

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2024.04.005

李清藐, 李天阳, 何丙辉, 等. 不同农作措施下紫色土坡耕地氮磷流失特征 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(4): 46-54.

不同农作措施下紫色土坡耕地氮磷流失特征

李清藐, 李天阳, 何丙辉, 张海香

西南大学 资源环境学院, 重庆 400715

摘要: 为揭示不同农作措施下径流氮磷流失变化特征, 基于 2020 年 12 场次的自然降雨产流事件, 分析了顺坡无施肥(对照, CK)、顺坡混合施用有机肥和化肥(T1)、顺坡单施化肥(T2)、顺坡单施化肥增量(T3)、横坡单施化肥(T4)5 种处理下径流量及径流中总氮(TN)、总磷(TP)质量浓度与流失量、氮磷比(TN/TP)的变化特征。结果表明: ① 各处理径流 TN, TP 最高质量浓度均发生在施肥后的前 6 次降雨, 其中的 4 次降雨事件造成了超 50% 的总氮、总磷流失。② 与单施化肥相比, 有机肥化肥配施的径流 TN, TP 流失量没有显著差异, 且径流 TN, TP 质量浓度与施肥后天数都呈极显著线性负相关($p < 0.01$)。③ 和顺坡耕作相比, 横坡整作可以显著削减 76.85% 的径流量、75.12% 的径流总氮流失量和 87.97% 的径流总磷流失量。④ CK 处理的 TN/TP 显著高于 T2 和 T3 ($p < 0.05$), 但与 T1, T4 差异无统计学意义 ($p > 0.05$), 所有处理下全年超 50% 的 TN/TP ≥ 50 , 表现为磷限制。

关键词: 地表径流; 氮磷流失; 坡耕地; 紫色土

中图分类号: S157.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2024)04-0046-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Loss from Purple Soil of Sloping Land under Different Farming Practices

LI Qingmiao, LI Tianyang, HE Binghui, ZHANG Haixiang

College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: In order to reveal the characteristics of changes of nitrogen and phosphorus loss through runoff under different farming practices, based on 12 natural rainfall-runoff events in 2020, the characteristics of runoff and changes in total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) concentrations, loss amount and nitrogen-phosphorus ratio (TN/TP) in runoff under five treatments: downslope tillage without fertilization (CK), downslope tillage with organic fertilizer and chemical fertilizer (T1), downslope tillage with chemical fertilizer (T2), downslope tillage with 1.5 times increase of chemical fertilizer (T3), and across slope tillage with chemical fertilizer (T4) were analyzed. The results showed that: ① The highest TN and TP concentrations in runoff in each treatment occurred in the first six rainfall events after fertilization, and

收稿日期: 2023-10-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(U20A20326); 重庆市自然科学基金项目(CSTB2022NSCQ-MSX0385); 重庆市技术创新与应用发展专项面上项目(CSTB2022TIADGPX0043)。

作者简介: 李清藐, 硕士研究生, 主要从事农业面源污染防治研究。

four of these rainfall events contributed more than 50% of total N and TP loss. ② There was no significant difference in TN and TP loss in T1 compared to T2, and both TN and TP concentrations in runoff of T1 treatment showed highly significant negative correlations with number of days after fertilization ($p < 0.01$). ③ Compared with downslope tillage, across slope tillage can significantly reduce 76.85% of runoff, 75.12% of TN loss and 87.97% of TP loss. ④ TN/TP was significantly higher in CK treatment than that of in T2 and T3 ($p < 0.05$), but not significantly different from that of in T1 and T4 ($p > 0.05$), and over 50% of TN/TP ≥ 50 throughout the year exhibited phosphorus limitation under all treatments. The results are indicative for the precise control of nitrogen and phosphorus loss from agricultural fields.

Key words: runoff; nitrogen and phosphorus loss; sloping land; purple soil

近年来,我国农业发展迅速,成就显著,但部分农业发展模式依旧依赖于生产要素的集约投入,具有高产量、低效率和高投入的特点^[1-2]。不良农作措施导致农地土壤氮、磷元素通过径流大量流失并进入下游水体,造成水体富营养化。我国的《第二次全国污染源普查公报》表明,农业面源污染已经成为了最主要的水污染源,造成了我国水库、河流、湖泊的水质恶化。因此,采用合理的农作措施减少氮、磷流失成为农业面源污染防控和水环境保护的重中之重。

