

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.01.027

白力鑫, 何丙辉, 李天阳, 等. 长期施肥与耕作对紫色土坡耕地产流产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(1): 31-39.

BAI Lixin, HE Binghui, LI Tianyang, et al. Effects of long-term fertilization and tillage on the production of runoff and sediment on purple soil slope cropland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(1): 31-39.

长期施肥与耕作对紫色土坡耕地产流产沙的影响

白力鑫, 何丙辉, 李天阳, 梁珂

(西南大学资源环境学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715)

摘要: [目的] 为探究长期施肥与耕作对紫色土坡耕地产流产沙的影响。[方法] 试验规定各小区均采用冬小麦—夏玉米轮作的紫色土坡耕地典型种植模式, 在 15° 紫色土坡耕地设置 5 种处理: 顺坡耕作无施肥 (CK)、顺坡耕作有机肥与化肥配施 (T1)、顺坡耕作单施化肥 (T2)、顺坡耕作单施化肥增量 (T3)、横坡垄作单施化肥 (T4), 每种处理重复 3 次。在 2008—2020 年, 共监测 107 场侵蚀性降雨事件, 分析了不同事件降雨量及施肥耕作处理下径流深、泥沙量、泥沙含量的变化特征。[结果] 不同施肥耕作处理中, 单位面积年产流深最大为 100.37 mm, 最小为 4.56 mm。除 T2 与 T3 处理径流深差异不显著 ($p > 0.05$) 外, 其余处理间径流深差异显著 ($p < 0.05$), 且均显著小于 CK 处理, 均值大小依次为 $CK > T3 > T2 > T1 > T4$ 。除 T1 与 T2 处理泥沙量差异不显著 ($p > 0.05$) 外, 其余处理间泥沙量差异显著 ($p < 0.05$), 且显著小于 CK 处理, 均值大小依次为 $CK > T3 > T2 > T1 > T4$ 。T1、T2、T3 的泥沙含量差异不显著 ($p > 0.05$), 但均显著小于 CK 处理 ($p < 0.05$) 且显著高于 T4 处理 ($p > 0.05$), 均值大小依次为 $CK > T3 > T1 > T2 > T4$ 。各处理下的泥沙含量与降雨量均呈幂函数负相关 ($p < 0.05$)。[结论] 顺坡耕作有机肥与化肥配施及横坡垄作对减少紫色土坡耕地地表径流、泥沙的产生贡献较大。

关键词: 施肥; 耕作; 产流产沙; 紫色土

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)01-0031-09

Effects of Long-term Fertilization and Tillage on the Production of Runoff and Sediment on Purple Soil Slope Cropland

BAI Lixin, HE Binghui, LI Tianyang, LIANG Ke

(College of Resources and Environment, Southwest University, Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing 400715, China)

Abstract: [Objective] This study is aimed at investigating the effects of long-term fertilization and cultivation on the production of runoff and sediment on purple soil sloping cropland. [Methods] The experiment stipulated that each community should adopt the typical planting mode of winter wheat summer corn rotation on purple soil sloping cropland. Five treatments were set up on 15° purple soil slopes, which were no fertilizer application in downslope cultivation (CK), combined application of manure and fertilizer with downslope tillage (T1), single application of chemical fertilizer with downslope tillage (T2), single application of chemical fertilizer increment with downslope tillage (T3), and single application of chemical fertilizer with cross-slope monopoly cultivation (T4). There were three replications for each treatment. A total of 107 erosive rainfall events were monitored during 2008—2020, and the variation characteristics of runoff depth, sediment yield, and sediment concentration under each event rainfall and different fertilizer tillage treatments were analyzed. [Results] Among the fertilization and cultivation treatments, the maximum annual runoff depth per unit area was 100.37 mm, and the minimum was 4.56 mm. Except for the insignificant difference in

收稿日期: 2023-08-08

修回日期: 2023-09-26

录用日期: 2023-10-10

网络首发日期 (www.cnki.net): 2023-12-04

资助项目: 国家自然科学基金项目 (U20A20326); 农田氮磷流失及农田地膜残留污染监测评价 (120A0701); 中央高校基本科研业务费专项 (SWU-KT22060); 重庆市教育委员会科学技术研究项目 (KJQN202100212)

第一作者: 白力鑫 (1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事水土保持与农业面源污染研究。E-mail: 492440849@qq.com

通信作者: 何丙辉 (1966—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持、生态研究。E-mail: hebinghui@swu.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

runoff depth between T2 and T3 treatments ($p > 0.05$), there was a significant difference in runoff depth between the other treatments ($p < 0.05$), and the runoff depth of all treatments was significantly smaller than that of the CK treatment, and the mean values were in the order of $CK > T3 > T2 > T1 > T4$. Except for the insignificant difference in sediment content between T1 and T2 treatments ($p > 0.05$), there was a significant difference in sediment content between the other treatments ($p < 0.05$), which were significantly smaller than the CK treatment, and the mean values were in the order of $CK > T3 > T2 > T1 > T4$. The sediment concentration showed no significant difference among T1, T2 and T3 ($p > 0.05$), but they were significantly smaller than that of the CK treatment ($p < 0.05$) and significantly higher than that of the T4 treatment ($p > 0.05$), and the mean values were in the order of $CK > T3 > T1 > T2 > T4$. The sediment content under each treatment was negatively correlated with rainfall amount with a power function ($p < 0.05$). [Conclusion] The combined application of organic fertilizer and chemical fertilizer along the slope cultivation and cross-slope monopoly cultivation contributed greatly to the reduction of surface runoff and sediment production on purple soil sloping cropland.

