DOI: 10.5846/stxb202206291845

李天阳,何丙辉,张海香,袭培栋.典型农作措施对沙溪庙组壤质紫色土坡耕地径流氮流失的影响.生态学报,2023,43(10):3894-3905. Li T Y, He B H, Zhang H X, Xi P D.Effects of representative agricultural measures on runoff nitrogen loss in loamy purple sloping croplands originating from Shaximiao Group.Acta Ecologica Sinica,2023,43(10):3894-3905.

典型农作措施对沙溪庙组壤质紫色土坡耕地径流氮流 失的影响

李天阳,何丙辉*,张海香,袭培栋

西南大学资源环境学院,重庆 400715

摘要:明确典型农作措施对紫色土坡耕地径流氮(N)流失的影响可为优化面源污染防控措施提供科学依据。基于 2019—2021 年沙溪庙组发育的壤质紫色土坡耕地不同降雨等级次降雨产流事件,分析了常规施肥(CK),优化施肥(T1)和优化施肥+秸秆 还田(T2)措施下径流、径流中总氮(TN)、硝态氮(NO₃-N)及铵态氮(NH₄-N)流失浓度和流失量的变化特征。结果表明,与 CK 相比,T1 和 T2 的径流深分别减小了 4.24%、12.71%,但减小程度不显著(P>0.05);CK 与 T1 的径流系数相等,且比 T2 增加了 12.5%(P>0.05);相比 CK,T1 和 T2 的 TN 浓度增加了 19.35%、25.8%(P>0.05),TN 流失量则均增加了 11.54%(P>0.05),表明 T1 和 T2 的施用也有增加土壤 N 流失的潜在风险。与中雨、大雨和大暴雨事件相比,暴雨事件的径流深分别增加了 6.5%—191.11%(P<0.05),而 TN、NO₃-N 及 NH₄-N 的流失量分别增加 106.38%—177.14%(P>0.05)、32.14%—360%(P<0.05)及 55.56%—600%(P<0.05)。与降雨量、径流系数相比,径流深与 N 流失指标间的相关系数更高(R²=0.32—0.76),表明径流深更 适合用于构建 N 流失预测模型。采用优化施肥和秸秆还田措施时要考虑其对土壤 N 滞留及无机态 N 随径流迁移的风险。 关键词:紫色土坡耕地;地表径流;氮流失;面源污染;农作措施

Effects of representative agricultural measures on runoff nitrogen loss in loamy purple sloping croplands originating from Shaximiao Group

LI Tianyang, HE Binghui*, ZHANG Haixiang, XI Peidong

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

Abstract: Interpreting the effects of representative agricultural measures on runoff nitrogen (N) loss in purple soil sloping croplands can help to provide the scientific basis for optimizing the preventive and control measures of non-point source pollution. During 2019—2021, in accordance with the recorded rainfall events grouped into different rainfall categories on the loamy purple soil sloping cropland originating from Shaximiao Group, the characteristics of runoff yield, the concentrations and losses of total nitrogen (TN), nitrate nitrogen (NO₃-N) and ammonium nitrogen (NH₄-N) in runoff under three representative agricultural measures including conventional fertilization (CK), optimized fertilization (T1), and optimized fertilization+straw returning (T2) measures were carefully examined. The results showed that compared with CK, the runoff depth decreased by 4.24% and 12.71% for T1 and T2, respectively, though these changes were not significantly different (P>0.05). The runoff coefficients in CK and T1 were equal and both 12.5% higher than that in T2 (P>0.05). TN concentration increased by 19.35% and 25.8%, and its loss increased by 11.54% in T1 and T2, respectively, compared with CK (P>0.05), indicating that the applications of T1 and T2 also have a potential risk of increasing soil N loss. Compared with moderate rain, heavy rain and large rainstorms, the runoff depth under rainstorms increased by 6.5%—191.11% (P<0.05), and the losses of TN, NO₃-N, and NH₄-N under rainstorms also increased by

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);农业农村部农田氮磷流失监测调查评价项目(120A0701)

收稿日期:2022-06-29; 采用日期:2023-04-13

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: hebinghui@ swu.edu.cn

http://www.ecologica.cn

106.38%—177.14% (P > 0.05), 32.14%—360% (P < 0.05), and 55.56%—600% (P < 0.05), respectively. Additionally, compared with rainfall amount and runoff coefficient, runoff depth showed relatively stronger correlations with the study N loss variables ($R^2 = 0.32$ —0.76), indicating that runoff depth may be more suitable to describe the dynamics of N loss when developing the prediction models. Our results imply that the risk of soil N retention and inorganic N migration with runoff should be considered when optimized fertilization and straw returning measures are adopted.

