red soil hilly regions. [**Methods**] Five standard runoff plots with a slope of 15° in the

收稿日期:2026-02-05 **修回日期:**2026-02-14 **接受日期:**2026-03-09
资助项目:国家自然科学基金(42067020);江西水利科技重点项目(202527ZDKT13, 202325ZDKT02);江西省“双千计划”项目(JXSQ2023201069)
第一作者:左继超(1987—),男,河北承德人,博士,高级工程师,主要从事水土保持与坡耕地氮循环研究。E-mail:jczuo1121@163.com
通信作者:莫明浩(1981—),男,江西抚州人,博士,教授级高级工程师,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:mominghao@126.com

Jiaoxi small watershed, Xingguo County, Ganzhou City, Jiangxi Province, were selected as the study sites. From March 23, 2023 to July 26, 2024, runoff, sediment yield, and nitrogen and phosphorus losses under individual natural rainfall events were monitored. Rainfall was classified into three types using the *K*-means clustering method, and the characteristics of runoff, sediment yield, and nitrogen and phosphorus losses under each rainfall type across different forest and grass cover types were compared. [**Results**] (1) Rainfall type Ⅰ (high frequency, low rainfall amount, short duration, and high rainfall intensity) was the dominant type triggering soil erosion. During the observation period, its occurrence frequency reached 60.94%, contributing 50.76% of the runoff volume and 51.40% of the sediment loss. The cumulative runoff volume and sediment loss for runoff plots under different forest and grass cover types generally followed the order: grass plot (T_4) < conifer-broadleaf mixed forest plot (T_2) < economic fruit forest plot (T_5) < coniferous forest plot (T_3) < bare plot (T_1). (2) Different forest and grass cover measures all demonstrated obvious benefits in reducing runoff and sediment. During the experimental period, the comprehensive runoff reduction benefits of T_2, T_3, T_4, and T_5 reached 94.28%, 80.96%, 99.16%, and 85.59%, respectively, and the comprehensive sediment reduction benefits were 99.35%, 96.45%, 99.90%, and 96.36%, respectively, with the sediment reduction effect being greater than the runoff reduction effect. Except for the T_4 treatment, the runoff depth and erosion amount of the other treatments were significantly positively correlated with rainfall amount, maximum 30-min rainfall intensity, and rainfall erosivity ($p < 0.01$). (3) Nitrogen and phosphorus losses were highly significantly correlated with runoff and sediment (correlation coefficients ranging from 0.799 to 0.987). Sediment-borne transport was the main pathway for nitrogen and phosphorus losses. The nitrogen and phosphorus reduction rates in sediment for each treatment mostly exceeded 91%. Compared with T_1, the nitrogen and phosphorus losses in runoff and sediment for T_2—T_5 were significantly reduced, with T_4 showing the best performance. The proportion of total nitrogen and total phosphorus lost via sediment was much higher than that lost via runoff. [**Conclusion**] Rainfall characteristics and forest and grass cover types significantly affect runoff, sediment yield, and nitrogen and phosphorus losses on slopes. Rainfall type Ⅰ exacerbates soil erosion, while grassland and conifer-broadleaf mixed forests exhibit outstanding soil and water conservation effects.

Keywords: red soil hilly regions; rainfall characteristics; forest and grass cover types; slope runoff and sediment yield; nitrogen and phosphorus losses

水土流失与氮磷面源污染作为全球性重大环境问题,严重制约社会经济的可持续发展,威胁生态安全与人类福祉。鄱阳湖流域红壤丘陵区是中国南方水土流失及氮磷面源污染的典型敏感区,其生态状况关乎区域生态安全格局[1]。该区域虽植被覆盖度较高,但仍存在植被结构单一等问题[2],多数林地缺乏乔灌草相结合的立体植被结构,难以形成多层次、全方位的生态防护体系[3];同时,林下土壤条件差,土质疏松、腐殖质匮乏,土壤抗侵蚀能力弱,水土保持与水源涵养功能显著降低[4-5]。据2021年数据,江西省林地水土流失面积达11 122.38 km^2,占水土流失总面积的81.73%,中度及以上水土流失加剧土壤侵蚀,大幅增加了氮磷等营养物质流失风险,威胁区域生态平衡[1,6]。深入剖析红壤丘陵区坡面产流产沙及氮磷流失的规律,对提升区域水土保持效能、削减氮磷面源污染输出意义重大,也是当前水利生态领域亟待解决的关键科学问题。

在众多影响水土流失的因素中,降雨与植被覆盖对坡面产流产沙及氮磷流失的作用机制,是揭示区域水土资源演变规律、制定科学治理策略的关键所在[7-8]。降雨作为坡面产流产沙及氮磷流失的直接驱动力,其特征参数的细微变化均可能引发显著的生态响应[9-10]。现有研究普遍表明,在降雨冲刷与径流携带的双重作用下,表层土壤中的部分氮素和大部分磷素以泥沙为载体随径流迁移,且径流中的氮磷输出量通常随降雨量和降雨强度的增大而增加[11-12]。然而,关于氮磷流失量与降雨强度的定量关系,学术界尚未达成统一共识。有研究表明[13],地表径流中氮磷养分浓度与各降雨参数并未呈现出显著的相关关系;而彭浩等[14]研究发现,随着降雨强度的增加,氮磷流失浓度呈上升趋势,但流失量与降雨强度的关联性尚不明确,有待进一步验证;事实上,降

雨条件不仅直接影响产流产沙特征,还通过改变土壤水分状况、侵蚀动力等间接影响氮磷的迁移转化[15-16]。降雨量、降雨强度及历时作为表征降雨特征的核心要素,不同组合下可产生具有相似降雨侵蚀力的事件,其对坡面过程的影响具有复杂性和多样性[3,17]。因此,深入剖析降雨作为触发因素所引发的直接或间接影响,对于准确评估区域氮磷流失风险具有重要意义。林草覆被类型作为坡面的重要生态屏障,通过其独特的植被结构和生态功能,对降雨特征产生的影响起到缓冲和调节作用,进而影响坡面产流产沙及氮磷流失[18-19]。不同林草覆被类型具有不同的冠层结构、根系分布和枯落物层厚度,这些因素共同决定了其对降雨的截留、吸收和分散能力[13,20]。例如,乔木林冠层茂密,能够有效截留一部分降雨,减少雨滴对坡面的直接打击,降低土壤侵蚀动力;草本植物根系发达,能够增强土壤的抗剪强度,提高土壤稳定性[18,21]。国内外学者针对不同水土保持措施对坡地水土流失、养分流失和土壤结构的影响开展了大量研究,取得了丰富成果[22-23]。如黄薇等[24]对比了高寒区5种典型植被覆盖下的地表产流及氮磷流失特征,揭示了不同植被类型在截流和控制养分方面的差异;宋民欣等[21]则从林草覆被格局的角度对比分析了三峡库区坡面水沙产出的特征,探讨了不同林草覆盖格局水土保持的差异。