紫色土是我国西南地区广泛分布的土壤类型,具有风化成土速率快、土层薄、结构松散、土壤矿质含量高等特点。紫色土坡耕地面积占紫色土总耕地面积的70%以上^[3],是氮、磷流失主要发源地。近年来,许多学者开展了紫色土土区不同农作措施下径流氮、磷流失的特征研究,比如,朱浩宇等^[4]发现化肥减量配施秸秆可以显著减少径流磷素流失;胡冬妮等^[5]认为长期有机肥代替化肥可以显著减少紫色土坡耕地径流氮素流失风险;林超文等^[6]提出横坡垄作可以显著减少紫色土坡耕地氮、磷流失。尽管已有研究考虑了不同施肥水平^[7]、耕作模式^[8]下紫色土坡耕地氮、磷流失特征,但大部分研究集中于径流氮、磷质量浓度及流失量,对径流氮磷比变化的特征分析尚未明确。氮磷比作为判断氮、磷营养限制状态的重要指标,常见于植物^[9]、土壤^[10-11]、水体^[12]生态化学计量研究。径流作为土壤氮、磷元素的迁移媒介及水体氮、磷元素的重要来源,是氮、磷元素由陆地生态系统迁移至水生态系统的主要途径^[13-14]。因此,明确径流中氮、磷生态化学计量变化可加深对农田氮、磷流失过程及其环境效应的认知。本研究基于2020年12次自然降雨产流事件,分析紫色土坡耕地不同施肥水平和耕作模式下径流氮、磷质量浓度、流失量及氮磷比变化特征,揭示氮、磷流失质量浓度随施肥时间的变化规律,以期对紫色土坡耕地水土流失与面源污染防治提供科学指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于重庆市西南大学后山农业面源污染监测基地(29°48′42″N, 106°24′20″E),该基地是农业农村部南方山地丘陵区种植业面源污染地表径流监测试验点之一,属亚热带季风气候,年均降雨量1 100 mm,且主要集中在5—9月,年平均气温18.3℃,平均日照时间1 270 h,无霜期334 d。试验基地土壤类型为紫色土,成土母质为中生代侏罗纪沙溪庙组紫色砂泥岩。主要的农作物为冬小麦(*Triticum aestivum* L.)和夏玉米(*Zea mays* L.)。

1.2 试验小区

试验共设置了15个径流小区,小区规格为长8 m,宽4 m。小区之间用水泥墙体的田埂隔开,以防止小区间水分和养分交换(图1)。试验共设5个施肥水平处理,分别为:顺坡无施肥对照处理(CK),顺坡混合施用有机肥和化肥处理(T1),顺坡单施化肥处理(T2),顺坡单施化肥增量处理(T3),横坡单施化肥处理(T4)。施肥处理的施肥量和施肥方式均按农民习惯实施。每组处理设置3个重复。各小区为冬小麦-夏玉米轮作的种植模式,冬小麦采用穴播的方式,固定30 cm×30 cm的株行距;夏玉米则采用移栽的方式,固定40 cm×150 cm的株行距。每年4月种植玉米,11月种植小麦,当年8月收获玉米,次年5月收获小麦。试验施用的肥料为尿素(N $\geq$ 46.4%)、农家肥(猪粪肥)、过磷酸钙(P₂O₅ $\geq$ 12.0%)、

氯化钾($\text{K}_2\text{O} \geq 60.0\%$), 施肥方式为撒施, 试验小区无灌溉水(表 1).

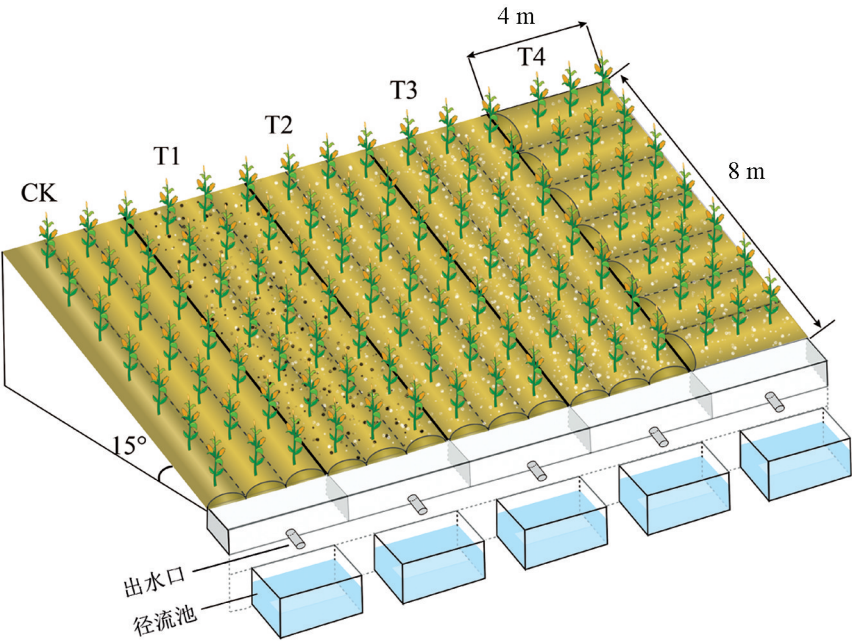


图 1 试验处理示意图

表 1 肥料养分输入情况

种植季	施肥时间	处理	化肥养分输入量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)			有机肥养分输入量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)		
			N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O
小麦	12 月上旬(基肥)	CK	0.00	0.00	0.00			
		T1	68.75	43.75	0.00	28.13	18.75	25.00
		T2	68.75	75.00	106.25			
		T3	100.00	112.50	156.25			
		T4	68.75	75.00	106.25			
	2 月上旬(追肥)	CK	0.00	0.00	0.00			
		T1	68.75	0.00	0.00			
		T2	159.38	0.00	43.75			
		T3	237.50	0.00	68.75			
		T4	159.38	0.00	43.75			
玉米	4 月上旬(基肥)	CK	0.00	0.00	0.00			
		T1	0.00	53.13	0.00	28.13	18.75	25.00
		T2	62.50	90.63	150.00			
		T3	93.75	134.38	225.00			
		T4	62.50	90.63	150.00			
	5 月上旬(追肥)	CK	0.00	0.00	0.00			
		T1	221.88	0.00	0.00	53.13	37.50	46.88
		T2	125.00	0.00	0.00			
		T3	187.50	0.00	0.00			
		T4	125.00	0.00	0.00			