Key Words: purple soil sloping cropland; surface runoff; nitrogen loss; non-point source pollution; agricultural measures

坡耕地水蚀引发的土壤氮(N)流失是土壤肥力下降、水体富营养化的重要原因^[1]。而土壤肥力下降促 使单位面积氮肥用量增加,会导致土壤活性氮大量积累且轻易流失,降低 N 肥施用效率,并增加面源污染风 险^[2-3]。硝态氮(NO₃-N)和铵态氮(NH₄-N)是土壤 N 元素的重要形态,二者均具有较高可溶性,并能通过硝 化或反硝化作用而相互转化,是 N 元素流失的主要形式^[4]。降雨是坡耕地土壤 N 流失的关键驱动力^[5]。土 壤中不同形态 N 元素以降雨径流为载体而发生流失,其流失浓度和总量受降雨时机及降雨量大小的影响而 表现出显著差异^[6]。通常,短历时强降雨事件下径流中不同形态 N 浓度及其流失量会相对较大^[7]。但当次 降雨事件的发生时间间隔较长或发生在刚施肥后,即使小雨量降雨产流事件,径流中各形态 N 的浓度和流失 量也较高^[8]。受全球气候变化影响,极端降雨事件频发,可能导致降雨引发的土壤 N 流失过程变得更加复 杂^[1,5]。因此,有必要进一步研究自然降雨作用下径流与土壤 N 流失的变化特征,并明确径流与 N 流失相关 性变化规律,进而为构建土壤 N 流失预测模型,揭示全球气候变化背景下土壤 N 的生物地球化学循环过程和 机制提供理论支撑。

坡耕地农作措施也是导致土壤各形态 N 流失变化的重要因素^[9]。施用化肥与有机肥可引起土壤各形态 N 流失浓度和流失量发生显著差异^[10]。研究发现,施用有机肥全部或部分替代化肥能够显著减少径流中各 形态 N 流失浓度和流失量^[11],但也有研究报道了相反结果^[4]。因此,施用化肥和有机肥对 N 流失的影响仍 需进一步研究。此外,秸秆覆盖常被视为一种防控水土流失和面源污染的有效措施而得到广泛推广^[12]。短 期内,秸秆覆盖可增加地表糙率、降低雨滴动能、延缓产流时间并增强水分入渗,而使产流、产沙及土壤 N 流 失减小^[13]。然而,部分研究发现一定用量的秸秆覆盖可能促进细沟发育,加剧产流、产沙与养分元素流 失^[14-15]。长期来看,秸秆覆盖可改善土壤理化性质,减少产流和产沙^[16],但也可能会增加径流 N 浓度,而导 致其流失量增加^[12,17]。可见,秸秆覆盖下径流中不同形态的氮流失特征仍需进一步明确。

紫色土坡耕地是三峡库区重要的农业生产基地。由于紫色土养分含量高且结构松散,在丰富的降雨和高强度的农耕活动共同作用下,紫色土坡耕地养分流失剧烈,区域农业面源污染风险较大^[18—19]。因此,采取有效农作措施降低紫色土坡耕地 N 等元素的流失成为研究热点^[20—21]。胡冬妮等^[22]研究了 2012—2013 年间紫色土坡耕地小麦-玉米轮作不同施肥方式下 N 流失,发现单施猪厩肥、猪厩肥与化肥配施、秸秆覆盖与化肥组合能分别减少 32.1%、27.5%及 21.2%的 N 流失。Huang 等^[23]在 2018—2019 年间对紫色土坡耕地径流氮流失进行监测,发现与常规化肥施用相比,化肥减量 15%施用能显著减少 40.8%的径流 N 流失。由于受研究时长、观测次数及区域特殊性等方面的影响,自然降雨量的等级变化对紫色土坡耕地径流变化、土壤 N 流失及径流与 N 流失间相关性变化的影响还尚未明确,且有机肥配施与秸秆还田组合下紫色土坡耕地径流 N 流失的特征也并不清楚。本文基于 2019—2021 年紫色土坡耕地不同降雨等级的产流事件,对比研究了施用有机肥和秸秆还田措施下不同形态 N 流失浓度和流失量变化特征,揭示了降雨及产流指标与 N 流失变量间的相关性,以期为紫色土坡耕地水土流失与面源污染防控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

本研究试验点位于重庆市渝北区兴隆镇农田氮磷流失监测基地(106°45′22″E,29°54′46″N),为全国农田

氮磷流失监测网络站点之一。试验点属亚热带季风气候,年平均气温 18°C,年平均日照时数 1340 h,年平均 无霜期为 319 d。试验区 2001—2021 年降雨量在 753.4—1481.6 mm 之间,年均降雨量为 1127.6 mm,本研究 所选取的 2019—2021 年降雨量分别为 1035 mm,1221.4 mm,1386.6 mm,分别代表了试验区降雨相对较少年 份、平水年份、丰水年份的降雨量,具有较好的典型性^[24]。试验点土壤为侏罗系沙溪庙组砂泥岩发育的灰棕

紫泥土石骨土,质地为中壤,试验点 0—20 cm 土层土壤基本性质见表 1。研究区植被主要为常绿阔叶林,分 布有马尾松(Pinus massoniana Lamb.)、白栎(Quercus fabri Hance)、柏树(Cupressus funebris Endl.)等。研究区 紫色土坡耕地主要为雨养农业,无灌溉;种植方式为常见的萝卜(Raphanus sativus L.)-玉米(Zea mays L.)轮作 模式,多为顺坡耕作。

表1 试验点土壤基本性质								
		Table 1	Basic soil properties in th	e study site				
土层 Soil depth/cm	рН	有机质含量 Soil organic matter content/(g/kg)	总氮含量 Total nitrogen content/(g/kg)	硝态氮含量 Nitrate nitrogen content/(mg/kg)	铵态氮含量 Ammonium nitrogen content/(mg/kg)			
0—20	5.89	11.19	0.73	3.44	9.56			