由此可见,降雨条件与林草覆被类型作为影响坡面产流产沙及氮磷流失的两大核心因子,其交互作用下的效应差异显著。红壤丘陵区作为我国南方典型的生态脆弱区,其独特的土壤性质与地形地貌,使得降雨特征和林草覆被类型对坡面过程的影响更为复杂,亟待深入探究。然而,目前针对红壤丘陵区特定降雨特征与不同林草覆被类型组合下坡面产流产沙及氮磷流失的深入研究仍相对不足。鉴于此,本研究聚焦于鄱阳湖流域红壤丘陵区典型林地类型——马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)林,通过设置不同林草覆被类型的标准径流小区,开展长期、系统的观测试验,监测不同坡面产流产沙及氮磷流失特征,探究降雨特征与林草覆被类型对坡面产流产沙及氮磷流失的影响机制,为该区域水土保持措施的合理配置、植被恢复与重建提供科学依据和技术支撑。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于江西省赣州市兴国县蕉溪小流域的国家水土保持监测站点水力侵蚀重点站黄金坪坡面径流场(中心坐标:115°13′45″—115°15′35″E,26°16′30″—26°21′00″N),地处赣南山区的兴国县西部的永丰乡境内,属赣江流域贡水水系平江支流的一条小流域,土地总面积为36.8 km^2。该研究区域属亚热带季风气候区,年平均气温为19.0 ℃,年平均降水量为1 545.6 mm,降雨量多集中在4—7月,年平均日照1 634.3 h,平均无霜期279 d。小流域的地貌类型以丘陵为主,海拔高度160～500 m,区域内土壤类型为红壤,成土母质为花岗岩类风化物,土质结构松散,腐殖质含量极低,易被冲刷,侵蚀强度多为轻、中度等级。区域内水土保持植物措施以马尾松为主,伴有枫香(*Liquidambar formosana* Hance)、木荷(*Schima superba* Gardn. & Champ.)等阔叶林,以及胡枝子(*Lespedeza bicolor* Turcz.)、铁芒萁〔*Dicranopteris linearis* (Burm. f.) Underw.〕、茅草〔*Imperata cylindrica* (L.) P. Beauv.〕等林下灌草,在赣南水土流失治理中较为典型。

1.2　试验设计

根据蕉溪小流域地形条件和植被类型特征,在小流域内共设置5个坡度为15°的标准径流小区,径流小区为原位布设,自2008年建成后未经扰动,土壤植被保存完好,每个小区投影面积100 m^2。试验设置5个不同林草覆被类型处理(表1),分别为种植马尾松+木荷+铁芒萁(针阔混交林,T_2),种植马尾松+铁芒萁(针叶林,T_3),种植混合草(草地,T_4),种植油茶(*Camellia oleifera* Abel.)(经果林,T_5),并设置裸露小区(T_1)作为对照,定期去除杂草。小区均按长20 m,宽5 m设计,每个小区周边设置砖砌围埂,围埂高出地面30 cm,埋入地下60 cm,以防止串流;小区下部修建集流池,以承接小区径流泥沙,并通过PVC管引入集流池,集流池采用三级分流(一级分流池、二级分流池、集流池),分流池、集流池均是长方体,长1.2 m,宽1 m,无加盖,一级分流池分流高度1 m,二级分流池分流高度0.8 m,均采用5孔分流。观测径流小区位于坡中部,自动气象站位于观测场右下角,距离观测场1 m处。

1.3　样品采集与测定方法

(1)降雨-产流-产沙观测。试验期(2023年3月23日—2024年7月26日)进行逐场次自然降雨条件下的产流、产沙观测,以6 h为降雨间隔时间。降雨过程数据来源于坡面径流场范围内的RG3-M自计式雨量筒,分辨率0.2 mm,观测指标包括降雨量、降雨历时,进一步计算雨强。通过径流小区的集流池进行径流泥沙样品采集,观测指标包括产流量、产沙量、径流系数、含沙量。每次降雨结束后,记录径流池壁的水位,由预先率定的径流池内壁长、宽数据计算得到地

表产流量;每次产流结束后,将各径流池中的水充分搅拌均匀后迅速采集500 ml水样于塑料瓶中,现场加酸稳定后立即带回实验室置于4 ℃冰箱保存,在72 h内分析径流样氮磷含量;然后将径流池中水充分搅拌均匀,迅速取500 ml径流至铝盒,采用烘干法测定径流含沙量;最后将径流池中水放干,将池底和集流槽中泥沙先收集称重并记录,然后充分混匀收集500 g泥沙样装袋、风干备用,进行泥沙样氮磷含量测定。

表1 径流小区基本情况

Table 1 Basic information of runoff plots

小区编号	覆被类型	小区坡度/(°)	小区面积/m^2	整地方式和措施处理	说明
T_1	裸露小区	15	100	裸露对照,定期除草	
T_2	针阔混交林	15	100	穴垦,马尾松+木荷+铁芒萁	种植密度3 000株/hm^2;马尾松平均胸径4.3 cm,平均树高3.1 m;木荷平均胸径4.1 cm,平均树高3.2 m
T_3	针叶林	15	100	全垦,马尾松+铁芒萁	种植密度3 000株/hm^2;平均胸径4.8 cm,平均树高3.2 m
T_4	草地	15	100	全垦,混合草	植被覆盖度96%
T_5	经果林	15	100	穴垦,油茶+水平阶	种植密度3 000株/hm^2;平均胸径3.1 cm,平均树高2.0 m,水平阶宽1 m

(2)氮磷含量检测。养分流失观测以水沙样品为基础,包括总氮、总磷、可溶性氮、可溶性磷。径流样品首先充分摇匀取适量测定总氮、总磷含量,然后将剩余水样经0.45 μm滤膜过滤后,测定可溶性氮、可溶性磷含量。泥沙样风干后进行分析,测定总氮、总磷含量。总氮、可溶性氮采用连续流动-盐酸萘乙二胺分光光度法测定,总磷、可溶性磷采用连续流动-钼酸铵分光光度法测定。

1.4 数据处理

利用SPSS 24.0软件中K均值聚类法对降雨量、降雨历时、平均降雨强度进行统计处理,用K均值聚类法区分侵蚀性降雨类型,将观测期内64场降雨划分为3类;以64场降雨-径流事件所采集的数据为基础,利用响应面方法(Response Surface Methodology,RSM)构建径流深、土壤流失量与养分流失量间的三维曲面,进而分析次降雨产流产沙对养分流失特征的影响;利用IBM SPSS 24.0和Office Excel 2019软件进行数据计算和统计分析,用相关系数法分析产流产沙的影响因素,用OriginPro 2021绘图。采用Pearson相关性检验进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 降雨类型的划分及其基本特征

本研究基于K-means聚类分析方法,以降雨量、雨强、降雨历时3个指标作为聚类分析的特征值,进行降雨类别划分,运用肘部法则确定K值为3,遂将雨型划分为Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ3种类型。由方差分析结果(表2)可知,研究区各降雨特征值总体差异性显著($p<0.05$),降雨量和降雨历时差异性极显著($p<0.01$)。因此,通过K均值聚类分析法划分研究区侵蚀性降雨类型的结果是有效的。

表2 研究区降雨K均值聚类分析结果方差分析

Table 2 Analysis of variance of K-means clustering analysis results of rainfall in study area

