

不同降雨类型对红壤坡耕地产流产沙及 氮磷养分流失的影响

徐光正^{1,2,3}, 车行^{1,2,3}, 左继超^{1,3,4}, 聂小飞^{1,3,4}, 刘士余^{2,3}, 易彩琼^{2,3}

(1. 流域水土保持江西省重点实验室, 南昌 330029; 2. 江西农业大学, 南昌 330045;

3. 江西省鄱阳湖流域生态水利技术创新中心, 南昌 330029; 4. 江西省水利科学院, 南昌 330029)

摘要: [目的] 开展不同降雨类型下地表产流产沙与氮磷养分流失的试验研究, 为南方红壤区坡耕地水土及养分流失的防治提供理论依据。[方法] 以江西水土保持生态科技园内典型红壤坡耕地为研究对象, 针对夏花生—冬油菜轮作的试验区, 采用 K-means 聚类分析法, 分析了不同降雨类型对产流产沙及氮磷养分流失的驱动效应。[结果] (1) 试验期降雨划分为雨型 I (小雨量、短历时、高雨强)、雨型 II (中雨量、中历时、中雨强) 和雨型 III (大雨量、长历时、低雨强), 雨型 I 发生频率最高, 为 45.10%, 雨型 II 累积降雨量最大, 占总降雨量的 34.27%。(2) 雨型 I 的产流、产沙贡献率最高, 分别为 48.96%、60.78%; 雨型 II 产流、产沙贡献率分别为 39.38% 和 36.10%; 雨型 III 产流和产沙贡献率均较低; 在地表径流量相同情况下, 雨型 I 的土壤流失量分别是雨型 II 和雨型 III 的 2.12 倍和 4.68 倍。(3) 雨型 I 对氮磷流失总量的贡献率为 41.67%~64.94%, 是雨型 II 的 1.02~3.50 倍、雨型 III 的 2.40~4.0 倍; 雨型 I 的氮磷养分均流失量为 0.14~2.75 kg/km², 比雨型 II 的分别高 2.06%~56.0%, 250.0%~366.67%, 比雨型 III 的分别高 141.46%~225.0%, 222.22%~314.29%。[结论] 雨型 I 发生频率最高, 达到 45.1%, 对地表径流和土壤流失的贡献率最高, 分别为 48.96% 和 60.78%, 是红壤坡耕地水土流失和氮磷养分流失的主导因素。

关键词: 氮磷流失; 降雨类型; 地表径流深; 土壤流失量; 红壤坡耕地

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)03-0001-08

Effects of different rainfall types on runoff, sediment yield, and nitrogen and phosphorus nutrient loss in red soil slope farmland

Xu Guangzheng^{1,2,3}, Che Xing^{1,2,3}, Zuo Jichao^{1,3,4}, Nie Xiaofei^{1,3,4}, Liu Shiyu^{2,3}, Yi Caiqiong^{2,3}

(1. Jiangxi Key Laboratory of Watershed Soil and Water Conservation, Nanchang 330029, China; 2. Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 3. Jiangxi Provincial Technology Innovation Center for Ecological Water Engineering in Poyang Lake Basin, Nanchang 330029, China; 4. Jiangxi Academy of Water Science and Engineering, Nanchang 330029, China)

Abstract: [Objective] This study conducts experimental research on surface runoff, sediment yield, and nitrogen and phosphorus nutrient loss under different rainfall types, thereby providing a theoretical basis for the prevention and control of soil, water, and nutrient losses from slope farmland in the red soil regions of southern China. [Methods] Taking typical red soil slope farmland in the Jiangxi Soil and Water Conservation Ecological Science and Technology Park as the study site, this study focused on the experimental area under a summer peanut-winter rapeseed rotation, and employed K-means clustering analysis to analyze the driving effects of different rainfall types on runoff, sediment yield, and nitrogen and phosphorus nutrient loss. [Results] (1) During

收稿日期: 2025-06-30

修回日期: 2025-08-07

接受日期: 2025-08-22

资助项目: 江西省“双千计划”项目(JXSQ2023201069); 国家自然科学基金项目(42367050); 江西省水利科学院开放研究资助项目(2023SKLS01)

第一作者: 徐光正(2002—), 男, 江西省九江市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与森林水文。E-mail: 957558710@qq.com

通信作者: 左继超(1987—), 男(满族), 河北省承德市人, 博士, 工程师, 主要从事水土保持与养分循环方面的研究。E-mail: 674529876@qq.com

<https://stbcj.publish.founderss.cn>

the experimental period, rainfall was classified into Type I (low rainfall, short duration, high intensity), Type II (moderate rainfall, moderate duration, moderate intensity), and Type III (high rainfall, long duration, low intensity). Type I had the highest frequency of occurrence at 45.10%, while Type II had the largest cumulative rainfall amount, accounting for 34.27% of the total rainfall. (2) Type I had the highest runoff and sediment contribution rates, which were 48.96% and 60.78%, respectively. Type II had runoff and sediment contribution rates of 39.38% and 36.10%, respectively. Type III had relatively low contribution rates to both runoff and sediment yield. Under the same surface runoff amount, the soil loss under Type I was 2.12 times and 4.68 times that of Type II and Type III, respectively. (3) The contribution rate of Type I to the total nitrogen and phosphorus loss ranged from 41.67% to 64.94%, which was 1.02 to 3.50 times that of Type II and 2.40 to 4.0 times that of Type III. The event-based average losses of nitrogen and phosphorus nutrients under Type I were 0.14 to 2.75 kg/km², which were 2.06% to 56.0% and 250.0% to 366.67% higher than those under Type II, respectively, and 141.46% to 225.0% and 222.22% to 314.29% higher than those under Type III, respectively. [Conclusion] Type I has the highest occurrence frequency, reaching 45.1%, and exhibits the highest contribution rates to surface runoff and soil loss, accounting for 48.96% and 60.78%, respectively. It is the dominant factor in soil erosion and nitrogen and phosphorus nutrient loss in red soil slope farmland.