1.2 试验设置

为监测次降雨事件下径流氮流失,选取用地历史一致的连片紫色土坡耕地(坡度为5°),建设径流小区, 每个小区面积为24 m²(长8 m×宽3 m)。各小区间用水泥砖墙隔开,其下端沿小区宽度方向设"T"型集流槽, 其出水口连接容积为2.94 m³(长3 m×宽1.4 m×高0.7 m)的径流池。径流池上方设挡雨板,以阻止雨水进入 而影响径流体积测定。

径流小区内种植模式为萝卜-玉米轮作,均为顺坡耕作。依据试验区农民的施肥传统和农业部门推广的施肥技术,设置3种施肥措施(均设3次重复),包括常规施肥(CK,萝卜季仅施猪粪,玉米季为猪粪与复合肥 混施)、优化施肥(T1,萝卜季为猪粪与有机肥混施,玉米季为猪粪、复合肥及有机肥混施)和优化施肥+秸秆还 田(T2),并将各措施任意布设到各径流小区,布设后的小区分布情况见图1。



Fig.1 Location of the experimental site and the schematic diagram of the runoff plots

CK:常规施肥 Conventional fertilization;T1:优化施肥 Optimized fertilization;T2:优化施肥+秸秆还田 Optimized fertilization+straw returning

按照试验点传统的农业种植方式并结合当地农业主管部门推广利用模式,确定各小区内萝卜播种为穴

播,全生育期无灌溉;玉米为育苗移栽并覆地膜。萝卜在全生育期共施肥 2 次,分别为 10 月下旬施底肥,12 月上旬施追肥。其中,CK 措施下所用肥料为猪粪(N、P₂O₅及 K₂O 占比分别为 0.5%、1.1%及 0.7%,含水率 90%),T1 措施下为猪粪和 35%有机肥(N、P₂O₅及 K₂O 占比分别为 15%、7%及 13%,有机质含量 16%)。玉米 为全生育期施底肥 1 次,时间为 4 月上旬,CK 措施下施用肥料为猪粪、45%复合肥(N、P₂O₅及 K₂O 占比均为 15%),秸秆收获后全部出田;在 T1 措施下玉米施用肥料为猪粪、45%复合肥及 35%有机肥,秸秆收获后全部出田。在 T2 措施下,萝卜与玉米施肥与 T1 一致,但秸秆收获后全部还田,并直接覆盖于小区地表。各措施的 施肥及养分输入量见表 2。

		Table 2	Fertilization co	onditions for ea	ich treatment i	n the monitorin	ig site			
作物 Crop	措施 Measure	种类 Type	含水率 Maiatuma / %	N占比 Proportion/%	P ₂ O ₅ 占比 Proportion/%	K ₂ 0占比 Proportion/%	施肥量 Amount/ (kg/hm ²)	养分输入量 Nutrient input/(kg/hm ²)		
crop	Measure		Moisture/ 70					Ν	Р	Κ
萝卜	СК	猪粪	90	0.5	1.1	0.7	18000	9	8.64	10.45
Raphanus	T1	猪粪	90	0.5	1.1	0.7	18000	9	8.64	10.45
sativus L.		有机肥	1.89	15	7	13	150	22.06	4.50	15.87
	T2 (秸秆还田)	猪粪	90	0.5	1.1	0.7	18000	9	8.64	10.45
		有机肥	1.89	15	7	13	150	22.06	4.50	15.87
玉米	СК	猪粪	90	0.5	1.1	0.7	18000	9	8.64	10.45
Zea mays L.		复合肥	1.95	15	15	15	600	88.2	38.51	73.19
	T1	猪粪	90	0.5	1.1	0.7	18000	9	8.64	10.45
		复合肥	1.95	15	15	15	450	66.15	28.88	54.89
		有机肥	1.89	15	7	13	300	44.13	8.99	31.73
	T2(秸秆还田)	猪粪	90	0.5	1.1	0.7	18000	9	8.64	10.45
		复合肥	1.95	15	15	15	450	66.15	28.88	54.89
		有机肥	1.89	15	7	13	300	44.13	8.99	31.73

表 2 监测点各措施小区施肥情况

CK:常规施肥 conventional fertilization;T1:优化施肥 optimized fertilization;T2:优化施肥+秸秆还田 optimized fertilization+straw returning

1.3 样品采集

于 2019—2021 年间次降雨发生时,记录降雨量。在各小区观测到地表径流后,进行径流水样采集。采集前先记录径流体积,其后用清洁竹竿均匀搅拌径流水,用水样润洗过的塑料瓶在径流池的不同位置和深度进行多点位采样。当径流总体积超过 1000 mL 时,各小区均采集 2 瓶水样(每瓶水样约 500 mL),其中 1 瓶用于分析测试,另 1 瓶备用。采样结束后,清洗径流池供后续监测使用。将收集的水样带回实验室,分别测定径流TN、NO₃-N 及 NH₄-N 浓度,其中 TN 浓度采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定^[25],NO₃-N 浓度采用酚 二磺酸分光光度法测定^[25],NH₄-N 浓度采用靛酚蓝比色法测定^[26]。