Keywords: fertilization; cultivation; runoff and sediment production; purple soil

Received: 2023-08-08

Revised: 2023-09-26

Accepted: 2023-10-10

Online(www.cnki.net): 2023-12-04

紫色土是以中生代岩层为母岩、母质发育形成的一类宝贵土壤资源,其养分含量丰富,风化成土速度快,但土层较薄,土壤有机质、团聚体含量较少,易发生水土流失^[1-2]。受施肥、耕作活动影响,加上南方紫色土坡耕地区域降雨频繁,雨水丰富,暴雨发生场次较多,致使降雨侵蚀引起的水土流失加剧。因此,紫色土坡耕地已成为我国水土流失最为严重的地类之一^[3-4]。

近年来,已有学者^[5-8]对坡耕地坡面产流产沙的特征及其不同管理模式对土壤侵蚀的影响进行了大量研究。GUO 等^[9]在雨季对紫色土区不同长度和土地扰动的地块进行了降雨、径流和泥沙的监测后发现,降雨量和强度越大,径流量和泥沙产量越高;任雨之等^[10]研究表明,紫色土坡耕地产流产沙量随降雨等级增大而增加,且耕作措施在侵蚀性降雨发生时的减流减沙效果明显;何晓玲等^[11]在平作、顺坡垄作及横坡垄作 3 种耕作方式下进行模拟降雨试验发现,耕作方式对径流和泥沙的调控作用较大,横坡垄作能很好地控制土壤侵蚀。前人的研究多集中在降雨、施肥和耕作等多方面因素对紫色土坡耕地产流产沙的影响,但这些研究中的模拟降雨监测场次普遍偏少,对自然降雨条件下的野外观测年度较少,尚缺乏长期连续的定点监测数据对其相关作用机制进行支撑。

因此,本研究以紫色土坡耕地典型的种植模式为研究对象,通过对 2008—2020 年 107 场侵蚀性自然降雨事件下径流小区降雨量、径流输沙数据进行分析,探究长期不同施肥措施与耕作模式交互作用对紫

色土坡耕地坡面产流产沙的影响,以期合理的优化紫色土区坡耕地施肥措施和耕作模式及降低该区水土流失风险提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于重庆市西南大学后山,为农业部南方山地丘陵区农业面源污染监测基地之一(106°24′20″E, 29°48′42″N)。该区属亚热带季风气候区,四季分明,该气候夏季高温多雨,冬季低温少雨,降水季节变化显著,年平均降水量 1 100 mm,其中 5—9 月的降雨量占全年降雨量的 70% 以上。年平均气温 18.3℃,年平均日照时间 1 270 h,无霜期约 334 天。土壤类型主要为紫色砂页岩发育而成且基础肥力一致的紫色土。该区主要植被类型为亚热带常绿阔叶林,农作物类型主要以小麦、玉米、稻谷等粮食类作物为主。

1.2 试验设计

本研究自 2008 年起,选取坡度为 15°的紫色土坡耕地,建立 15 个用于长期定位监测的径流小区,规格为 32 m²(长 8 m×宽 4 m),为避免各小区间养分的交换,各小区之间用宽 25 cm,高出地面 20 cm 的混凝土田埂隔开。每个小区设置 1 个单独的径流池,径流池规格为 1.5 m×1.2 m×1.0 m,容积为 1.8 m³。试验规定各小区均采用冬小麦—夏玉米轮作这一紫色土坡耕地典型的种植模式,共设置顺坡耕作无施肥(CK)、顺坡耕作有机肥与化肥配施(T1)、顺坡耕作单施化肥(T2)、顺坡耕作单施化肥增量(T3)、横

坡垄作单施化肥(T4)5 组处理,各处理设置 3 次重复(图 1)。

试验监测年间每年施肥量均保持一致,具体施肥量见表 1,其中,氮、磷和钾肥分别采用尿素、过磷酸钙和氯化钾。尿素含 N $\geq$ 46.4%,过磷酸钾含 P₂O₅ $\geq$ 12%,氯化钾含 K₂O $\geq$ 60%,有机肥为农家肥(猪粪尿),含有机 C 4.31%、N 0.24%、P₂O₅ 0.17%和 K₂O 0.21%。

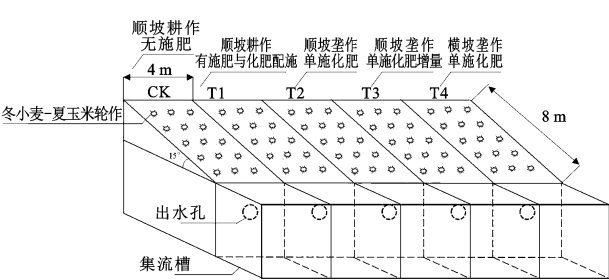


图 1 试验小区示意

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental plots

表 1 试验各处理小区肥料养分输入量

Table 1 Fertilizer nutrient inputs for each treatment in different seasons

种植季	施肥时间	处理	化肥营养输入量/(kg·hm ⁻²)			有机肥营养输入量/(kg·hm ⁻²)		
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
小麦	12 月上旬(基肥)	CK	0	0	0	0	0	0
		T1	68.75	43.75	0	28.13	18.75	25.00
		T2	68.75	75.00	106.25	0	0	0
		T3	100.00	112.50	156.25	0	0	0
		T4	68.75	75.00	106.25	0	0	0
	2 月上旬(追肥)	CK	0	0	0	0	0	0
		T1	68.75	0	0	0	0	0
		T2	159.38	0	43.75	0	0	0
		T3	237.50	0	68.75	0	0	0
		T4	159.38	0	43.75	0	0	0
玉米	4 月上旬(基肥)	CK	0	0	0	0	0	0
		T1	0	53.13	0	28.13	18.75	25.00
		T2	62.50	90.63	150.00	0	0	0
		T3	93.75	134.38	225.00	0	0	0
		T4	62.50	90.63	150.00	0	0	0
	5 月上旬(追肥)	CK	0	0	0	0	0	0
		T1	221.88	0	0	53.13	37.50	46.88
		T2	125.00	0	0	0	0	0
		T3	187.50	0	0	0	0	0
		T4	125.00	0	0	0	0	0