1.3 样品采集与测定方法

试验于 2020 年 1 月 1 日开始为期一年的监测。雨量计记录降雨量, 降雨后产生的地表径流利用径流桶收集。采样时, 先用清洁竹竿充分搅匀径流水, 然后利用清洁矿泉水瓶收集。取样结束后, 清洗径流池, 以备下一次采样和计量。径流池测定每次产流降雨的径流量; 总氮(TN)的测定采用过硫酸钾氧化法, 总磷(TP)的测定采用过硫酸铵消解-钼蓝比色法。

1.4 数据处理

TN, TP 流失量计算公式如下:

$$Q_i = C_i \times V_i \tag{1}$$

式中: Q_i 为观测期间第 i 次地表径流中 TN, TP 流失量(mg); C_i 为第 i 次地表径流中 TN, TP 质量浓度(mg/L); V_i 为第 i 次地表径流中径流量体积(L)。

径流氮磷化学计量比均为摩尔质量比, 计算公式如下:

$$q_{\text{TN}_i}/q_{\text{TP}_i} = \frac{C_{\text{TN}_i}/n_1}{C_{\text{TP}_i}/n_2} \tag{2}$$

式中: C_{TN_i} , C_{TP_i} 为观测期间第 i 次地表径流中 TN, TP 质量浓度(mg/L); n_1 为 N 的相对原子质量, $n_1=14$; n_2 为 P 的相对原子质量, $n_2=31$ 。

1.5 数据分析

采用 SPSS 26.0 软件对数据进行统计分析。采用单因素方差(One-way ANOVA)对不同施肥和耕作下紫色土坡耕地地表径流 TN, TP 质量浓度、流失量及 TN/TP 间的差异性进行分析, 并用最小显著差异法(Least Significance Difference, LSD)进行多重比较。利用 Pearson 相关分析探究施肥时间与径流 TN, TP 质量浓度之间的关系, 并利用回归分析建立统计模型。采用 Microsoft Excel 2016 绘图。

2 结果与分析

2.1 降雨量及径流量变化

研究期间共 12 次产流降雨事件, 集中在 6—7 月(图 2)。其中, 最大降雨量发生在 7 月 2 日, 为 159 mm, 最小降雨量发生在 7 月 19 日, 仅为 2 mm。

各处理间, CK 的最大径流量为 175.30 L, T1 的最大径流量为 127.82 L, T2 的最大径流量 150.28 L, T3 的最大径流量为 168.83 L, T4 的最大径流量为 84.63 L。CK, T2, T3 的最小径流量为 1.75, 1.71, 1.80 L; T1 的最小径流量为 2.63 L; T4 在 6 月 6 日、7 月 6 日、7 月 8 日、7 月 19 日均未产流, 最小径流量为 2.48 L。

总体来看, T1 处理径流量与所有处理差异均无统计学意义($p>0.05$), T4 处理显著低于 CK, T2 和 T3(表 2)。与 T2 处理相比, T1 处理减少了 18.95%的径流量, T4 处理径流量显著减少了 76.85%。

表 2 各处理下径流量、径流 TN 和 TP 平均质量浓度、平均 TN/TP 及 TN 和 TP 流失总量

处理	径流量/ (L · a ⁻¹)	TN 质量浓度/ (mg · L ⁻¹)	TP 质量浓度/ (mg · L ⁻¹)	TN/TP	TN 流失总量/ (g · a ⁻¹)	TP 流失总量/ (mg · a ⁻¹)
CK	96.63±68.49a	4.15±0.88a	0.09±0.03b	146.84±95.07a	2.78±0.72a	86.84±31.69bc
T1	64.07±51.39ab	4.24±1.22a	0.14±0.07ab	105.34±79.98ab	2.45±0.65a	91.92±37.97b
T2	79.05±62.67a	3.91±0.37a	0.14±0.03ab	96.62±103.16b	2.52±0.94a	119.75±28.01b
T3	97.82±69.97a	4.22±1.12a	0.19±0.02a	89.67±89.84b	3.63±1.34a	203.84±75.98a
T4	21.74±29.47b	3.51±0.27a	0.08±0.03b	140.05±83.39ab	0.63±0.65b	14.24±9.70c