1.4 指标计算

根据国家降水量等级标准(GB/T 28592—2012)^[27],将观测的次降雨事件按 24 小时降雨量划分为小雨 (< 9.9 mm),中雨(10—24.9 mm),大雨(25—49.9 mm),暴雨(50—99.9 mm),大暴雨(100—200 mm)和特大 暴雨(>200 mm)。本研究采用径流深和径流系数来表征径流变化特性,其计算公式为:

$$RD_i = Q_i / A \tag{1}$$

$$RC_i = RD_i / RA_i \tag{2}$$

式中, RD_i 表示第 *i* 次产流事件的径流深, mm; Q_i 为第 *i* 次产流事件径流体积, L; A 为小区面积, m²; RC_i 为第 *i* 次产流事件径流系数, 无量纲; RA_i 为第 *i* 次产流事件的降雨量, mm。

同时,计算各次降雨产流事件下的 TN、NO3-N 和 NH4-N 流失量,公式为:

$$L_i = C_i \times Q_i \times 10^{-2} / A \tag{3}$$

式中, L_i 表示第*i*次产流事件中径流 TN、NO₃-N 和 NH₄-N 流失量,kg/ hm²; C_i 表示第*i*次产流事件中测定的径

流TN、NO3-N和NH4-N浓度,mg/L。

1.5 数据分析

利用 SPSS22.0 软件进行数据处理和统计分析。采用单因素方差(One-way ANOVA)分析检验不同降雨等 级与措施间径流深、径流系数、TN、NO₃-N和NH₄-N浓度、流失量及NO₃-N和NH₄-N流失占TN流失比例的差 异性,用LSD(Least significant difference,最小显著差异法)进行多重比较。不同降雨等级与措施间,径流深的 标准差在 0.27—8.64 mm 之间变化,径流系数的标准差在 0.02—0.13 之间变化,TN、NO₃-N和NH₄-N浓度的 标准差分别在 0.13—6.80 mg/L、0.03—4.16 mg/L、0.02—1.88 mg/L 之间变化,TN、NO₃-N和NH₄-N流失量标 准差分别在 0.01—1.02 kg/hm²、0.01—0.54 kg/hm²、0.01—0.28 kg/hm²之间变化,而NO₃-N和NH₄-N流失占 TN 流失比例的标准差在 1.64%—31.12%、1.65%—23.79%之间变化。计算各措施下不同变量 3 次重复的算 术平均值,并利用 Spearman 相关分析探究各变量间的相关性。本文中 P<0.05表示差异显著,P<0.01为差异 极显著。采用 Microsoft Excel 2016 绘图。

2 结果与分析

2.1 次降雨事件

在 2019—2021 年间共记录 75 场次降雨事件(图 2),其降雨量呈偏正态分布,其中在 2019 年 5 月 30 日降雨量最小,为4 mm,在 2021 年 7 月 8 日降雨量最大,为 125.1 mm;所有次降雨事件的平均降雨量为(33.69±27.72) mm。



图 2 2019—2021 年全部降雨事件及产流事件

Fig.2 Total rainfall events and rainfall events producing runoff during 2019-2021

43 卷

在全部降雨事件中,仅有 22 场次降雨事件产生地表径流(图 2),其降雨量同样呈偏正态分布,其中在 2019 年 5 月 13 日产流降雨量最小,为 15 mm,在 2021 年 7 月 8 日产流降雨量最大,为 125.1 mm;22 次产流降 雨事件的平均降雨量为(67.55±26.83) mm。

对产流降雨事件按降雨量等级分类获得中雨事件 1 次,发生在 2019 年 5 月 13 日,降雨量为 15 mm;大雨 事件 4 次,分别发生在 2019 年 8 月 9 日、2020 年 7 月 26 日、2021 年 5 月 7 日及 8 月 24 日,降雨量分别为 30、 48.2、41.2 mm 及 37.7 mm;暴雨事件 15 次,分别发生在 2019 年 7 月 30 日、2020 年 4 月 24 日、6 月 3 日、17 日、 21 日、28 日、7 月 3 日、13 日、18 日、2021 年 5 月 3 日、7 月 12 日、16 日、19 日,8 月 29 日及 9 月 7 日,其降雨量 在 50.5—99.4 mm 之间,平均值为(72.52±17.34) mm;大暴雨事件 2 次,发生在 2021 年 7 月 8 日和 8 月 14 日, 降雨量分别为 125.1、100.7 mm。

2.2 径流深与径流系数变化

ą

与 CK 相比,T1 和 T2 的径流深分别减少了 4.24%、12.71%,但差异并不显著(P>0.05)(表 3)。各降雨等 级间,暴雨事件下径流深最大((13.1±7.9) mm),分别比中雨、大雨和大暴雨事件增加了 191.11%、178.72%、 6.5%(P<0.05)(表 3)。相同措施不同降雨等级,暴雨事件下径流深与大暴雨差异不显著(P>0.05),但均显著 高于大雨和中雨事件(P<0.05)(图 3)。





Fig.3 Runoff depth and runoff coefficient during 2019-2021

图中不同小写字母表示在 P<0.05 水平下不同降雨等级间差异显著

長3	不同降雨等级及措施下径流深	、径流系数、N浓	度、流失量及占比
----	---------------	----------	----------

Table 3 Runoff depth, runoff coefficient and the concentrations, losses and proportions of N variables in each rainfall category and treatment