1.3 试验期间田间管理

农作物品种:冬小麦供试品种“渝麦 7 号”;夏玉米供试品种“中糯 309”。

播种与收获:冬小麦采用穴播的方式进行种植,株距保持 30 cm×30 cm,播种时间为每年 11 月上旬,来年 5 月中旬收获;夏玉米则采用移栽的方式种植,株距保持 40 cm×150 cm,每年 3 月开始育苗,4 月中旬进行移栽,8 月上旬收获。

施肥方式:2 种作物施肥方式均为撒施。在冬小麦播种前施加底肥,翌年 2 月补充追肥,30%氮肥作为底肥,60%在拔节期追肥,10%在抽穗期追肥;一次性施磷肥作为底肥;70%钾肥作为底肥,剩余 30%在拔节期追肥。夏玉米播种前施底肥,同年 5 月下旬施追肥,全部磷肥和钾肥,30%氮肥为底肥,剩下 70%氮肥为追肥。

1.4 样品的采集与分析

在每场侵蚀性降雨发生后,利用试验点布设的自记雨量计记录每场降雨量数据。待产流产沙彻底完成,通过测得径流池内的径流深度计算出每场次降雨的径流总量,再通过相应公式计算出径流小区单位面积径流深。

利用清洁塑料棒充分搅匀收集到径流后,在径流池中不同深度,多个部位进行样品采集,将收集到的样品倒入 500 mL 干净水瓶中并贴上标签,在-20℃条件下冷冻保存待测。测泥沙量时,将水瓶中样品摇匀后倒出 100 mL 采用烘干法进行烘干,称重得出 100 mL 径流中的泥沙含量,再利用公式计算,得出整个径流小区的总产沙量。每次采样完成后,将每个径流池冲洗干净,以确保下次采样的顺利进行及数据准确性。

1.5 径流量、径流率与泥沙量计算方法

径流总量计算公式:

$$V = h \times j \times k \quad (1)$$

式中: V 为小区总径流量(L); h 为径流深度(dm); j 为径流池长度(dm); k 为径流池宽度(dm)。

径流深计算公式为:

$$R = V / (l \times w) \quad (2)$$

式中: R 为单位面积径流深(mm); V 为小区总径流量(L); l 为小区长度(m); w 为小区宽度(m)。

泥沙量计算公式:

$$S = V \times C \quad (3)$$

式中: S 为小区总泥沙量(g); V 为小区总径流量(L); C 为小区泥沙含量(g/L)。

1.6 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 和 IBM SPSS 25 软件进行数据整理、计算和统计分析, 利用 Excel 2016 和 Origin 2018 软件进行相关图表的绘制。采用单因

素方差(One-way ANOVA)对不同处理下的径流深、泥沙、泥沙含量分别进行差异显著性分析, 采用 Spearman 相关分析揭示各指标间的相关性, 采用回归分析建立侵蚀性降雨量与泥沙含量间的数学关系。

2 结果与分析

2.1 试验区域降雨特征

由表 2 可知, 2008—2020 年多年平均降雨量为 1 132 mm, 其中 2011 年降雨量最小, 为 838 mm; 2014 年降雨量最大, 为 1 392 mm。试验区 107 场产流次降雨事件的累积降雨量变化范围在 36.30 ~ 631.89 mm, 占年降雨量的 3.2% ~ 57.2%。其中, 2008 年、2009 年、2010 年、2012 年和 2013 年累积侵蚀性降雨量分别比多年平均累积侵蚀性降雨量增加 58.8%, 19.6%, 28.8%, 86.4%, 20.4%; 而 2011 年、2014 年、2015 年、2016 年、2017 年、2018 年、2019 年和 2020 年分别减少 42.4%, 21.4%, 2.6%, 15.0%, 29.7%, 3.9%, 9.8%, 89.3%。

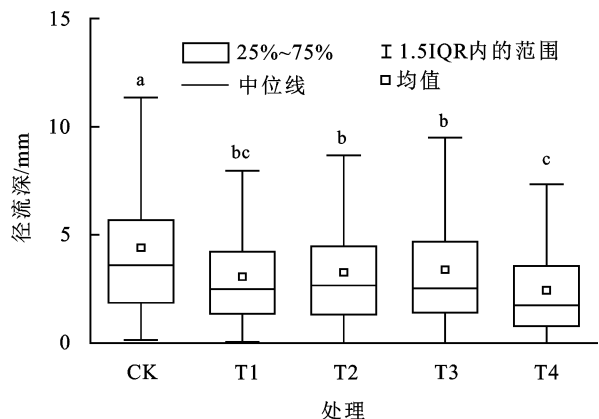
表 2 试验区 2008—2020 年降雨特征统计

Table 2 Rainfall characteristics in the experimental area from 2008 to 2020

年份	年降雨量/mm	日最大降雨		侵蚀性降雨	
		降雨量/mm	出现时间(月-日)	侵蚀性降雨次数	累积侵蚀性降雨量/mm
2008	963.24	163.1	06-15	13	538.2
2009	1 199.46	164.8	08-04	8	405.3
2010	1 045.07	84.5	07-05	11	436.7
2011	838.35	85.0	06-17	3	195.1
2012	1 104.00	89.0	05-21	14	631.9
2013	1 222.30	71.4	05-13	9	408.3
2014	1 392.40	82.4	07-11	5	266.6
2015	1 311.10	127.5	06-30	5	330.2
2016	1 217.60	72.5	07-14	8	288.2
2017	1 180.20	50.0	05-21	7	238.4
2018	924.20	69.9	04-14	8	325.9
2019	1 192.30	45.2	07-16	12	305.8
2020	1 123.20	15.9	07-02	4	36.3