注: 不同小写字母表示不同处理间差异有统计学意义($p<0.05$)。

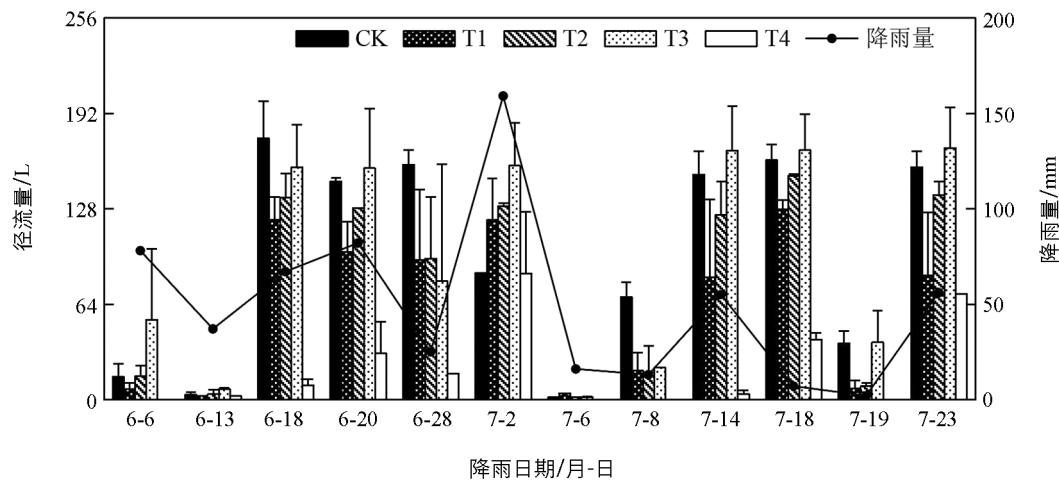


图 2 降雨量及径流量变化

2.2 径流 TN 和 TP 质量浓度变化特征

各次降雨间，径流 TN 质量浓度范围为：CK，2.21~10.98 mg/L；T1，2.08~13.58 mg/L；T2，1.76~8.04 mg/L；T3，1.46~9.84 mg/L；T4，1.68~6.82 mg/L(图 3a)。

各次降雨间，径流 TP 质量浓度范围为：CK，0.03~0.31 mg/L；T1，0.03~0.34 mg/L；T2，0.03~0.37 mg/L；T3，0.06~0.44 mg/L；T4，0.03~0.09 mg/L(图 3b)。

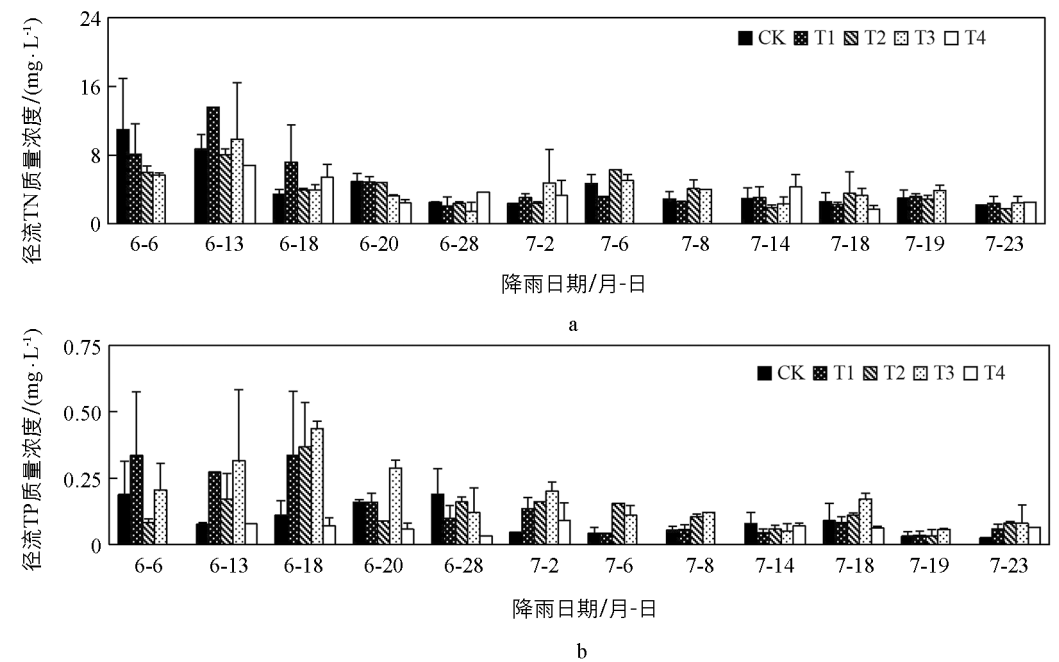


图 3 径流 TN，TP 质量浓度变化

CK 的径流 TN 和 TP 质量浓度与施肥后天数分别呈极显著($p<0.01$)和显著($p<0.05$)的线性负相关，T1 的径流 TN，TP 质量浓度与施肥后天数均呈极显著线性负相关($p<0.01$)，T2 的径流 TN 质量浓度和施肥后天数呈显著线性负相关($p<0.05$)，T3 的径流 TP 质量浓度和施肥后天数呈显著线性负相关($p<0.05$)，T4 的径流 TN，TP 质量浓度与施肥后天数相关性无统计学意义($p>0.05$)(图 4)。

各处理间径流 TN 平均质量浓度差异无统计学意义($p>0.05$)，CK 与 T4 的径流 TP 平均质量浓度显著低于 T3($p<0.05$)(表 2)。与 T2 相比，T3 的径流 TP 平均质量浓度增加了 35.71%，T4 的径流平均质量浓度减少了 42.86%。