指标		措施 Measure		降雨等级 Rainfall category				
Variable	СК	T1	T2	中雨	大雨	暴雨	大暴雨	
RD /mm	11.8±8.2a	11.3±7.4a	10.3±7.2a	$4.5 \pm 0.69 \mathrm{b}$	$4.7\pm2.4\mathrm{b}$	13.1±7.9a	12.3±4.8a	
RC	0.18±0.12a	0.18±0.11a	0.16±0.10a	0.30±0.05a	$0.12 \pm 0.04 \mathrm{c}$	$0.18{\pm}0.12\mathrm{b}$	$0.11 \pm 0.06c$	
TNc/(mg/L)	6.2±4.0a	7.4±4.9a	7.8±5.2a	10.3±5.4a	8.0±5.1a	6.8±4.6a	6.5±4.2a	
NO_3 -Nc/(mg/L)	3.1±2.9a	3.4±2.6a	4.0±3.7a	$0.40\pm0.11\mathrm{b}$	3.0±2.3a	3.9±3.4a	$2.9 \pm 1.9 \mathrm{ab}$	
$\rm NH_4$ -Nc/(mg/L)	1.2±1.3a	1.3±1.6a	1.1±1.1a	$0.55{\pm}0.16{\rm b}$	$0.76{\pm}0.57{\rm b}$	1.4±1.5a	$0.60{\pm}0.60{\rm b}$	
TNl/(kg/hm ²)	$0.78 \pm 0.79 a$	$0.87 \pm 0.89 a$	$0.87 \pm 0.92a$	0.47±0.27a	0.35±0.26a	$0.97 \pm 0.95 a$	0.98±0.82a	
NO_3 -Nl/(kg/hm ²)	0.32±0.47a	$0.32 \pm 0.46a$	0.34±0.51a	$0.01{\pm}0.01{\rm b}$	$0.28 \pm 0.46 \mathrm{ab}$	0.37±0.51a	$0.25 \pm 0.28 \mathrm{ab}$	
$\rm NH_4$ -Nl/(kg/hm ²)	0.12±0.19a	0.12±0.24a	0.09±0.17a	$0.02 \pm 0.01 \mathrm{b}$	0.09 ± 0.14 ab	0.14±0.23a	$0.03{\pm}0.03{\rm b}$	
NO ₃ -Np/%	33.1±27.7a	33.6±29.1a	33.3±29.7a	4.8±4.7c	$25.3{\pm}21.4{\rm b}$	37.4±30.4a	$33.5 \pm 24.8 \mathrm{ab}$	
$\rm NH_4$ -Np/%	15.3±16.9a	13.6±16.3a	12.1±14.3a	6.5±5.9a	13.9±19.5a	14.9±15.8a	7.6±7.6a	
NH ₄ -NI/(kg/hm ²) NO ₃ -Np/% NH ₄ -Np/%	0.12±0.19a 33.1±27.7a 15.3±16.9a	0.12±0.24a 33.6±29.1a 13.6±16.3a	0.09±0.17a 33.3±29.7a 12.1±14.3a	0.02±0.01b 4.8±4.7c 6.5±5.9a	0.09±0.14ab 25.3±21.4b 13.9±19.5a	$0.14 \pm 0.23a$ $37.4 \pm 30.4a$ $14.9 \pm 15.8a$	0.03±0.03b 33.5±24.8ab 7.6±7.6a	

措施和降雨等级比较中,同行不同小写字母表示在 P<0.05 水平下差异显著; RD:径流深 runoff depth;RC:径流系数 runoff coefficient;TNc:总 氮浓度 total nitrogen concentration;NO₃-Nc:硝态氮浓度 nitrate nitrogen concentration;NH₄-Nc:铵态氮浓度 ammonium nitrogen;TNI:总氮流失量 total nitrogen loss;NO₃-NI:硝态氮流失量 nitrate nitrogen loss;NH₄-NI:铵态氮流失量 ammonium nitrogen loss;NO₃-Np:硝态氮占总氮流失比例 Proportions of NO₃-N in TN loss;NH₄-Np:铵态氮占总氮流失比例 Proportions of NH₄-N in TN loss CK 与 T1 的径流系数相同,比 T2 增高了 12.5%,但差异不显著(P>0.05)(表 3)。中雨事件下径流系数最高(0.30±0.05),分别比大雨、暴雨、大暴雨事件增高了 150%、66.67%和 173.72%(P<0.05)(表 3)。相同措施下不同降雨等级的径流系数差异显著(P<0.05),且均表现为中雨事件最高,大雨事件最低(图 3)。

2.3 径流氮浓度变化

3900

与 CK 相比, T1 和 T2 的径流 TN 浓度分别增加了 19.35%、25.8%,但差异并不显著(P>0.05)(表 3)。中雨事件径流 TN 浓度最高((10.3±5.4) mg/L),分别比大雨、暴雨、大暴雨事件增加了 28.75%、51.47%、58.46%,但差异不显著(P>0.05)(表 3)。 CK 下各降雨等级间径流 TN 浓度差异不显著(P>0.05);而 T1 和 T2下,中雨事件径流 TN 浓度均最高,分别为(14.05±0.64) mg/L、(14.45±0.21) mg/L,比大雨事件增加了 62.99%、66.09%(P>0.05),比暴雨事件增加了 115.16%、103.52%(P<0.05),比大暴雨事件增加了 122.31%、146.59%(P<0.05)(图 4)。