2.2 长期施肥与耕作对紫色土坡耕地产流的影响

由图 2 可知, 2008—2020 年不同施肥与耕作模式下, 紫色土坡耕地单位面积年产流深最大为 100.37 mm, 最小为 4.56 mm, 试验区各处理下径流深均值依次为 CK>T3>T2>T1>T4。比较 CK、T1、T2 和 T3 4 种顺坡耕作模式不同施肥处理下径流深的变化发现, 除 T2 与 T3 处理径流深差异性不显著外 ($p>0.05$), CK 处理下的径流深均值最大, T1 处理下的径流深均值最小, 显著小于 CK、T2、T3 处理, T1、T2、T3 较 CK 处理径流深分别降低 30.56%, 23.94%, 23.08%。比较相同施肥处理顺坡耕作与横坡垄作 2 种模式下的 T2 与 T4 发现, T4 处理下径流深均值显著低于 T2 处理, 横坡垄作单施化肥有效降低 25.35% 的径流深。



注: 图柱上方不同小写字母表示不同处理间差异显著性 ($p < 0.05$)。下同。

图 2 不同施肥和耕作处理下紫色土坡耕地径流深

Fig. 2 Runoff depth under different fertilization and tillage treatments on purple sloping cropland

2.3 长期施肥与耕作对紫色土坡耕地产沙的影响

由图 3 可知,紫色土区不同施肥与耕作模式下,试验区 2008—2020 年各处理下泥沙量均值依次为 CK>T3>T2>T1>T4。比较 CK、T1、T2 和 T3 4 种顺坡耕作模式不同施肥处理下泥沙量的变化发现,T1 处理下的泥沙量均值最小,显著小于 CK 和

T3 处理,但与 T2 处理差异性不显著($p>0.05$)。T1、T2、T3 较 CK 处理泥沙量分别减少 52.88%,46.36%,39.92%。比较相同施肥处理顺坡耕作与横坡垄作 2 种模式下的 T2 与 T4 发现,T4 处理下泥沙量均值显著小于 T2 处理,横坡垄作单施化肥有效减少 68.60%的泥沙量。

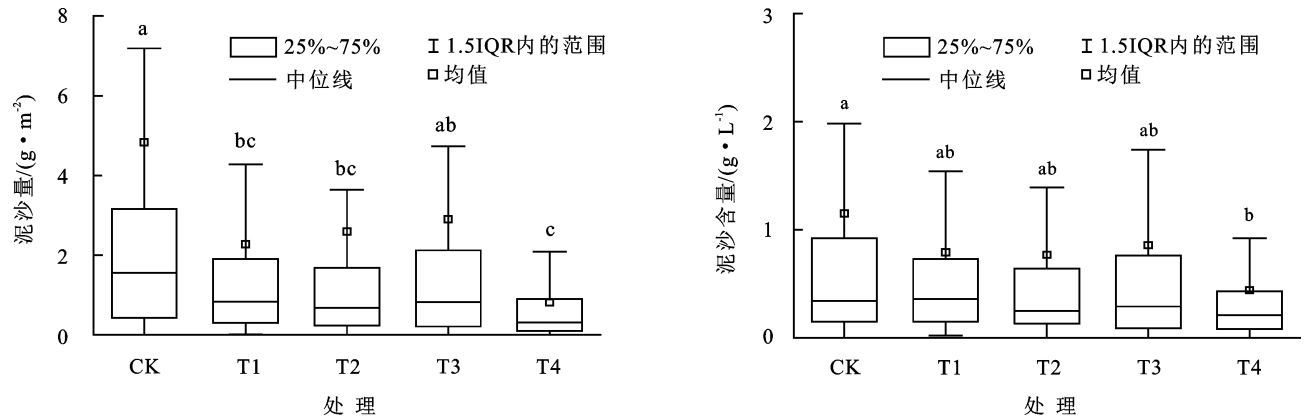


图 3 不同施肥和耕作处理下紫色土坡耕地产沙量和泥沙含量的变化

Fig. 3 Sediment yield and sediment content under different fertilization and tillage treatments on purple sloping cropland

试验区 2008—2020 年各处理下泥沙含量均值依次为 CK>T3>T1>T2>T4。比较 CK、T1、T2 和 T3 4 种顺坡耕作模式不同施肥处理下泥沙含量的变化发现,T2 处理下的泥沙含量均值最小,显著小于 CK 处理,但与 T1 和 T3 处理差异性不显著($p>0.05$)。T1、T2、T3 较 CK 处理泥沙含量分别减少 31.21%,33.11%,25.53%。比较相同施肥处理顺坡耕作与横坡垄作 2 种模式下的 T2 与 T4 发现,T4 处理下泥沙含量均值显著小于 T2 处理,横坡垄作处理有效减少了径流中 42.76%的泥沙含量(图 3)。

2.4 侵蚀性降雨量、径流深、泥沙量、泥沙含量之间的相关性分析

由表 3 可知,侵蚀性降雨量与径流深和泥沙量呈极显著正相关($p<0.01$),与泥沙含量呈极显著负相关($p<0.01$),径流深与泥沙量呈极显著正相关($p<0.01$),泥沙含量与泥沙量呈极显著正相关($p<0.01$)。