降雨参数	聚类		误差		F	p
	均方	df	均方	df		
降雨量	6599.64	2	552.34	50	11.95	0.000
降雨历时	14509176.28	2	84959.60	50	170.78	0.000
降雨强度	191.02	2	37.15	50	5.14	0.009

注:df为自由度,F为统计量,p为显著性。

试验期间,收集到产流产沙的降雨场次共64场,总降雨量为1 845.7 mm。根据不同降雨类型的特征参数值,观测期内蕉溪小流域侵蚀性降雨可划分为3种类型,分别为Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ(表3)。采用SPSS频率统计分析,以不同指标的25%和75%分位数取值作为指标常规变化范围,雨型Ⅰ降雨特征为高频次(60.94%)、小雨量(10.8~24.1 mm)、短历时(257~1 027 min)、大雨强(3.4~9.0 mm/h),雨型Ⅱ特征为中频率(35.94%)、中雨量(24.4~38.1 mm)、中历时(285~1 240 min)、小雨强(1.4~3.5 mm/h),雨型Ⅲ特征为低频率(3.12%)、大雨量(103.3 mm)、长历时(3 682 min)、中雨强(5.3 mm/h)。

3种降雨类型中,雨型Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ降雨量分别为819.3,819.8,206.6 mm;雨型Ⅰ的平均降雨强度最大,其次为雨型Ⅲ,雨型Ⅱ最小,雨型Ⅰ平均雨强为7.8 mm/h,是雨型Ⅱ,Ⅲ的2.9,1.5倍,最大30 min降雨强度I_{30}呈现为雨型Ⅲ>雨型Ⅰ>雨型Ⅱ;雨型Ⅲ平均降雨侵蚀力最大,为684.5 MJ·mm/(hm^2·h),其次为雨型Ⅰ,雨型Ⅱ最小。观测期以小雨量、短历时、大雨强的雨型Ⅰ为主,发生频率最高,为60.94%,降雨量占比为44.39%;雨型Ⅱ(中雨量、中历时、小雨强)、雨型Ⅲ(大雨量、长历时、中雨强)发生频率分别为35.94%,3.12%。但雨型Ⅲ以极低发生频率的占比贡献了11.19%的降雨量。

表 3　研究区不同降雨类型的特征参数

Table 3　Characteristic parameters of different rainfall types in study area

雨型	频次	参数	降雨量/mm	降雨历时/min	平均降雨强度/(mm·h^{-1})	I_{30}/(mm·h^{-1})	降雨侵蚀力/(MJ·mm·hm^{-2}·h^{-1})
Ⅰ	39	总和	819.3	12495			9044.77
		均值	21.01	783	7.8	26.2	231.92
		P_{75}	24.1	1027	9.0	32.6	194.13
		P_{25}	10.8	257	3.4	11.3	22.87
Ⅱ	23	总和	819.8	27075			4851.67
		均值	35.6	885	2.7	18.1	210.94
		P_{75}	38.1	1240	3.5	23.8	125.96
		P_{25}	24.4	285	1.4	8.1	25.82
Ⅲ	2	总和	206.6	7365			1729.00
		均值	103.3	3682	5.3	43.5	864.50

注:P_{25}和P_{75}分别代表 25% 和 75% 分位数对应的数值。

2.2　产流产沙特征对降雨的响应

根据雨型划分和次降雨坡面径流泥沙流失情况,可得不同雨型下各小区坡面径流量(图 1A)和泥沙流失量特征(图 1B),不同林草覆盖类型径流小区的累积径流量、泥沙流失量总体表现为 $T_4<T_2<T_5<T_3<T_1$。具体来看,T_1,T_2,T_3,T_4,T_5的累积径流深分别为 654.24,37.42,124.56,5.53,94.26 mm,累积泥沙流失量分别为 341.69,2.24,12.13,0.33,12.45 kg/hm^2。64 场侵蚀性降雨共导致 916.01 mm 的径流深,其中,Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ雨型的径流量分别为 464.93,356.63,94.44 mm,占比分别为 50.76%,38.93%,10.31%;导致 368.83 kg/hm^{2}的侵蚀量,Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ雨型分别产出泥沙 189.57,148.54,30.73 kg/hm^2,同样主要由雨型Ⅰ贡献(占比 51.40%)。可见,水土流失主要发生在小雨量、短历时、大雨强的雨型Ⅰ中。T_1处理中,由雨型Ⅰ、雨型Ⅱ、雨型Ⅲ贡献的径流和泥沙流失占比分别为 53.96%,36.81%,9.23% 和 51.96%,39.42%,8.61%,其径流、泥沙输出主要由雨型Ⅰ贡献;T_2,T_3,T_5处理中,雨型Ⅰ对径流输出贡献率均有所降低,T_3,T_4,T_5对泥沙输出贡献率有所减少。

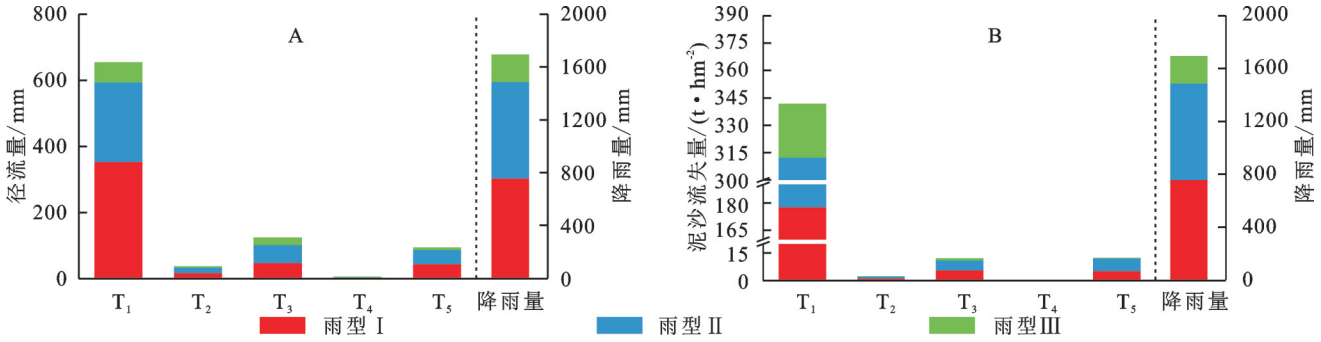


图 1　不同植被类型坡面累积径流量和泥沙流失量

Fig. 1　Cumulative runoff volume and sediment loss on slopes under different vegetation cover types

不同林草覆盖类型产流产沙对降雨特征的响应也存在差异(图 2),雨型Ⅰ的径流量和侵蚀量与整体占比较为相似,说明各处理对雨型Ⅰ响应相近,且各雨型下T_1的产流、产沙量占比始终最大;而雨型Ⅱ、雨型Ⅲ条件下,T_1的产流、产沙量占比有所减少,T_3产流、产沙占比则有所增加,这表明不同林草覆盖处理措施能够改变坡面产流产沙对降雨特征的响应模式。