与 CK 相比, T1 和 T2 的径流 NO₃-N 浓度分别增加了 9.68%、29.03%, 但差异不显著(P>0.05)(表 3)。各 降雨等级下, 暴雨事件径流 NO₃-N 浓度最高((3.9±3.4) mg/L), 分别比中雨、大雨、大暴雨事件增高了 875%、 30%、34.48%(P<0.05)(表 3)。相同措施不同降雨等级径流 NO₃-N 浓度差异均不显著(P>0.05)(图 4)。

与 CK 相比, T1 的径流 NH₄-N 浓度增加了 8.33%, 而 T2 则减少了 8.33%, 但差异不显著(P>0.05)(表 3)。暴雨事件的径流 NH₄-N 浓度最高((1.4±1.5) mg/L), 分别比中雨、大雨、大暴雨事件增高了 154.54%、 84.21%、133.33%(P<0.05)(表 3)。相同措施不同降雨等级径流 NH₄-N 浓度差异均不显著(P>0.05)(图 4)。



图中不同小写字母表示在 P<0.05 水平下不同降雨等级间差异显著

2.4 径流氮流失量及占比变化

与 CK 相比,T1 和 T2 的径流 TN 流失量均增加了 11.54%,但差异不显著(P>0.05)(表 3)。暴雨事件的 径流 TN 流失量((0.97±0.82) kg/hm²)与大暴雨事件((0.98±0.82) kg/hm²)相差不大,分别比中雨、大雨、增 加了 106.38%、177.14%,但差异并不显著(P>0.05)(表 3)。相同措施不同降雨等级间径流 TN 流失量差异均 不显著(P>0.05)(图 5)。

CK 与 T1 的径流 NO₃-N 流失量相同,均比 T2 减小 5.88%,但差异不显著(P>0.05)(表 3)。暴雨事件的径流 NO₃-N 流失量最大((0.37±0.51) kg/hm²),分别比中雨、大雨、大暴雨事件增加了 360%、32.14%、48%,但差异不 显著(P<0.05)(表 3)。相同措施不同降雨等级间的径流 NO₃-N 流失量差异均不显著(P>0.05)(图 5)。

CK 与 T1 的径流 NH₄-N 流失量相同,均比 T2 增加了 33.33%,但差异不显著(P>0.05)(表 3)。暴雨事件 NH₄-N 流失量最大((0.14±0.23) kg/hm²),分别比中雨、大雨、大暴雨事件增加了 600%、55.56%、366.67% (P<0.05)(表 3)。相同措施不同降雨等级间的径流 NH₄-N 流失量差异不显著(P>0.05)(图 5)。

与 CK 相比, T1 和 T2 的径流 NO₃-N 流失占比分别增加了 1.51%、0.6%,差异并不显著(P>0.05)(表 3)。 暴雨事件径流 NO₃-N 流失占比最大(37.4%±30.4%),分别比中雨、大雨、大暴雨事件增加了 679.17%、 47.83%、11.64%(P<0.05)(表 3)。CK 下,各降雨等级间径流 NO₃-N 流失占比差异不显著(P>0.05);而在 T1 和 T2 下,暴雨事件径流 NO₃-N 流失占比与大雨、大暴雨事件下差异不显著(P>0.05),但显著高于中雨事件 (P<0.05)(图 6)。

图中不同小写字母表示在 P<0.05 水平下不同降雨等级间差异显著

与 CK 相比, T1 和 T2 的径流 NH₄-N 流失占比分别减少了 11.11%、20.92%, 但差异不显著(P>0.05) (表 3)。暴雨事件径流 NH₄-N 流失占比最大(14.9% ± 15.8%), 分别比中雨、大雨、大暴雨事件增加了 129.23%、7.19%、96.05%, 但差异不显著(P>0.05)(表 3)。相同措施不同降雨等级间径流 NH₄-N 流失占比差

异均不显著(P>0.05)(图 6)。

2.5 各变量间的相关性

由表4可知,降雨量与径流深及TN流失量、NO₃-N流失占比呈极显著正相关(P<0.01),而与NO₃-N浓度 和流失量呈显著正相关(P<0.05)。径流深与径流系数、NO₃-N和NH₄-N的浓度及其流失占比及TN流失量 均呈极显著正相关(P<0.01)。径流系数与TN流失量、NH₄-N的浓度及其流失占比呈极显著正相关(P< 0.01)。此外,TN、NO₃-N和NH₄-N的浓度与流失量间呈极显著正相关(P<0.01)。NO₃-N流失占比与NO₃-N 浓度及流失量、NH₄-N浓度呈极显著正相关(P<0.01),与TN和NH₄-N流失量呈显著正相关(P<0.05)。NH₄-N流失占比与TN浓度呈显著负相关(P<0.05),而与NH₄-N浓度呈极显著正相关(P<0.01),与NO₃-N流失占 比呈显著正相关(P<0.05)。

	Table 4 Spearman correlations between study variables									
	RD	RC	TNc	NO3-Nc	$\rm NH_4$ -Nc	TNl	NO3-NI	$\rm NH_4$ -Nl	NO3-Np	$\rm NH_4$ -Np
RA	0.60 **	ns	ns	0.28 *	ns	0.34 **	0.27 *	ns	0.39 **	ns
RD		0.66 **	ns	0.35 **	0.53 **	0.76 **	ns	ns	0.37 **	0.32 **
RC			ns	ns	0.54 **	0.59 **	ns	ns	ns	0.34 **
TNc				0.67 **	0.45 **	0.72 **	0.35 **	0.44 **	ns	-0.27 *
NO_3 -Nc					0.54 **	0.68 **	0.55 **	0.49 **	0.65 **	ns
$\rm NH_4$ -Nc						0.67 **	ns	0.38 **	0.45 **	0.63 **
TNI							0.30 *	0.38 **	0.32 *	ns
NO3-NI								0.79 **	0.41 **	ns
$\rm NH_4$ -Nl									0.30*	ns
NO ₃ -Np										0.30*
			1-1-1-1-1-1			10.7				