Keywords: nitrogen and phosphorus loss; rainfall type; depth of surface runoff; amount of soil loss; red soil slope farmland

南方红壤坡耕地是我国重要的农业生产资源,对保障粮食安全、推动我国农业可持续发展具有重要作用。然而,该区域坡面水土流失仍部分处于中度和强度状态,每年土壤流失厚度达 3.7~5.9 mm^[1],且伴随水土流失的氮磷养分流失已成为南方流域农业面源污染的重要来源,对区域水环境安全构成严重威胁^[2]。降雨作为驱动坡面产流产沙的关键因子,其降雨量、雨强及降雨历时等特征深刻影响着径流与泥沙的形成、运移过程以及养分流失规律^[3-5]。大量研究表明,不同降雨类型对红壤坡耕地产流产沙与氮磷流失的影响存在显著差异,深入研究不同降雨类型的作用机制,对于布设针对性的水土保持措施至关重要^[6-8]。

已有诸多学者围绕降雨与坡耕地水土及养分流失的关系开展了丰富的研究。Yan 等^[9]采用模拟降雨的方法对中国西南喀斯特地区的研究表明,降雨强度是影响径流与泥沙最重要的因素;Gedle 等^[10]在埃塞俄比亚的研究表明,与中等强度降雨相比,高等强度降雨使地表径流增加 159%;李建明等^[3]对三峡库区紫色土坡耕地产流产沙的研究发现,小雨量、短历时、大雨强的降雨类型对坡面产流和产沙的贡献均值分别为 48.19% 和 81.82%;王小博等^[4]对武汉市蔡甸区西湖流域径流小区的研究表明,果林地由中雨量、弱雨强、长历时、高频次与大雨量、强雨强、中等历时、低频次两种降雨类型引起的坡面径流量与土壤侵蚀量占总量的 78.7%~82.4%;孙理阳等^[5]对北京山区采取不同水土保持措施的径流小区在不同降雨类型下水土流失及氮磷流失进行研究,发现在超长历时、超

高雨量、中高雨强降雨型下坡面产流量、产沙量、氮磷流失量最大,同时证实了水土保持措施在削减坡面产流产沙和养分流失方面的显著效果,对产流量、产沙量削减的贡献率分别为 50.0%, 94.9%,对总氮、总磷削减的贡献率分别为 78.1%, 66.5%。

江西省属南方红壤区,位于亚热带湿润季风气候区,降雨丰沛且集中,4—9月高强度降雨事件频发,红壤抗蚀抗冲性差,同时在频繁耕作扰动和化肥施用的双重作用下,极易导致严重的水土流失和氮磷养分流失风险^[11-12]。然而,针对江西省典型轮作种植模式下的红壤坡耕地水土流失原位观测较少,不同降雨类型对产流产沙及氮磷养分流失的影响尚不清楚。

基于此,本文以江西水土保持生态科技园红壤坡耕地为试验区,选取江西省乃至南方红壤区具有代表性的夏花生—冬油菜轮作种植模式,开展不同降雨类型下地表产流产沙与氮磷养分流失的试验研究,旨在为南方红壤区坡耕地水土及养分流失的防治提供理论依据。

1 试验区概况

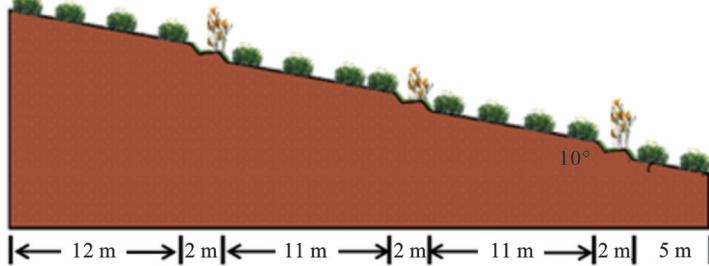
试验区位于江西省九江市德安县的江西水土保持生态科技园(东经 115°42′38"—115°43′13",北纬 29°16′38"—29°17′24"),年均降水量 1 436.8 mm,年均气温 16.7℃,无霜期 249 d,年日照时数 1 650~2 100 h。地貌以低丘缓坡为主,地表坡度多在 5°~25°。原生植被属亚热带常绿阔叶林,成土母质为第四纪红黏土,土壤以红壤为主,是我国红壤核心分布区。试验前,试验

区土壤的基本理化性质:pH为4.62~4.97,有机质质量分数7.80 g/kg,全氮质量分数0.59 g/kg,全磷质量分数0.32 g/kg,全钾质量分数19.07 g/kg^[13-14]。