以T_1为参照,不同林草覆盖措施均具有明显的减流、减沙效益,在试验期内T_2,T_3,T_4,T_5综合减流效益分别达 94.28%,80.96%,99.16%,85.59%(图 3A),综合减沙效益分别达 99.35%,96.45%,99.90%,96.36%(图 3B)。但不同草被覆盖小区的减流、减沙效益对降雨类型的响应不同,雨型Ⅰ中,T_2,T_3,T_4,T_5的平均减流效益分别为 95.00%,86.64%,99.05%,87.61%,平均减沙效益分别达 99.33%,96.87%,99.91%,97.11%;雨型Ⅱ中,平均减流效益分别为 93.37%,77.19%,99.42%,81.93%,平均减沙效益分别为 99.25%,95.84%,99.87%,94.77%;雨型Ⅲ下,平均减流效益分别为 93.74%,62.85%,98.70%,88.38%,平均减沙效益分别为 99.84%,96.74%,99.97%,99.07%。总体而言,各覆被措施的减沙效果要大于减流效果,

尤其是在发生率高的雨型Ⅰ中，减流效益达86%以上，减沙效益达到96%以上。这表明，所有林草覆被类型都具有一定的水土流失防治能力。但不同措施在不同雨型下有所差异，如T_2，T_4减流效益在各雨型表现分别为69.50%～99.86%，84.66%～99.77%，减沙效益分别为45.66%～99.95%，93.78%～99.98%，而T_3，T_5的水土保持效益在各雨型中则不太稳定，减流效益分别为39.78%～95.48%，23.59%～99.63%，减沙效益分别为65.42%～99.35%，50.70%～99.74%，且各效益均低于T_2，T_4。

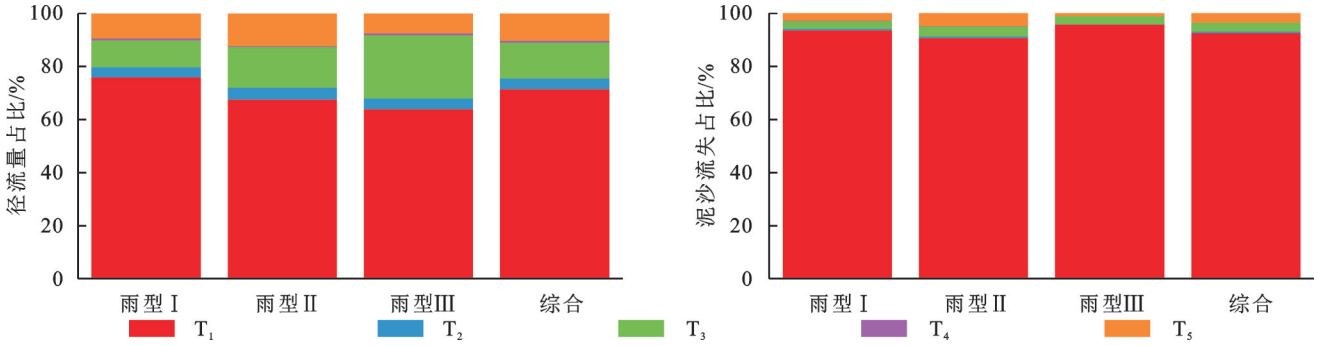


图2 不同配置模式地表径流和泥沙流失占比

Fig. 2 Proportion of surface runoff and sediment loss under different configuration modes

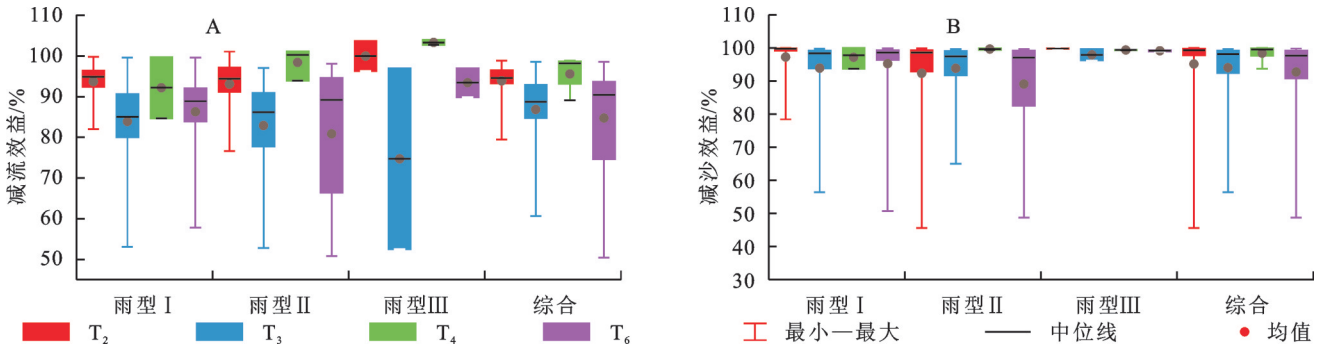


图3 不同处理各雨型下减流效益和减沙效益

Fig. 3 Runoff and sediment reduction benefits for different treatments under different rainfall types

进一步对降雨特征因子与坡面侵蚀产沙的相关性分析发现，除T_4处理外，不同林草覆被类型坡面的径流深、侵蚀量与降雨量、最大30 min雨强、降雨侵蚀力均呈极显著正相关($p<0.01$)，而平均降雨强度和降雨历时与径流深、侵蚀量相关性不显著(表4)。总体来看，侵蚀量与降雨特征因子的相关性大小表现为降雨量＞最大30 min雨强＞平均降雨强度＞降雨历时，说明降雨量和最大30 min雨强在反映降雨特征和坡面产流产沙的影响方面具有更好的代表性，而其他指标的解释性相对较弱。

2.3 覆被类型对养分流失特征的影响

针对各径流小区，以64场降雨-径流事件所采集的数据为基础，利用响应面方法构建次降雨径流深、土壤流失量与养分流失量间的三维曲面，进而分析次降雨产流产沙对养分流失特征的影响。如图4所示，反映了不同措施下总氮、可溶性氮、总磷、可溶性磷等养分流失对产流产沙的响应规律。总氮流失随径流和泥沙均有明显递增趋势，径流冲刷和泥沙携带共同驱动总氮流失，可溶性氮随径流量增加呈先递增后略有减小趋势，随泥沙流失量增加无明显变化；总磷流失量特征与总氮类似，同样随径流和泥沙均有明显递增趋势；可溶性磷随径流量增加呈先递增后略有减小趋势。

表4 产流产沙及其与降雨特征相关性分析

Table 4 Analysis of correlation between runoff and sediment yield and rainfall characteristics

指标	处理	降雨量	平均雨强	I_{30}	降雨侵蚀力	降雨历时
径流深	T_1	0.797**	0.287*	0.690**	0.813**	0.178
	T_2	0.729**	0.178	0.515**	0.697**	0.135
	T_3	0.872**	0.182	0.541**	0.757**	0.331*
	T_4	−0.048	−0.337	0.328	0.317	−0.198
	T_5	0.721**	0.185	0.356*	0.534**	0.19
侵蚀量	T_1	0.807**	0.328**	0.758**	0.790**	0.163
	T_2	0.460**	0.016	0.417**	0.558**	−0.019
	T_3	0.631**	0.310*	0.515**	0.721**	0.065
	T_4	−0.083	−0.368	0.273	0.242	−0.145
	T_5	0.541**	0.240	0.329*	0.469**	0.041