表 4 各变量间的 Spearman 相关性

**. 相关性在 0.01 水平下显著; *. 相关性在 0.05 水平下显著; ns.相关性在 0.05 水平下不显著; RA:降雨量 Rainfall

3 讨论

3.1 不同农作措施和降雨等级对径流的影响

本试验中,常规施肥、优化施肥及其与秸秆还田组合3种措施间的径流深与径流系数差异不显著,但后两种措施的径流深与径流系数相比均有不同程度减小,说明优化施肥及其与秸秆还田措施具有减小地表径流的潜力。这主要是因为优化施肥能够改善土壤的孔隙度、饱和导水率及有机质含量等理化性质而增加径流入渗,进而减小径流深、径流系数^[28-29]。Li等^[30]分析了紫色土坡耕地内上百次降雨产流事件,发现与单施化肥相比,有机肥与化肥优化配施能使地表径流减少6.71%。同时,秸秆还田也可通过延缓产流时间,增强水分入渗及改善土壤理化性质等来减少产流^[13,16]。林超文等^[12]在紫色土丘陵区坡耕地观测到秸秆还田能减少73.9%—86.2%的地表径流。本试验中3种措施间径流深与径流系数差异不显著,这与试验时间尚短,各措施间的土壤理化性质差异还未能显著体现有关。Zanon等^[4]发现12年的优化施肥与秸秆还田对土壤理化性质的改善还不足以显著减小地表产流。此外,在较大雨强下,秸秆还田会加剧产流^[14,21],这也是引起各措施间径流深与径流系数差异不显著的原因。

按照国家降水量等级标准(GB/T 28592—2012),将记录的次降雨事件划分为小雨、中雨、大雨、暴雨和大 暴雨等 5 个等级,而产流则发生在中雨及以上次降雨事件。径流深在暴雨与大暴雨事件下显著高于中雨与大 雨事件,且与降雨量呈显著正相关,这与杨任翔等^[31]研究结果一致。然而,有研究观测到小降雨产流事件径 流深显著高于大降雨产流事件^[9]。Meng 等^[32]也发现在相同土地利用类型下,中雨事件径流深显著高于暴雨 事件。产生上述差异的原因与土壤前期的含水率有关,当土壤前期含水率接近或达到饱和后,小降雨产流事 件的径流深也可显著高于大降雨产流事件^[33]。试验还发现径流系数在中雨事件显著高于大雨和大暴雨事 件,其变化规律与径流深并不完全一致,这也是受到土壤前期含水率变化的影响^[34]。任雨之等^[35]认为土壤 前期含水率变化是引起紫色土区坡耕地坡面径流深与径流系数对降雨等级有不同响应的原因。

3.2 不同农作措施和降雨等级对径流氮流失的影响

与常规施肥相比,优化施肥及其与秸秆还田组合措施增加了径流中 TN 浓度,但差异不显著。其主要原因为优化施肥及其与秸秆还田组合能增加土壤中 TN 含量^[13,22],从而增加 TN 随径流流失的机会,但同时优化措施可减少地表径流,使得各措施间的 TN 浓度并不显著。尽管中雨事件下 TN 浓度最高,但与其他降雨等级间差异并不显著。这是因为在大雨、暴雨和大暴雨事件下,径流深相对较高,径流稀释作用可使得 TN 浓度与中雨事件下差异不显著^[36-37]。NO₃-N 和 NH₄-N 浓度在各措施间的差异不显著,但在各降雨等级间差异显著,且均在暴雨事件下最高,这与降雨频率及发生时机有关^[38]。NO₃-N 和 NH₄-N 是肥料中 N 主要存在形式, 其浓度在刚施肥后的降雨径流中较高,并随降雨发生间隔时间的延长而逐渐减小^[8]。本试验中,暴雨发生频率最高,当其发生在刚施肥后,会导致该事件下径流 NO₃-N 和 NH₄-N 浓度相对较高。在比较相同措施各降雨间不同形态 N 浓度变化时,TN 变化与 NO₃-N 和 NH₄-N 并不一致,这与除 NO₃-N 和 NH₄-N 外,有机 N 的浓度