分别对试验区 5 种不同施肥与耕作处理下的侵蚀性降雨量、径流深、泥沙含量与泥沙量进行相关性分析,除 T1 处理下侵蚀性降雨量与泥沙含量表现不显著外,T2 和 T4 处理呈现出显著负相关($p<0.05$),CK 和 T3 处理呈现出极显著负相关($p<0.01$)。

由图 4 可知,累积侵蚀性降雨量与泥沙含量均呈现显著幂函数负相关($p<0.05$,其中 CK 处理 R^2 最大,为 0.070 6,T1 处理 R^2 最小,为 0.046 8)。

表 3 总体侵蚀性降雨量、径流深、泥沙含量与泥沙量之间的相关性分析

Table 3 Spearman correlations between overall erosive rainfall, runoff depth, sediment content, and sediment yield

处理	项目	侵蚀性降雨量	径流深	泥沙含量	泥沙量
CK	侵蚀性降雨量	1.000			
	径流深	0.387 **	1.000		
	泥沙含量	-0.173 **	-0.016	1.000	
	泥沙量	0.047	0.456 **	0.849 **	1.000
T1	侵蚀性降雨量	1.000			
	径流深	0.413 **	1.000		
	泥沙含量	-0.081	-0.114 *	1.000	
	泥沙量	0.218 **	0.489 **	0.765 **	1.000
T2	侵蚀性降雨量	1.000			
	径流深	0.413 **	1.000		
	泥沙含量	-0.111 *	-0.051	1.000	
	泥沙量	0.162 **	0.498 **	0.804 **	1.000
T3	侵蚀性降雨量	1.000			
	径流深	0.372 **	1.000		
	泥沙含量	-0.158 **	-0.068	1.000	
	泥沙量	0.051	0.418 **	0.848 **	1.000
T4	侵蚀性降雨量	1.000			
	径流深	0.492 **	1.000		
	泥沙含量	-0.119 *	-0.172 **	1.000	
	泥沙量	0.186 **	0.453 **	0.765 **	1.000
总体	侵蚀性降雨量	1.000			
	径流深	0.399 **	1.000		
	泥沙含量	-0.131 **	-0.039	1.000	
	泥沙量	0.126 **	0.508 **	0.808 **	1.000