注：*表示在0.05水平(双侧)上显著相关；**表示在0.01水平(双侧)上显著相关。

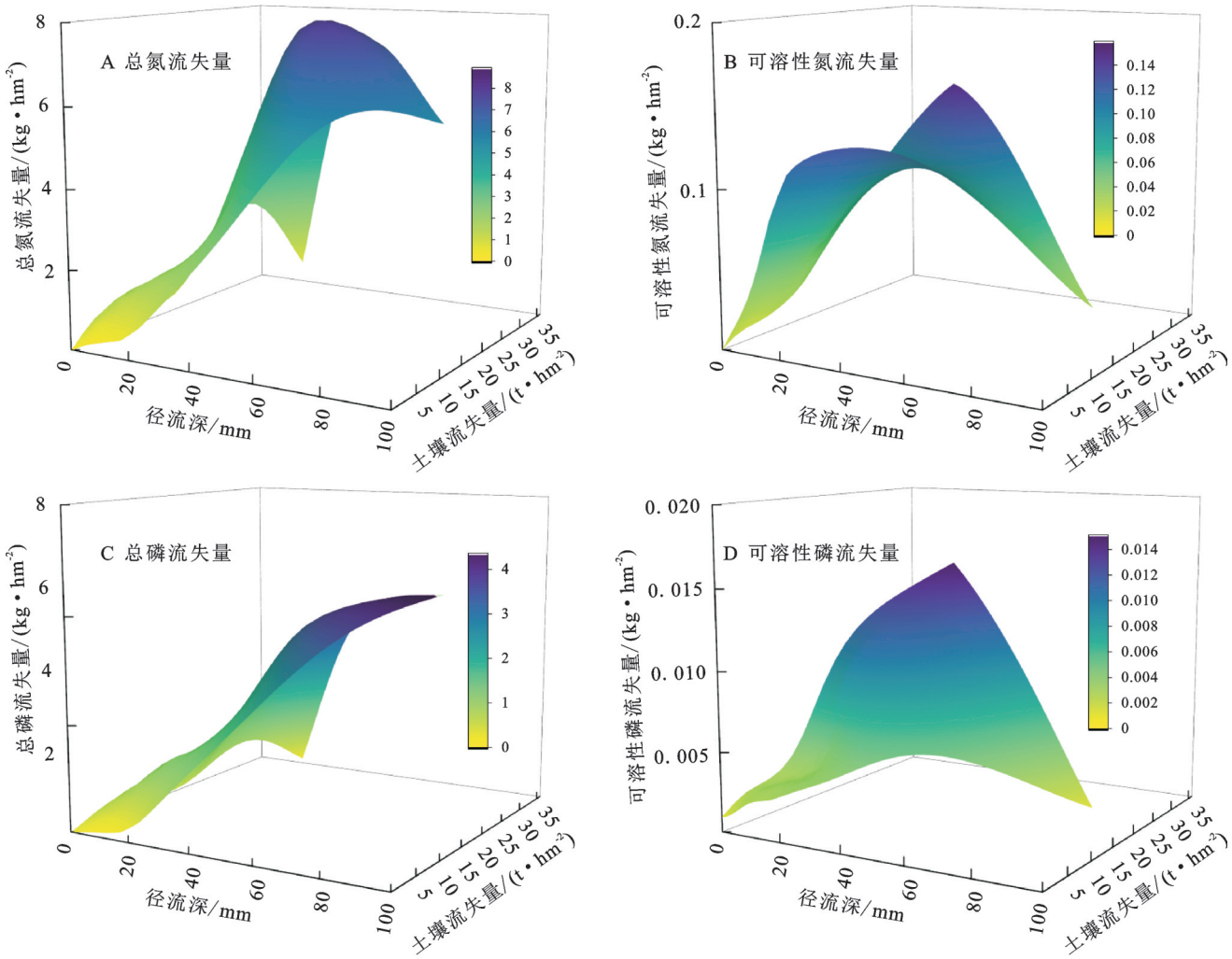


图 4　场次降雨氮磷流失对径流深和土壤流失量的响应曲面图

Fig. 4　Response surface plots of nitrogen and phosphorus losses in individual rainfall events in response to runoff depth and soil loss amount

为进一步确定土壤养分氮磷输出与地表径流以及土壤侵蚀等指标之间的关系,对各处理的次降雨氮磷流失与径流泥沙输出进行 Pearson 相关分析(n=213),结果见表 5。次降雨的总氮、可溶性氮、总磷、可溶性磷流失量均与径流、泥沙输出量表现出极显著相关关系(p<0.01),表明氮磷输出的主要载体确为径流、泥沙。总磷输出量与总氮相关性极显著,表明由侵蚀泥沙所造成的土壤养分流失受侵蚀土壤颗粒控制,且不同土壤养分流失过程存在一定的关联性。

表 5　氮磷流失量与径流泥沙输出的相关关系

Table 5　Correlation of nitrogen and phosphorus losses with runoff and sediment output

指标	径流深	土壤流失量	总氮流失量	可溶性氮流失量	总磷流失量	可溶性磷流失量
径流深	1	0.799**	0.273**	0.189*	0.298**	0.181*
土壤流失量		1	0.263**	0.252**	0.266**	0.286**
总氮流失量			1	0.984**	0.987**	0.970**
可溶性氮流失量				1	0.954**	0.972**
总磷流失量					1	0.962**
可溶性磷流失量						1

注:*表示在0.05水平(双侧)上显著相关,**表示在0.01水平(双侧)上显著相关。

从图 5 与图 6 所呈现的数据综合来看,不同林草覆被措施下氮素、磷素累积流失量随径流与泥沙流失总量均展现出显著差异,且在流失特征与控制效果上存在诸多相似与不同之处。在径流养分流失方面,以 T_1 处理作为对照,其径流总氮流失量为 1.38 kg/hm^2,可溶性氮流失量为 0.95 kg/hm^2;径流总磷流

失量为0.13 kg/hm²，可溶性磷流失量为0.08 kg/hm²。与之相比，T_2，T_3，T_4，T_5这4种处理在径流中的总氮、可溶性氮、总磷以及可溶性磷流失量均呈现出明显降低的趋势。具体而言，总氮消减率处于72.47%～98.95%的区间，可溶性氮消减率为66.16%～99.83%；总磷消减率为77.56%～99.43%，可溶性磷消减率处于74.50%～99.87%的范围。其中，T_4处理在减少氮素和磷素径流流失方面成效均最为突出，消减率显著高于其他处理。