2 试验设计与研究方法

2.1 试验设计

试验小区于2014年建成,坡度为10°,小区规格花生或油菜



为长45 m×宽40 m(投影面积),种植制度是夏花生—冬油菜轮作。从坡上至坡下,每隔一定距离沿等高线布设1条山边沟(共3条),并沿每条山边沟水平方向种植黄花菜植物篱(图1)。

试验中所用的量水设备采用直径1 m、高1.2 m的圆柱形圆桶(加盖)作为分流箱、集流桶,分流箱采用9孔分流。

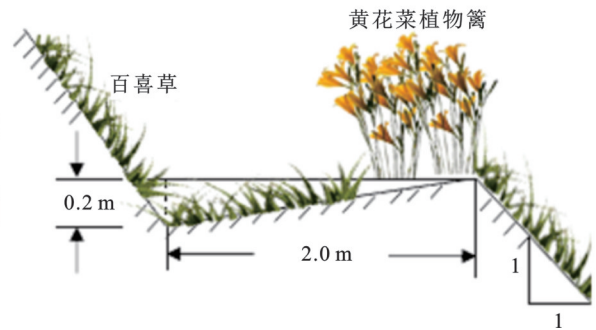


图1 试验小区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental plots

花生和油菜种植、收获、施肥及管理情况参照当地农民习惯进行。花生于5月上旬种植,先撒施磷肥7.5 kg/100 m²,复合肥3.75 kg/100 m²,再翻耕土壤20 cm;然后平整地面,再横坡开沟种植,沟与沟间距25—30 cm,沟内点穴播种,每穴3粒,株距20 cm;花生品种为白沙9018,8月下旬收获并计产。

油菜于9月中旬种植,先撒施复合肥5.25 kg/100 m²,尿素0.45 kg/100 m²,硼肥150 g/100 m²作基肥翻耕土壤中,然后平整地面再横坡开沟播种,沟与沟间距30 cm,最后覆土盖籽,12月上旬按0.75 kg/100 m²追施尿素提苗、壮苗;油菜品种为庆油8号,次年5月上旬收获并计产。

2.2 试验观测

试验于2023年5月—2024年9月进行,在观测场次降雨地表径流、土壤流失的同时,观测氮素、磷素随地表径流的流失情况。

(1) 产流产沙观测 按照水利部水土保持监测中心编著的《径流小区和小流域水土保持监测手册》,进行逐场次降雨的试验观测与样品采集。

具体操作步骤:采用体积法观测地表径流量,即先记录圆桶的水深,由预先率定的公式计算得到地表径流量;然后将圆桶中水充分搅拌均匀后,迅速取500 ml至铝盒,采用烘干法测定径流含沙量,进而计算悬移质泥沙量。最后将圆桶中水放干,收集圆桶底部的泥沙量,即为推移质泥沙量。

(2) 氮、磷含量测定 每次产流结束后,待各圆桶

中的水静置4 h后取500 ml清水样,现场加1滴浓硫酸固定后立即带回实验室放入4℃冰箱保存,经0.45 μm滤膜过滤后,在72 h内分析完毕。参考《环境分析法》《土壤农业化学分析方法》检测样品的溶解态总氮、铵态氮、硝态氮、可溶性氮、可溶性磷及溶解态总磷等的含量。采用碱性过硫酸钾消解—紫外光度法测定溶解态总氮和可溶性氮,水杨酸分光光度法测定铵态氮,硫酸肼法测定硝态氮,钼酸铵分光光度法测定可溶性磷和溶解态总磷。

2.3 数据处理

(1) 产流产沙指标 地表径流深计算公式为:

$$R = 1000V/A \quad (1)$$

式中:R为地表径流深(mm);V为地表径流体积(m³);A为小区面积(m²)。

土壤流失量计算公式为:

$$E = 1000VC/A \quad (2)$$

式中:E为土壤流失量(t/km²);V为地表径流体积(m³);C为径流含沙量(kg/m³);A为小区面积(m²)。

不同雨型下地表径流深、土壤流失量以及氮磷流失贡献率计算公式为:

$$I = \frac{R_i(E_i)(N_i或P_i)}{R(E)(N或P)} \times 100\% \quad (3)$$

式中:I为贡献率;R为地表径流深(mm);E为土壤流失量(t/km²);N、P为氮、磷素流失量;i为不同雨型。

(2) 降雨划分聚类分析 采用K-means聚类分析法对侵蚀性降雨进行划分。该方法是一种广泛使用

的聚类算法,它的目标是将数据集划分为 K 个簇,使得簇内的数据点尽可能相似,而簇间的数据点尽可能不同。能客观反映样本间在多维指标上的相似性,结果直观,便于解释与分类;分类标准基于实际数据分布,避免人为阈值划分的主观性。其中 K 值运用肘部法则确定。

同时,采用 Office Excel 2019 和 SPSS 16.0 软件进行数据分析,使用 Origin 2024 软件和 Pycharm 软件进行图表绘制。