注: * 表示显著相关性($p<0.05$)(双尾); ** 表示极显著相关性($p<0.01$)(双尾)。

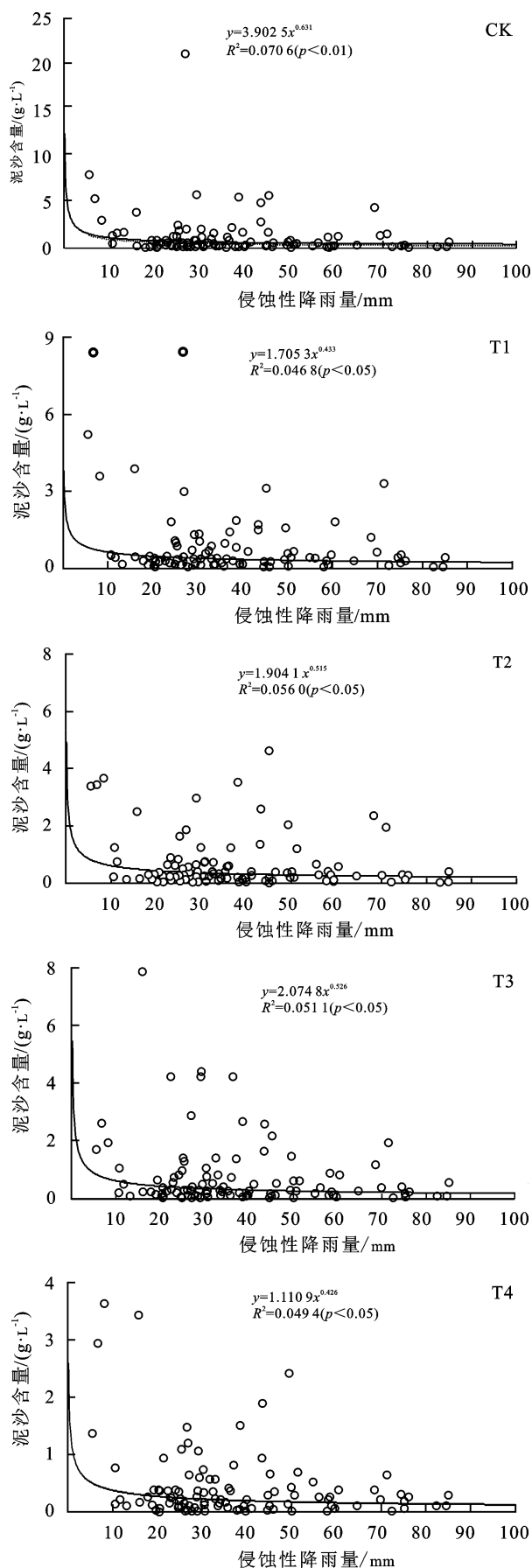


图 4 泥沙含量与侵蚀性降雨量的关系

Fig. 4 Relationship between sediment content and erosive rainfall

3 讨论

3.1 长期施肥与耕作对紫色土坡耕地产流产沙的影响

本研究表明,在长达 12 年的不同施肥与耕作处理下,顺坡耕作无施肥的产流产沙量均值最大。这可能是由于长期不施肥土壤有机质等作物生长所需的必要营养元素随试验年限增加而显著降低^[12],导致作物长势最差,根系固土能力退化,土壤板结情况最为严重,对径流泥沙的拦截能力最弱,遭遇侵蚀性降雨时雨水更容易汇聚成流,导致大量径流、泥沙的产生。顺坡耕作有机肥与化肥配施、横坡垄作单施化肥均对减少紫色土坡耕地地表径流、泥沙的产生贡献较大(图 2、图 3),这与前人^[13-14]研究结果相符,主要是因为有机肥与化肥配施能最为直接补充土壤中流失的 C、N、P 等养分含量^[15],且有机肥与化肥配施处理下 C、N、P 含量显著高于单施化肥处理^[16],这表明该处理下土壤中团聚体数量及其稳定性更高,能有效培肥地力,增加土壤孔隙度,改良土壤结构^[17],使得作物长势最好,植被覆盖率最高,滞留降雨的能力凸显,显著延长水分入渗时间,增强土壤蓄水沉沙能力^[18],有效减少地表径流、泥沙的产生。横坡垄作单施化肥产流产沙量均值显著小于顺坡耕作单施化肥(图 2、图 3),这与盖浩等^[19]研究结果相符。这可能是因为横坡垄作因耕作方向垂直于径流流动方向,其坡面微地貌的更改缩短了坡长,可有效拦截径流泥沙,使得流失的径流、泥沙在横垄处堆积^[20],并改变径流运移的方向,由沿坡顺流变为沿垄横流,降低径流流速,以入渗方式进入地下的径流增加。同时拦截部分大团聚体,土壤团聚体越稳定,使得土壤中大孔隙数量增多,增加土壤渗透性同时增强土壤结构稳定性^[21],最终形成固土保水的良性循环。

3.2 长期施肥与耕作处理下泥沙含量与侵蚀性降雨量的关系

次降雨事件中降雨历时和降雨强度是影响侵蚀性降雨量的重要因素^[22]。本研究表明,顺坡耕作无施肥、顺坡耕作有机肥与化肥配施、顺坡耕作单施化肥、顺坡耕作单施化肥增量、横坡垄作单施化肥 5 种不同施肥与耕作处理下的泥沙含量均在侵蚀性降雨量较小时表现出最大值,这可能是因为次降雨事件中,侵蚀性降雨量受到降雨历时和降雨强度的影响,在侵蚀性降雨量较小时,降雨历时普遍较短或降雨强度较小,导致土壤的初始含水率较低,初始土壤水吸力较大^[23],雨水更多以入渗的方式进入地下,地表径流的形成相对较少,而降雨初期雨滴打击在土壤表面通过溅蚀产生大量分散的土粒,大量土粒被较少的薄层径流搬运后,造成降雨初期泥沙含量浓度峰值的形

成^[24]。5 种不同施肥与耕作处理下的泥沙含量和侵蚀性降雨量两者之间均存在显著幂函数负相关关系($p < 0.05$),随着侵蚀性降雨量的增加,泥沙含量随即降低后趋于稳定。这可能是因为随着侵蚀性降雨量的增大,次降雨事件中的降雨历时较长或降雨强度较大。而在中国三峡地区农业小流域,降雨量是径流产生的主要原因^[25],坡面泥沙颗粒的迁移受到降雨量大小、坡面径流量大小等诸多因素的影响^[26]。王玲玲等^[27]研究发现,径流量、产沙量的大小主要受降雨所致,且具有同增共减的变化规律。中亚热带林地区域降雨量和径流量、产沙量的相关性分析同样表明径流量和产沙量均随降雨量的增大随之增加^[28]。前人^[29]研究发现,次降雨事件各降雨强度下随着降雨历时的延长,径流量总体呈现逐渐增加后趋于稳定的趋势,产沙量总体呈现先增加后减少最终趋于稳定的趋势;且当进入侵蚀产沙稳定期后,累计径流量和累计产沙量两者增加的速率和幅度也有所差别^[30],导致随降雨历时的增加或降雨强度的增大侵蚀性降雨量逐渐增大,而对泥沙含量的稀释效果也越发显著,泥沙含量随即表现出与侵蚀性降雨量之间的幂函数递减关系。

4 结论

(1)紫色土区多年平均降雨量为 1 132 mm,降雨主要集中在每年 5—9 月,但多年累积侵蚀性降雨量普遍较小,年侵蚀性降雨事件发生的次数较少。

(2)通过监测试验区 107 场侵蚀性降雨事件后发现,各施肥耕作处理中除 T2 与 T3 处理径流深差异不显著($p > 0.05$)外,其余处理间径流深均显著小于 CK 处理,均值大小依次为 CK>T3>T2>T1>T4。除 T1 与 T2 处理泥沙量差异不显著($p > 0.05$)外,其余处理间泥沙量差异显著($p < 0.05$),且显著小于 CK 处理,均值大小依次为 CK>T3>T2>T1>T4。T1、T2、T3 的泥沙含量差异不显著($p > 0.05$),但均显著小于 CK 处理($p < 0.05$)且显著高于 T4 处理($p > 0.05$),均值大小依次为 CK>T3>T1>T2>T4。

(3)长期施肥及横坡耕作可以显著提升紫色土坡耕地固土保水能力,其中顺坡耕作有机肥与化肥配施和横坡耕作单施化肥对减少紫色土坡耕地地表径流的产生和泥沙量的流失贡献最大。5 种不同施肥与耕作处理下的泥沙含量与侵蚀性降雨量呈现显著幂函数负相关关系。

参考文献:

- [1] 中国科学院成都分院土壤研究室.中国紫色土—上篇[M].北京:科学出版社,1991.
Soil Research Laboratory Chengdu Branch of Chinese A-

cademy of Sciences.Purple Soils in China[M]. Beijing: Science Press,1991.