在泥沙养分流失方面，各处理随泥沙流失的总氮量差异极为显著，范围为0.04～28.16 kg/hm²，流失量大小顺序表现为$T_1>T_5>T_3>T_2>T_4$；随泥沙流失的总磷量差距同样明显，范围是0.02～15.52 kg/hm²，流失量大小顺序也为$T_1>T_5>T_3>T_2>T_4$。与T_1相比，其余各处理泥沙总氮消减率均超过91.16%，泥沙总磷消减率均高于95.36%。这说明，实施林草覆被措施能够大幅减少氮素和磷素随泥沙的流失，不同处理对泥沙养分流失的控制效果虽有不同，但整体上均能有效降低流失量。通过对比养分随径流与泥沙流失的占比情况发现，总氮、总磷随泥沙流失的占比分别处于73.03%～95.31%，96.51%～99.19%的区间，远高于随径流的损失占比。这表明，在该研究区域内，泥沙携带是氮磷养分流失的主要途径。这可能是由于研究区域的地形、土壤质地以及降雨等因素共同作用，导致土壤侵蚀较为严重，大量氮磷养分附着于泥沙颗粒表面，随泥沙的搬运而流失[5]。

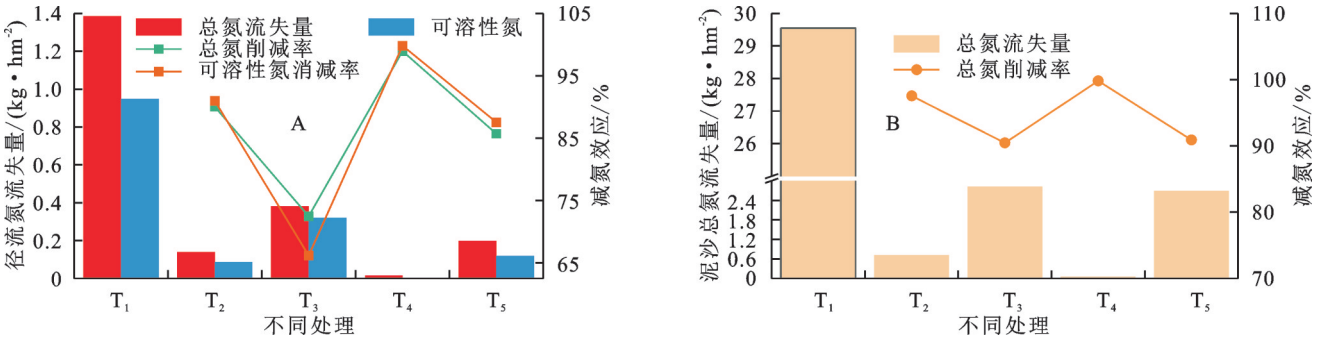


图5 径流、泥沙中氮素累积流失量及消减率

Fig. 5 Cumulative nitrogen loss amount and reduction rate in runoff and sediment

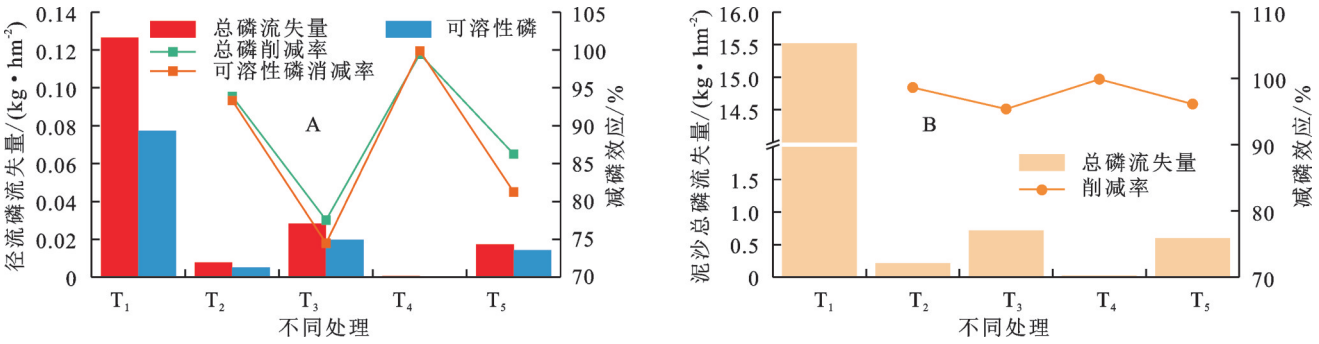


图6 径流、泥沙中磷素累积流失量及消减率

Fig. 6 Cumulative phosphorus loss amount and reduction rate in runoff and sediment

3 讨 论

3.1 降雨特征对坡面产流产沙及氮磷流失的影响

本研究通过*K*-means聚类分析将降雨类型划分为3种（雨型Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ），揭示了不同降雨特征对坡面产流产沙及氮磷流失的显著影响。结果显示，雨型Ⅰ（高频次、小雨量、短历时、大雨强）是导致水土流失的主要降雨类型，其贡献了50.76%的径流量和51.40%的泥沙流失量。这一发现与三峡库区等地的研究结果一致，即短历时高强度降雨对土壤侵蚀的累积效应更为显著[21,25]。进一步分析表明，降雨量与产沙量呈极显著正相关（$p<0.01$），且降雨量在反映降雨特征对坡面产流产沙的影响方面具有更好的代表性。这一结果强调降雨量作为关键因子在土壤侵蚀模型中的重要性。

此外，最大30 min雨强（I_{30}）和降雨侵蚀力也是影响产流产沙的重要因素。雨型Ⅰ的I_{30}值显著高于其他雨型，导致其侵蚀力最强，进一步加剧土壤侵蚀。这一发现与神木侵蚀试验站的研究结果相似，即高强度降雨通过增强雨滴击溅和径流冲刷作用，显著提高了土壤侵蚀速率。值得注意的是，雨型Ⅲ虽然发生频率低，但其单次降雨量大、历时长，仍贡献11.19%的降雨量，表明在长期水土保持规划中，需考虑极端降雨事件的影响。

氮磷流失特征方面,雨型Ⅰ条件下,氮磷流失量显著高于其他雨型。这主要是因为高强度降雨加速了地表径流的形成,增强了径流对土壤养分的冲刷和携带能力。特别是颗粒态氮磷,其流失量与泥沙流失量呈极显著正相关($p<0.01$),表明泥沙携带是氮磷流失的主要途径。这一结果与吴东等[25]试验中的发现一致,即高强度降雨下,氮磷流失以颗粒态为主,且流失量随降雨强度的增加而显著上升。

3.2　林草覆被类型对坡面产流产沙及氮磷流失的影响

本研究通过设置5种不同林草覆被类型处理(裸露小区、针阔混交林、针叶林、草地、经果林),揭示了植被类型对水土保持和养分流失的显著影响。结果显示,草地(T_4)在减少径流和泥沙流失方面表现最优,其综合减流效益达99.16%,综合减沙效益达99.90%。这一结果与芦杰丰等[26]的研究发现相似,即草被通过增加地表糙度和根系固土作用,显著降低了径流和泥沙的产生。研究分析表明,不同林草覆被类型的减流减沙效益存在显著差异。这与其植被结构、根系特征等内在因素密切相关。针阔混交林(T_2)和草地(T_4)的减沙效果优于针叶林(T_3)和经果林(T_5),这主要是因为前者具有乔灌草多层次结构,植被覆盖度高,且根系发达,深根与浅根交错分布,能更有效地拦截径流和固定土壤[8]。特别是草地,其均匀的植被覆盖和密集的根系网络,形成致密的土壤-植被复合体,大大增强了土壤的抗侵蚀能力,使得其在减少泥沙流失方面表现尤为突出。相比之下,针叶林(T_3)因为其植被结构相对单一,多为单一树种,林下植被发育较差,地表覆盖度较低,对径流的拦截和土壤的固定作用有限;同时,针叶林根系多以垂直根为主,水平根系相对不发达,在固土方面存在一定局限性。