表 1 不同降雨类型划分

Table 1 Classification of different rainfall types

雨型	场次	比例/%	指标	降雨量/mm	降雨历时/min	降雨强度/(mm·h ⁻¹)
I	23	45.10	总和	484.60	7169.50	—
			均值	21.10	311.70	4.06
			上 75% 分位数	23.30	480.00	9.20
			下 25% 分位数	14.90	110.00	2.16
II	19	37.25	总和	494.20	21190.00	—
			均值	26.01	1115.26	1.40
			上 75% 分位数	30.30	1240.00	1.77
			下 25% 分位数	15.60	880.00	0.80
III	9	17.65	总和	463.10	22185.00	—
			均值	51.50	2465.00	1.25
			上 75% 分位数	59.90	2535.00	1.50
			下 25% 分位数	41.20	2390.00	1.04

由表 1 可知,试验期间,以小雨量、短历时、高雨强的雨型 I 为主,发生频率最高,为 45.10%,场均降雨强度最大,达 4.06 mm/h,降雨量占比为 33.61%;中雨量、中历时、中雨强的雨型 II 和大雨量、长历时、低雨强的雨型 III 发生频率分别为 37.25%,17.65%,场均降雨强度分别为 1.40 mm/h,1.25 mm/h。但雨型 III 以 17.65% 的占比贡献 32.12% 的降雨量,雨型 I 的降雨强度远超雨型 II 和雨型 III,分别为雨型 II 和雨型 III 的 2.9 倍和 3.2 倍,是试验区的主要雨型。

3.2 不同雨型对坡面产流、产沙的影响

由表 2 可知,不同雨型对坡面产流、产沙的贡献率存在显著差异。雨型 I 的产流贡献率最高,达 48.96%,产沙贡献率达 60.78%,表明该雨型下土壤侵蚀更为剧烈;雨型 II 的产流、产沙贡献率分别为 39.38% 和 36.10%;雨型 III 的产流、产沙贡献率均较低,分别为 11.66%,3.12%。从 3 种雨型的场均产流、产沙来看,同样表现为雨型 I > 雨型 II > 雨型 III。

由图 2 可知,雨型 I、雨型 II、雨型 III 的坡面地表径流深与土壤流失量线性拟合决定系数分别为 0.73,0.56,0.83,在地表径流深相同的情况下,雨型 I 的土壤流失量是雨型 II 和雨型 III 的 2.12,4.68 倍,表现为雨型 I > 雨型 II > 雨型 III,凸显高强度降雨对土壤

3 结果与分析

3.1 降雨类型的划分及其基本特征

试验期间,收集到产流产沙的降雨场次共 51 场,总降雨量为 1 441.90 mm。本文在前人的研究基础之上^[3,5],以降雨量、雨强、降雨历时 3 个指标作为降雨划分的依据,利用 SPSS 对 51 场降雨数据进行 K-means 聚类分析,运用肘部法则确定 K 值为 3,遂将雨型划分为 3 种,不同降雨类型特征见表 1。

剥离能力的显著增强效应。

表 2 不同降雨类型下地表径流深与土壤流失量的指标值
Table 2 Indicator values of surface runoff depth and soil loss under different rainfall types

雨型	指标	地表径流深/ mm	土壤流失量/ (t·km ⁻²)
I	总和	25.54	81.60
	均值	1.11	3.55
II	总和	20.54	48.46
	均值	1.08	2.55
III	总和	6.08	4.19
	均值	0.68	0.47

3.3 不同雨型对氮、磷养分流失的影响

由图 3 可知,雨型 I 对溶解态总氮流失量的贡献率比雨型 II、雨型 III 高出 11.45,32.97 个百分点,对铵态氮流失量的贡献率比雨型 II、雨型 III 高出 18.49,35.32 个百分点,对硝态氮流失量的贡献率比雨型 II、雨型 III 高出 0.74,24.27 个百分点,对可溶性氮流失量的贡献率比雨型 II、雨型 III 高出 4.03,27.13 个百分点,对可溶性磷流失量的贡献率比雨型 II、雨型 III 高出 46.25,48.57 个百分点,对溶解态总磷流失量的贡献率比雨型 II、雨型 III 高出 45.13,48.58 个百分点。

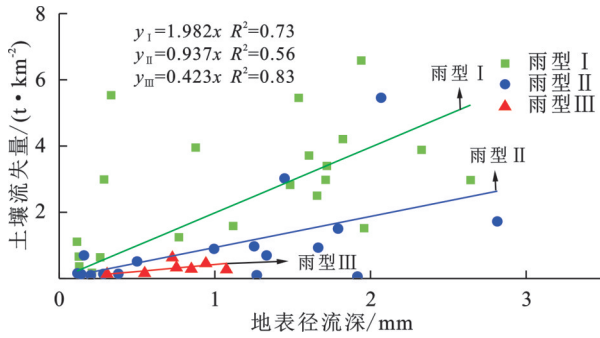


图2 不同雨型的水沙关系

Fig. 2 Sediment-runoff relationship under different rainfall types

可以看出,雨型 I 对上述养分流失的贡献率最大,均超过 40%,起着主导作用;雨型 II 的贡献率介于 18.69%~40.93%,雨型 III 的贡献率低于 20%,相对较小。在磷素指标中,雨型 I 对其流失量的贡献率高出雨型 II、雨型 III 40 多个百分点,表明高强度降雨对磷素流失的影响更为明显。