- [2] XIA R, SHI D M, NI S H, et al. Effects of soil erosion and soil amendment on soil aggregate stability in the cultivated-layer of sloping farmland in the Three Gorges Reservoir area[J].Soil and Tillage Research,2022,223:e105447.
- [3] 何淑勤,宫渊波,郑子成,等.降雨强度和坡度对中国紫色土区玉米苗期氮素流失的影响[J].农业工程技术,2022,15(2):156-164.
- HE S Q, GONG Y B, ZHENG Z H, et al. Effects of rainfall intensities and slope gradients on nitrogen loss at the seedling stage of maize (*Zea mays* L.) in the purple soil regions of China[J].Agricultural Engineering Technology,2022,15(2):156-164.
- [4] 苏正安,熊东红,张建辉,等.紫色土坡耕地土壤侵蚀及其防治措施研究进展[J].中国水土保持,2018(2):42-47,69.
- SU Z A, XIONG D H, ZHANG J H, et al. Research progress of soil erosion of purple soil slope farmland and its prevention and control measures[J].Soil and Water Conservation in China,2018(2):42-47,69.
- [5] 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 tillage measures[J].Mountain Research,2020,38(6):851-860.
- [6] 侯淑艳,刘绪军,刘建新,等.水土保持措施对黑土坡耕地产流产沙的影响[J].中国水土保持科学(中英文),2022,20(4):26-33.
- HOU S Y, LIU X J, LIU J X, et al. Effects of soil and water conservation measures on the runoff and sediment yield in black sloping farmland[J].Science of Soil and Water Conservation,2022,20(4):26-33.
- [7] 张嘉懿,汪军红,程先富,等.降雨对江子河小流域不同农作物措施坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2021,35(2):8-14.
- ZHANG J Y, WANG J H, CHENG X F, et al. Effects of rainfall on slope runoff and sediment yield under different crop measures in the Jiangzi River minor watershed[J].Journal of Soil and Water Conservation,2021,35(2):8-14.
- [8] 张青青,陈志强,陈志彪,等.南方典型红壤区不同水土保持措施下坡面产流产沙及稀土迁移特征[J].水土保持学报,2018,32(1):46-53,58.
- ZHANG Q Q, CHEN Z Q, CHEN Z B, et al.Characteristics of slope runoff and sediment yield and REEs migrations under different soil and water conservation measures in a typical red soil region of southern China

- [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(1):46-53, 58.
- [9] GUO X M, LI T Y, HE B H, et al. Effects of land disturbance on runoff and sediment yield after natural rainfall events in southwestern China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(10):9259-9268.
- [10] 任雨之, 郑江坤, 付滢, 等. 不同耕种模式下降雨等级对紫色土坡耕地产流产沙的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2020, 18(3):90-98.
- REN Y Z, ZHENG J K, FU Y, et al. Effects of rainfall levels on runoff and sediment yield of slope farmland in purple soil under different tillage and crop patterns[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2020, 18(3):90-98.
- [11] 何晓玲, 郑子成, 李廷轩. 不同耕作方式对紫色土侵蚀及磷素流失的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(12):2492-2500.
- HE X L, ZHENG Z C, LI T X. Effects of tillage practices on soil erosion and phosphorus loss in sloping cropland of purple soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(12):2492-2500.
- [12] 吴春晓, 高小峰, 闫本帅, 等. 长期施肥对黄土高原梯田土壤养分特征和微生物资源限制的影响[J]. *环境科学*, 2022, 43(1):521-529.
- WU C X, GAO X F, YAN B S, et al. Effects of long-term fertilization on soil nutrient characteristics and microbial resource restrictions in a terrace on the loess plateau[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(1):521-529.
- [13] 彭石磊, 何丙辉, 王润泽, 等. 自然降雨条件下不同施肥模式和耕作方式对坡耕地紫色土肥力质量的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2018, 35(4):318-326.
- PENG S L, HE B H, WANG R Z, et al. Effect of soil fertility quality based on different fertilization and tillage patterns in slope cropland of purple soil under natural rainfall[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(4):318-326.
- [14] 王晓荣, 唐万鹏, 付甜, 等. 不同管理措施对三峡库区柑橘园土壤养分和径流氮磷流失的影响[J]. *中国农学通报*, 2021, 37(11):95-102.
- WANG X R, TANG W P, FU T, et al. Effects of different management practices on soil nutrient and nitrogen and phosphorus losses with runoff of citrus orchard in the Three Gorges Reservoir area[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(11):95-102.
- [15] 鲁艳红, 廖育林, 聂军, 等. 连续施肥对不同肥力稻田土壤基础地力和土壤养分变化的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(21):4169-4178.
- LU Y H, LIAO Y L, NIE J, et al. Effect of successive fertilization on dynamics of basic soil productivity and soil nutrients in double cropping paddy soils with different fertilities[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(21):4169-4178.
- [16] 杜映妮, 李天阳, 何丙辉, 等. 长期施肥和耕作下紫色土坡耕地土壤 C、N、P 和 K 化学计量特征[J]. *环境科学*, 2020, 41(1):394-402.
- DU Y N, LI T Y, HE B H, et al. Stoichiometric characteristics of purple sloping cropland under long-term fertilization and cultivation[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(1):394-402.
- [17] 谢钧宇, 曹寒冰, 孟会生, 等. 不同施肥措施及施肥年限下土壤团聚体的大小分布及其稳定性[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(3):274-281, 290.
- XIE J Y, CAO H B, MENG H S, et al. Effects of different fertilization regimes and fertilization ages on size distribution and stability of soil aggregates[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(3):274-281, 290.
- [18] 杨帆, 程金花, 张洪江, 等. 坡面草本植物对土壤分离及侵蚀动力的影响研究[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(5):129-137.
- YANG F, CHENG J H, ZHANG H J, et al. Effect of herb plants on soil detachment and erosion dynamics [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(5):129-137.
- [19] 盖浩, 刘平奇, 张梦璇, 等. 黑土坡耕地横坡垄作对减少径流及土壤有机碳流失的作用[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(2):300-304, 311.
- GAI H, LIU P Q, ZHANG M X, et al. Effects of ridge planting on reducing runoff and soil organic carbon loss in black soil slope[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(2):300-304, 311.
- [20] 牟廷森, 沈海鸥, 贺云锋, 等. 黑土区垄作方式对坡耕地土壤侵蚀的调控效果[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(2):22-30.
- MOU T S, SHEN H O, HE Y F, et al. Effects of ridge tillage patterns on soil erosion of sloping croplands in black soil region of northeastern China[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(2):22-30.
- [21] 白怡婧, 刘彦伶, 李渝, 等. 长期不同施肥和耕作对坡耕地黄壤团聚体组成及有机碳的影响[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2021, 19(2):52-60.
- BAI Y J, LIU Y L, LI Y, et al. Effect of long-term different tillage and fertilization measures on aggregates composition and organic carbon in yellow soil slope cultivated land[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2021, 19(2):52-60.
- [22] 陈俊克, 缴锡云, 庄杨, 等. 次降雨有效降雨量的影响因素及其估算模型[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(4):15-20.
- CHEN J K, JIAO X Y, ZHUANG Y, et al. Investigating effective rainfall and factors affecting effective rainfall using experiments and modelling[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2017, 36(4):15-20.