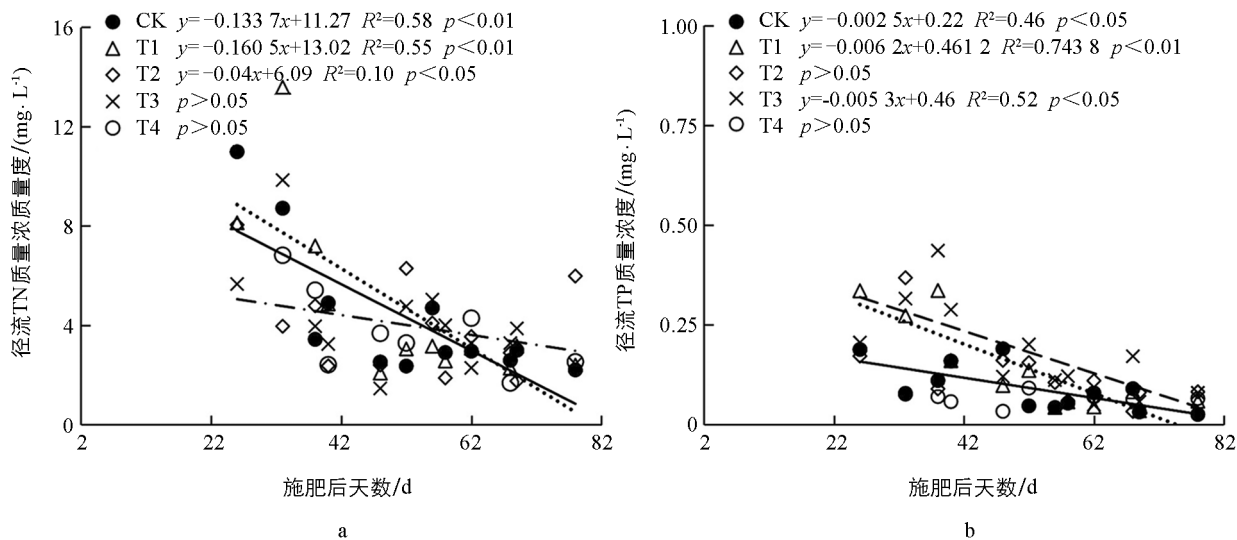


图 4 径流 TN 和 TP 浓度随施肥后天数变化

2.3 径流 TN 和 TP 流失量变化特征

2020 年 6 月 18 日至 7 月 2 日的 4 次产流事件的径流 TN, TP 流失量较大(图 5). 该 4 次降雨的 TN 流失量占研究期间所有产流事件总 TN 流失量的 53.1%(CK), 79.4%(T1), 69.1%(T2), 54.4%(T3), 88.3%(T4). 同时, 该 4 次降雨的 TP 流失量占研究期间所有产流事件总 TP 流失的 77.4%(CK), 91.2%(T1), 79.7%(T2), 77.4%(T3), 74.9%(T4).

总体来看, T4 的 TN 流失量显著低于其他处理($p < 0.05$), 与 T2 处理相比, T4 处理的 TN 流失量减少了 75.11%(表 2). T4 的 TP 流失量与 CK 差异无统计学意义($p > 0.05$), 但显著低于 T1, T2 和 T3($p < 0.05$), 与 T2 相比, T4 的 TP 流失量减少了 87.97%, T3 处理的 TP 流失量增加了 70.32%.

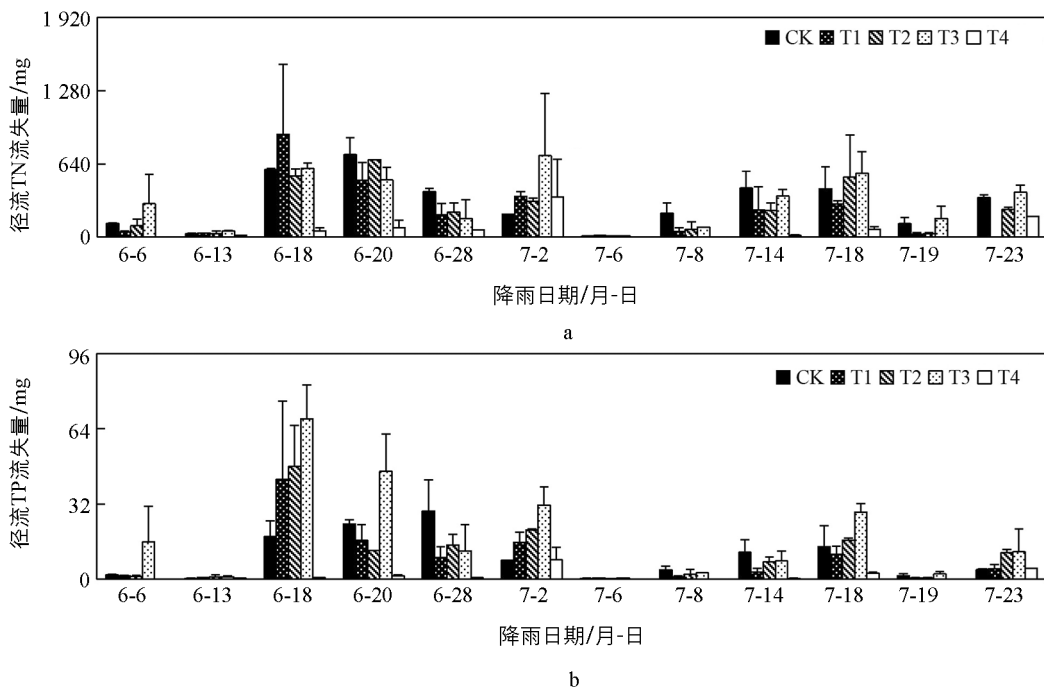


图 5 径流 TN 和 TP 流失量变化

2.4 径流 TN/TP 变化特征及氮磷限制状况

各次降雨事件间, TN/TP 变化范围为 CK: 27.25~287.20; T1: 46.89~162.73; T2: 12.61~168.84; T3: 18.56~209.61; T4 在 6 月 6 日、7 月 6 日、7 月 8 日、7 月 19 日未产流, TN/TP 变化范围为 58.99~110.02(图 6).