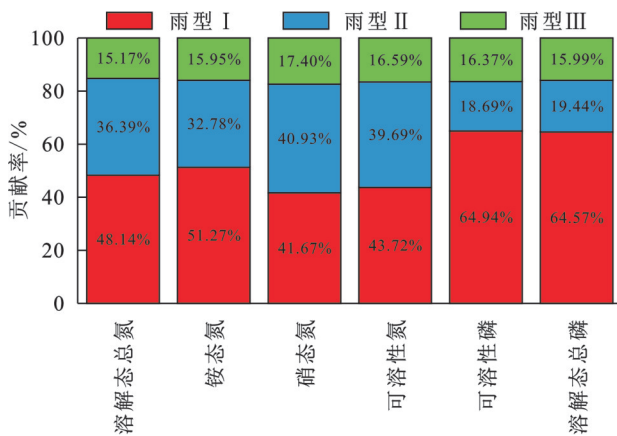


图3 氮、磷各指标流失量的不同雨型贡献率组成

Fig. 3 Composition of contribution of different rainfall types to nitrogen and phosphorus loss

由图 4 可知,雨型 I 的溶解态总氮场均流失量为 2.75 kg/km^2 ,铵态氮场均流失量为 0.78 kg/km^2 ,硝态氮场均流失量为 0.99 kg/km^2 ,可溶性氮场均流失量为 2.08 kg/km^2 ,均显著高于雨型 II 和雨型 III,在氮素场均流失量中居主导地位;雨型 II 的溶解态总氮、铵态氮、硝态氮、可溶性氮场均流失量分别为 2.10, 0.50, 0.97, 1.89 kg/km^2 ,雨型 III 的溶解态总氮、铵态氮、硝态氮、可溶性氮场均流失量分别为 0.87, 0.24, 0.41, 0.79 kg/km^2 。在上述氮素指标中,雨型 I 的溶解态总氮场均流失量比雨型 II、雨型 III 分别高 30.95%, 216.09%, 铵态氮场均流失量比雨型 II、雨型 III 分别高 56.0%, 225.0%, 硝态氮场均流失量比雨型 II、雨型 III 分别高 2.06%, 141.46%, 可溶性氮场均流失量比雨型 II、雨型 III 分别高 10.05%, 163.29%。究其原因,可能是高雨强下以超渗产流为主,地表径

流量增大,对地表的冲刷作用增强,从而使得氮素养分流失增大。

在磷素养分方面,雨型 I、雨型 II、雨型 III 的可溶性磷场均流失量分别为 0.14, 0.04, 0.03 kg/km^2 ,雨型 I 比雨型 II、雨型 III 分别高 250.0%, 366.67%;溶解态总磷场均流失量分别为 0.29, 0.09, 0.07 kg/km^2 ,雨型 I 比雨型 II、雨型 III 分别高 222.22%, 314.29%。原因可能是雨型 I 的雨强较高,地表径流量较大,冲刷力较强,从而使得土壤流失量增加,而磷素主要随土壤流失而流失。

总体而言,不同雨型对氮、磷养分场均流失量的影响差异明显,表现为雨型 I > 雨型 II > 雨型 III,雨型 I 是氮磷养分流失的主导因素。

4 讨论

4.1 降雨类型对坡面产流产沙的影响

降雨作为地表径流产生的先决条件,与地表径流共同构成水蚀区侵蚀发生的主要驱动力与载体。在影响坡面产流和土壤侵蚀的诸多降雨特征中,降雨强度和降雨量是两个关键因素。前人针对黄土高原、西南喀斯特地区、南方红壤区等不同区域,围绕次降雨雨型与土壤侵蚀开展大量研究,普遍将侵蚀性降雨划分为 3 至 5 类,且一致认定高强度、短历时的降雨是引发各区域土壤侵蚀的重要雨型^[3-4, 15-16]。

本研究显示,试验期间,雨型 I 发生频率最高,达 45.10%,且不同雨型对坡面产流、产沙的贡献率差异明显。雨型 I 对产流的贡献率最高,达 48.96%,产沙贡献率更是高达 60.78%,这充分表明该雨型的土壤侵蚀更为剧烈;雨型 II 的产流、产沙贡献率分别为 39.38%, 36.10%;雨型 III 的产流、产沙贡献率均较低,分别为 11.66%, 3.12%。进一步分析单位径流量的土壤流失量可知,雨型 I 的土壤流失量明显高于雨型 II 和雨型 III,凸显高强度降雨对土壤剥离能力的明显增强效应。雨型 III 场均地表径流深与土壤流失量最小,这可能与产流模式有关。在低强度降雨时,产流模式以蓄满产流为主,此时土壤入渗量较大,地表径流量较小,地表径流的冲刷力也相对较弱,坡面的侵蚀形式主要以雨滴击溅造成的溅蚀和坡面薄层水流引起的面蚀为主^[7]。而雨型 I 具有雨强高、降雨雨滴动能大的特点,产流模式以超渗产流为主,这会加剧地表击溅侵蚀,破坏土壤团聚体结构,同时地表径流快速汇集,冲刷能力显著增强,容易出现沟蚀,进而导致土壤流失量明显增加。这也是其在相同地表径流深下土壤流失量明显高于其他