在氮磷流失控制方面,草地(T_4)同样表现最优。与裸露小区相比,其径流中总氮和总磷的消减率分别达98.95%和99.43%,泥沙中总氮和总磷的消减率分别达91.16%和95.36%。这一结果与刘海涛等[27]的研究发现一致,即植被覆盖通过减少径流和泥沙的产生,显著降低氮磷的流失量。值得注意的是,不同林草覆被类型对氮磷流失形态的影响也存在差异。例如,草地和针阔混交林在减少颗粒态氮磷流失方面效果更优,这是因为它们丰富的植被和发达的根系能够有效拦截和吸附随泥沙运动的颗粒态氮磷;而针叶林和经果林在减少溶解态氮磷流失方面表现相对较好,可能是由于针叶林凋落物分解产生的某些物质以及经果林施肥管理等因素,在一定程度上影响氮磷在土壤中的存在形态和迁移转化过程,使得溶解态氮磷相对更容易被控制。

3.3　降雨与林草覆被的交互作用及氮磷流失特征

本研究通过分析不同降雨类型下各林草覆被类型的产流产沙和氮磷流失特征,揭示了降雨与植被的交互作用对水土保持和养分流失的影响。结果显示,不同林草覆被类型对降雨特征的响应存在显著差异。例如,在雨型Ⅰ条件下,草地(T_4)的减流效益达99.05%,减沙效益达99.91%,显著高于其他处理。这表明草地在高强度降雨下具有更强的水土保持能力。高强度降雨加速了径流的形成和泥沙的剥蚀,导致氮磷流失量显著增加。然而,草地和针阔混交林通过其茂密的植被和发达的根系,有效减缓了径流速度,减少了泥沙的产生,从而降低了氮磷的流失量[8]。这一结果与长江上游紫色土坡面的模拟试验中的发现相似[13,27],即植被覆盖通过改变坡面糙度和水流路径,显著影响了土壤侵蚀和养分流失过程[8]。

此外,本研究还发现氮磷流失量与径流深和土壤流失量呈极显著正相关($p<0.01$),表明氮磷输出的主要载体是径流和泥沙[10,28]。这一结果与周晗等[29]的研究结果一致,即氮磷流失量随径流和泥沙流失量的增加而显著上升。值得注意的是,总磷输出量与总氮输出量之间也存在极显著正相关($p<0.01$),表明不同土壤养分流失过程之间存在一定的关联性。这可能是因为侵蚀泥沙作为养分流失的主要载体,其携带的氮磷养分在流失过程中保持了相对稳定的比例[30]。

4　结　论

本研究揭示了红壤丘陵区降雨特征与林草覆被类型对坡面产流产沙及氮磷流失的关键影响,发现雨型Ⅰ是导致水土流失的主要降雨类型,其高频次、小雨量、短历时和大雨强的特征显著加剧土壤侵蚀和氮磷流失;草地和针阔混交林在减少径流、泥沙及氮磷流失方面效果最佳。基于此,建议在雨型Ⅰ高发区优先配置草地(成本低、见效快)和针阔混交林(长期固土),兼顾生态与经济效益,如混交林搭配经济树种、草地种植优质牧草。本研究为红壤丘陵区水土保持与生态修复提供了科学依据和技术支持,助力绿色发展。

参考文献(References):

[1]　莫明浩,谢颂华,聂小飞,等.南方红壤区水土流失综合治理模式研究:以江西省为例[J].水土保持通报,2019,39(4):207-213.
Mo M H, Xie S H, Nie X F, et al. Research on patterns of soil and water loss comprehensive harness in red soil region of Southern China[J]. Bulletin of Soil and Water

Conservation, 2019,39(4):207-213.

[2] 袁再健,马东方,聂小东,等.南方红壤丘陵区林下水土流失防治研究进展[J].土壤学报,2020,57(1):12-21.
Yuan Z J, Ma D F, Nie X D, et al. Progress in research on prevention and control of soil erosion under forest in red soil hilly region of South China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020,57(1):12-21.

[3] 晏世杰,段剑,沈发兴,等.套种药材对红壤坡地幼龄油茶园产流产沙及氮磷流失的影响[J].水土保持学报,2024,38(6):70-78.
Yan S J, Duan J, Shen F X, et al. Effects of interplanting medicinal herbs on runoff, sediment and nitrogen and phosphorus losses in young oil tea plantation on red soil sloping field[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(6):70-78.

[4] 梁媛,陈晓安,伍冰晨,等.不同水保措施下红壤坡地泥沙及氮磷流失对雨型的响应[J].水土保持通报,2025,45(4):10-18.
Liang Y, Chen X A, Wu B C, et al. Response of sediment, nitrogen and phosphorus loss to rainfall patterns under different soil and water conservation measures on red soil slopes[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025,45(4):10-18.

[5] 秦伟,左长清,晏清洪,等.红壤裸露坡地次降雨土壤侵蚀规律[J].农业工程学报,2015,31(2):124-132.
Qin W, Zuo C Q, Yan Q H, et al. Regularity of individual rainfall soil erosion in bare slope land of red soil [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015,31(2):124-132.

[6] 聂小飞,郑海金,涂安国,等.南方红壤区长期水土流失综合治理显著减少河流输沙:以鄱阳湖流域赣江上游平江为例[J].湖泊科学,2021,33(3):935-946.
Nie X F, Zheng H J, Tu A G, et al. Long-term soil and water conservation in red soil region of southern China significantly reduced riverine sediment load: a case study of Pingjiang River in the upper reaches of Ganjiang River, Lake Poyang Basin[J]. Journal of Lake Sciences, 2021,33(3):935-946.

[7] Yang S Q, Han R Y, Xing L, et al. Effect of slope farmland soil and water and soil nitrogen and phosphorus loss based on different crop and straw applications and ridge patterns in the basin of the main stream of the Songhua River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(1):42-47.

[8] 朱冰冰,李占斌,李鹏,等.草本植被覆盖对坡面降雨径流侵蚀影响的试验研究[J].土壤学报,2010,47(3):401-407.
Zhu B B, Li Z B, Li P, et al. Effect of grass coverage on sediment yield of rain on slope [J]. Acta Pedologica Sinica, 2010,47(3):401-407.

[9] Yan Y J, Hu Z Y, Wang L J, et al. Impact of extreme rainfall events on soil erosion on karst slopes: a study of hydrodynamic mechanisms [J]. Journal of Hydrology, 2024,638:131532.

[10] 左继超,郑海金,奚同行,等.自然降雨条件下红壤坡地磷素随径流垂向分层输出特征[J].环境科学,2017,38(10):4178-4186.
Zuo J C, Zheng H J, Xi T H, et al. Characteristics of phosphorus output through runoff on a red soil slope under natural rainfall conditions[J]. Environmental Science, 2017,38(10):4178-4186.