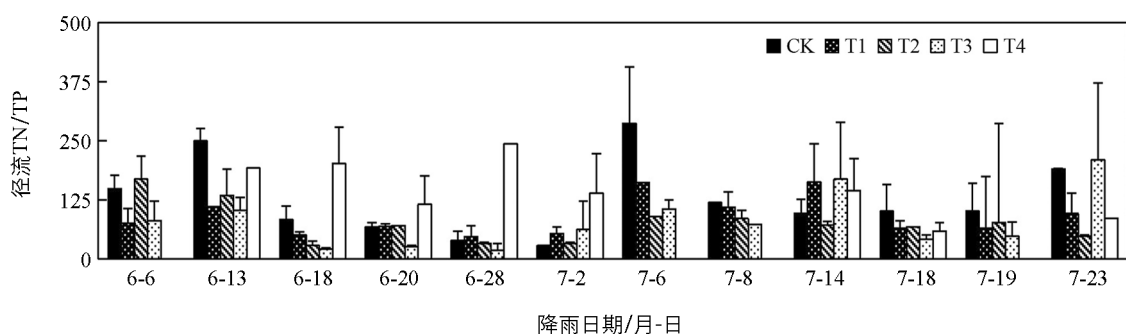


图 6 径流 TN/TP 变化

参照水体富营养化评估的营养物限制性划分标准^[15]，本研究将 TN/TP(摩尔比) ≥ 50 时认定为磷限制，TN/TP(摩尔比) ≤ 22 时认定为氮限制。各次降雨中只有 T1，T3，T4 各有 1，1，4 次的径流 TN/TP 处于氮限制，各处理径流 TN/TP ≥ 50 的占比分别为 92.85% (CK)，75.00% (T1)，64.28% (T2)，53.57% (T3) 和 81.25% (T4) (图 7)。

平均来看，所有处理的 TN/TP 都处于磷限制，其中 CK 处理的 TN/TP 显著高于 T2 和 T3 ($p < 0.05$)，但与 T1，T4 差异无统计学意义 ($p > 0.05$) (表 2)。

3 讨论

本试验中，产流降雨事件集中在 6—7 月。刘双爽等^[16]在重庆农业区县内的汉丰湖和高阳湖的研究结果中显示，6—7 月湖泊水体中 TN，TP 质量浓度也发生了骤增，原因是降雨后径流带来的外源氮磷输入。12 次产流降雨事件中，各处理径流 TN，TP 最高质量浓度均发生在施肥后的前 6 次。其中，6 月 18 日至 7 月 2 日的 4 次产流事件在所有处理下均贡献了超半数的径流 TN，TP 流失量。Zeng 等^[17]在东江的研究中也有类似的结果，在基肥和第一追肥阶段施肥后频繁的降雨事件贡献了大部分地表径流氮、磷流失。因此，6—7 月是当地农田氮、磷流失高风险时期，施肥后产流降雨事件是氮、磷流失防治的关键时间节点。

试验结果中，最初几次 CK 处理的径流 TN 质量浓度处于较高水平甚至大于施肥处理，其原因主要是在前期未产流情况下，大气氮沉降^[18]、土壤内动植物残体成为了 CK 处理的氮源。此外，植物生长不良时，土壤氮素也较易流失。而增量施肥处理的径流氮、磷质量浓度和流失量则均保持在很高的水平，这与闫建梅等^[19]研究相似。土壤中氮素来源广泛，未施肥坡耕地氮素也存在大量流失的风险。过度施用化肥会使氮、磷流失加剧，从而增加农业面源污染风险。因而，确定合理的施肥量也是控制径流氮、磷流失的关键。

研究表明，有机肥化肥配施是有效减少径流 TN，TP 流失的农作措施^[20-21]，但也有学者认为，施用有机肥会造成土壤可矿化氮含量增加，增加农田土壤氮素流失风险^[22]。本研究中，有机肥化肥配施处理在控制 TN 径流流失上效果不佳，这可能是因为有机肥对土壤氮素矿化的影响增加了农田土壤氮素流失风险^[23]；也有可能是试验有机肥施用量相对较少，在提高植物氮素吸收^[24]、改善土壤理化性质^[25]上作用也比较小。与此同时，由于第一次产流降雨距离最后一次施肥时间较久，有机肥对土壤磷素的活化作用促进了磷素在土壤中的迁移^[26]，其在坡下富集而更易在最初几次产流降雨中流失，T1 处理的径流 TP 质量浓度与时间呈现极显著的相关性。这表明，施用有机肥可能会提高施肥后最初几次产流降雨事件的磷流失风险。