雨型的重要原因。正因如此,雨型 I 对坡面产流产沙的贡献率最高。本研究结果与秦伟等^[8]在红壤区、

曹美晨等^[17]在黄土高原以及陈磊等^[18]在喀斯特地区的研究结果一致。

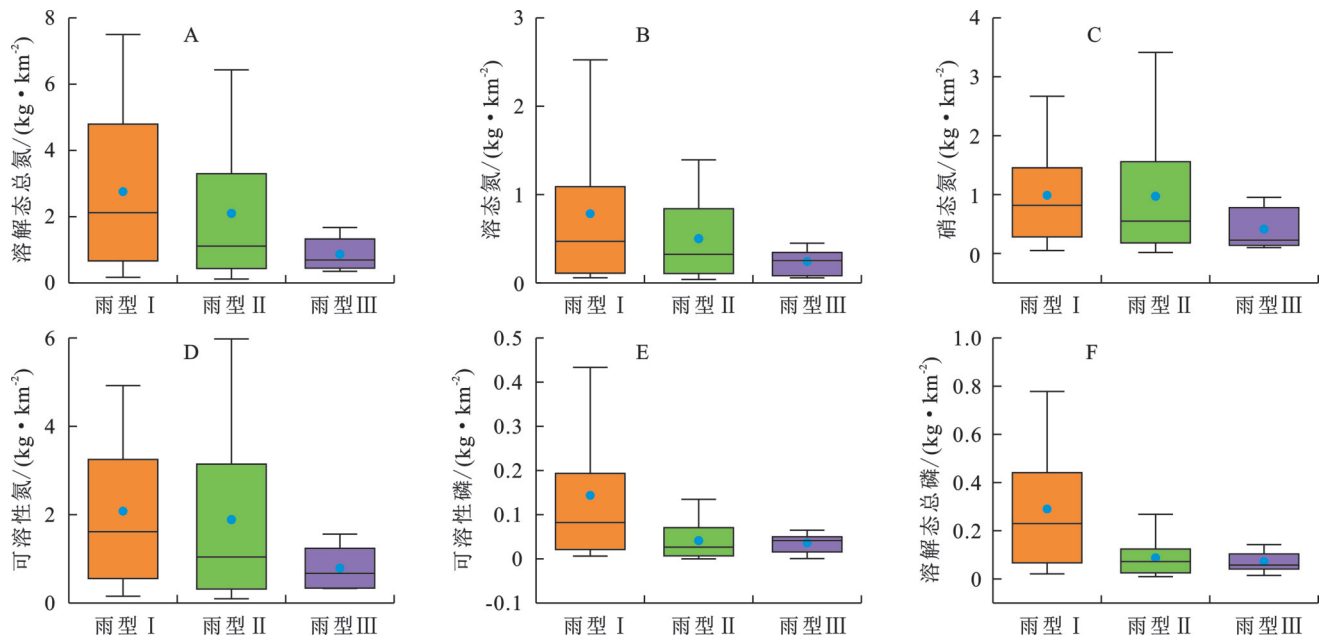


图 4 不同雨型下氮、磷各指标场次流失量

Fig. 4 Event-based nitrogen and phosphorus loss for each indicator under different rainfall types

然而,邬铃莉等^[19]在北方土石山区的研究结果显示,大雨量、长历时和中雨强的雨型对土壤侵蚀的贡献最大。究其原因,可能是北方土石山区和南方红壤区的土壤、地形地貌等特性不同所致。北方土石山区土层浅薄,地面组成物质石多土少,土壤质地疏松、孔隙度大、通气透水性强,但细粒物质含量低,土壤团聚体稳定性差。在中雨强下,水分可缓慢渗入土层,但因土层薄,土壤含水量更易饱和,导致土壤侵蚀强度增大^[20];而南方红壤区温暖多雨,土壤黏粒含量高,干时坚硬板结,湿时黏滞孔隙闭塞,导致水分入渗率低。在高雨强降雨下,雨滴的溅蚀作用和地表径流的冲刷作用叠加,使得土壤流失量增大^[21-22]。因此,根据气候特点和主要降雨类型分析,研究区主要需针对短历时、高雨强的降雨,采取适宜的水土保持措施,避免造成大面积的坡面水土流失。

4.2 降雨类型对坡面氮磷养分流失的影响

雨型作为影响坡面水土流失的关键因素,不同雨型下坡面产流产沙及养分流失量呈现出显著差异^[14,16]。本研究结果表明,不同雨型对氮、磷养分流失影响差异显著,雨型 I 在氮、磷养分流失中起主导作用。原因可能是雨型 I 雨强较高,雨滴对地表打击强烈,可直接破坏土壤结构,使土壤颗粒分散,为养分流失创造条件。同时,高雨强下的产流模式多为超渗产流,导致地表径流量迅速增大^[23-24]。增大的地表径流对地表的冲刷作用加剧,不仅直接带走大量土壤颗粒,还将溶解在径流中的养分一同带走,从