[11] 符彪,梁启斌,马建刚,等.滇西蒲缥河流域侵蚀性降雨及产流产沙特征研究[J].西南林业大学学报(自然科学),2024,44(3):121-129.
Fu B, Liang Q B, Ma J G, et al. Characteristics of erosive rainfall and its effects on runoff and sediment yield in the Pupiaohe Basin, western Yunnan[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2024,44(3):121-129.

[12] 邬铃莉,王云琦,王晨沣,等.降雨类型对北方土石山区坡面土壤侵蚀的影响[J].农业工程学报,2017,33(24):157-164.
Wu L L, Wang Y Q, Wang C F, et al. Effect of rainfall patterns on hillslope soil erosion in rocky mountain area of North China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(24): 157-164.

[13] 蒲玉琳,谢德体,林超文,等.紫色土区不同植物篱模式控制坡耕地氮素流失效应[J].农业工程学报,2014,30(23):138-147.
Pu Yu L, Xie D T, Lin C W, et al. Effect of hedgerow patterns controlling nitrogen loss of slope farmland in purple soil area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014,30(23):138-147.

[14] 彭浩,李忠武,刘春,等.湘中低山丘陵区坡面产流输沙对降雨、土壤类型及水保措施的综合响应特征[J].水土保持学报,2019,33(2):60-67.
Peng H, Li Z W, Liu C, et al. Comprehensive response characteristics of runoff and sediment yield on rainfall, soil type and water conservation measures in hilly area of central Hunan province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019,33(2):60-67.

[15] Xia L Z, Hoermann G, Ma L, et al. Reducing nitrogen and phosphorus losses from arable slope land with contour hedgerows and perennial alfalfa mulching in Three Gorges Area, China[J]. Catena, 2013,110:86-94.

[16] 林锦阔,李子君,许海超,等.降雨因子对沂蒙山区不同土地利用方式径流小区产流产沙的影响[J].水土保持通报,2016,36(5):7-12,19.
Lin J K, Li Z J, Xu H C. Effects of rainfall factors on runoff and sediment yield of runoff plots with different land use patterns in Yimeng mountainous area[J]. Bulle-

tin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(5): 7-12,19.

[17] 李建明,丁文峰,冉文建,等.自然降雨特征和作物覆盖对三峡库区紫色土坡耕地产流产沙影响[J].农业工程学报,2025,41(8):137-146.
Li J M, Ding W F, Ran W J, et al. Effects of natural rainfall characteristics and crop coverage on runoff and sediment yield in purple soil slope cultivated land in the Three Gorges Reservoir areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(8):137-146.

[18] Wang L J, Zhang Y L, Jia J C, et al. Effect of vegetation on the flow pathways of steep hillslopes: overland flow plot-scale experiments and their implications[J]. Catena, 2021,204:105438.

[19] 常松涛,黄少燕,查轩,等.雨强和植被覆盖度对红壤坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2019,33(3):58-63.
Chang S T, Huang S Y, Zha X, et al. Effects of rainfall intensity and vegetation coverage on runoff and sediment yield on red soil slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019,33(3):58-63.

[20] Liu Y, Tao Y, Wan K Y, et al. Runoff and nutrient losses in citrus orchards on sloping land subjected to different surface mulching practices in the Danjiangkou Reservoir area of China[J]. Agricultural Water Management, 2012,110:34-40.

[21] 宋民欣,吕希恒,韩陈,等.三峡库区降雨特征和林草覆被格局对坡面水沙产出的影响[J].水土保持学报,2024,38(3):82-90,100.
Song M X, Lü X H, Han C, et al. Impacts of rainfall characteristics and vegetation cover patterns on slope runoff and sediment yields in the Three Gorges Reservoir area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(3):82-90,100.

[22] Li H Y, Zhu N Y, Qiao J, et al. Evaluating the long-term effects of best management practices on pollution reduction and soil quality improvement in sloping farmland of the Three Gorges Reservoir area[J]. Agricultural Water Management, 2024,297:108844.

[23] 陆淑宁,李荣融,姚冲,等.横坡垄作对坡耕地产流产沙及氮磷养分流失过程影响研究[J].土壤学报,2024,61(5):1271-1283.
Lu S N, Li R R, Yao C, et al. Study on the effects of counter tillage on runoff and sediment yield and process of nitrogen and phosphorus nutrient loss on sloping farmland[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024,61(5):1271-1283.

[24] 黄薇,王冬梅,李平,等.青海高寒区典型植被地表径流及氮磷流失特征[J].农业工程学报,2021,37(13):92-100.
Huang W, Wang D M, Li P, et al. Characteristics of surface runoff and nitrogen and phosphorus loss for different vegetation covers in Qinghai alpine region of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021,37(13):92-100.

[25] 吴东,黄志霖,肖文发,等.三峡库区典型退耕还林模式土壤养分流失控制[J].环境科学,2015,36(10):3825-3831.
Wu D, Huang Z L, Xiao W F, et al. Control of soil nutrient loss of typical reforestation patterns along the Three Gorges Reservoir area[J]. Environmental Science, 2015,36(10):3825-3831.

[26] 芦杰丰,赵庆,李瑞栋,等.植物根系对鄂尔多斯矿区排土场边坡产流产沙特征的影响[J].中国水土保持科学(中英文),2024,22(4):109-118.
Lu J F, Zhao Q, Li R D, et al. Effects of plant root systems on runoff and sediment yield characteristics of dump slopes in the Erdos mining area[J]. Science of Soil and Water Conservation (Natural Sciences), 2024, 22(4):109-118.

[27] 刘海涛,姚莉,朱永群,等.深松和秸秆覆盖条件下紫色土坡耕地水分养分流失特征[J].水土保持学报,2018,32(6):52-57,165.
Liu H T, Yao L, Zhu Y Q, et al. Characteristics of water and nutrients loss under subsoiling and straw mulching in purple soil slope cropland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018,32(6):52-57,165.

[28] 程鹏,廖超林,肖其亮,等.横坡垄作和秸秆覆盖对红壤坡耕地氮磷流失的影响[J].农业环境科学学报,2022,41(5):1036-1046.
Cheng P, Liao C L, Xiao Q L, et al. Effects of cross slope ridge cultivation and straw mulching on nitrogen and phosphorus loss in red soil slope farmland[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022,41(5):1036-1046.

[29] 周晗,严俊霞,李洪建,等.晋西黄土区坡耕地不同下垫面水土流失对侵蚀性降雨的响应[J].水土保持研究,2019,26(4):7-12.
Zhou H, Yan J X, Li H J, et al. Response of soil and water loss on different underlying surfaces of sloping farmland to erosive rainfall in the loess area of western Shanxi Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019,26(4):7-12.

[30] 伍冰晨,陈晓安,汤崇军,等.红壤坡地果园产流产沙及氮磷流失对坡面水土保持措施的响应[J].水利学报,2024,55(7):802-814.
Wu B C, Chen X A, Tang C J, et al. Response of runoff and sediment yield and nitrogen and phosphorus loss to soil and water conservation measures in orchards of red soil slope[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024,55(7):802-814.