本试验结果表明，横坡垄作在控制氮、磷流失上效果强于有机肥化肥配施。和顺坡耕作相比，横坡垄作显著削减了 76.85% 的径流量，减少 75.12% 的径流总氮流失量和 87.97% 的径流总磷流失量。与此同

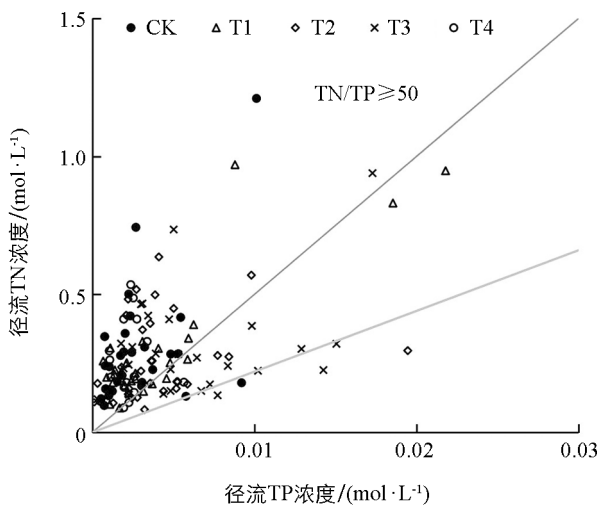


图 7 各次降雨事件不同处理下径流 TN 和 TP 限制状况

时, T4 处理的径流 TN, TP 质量浓度和时间没有显著相关性, 径流 TN, TP 质量浓度峰值也是各处理中最低的. 这是因为横坡垄作可以通过改变微地形, 降低径流流速从而增加径流入渗, 使径流中氮、磷浓度都可以保持在稳定的水平. 因此, 横坡垄作是适合在紫色土坡耕地推广的保护性耕作.

本研究中有有机肥化肥配施和横坡垄作的 TN/TP 都较大, 但各自原因不同. 横坡垄作通过显著削减径流 TP 浓度从而提高 TN/TP, 而有机肥化肥配施则是因为径流 TN 浓度较高所以 TN/TP 较大, 这与 Smith 等^[27]的施用有机肥会通过增加径流 TP 浓度从而减少 TN/TP 的结果不同, 可能也与有机肥施用量有关. 在本研究中, CK 处理的 92.85%、T1 处理的 75.00%、T2 处理的 64.28%、T3 处理的 53.57% 和 T4 处理的 81.25% 径流 TN/TP 均处于磷限制. 这是因为磷素主要以颗粒态磷流失, 而本研究中次降雨事件集中在玉米生长旺盛时期, 作物的截留作用削减了降雨速度, 大大减少了径流泥沙, 从而减小了 TP 浓度, 致使径流 TN/TP 较大而表现为磷限制.

和本试验结果不同, 钱田等^[28]的研究结果表明, 汉丰湖夏季 TN/TP 处于氮限制, 原因是氮素在输入水体的过程中被夏季高强度降雨稀释. 但 Jarvie 等^[29]的研究结果显示, 相对于水文稀释作用, 营养来源随着流域规模增加而增加, 会使得河流氮磷浓度比源头径流还要高, 且在一定条件下, 源头径流和河流中氮、磷限制状况有相同的变化规律. 这说明氮、磷化学计量特征及养分限制状况会受到尺度的影响, 同时, 在养分迁移过程中, 不同尺度间相似或各异的变化特征可能会揭示流失机理, 有助于精确识别氮、磷流失高风险区域, 明确农作措施的控氮、控磷能力. 因此, 未来可以有更多研究关注于径流氮、磷生态化学计量特征, 以及从径流到水体的氮、磷化学计量特征变化及其之间的关系, 制定更准确的径流营养物限制性划分标准, 这将对精准化防治农田氮、磷流失及下游水体富营养化有一定指示意义.

4 结论

1) 各处理下径流 TN, TP 最高质量浓度均发生在施肥后的前 6 次产流降雨时间, 其中的 4 次降雨事件造成了超 50% 的总氮、总磷流失. 6—7 月是当地农田氮、磷流失高风险时期, 施肥后降雨事件是氮、磷流失防治的关键时间节点.

2) 与单施化肥比, 有机肥化肥配施的 TN, TP 流失量没有显著差异, 有机肥化肥配施处理的 TN, TP 浓度与时间都呈现极显著的相关性. 施用有机肥可能会提高施肥后最初几次产流降雨事件的磷流失风险.

3) 横坡垄作在控制氮、磷流失效果上强于有机肥化肥配施. 和顺坡耕作相比, 横坡垄作可以显著削减 76.85% 的径流量, 减少 75.12% 的径流总氮流失量和 87.97% 的径流总磷流失量, 是适合在紫色土坡耕地推广的保护性耕作.

4) 横坡垄作和有机肥化肥配施会显著影响 TN/TP, 所有处理下, 全年径流超 50% 的 TN/TP $\geq$ 50, 为磷限制, 是因为作物对颗粒态磷的拦截作用降低了径流 TP 浓度.

参考文献:

[1] ZOUL L, LIUY S, WANGY S, et al. Assessment and Analysis of Agricultural Non-Point Source Pollution Loads in China: 1978-2017 [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 263: 110400.