而使得雨型 I 的氮磷养分流失指标的贡献率和平均流失量均显著高于雨型 II 和雨型 III。与之相反,雨型 III 贡献率较低,可能是低雨强下的产流模式以蓄满产流为主,水分有更多的时间下渗进入土壤深层,溶解态养分也会随着水分下渗而进入土壤深层,导致地表流失量相对较低。此现象与王祥^[25]对长江上游丘陵坡耕地氮磷养分流失的研究结果一致。值得注意的是,磷素流失对雨型的响应更为敏感。雨型 I 对可溶性磷的贡献率高达 65%,是雨型 II 和雨型 III 的 3.4 倍以上。这表明高雨强、短历时降雨是磷素迁移的关键驱动因子。这是因为磷素在土壤中的吸附性较强,主要随土壤颗粒流失^[26-27]。高雨强降雨产生的较大地表径流能够携带更多的土壤颗粒,从而将吸附在土壤颗粒上的磷素一同带走,导致磷素流失量显著增加。而氮素由于在土壤中溶解性较好,极易随着地表径流流失,其流失过程更多地受到径流的影响^[28-29]。

综合来看,雨强对氮磷养分流失起着至关重要的作用,高雨强降雨通过破坏土壤结构、增大地表径流量等方式,成为影响氮、磷流失的关键因素。这一研究结果对于深入理解坡面土壤养分流失机制以及实施针对性的水土保持措施具有重要的理论和实践意义。

5 结论

(1) 研究区试验期内,雨型 I (小雨量、短历时、高雨强) 发生频率最高,达 45.10%,降雨量占比 33.61%;雨型 II (中雨量、中历时、中雨强) 发生频率

37.25%;雨型Ⅲ(大雨量、长历时、低雨强)发生频率17.65%,却贡献32.12%的降雨量。雨型Ⅰ的降雨强度分别为雨型Ⅱ和雨型Ⅲ的2.9倍和3.2倍。

(2) 高雨强降雨增大土壤团聚体破坏和径流冲刷能力,导致水土流失加剧。雨型Ⅰ对地表径流和土壤流失的贡献率最高,分别为48.96%,60.78%,且在地表径流深相同的情况下,其土壤流失量是雨型Ⅱ、雨型Ⅲ的2.12倍、4.68倍。

(3) 高雨强降雨是氮磷养分流失的主导因素。雨型Ⅰ对氮磷养分流失贡献率最高,尤其是,对铵态氮和可溶性氮的贡献率超过40%,对可溶性磷和溶解态总磷的贡献率超过60%。

参考文献(References):

- [1] 水利部,中国科学院,中国工程院编.中国水土流失防治与生态安全-总卷[M].北京:科学出版社,2010.
Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Chinese Academy of Engineering. Prevention and Control of Soil and Water Loss and Ecological Security in China-General Volume[M]. Beijing: science press, 2010.
- [2] Wu X Y, Zhang L P, Fu X T, et al. Nitrogen loss in surface runoff from Chinese cabbage fields[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2011,36(9/11):401-406.
- [3] 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.
- [4] 王小博,朱永清,吴宜进,等.不同植被下降雨类型对红壤坡地土壤侵蚀特征的影响[J].水土保持研究,2017,24(2):6-11.
Wang X B, Zhu Y Q, Wu Y J, et al. Effects of rainfall regimes on soil erosion on red soil slopes under different vegetation types[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017,24(2):6-11.
- [5] 孙理阳,李华林,张帆,等.降雨特征及不同水土保持措施对坡面产流、产沙和氮磷流失的影响[J].东北农业大学学报,2024,55(8):111-122.
Sun L Y, Li H L, Zhang F, et al. Effects of rainfall characteristics and soil conservation measures on runoff, sediment yield, and nitrogen-phosphorus loss on slopes[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2024, 55 (8):111-122.
- [6] 廖绵濬,张贤明.现代陡坡地水土保持[M].北京:九州出版社,2004.
Liao M J, Zhang X M. Modern Soil and Water Conservation on Steep Slopes [M]. Beijing:jiuzhoupress,2004.
- [7] 耿晓东,郑粉莉,张会茹.红壤坡面降雨入渗及产流产沙特征试验研究[J].水土保持学报,2009,23(4):39-43.
Geng X D, Zheng F L, Zhang H R. Effect of rainfall intensities and slope gradients on characteristics of rainfall infiltration, runoff and sediment on red soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009,23(4):39-43.
- [8] 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.
- [9] Yan Y J, Dai Q H, Yuan Y F, et al. Effects of rainfall intensity on runoff and sediment yields on bare slopes in a karst area, SW China[J]. Geoderma, 2018,330:30-40.
- [10] Gedle A, Rientjes T, Haile A T, et al. Responses of surface runoff and soil water-erosion to changes in seasonal land cover and rainfall intensity;the case of Shilansha watershed, Rift Valley Basin of Ethiopia[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2025,58:102289.
- [11] Bai A J, Zhai P M, Liu X D. Climatology and trends of wet spells in China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2007,88(3):139-148.
- [12] 谢永玉,瞿思敏,勾建峰,等.长江下游地区梅雨和台风降雨降水同位素特征及影响因素[J].水电能源科学,2022,40(4):70-73.
Xie Y Y, Qu S M, Gou J F, et al. Isotopic characteristics and influencing factors of Meiyu and typhoon events in lower reaches of Yangtze River[J]. Water Resources and Power, 2022,40(4):70-73.
- [13] 赵凯丽,王伯仁,徐明岗,等.我国南方不同母质土壤pH剖面特征及酸化因素分析[J].植物营养与肥料学报,2019,25(8):1308-1315.
Zhao K L, Wang B R, Xu M G, et al. Changes in pH with depths of soils derived from different parent materials and analysis of acidification in Southern China [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019,25(8):1308-1315.
- [14] 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.
- [15] 普隽泽,吕锡芝,张秋芬,等.黄土丘陵沟壑区典型草被产流产沙特征及其影响因素[J].水土保持研究,2023,