- [23] 刘汗,雷廷武,赵军.土壤初始含水率和降雨强度对黏黄土入渗性能的影响[J].中国水土保持科学,2009,7(2):1-6.
LIU H, LEI T W, ZHAO J. Effects of initial soil water content and rainfall intensity on Loess infiltration capacity[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009, 7(2): 1-6.
- [24] 张会茹,郑粉莉.不同降雨强度下地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2011,25(3):40-43.
ZHANG H R, ZHENG F L. Effect of slope gradients on erosion from a red soil hillslope under different rainfall intensity[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(3): 40-43.
- [25] FANG N F, SHI Z H, LI L, et al. Rainfall, runoff, and suspended sediment delivery relationships in a small agricultural watershed of the Three Gorges area, China[J]. Geomorphology, 2011, 135(1/2): 158-166.
- [26] 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/OL].土壤学报,2023:1-12. (2023-04-12). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20230411.1317.010.html>.
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/OL]. Acta Pedologica Sinica, 2023: 1-12. (2023-04-12). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20230411.1317.010.html>.
- [27] 王玲玲,姚文艺,王文龙,等.黄土丘陵沟壑区多尺度地貌单元输沙能力及水沙关系[J].农业工程学报,2015,31(24):120-126.
WANG L L, YAO W Y, WANG W L, et al. Sediment transport capacity and flow-sediment relationship in different topographical units of different spatial scales in hilly loess region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(24): 120-126.
- [28] 曹光秀,王克勤,赵洋毅,等.中亚热带地区常绿阔叶林地表径流和产沙影响机制[J].水土保持学报,2018,32(4):30-36.
CAO G X, WANG K Q, ZHAO Y Y, et al. The mechanism of surface runoff and sediment yield of evergreen broad-leaved forest in the middle subtropical region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(4): 30-36.
- [29] 乔闪闪,吴磊,彭梦玲.人工模拟降雨条件下黄土坡面水-沙-氮磷流失特征[J].环境科学研究,2018,31(10):1728-1735.
QIAO S S, WU L, PENG M L. Simulation of runoff, sediment, nitrogen and phosphorus loss on bare loess sloping land using simulated rainfall[J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31(10): 1728-1735.
- [30] 杨青,杨广斌,赵青松,等.喀斯特地区不同降雨和植被覆盖的坡面产流产沙特征[J].水土保持通报,2020,40(1):9-16.
YANG Q, YANG G B, ZHAO Q S, et al. Characteristics of runoff sediment yield on slopes under different rainfall and vegetation cover in Karst areas[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(1): 9-16.
- (上接第30页)
- [23] 化全县,韩亚伟,汤建伟,等.过磷酸钙颗粒的溶解动力学研究[J].磷肥与复肥,2016,31(5):10-12.
HUA Q X, HAN Y W, TANG J W, et al. Study on dissolution kinetics of single superphosphate granules in water[J]. Phosphate and Compound Fertilizer, 2016, 31(5): 10-12.
- [24] LI Y Y, GAO R, YANG R, et al. Using a simple soil column method to evaluate soil phosphorus leaching risk[J]. Clean-Soil, Air, Water, 2013, 41(11): 1100-1107.
- [25] 张彩.细颗粒泥沙絮凝对磷迁移转化的影响研究[D].重庆:重庆交通大学,2019.
ZHANG C. Effect of fine sediment flocculation on phosphorus transfer and transformation[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019.
- [26] 李杰,杨文俊,郭超.有机物对泥沙絮凝影响研究综述[J].泥沙研究,2022,47(4):75-80.
LI J, YANG W J, GUO C. A review of research on the influence of organic matter on sediment flocculation[J]. Journal of Sediment Research, 2022, 47(4): 75-80.
- [27] ZHAO C H, GAO J E, ZHANG M J, et al. Response of roll wave to suspended load and hydraulics of overland flow on steep slope[J]. Catena, 2015, 133: 394-402.
- [28] ZHANG G H, SHEN R C, LUO R T, et al. Effects of sediment load on hydraulics of overland flow on steep slopes[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010, 35(15): 1811-1819.