[2] ZHANG T, YANG Y H, NI J P, et al. Adoption Behavior of Cleaner Production Techniques to Control Agricultural Non-Point Source Pollution: A Case Study in the Three Gorges Reservoir Area [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 223: 897-906.

[3] 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.

[4] 朱浩宇, 贾安都, 王子芳, 等. 化肥减量对紫色土坡耕地磷素流失的影响 [J]. 中国环境科学, 2021, 41(1): 342-352.

[5] 胡冬妮, 董志新, 朱波. 有机肥替代化肥对紫色土坡耕地氮素流失的影响 [J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(3): 431-440.

[6] 林超文, 罗春燕, 庞良玉, 等. 不同耕作和覆盖方式对紫色丘陵区坡耕地水土及养分流失的影响 [J]. 生态学报, 2010, 30(22): 6091-6101.

[7] 汪涛, 朱波, 况福虹, 等. 有机-无机肥配施对紫色土坡耕地氮素淋失的影响 [J]. 环境科学学报, 2010, 30(4):

781-788.

[8] 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.

[9] 谭雪, 李留彬, 向国伟, 等. 三峡库区消落带落羽杉细根碳氮磷化学计量特征及其与土壤养分的关系研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(7): 14-23.

[10] 宋亚辉, 艾泽民, 乔磊磊, 等. 施肥对黄土高原农地土壤碳氮磷生态化学计量比的影响 [J]. 水土保持研究, 2019, 26(6): 38-45, 52.

[11] 梁珂, 何丙辉. 紫色土区典型土地利用方式下土壤碳、氮、磷生态化学计量特征分析 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(10): 29-36.

[12] 叶玉适, 陈进, 许继军, 等. 长江源和怒江源区水体氮磷化学计量特征初探 [J]. 长江科学院院报, 2019, 36(9): 6-11, 22.

[13] ZHAN X Y, ZHANG Q W, ZHANG H, et al. Pathways of Nitrogen Loss and Optimized Nitrogen Management for a Rice Cropping System in Arid Irrigation Region, Northwest China [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 268: 110702.

[14] 王全九, 杨婷, 刘艳丽, 等. 土壤养分随地表径流流失机理与控制措施研究进展 [J]. 农业机械学报, 2016, 47(6): 67-82.

[15] 聂泽宇, 梁新强, 邢波, 等. 基于氮磷比解析太湖苕溪水体营养现状及应对策略 [J]. 生态学报, 2012, 32(1): 48-55.

[16] 刘双爽, 袁兴中, 王晓锋, 等. 汉丰湖和高阳湖水体氮磷分布及影响因素研究 [J]. 中国环境科学, 2021, 41(8): 3749-3757.

[17] ZENG F F, ZUO Z, MO J C, et al. Runoff Losses in Nitrogen and Phosphorus from Paddy and Maize Cropping Systems: A Field Study in Dongjiang Basin, South China [J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 675121.

[18] 袁玲, 周鑫斌, 辜夕容, 等. 重庆典型地区大气湿沉降氮的时空变化 [J]. 生态学报, 2009, 29(11): 6095-6101.

[19] 闫建梅, 何丙辉, 田太强, 等. 施肥水平与耕作模式对紫色土坡耕地地表径流磷素流失的影响 [J]. 水土保持学报, 2015, 29(1): 132-136.

[20] 唐倩, 王克勤, 宋娅丽, 等. 有机肥对滇中红壤烤烟坡耕地氮磷流失的影响 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 106-116.

[21] 王秋君, 张小莉, 罗佳, 等. 不同有机无机复混肥对小麦产量、氮效率和土壤微生物多样性的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(5): 1003-1009.

[22] 杜晓玉, 徐爱国, 冀宏杰, 等. 华北地区施用有机肥对土壤氮组分及农田氮流失的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2011(6): 13-19.

[23] 张名豪, 卢吉文, 赵秀兰. 有机物料对两种紫色土氮素矿化的影响 [J]. 环境科学, 2016, 37(6): 2291-2297.

[24] 赵吉霞, 禹妍彤, 周芸, 等. 有机肥等氮替代化肥对玉米产量和氮素吸收利用效率的影响 [J]. 水土保持研究, 2022, 29(5): 374-381.

[25] 何石福, 荣湘民, 李艳, 等. 有机肥替代和稻草覆盖对中南丘陵茶园氮磷径流损失的影响 [J]. 水土保持学报, 2017, 31(5): 120-126, 132.

[26] 韩晓飞, 高明, 谢德体, 等. 有机无机肥配施对紫色土旱坡地土壤无机磷迁移的影响 [J]. 水土保持研究, 2017, 24(5): 39-44.

[27] SMITH D R, JARVIE H P, HARMEL R D, et al. The Role of Field-Scale Management on Soil and Surface Runoff C/N/P Stoichiometry [J]. Journal of Environmental Quality, 2019, 48(5): 1543-1548.

[28] 钱田, 黄祺, 何丙辉, 等. 三峡库区汉丰湖水体氮磷及化学计量比季节变化特征 [J]. 环境科学, 2020, 41(12): 5381-5388.

[29] JARVIE H P, SMITH D R, NORTON L R, et al. Phosphorus and Nitrogen Limitation and Impairment of Headwater Streams Relative to Rivers in Great Britain: A National Perspective on Eutrophication [J]. The Science of the Total Environment, 2018, 621: 849-862.