- 30(2):1-6.
- Pu J Z, Lü X Z, Zhang Q F, et al. Characteristics and influencing factors of runoff and sediment yield of typical grassland in loess hilly and Gully Region[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023,30(2):1-6.
- [16] 高儒学,戴全厚,甘艺贤,等.不同雨强下喀斯特坡耕地养分流失特征研究[J].*土壤学报*,2019,56(5):1072-1084.
- Gao R X, Dai Q H, Gan Y X, et al. Characteristics of nutrient loss from sloping farmland in karst region as a function of rainfall intensity[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019,56(5):1072-1084.
- [17] 曹美晨,辛艳,任正龔,等.半干旱黄土丘陵沟壑区不同土地利用坡面的降雨侵蚀特征[J].*泥沙研究*,2022(6):43-50.
- Cao M C, Xin Y, Ren Z Y, et al. Characteristics of rainfall erosion on different land use slopes in semi-arid loess hilly and Gully Region[J]. *Journal of Sediment Research*, 2022(6):43-50.
- [18] 陈磊,张科利,马芊红,等.喀斯特土石异质坡面产流产沙规律[J].*水土保持学报*,2022,36(5):82-89.
- Chen L, Zhang K L, Ma Q H, et al. Law of runoff and sediment yield on karst heterogeneous slope of soil and rock[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(5):82-89.
- [19] 邹铃莉,王云琦,王晨洋,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.
- [20] 张明礼,杨浩,邹军,等.北方土石山区土壤侵蚀对土壤质量的影响[J].*水土保持学报*,2011,25(2):218-221.
- Zhang M L, Yang H, Zou J, et al. Effects of soil erosion on soil quality in the rocky mountain areas of northern China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011,25(2):218-221.
- [21] 王祖梅,杨茂进,杨雨珂,等.长期实施梯田和生草措施对红壤坡地果园土壤养分的影响[J].*土壤通报*,2024,55(2):412-419.
- Wang Z M, Yang M J, Yang Y K, et al. Effects of terrace and grass growing measures on soil nutrients of slope orchards in red soil hilly region[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2024,55(2):412-419.
- [22] 张紫薇,赵文俊,李奇,等.表层土壤结构对红壤坡耕地产流及产沙过程的影响[J].*土壤学报*,2024,61(2):434-444.
- Zhang Z W, Zhao W J, Li Q, et al. Effects of top soil structure on runoff and sediment yield of red soil slope cropland[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61(2): 434-444.
- [23] 韦美敬,黄艳荟,杨浩宇,等.不同坡度下蔗地土壤侵蚀及氮素流失对雨型和甘蔗生育期的响应[J].*水土保持研究*,2024,31(5):35-44.
- Wei M J, Huang Y H, Yang H Y, et al. Response of soil erosion and nitrogen loss to rainfall pattern and sugarcane growth period at different slopes[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024,31(5):35-44.
- [24] 宁嘉丽,黄艳荟,李桂芳,等.自然降雨下蔬菜地土壤侵蚀及氮素流失特征[J].*环境科学*,2023,44(1):293-302.
- Ning J L, Huang Y H, Li G F, et al. Characteristics of soil erosion and nitrogen loss in vegetable field under natural rainfall[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(1):293-302.
- [25] 王祥.雨强和坡度对长江上游丘陵坡耕地碳氮磷流失的影响研究[D].重庆:重庆交通大学,2024.
- Wang X. Study on the impact of rainfall intensity and slope gradient on carbon, nitrogen, and phosphorus loss in sloping farmland in the upper reaches of the Yangtze River[D]. Chongqing: chongqing jiaotong university, 2024.
- [26] 迟宇博,吴磊,李蕊,等.不同措施黄绵土坡地暴雨侵蚀及磷素流失特点[J].*农业环境科学学报*,2020,39(12):2833-2843.
- Chi Y B, Wu L, Li R, et al. Characteristics of soil erosion and phosphorus loss from loessial sloping land under different measures during heavy rainstorms[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(12): 2833-2843.
- [27] 黄艳荟,宁嘉丽,李桂芳,等.甘蔗种植方式对蔗地土壤侵蚀及氮素流失特征的影响[J].*水土保持通报*,2022,42(6):121-128,136.
- Huang Y H, Ning J L, Li G F, et al. Effects of planting methods on soil erosion and nitrogen loss in a sugarcane field[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022,42(6):121-128,136.
- [28] 陶静,周晴晴,吴永红.植物篱系统对三峡库区水土与养分流失的协同控制作用[J].*武汉大学学报:理学版*,2024,70(1):120-128.
- Tao J, Zhou Q Q, Wu Y H. Synergic control of water, soil and nutrients loss by hedgerow systems in the Three Gorges Reservoir area[J]. *Journal of Wuhan University: Natural Science Edition*, 2024,70(1):120-128.
- [29] 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.