本试验中,TN、NO₃-N和NH₄-N的流失量在各措施与各降雨等级间的变化规律与它们的浓度相似,表明TN、NO₃-N和NH₄-N的流失量主要取决于浓度而非径流。同时,相关分析结果也显示TN流失量与径流深(*R*²=0.76)、TN浓度(*R*²=0.72)均呈极显著正相关,而NO₃-N和NH₄-N的流失量则仅与它们的浓度(*R*²=0.55、0.38)呈极显著正相关。以上结果与Schlesinger等^[5]发现不同形态N流失量主要取决于径流而非其浓度的情况相反,造成这种差异的原因是本试验中施肥和秸秆还田增加土壤N元素浓度而减少径流产生,使得浓度效应相比径流更强^[12,40]。本试验发现各措施间的NO₃-N和NH₄-N流失占TN流失的比例差异不显著,但NO₃-N流失占比在各降雨等级间差异显著,且NO₃-N流失占比(各措施在33.11%—33.57%之间)远高于NH₄-N流失占比(各措施在12.12%—15.32%之间),这与Udawatta等^[41]的结果类似,其原因为硝化作用和氨挥发导致NO₃-N占比相比NH₄-N更高^[42]。值得注意的是,NO₃-N与NH₄-N流失占比之和接近TN流失量的一半,表明溶解态无机N随径流流失是TN流失的重要途径。各措施TN浓度远高于GB3838—2002《地表水环境质量标准》中V类限定值2mg/L,因此控制溶解态N迁移是减小土壤N损失并降低下游水体TN浓度的关键^[43—44]。

4 结论

与常规施肥相比,优化施肥及其与秸秆还田组合措施下的径流深分别减少了 4.24%、12.71%,而 TN 浓度 分别增加了 19.35%、25.8%,流失量则均增加了 11.54%;常规施肥与优化施肥的 NO₃-N、NH₄-N 流失量相同,均比优化施肥与秸秆还田组合的 NO₃-N 流失量减少 5.88%,而 NH₄-N 流失量增加了 33.33%;优化施肥及其 与秸秆还田组合措施有增加土壤 N 流失的潜在风险。暴雨事件相比其他降雨等级事件可使 TN、NO₃-N 及 NH₄-N 的流失量分别增加 106.38%—177.14%、32.14%—360%、55.56%—600%。与降雨量、径流系数相比,径 流深与 TN、NO₃-N 及 NH₄-N 的浓度、TN 流失量及 NO₃-N 与 NH₄-N 流失占比均呈极显著正相关,说明径流深 更适合用于构建 N 流失预测模型。NO₃-N 和 NH₄-N 流失占 TN 流失的比例较高,溶解态无机 N 随径流流失 是 TN 流失的重要途径。采取优化施肥和秸秆还田措施时需进一步考虑其对土壤 N 含量的影响,减少土壤 N 的滞留及无机态 N 迁移是控制紫色土坡耕地 N 流失,降低下游水体富营养化风险的关键。

参考文献(References):

- [1] Zhang Y F, Wu H, Yao M Y, Zhou J, Wu K B, Hu M P, Shen H, Chen D J. Estimation of nitrogen runoff loss from croplands in the Yangtze River Basin: a meta-analysis. Environmental Pollution, 2021, 272: 116001.
- [2] Abdelhafez A A, Abbas H H, Abd-El-Aal R S, Kandil N F, Li J H, Mahmoud W. Environmental and health impacts of successive mineral

fertilization in Egypt. CLEAN-Soil, Air, Water, 2012, 40(4): 356-363.

- [3] Wang T, Zhu B. Nitrate loss via overland flow and interflow from a sloped farmland in the hilly area of purple soil, China. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2011, 90(3): 309-319.
- [4] Zanon J A, Favaretto N, Democh Goularte G, Dieckow J, Barth G. Manure application at long-term in no-till: effects on runoff, sediment and nutrients losses in high rainfall events. Agricultural Water Management, 2020, 228: 105908.
- [5] Schlesinger W H, Abrahams A D, Parsons A J, Wainwright J. Nutrient losses in runoff from grassland and shrubland habitats in Southern New Mexico: I. rainfall simulation experiments. Biogeochemistry, 1999, 45(1): 21-34.
- [6] Ruiz Diaz D A, Sawyer J E, Barker D W, Mallarino A P. Runoff nitrogen loss with simulated rainfall immediately following poultry manure application for corn production. Soil Science Society of America Journal, 2010, 74(1): 221-230.
- [7] Song W M, Chen S P, Zhou Y D, Lin G H. Rainfall amount and timing jointly regulate the responses of soil nitrogen transformation processes to rainfall increase in an arid desert ecosystem. Geoderma, 2020, 364: 114197.
- [8] Smith D R, Owens P R, Leytem A B, Warnemuende E A. Nutrient losses from manure and fertilizer applications as impacted by time to first runoff event. Environmental Pollution, 2007, 147(1): 131-137.
- [9] Ramos M C, Martínez-Casasnovas J A. Nutrient losses by runoff in vineyards of the Mediterranean Alt Penedès region (NE Spain). Agriculture, Ecosystems & Environment, 2006, 113(1/2/3/4): 356-363.
- [10] Bah H, Zhou M H, Ren X, Hu L, Dong Z X, Zhu B. Effects of organic amendment applications on nitrogen and phosphorus losses from sloping cropland in the Upper Yangtze River. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 302: 107086.
- [11] Lourenzi C R, Ceretta C A, Ciancio N H R, Tiecher T L, da Silva L O S, De Conti L, Girotto E, Ferreira P A A, Vidal R F, Scopel G, Marchezan C, Brunetto G. Forms of nitrogen and phosphorus transfer by runoff in soil under no-tillage with successive organic waste and mineral fertilizers applications. Agricultural Water Management, 2021, 248: 106779.
- [12] 林超文,罗春燕,庞良玉,黄晶晶,付登伟,涂仕华,蒲波.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.生态学报,2010,30(22):6091-6101.
- [13] Prosdocimi M, Tarolli P, Cerdà A. Mulching practices for reducing soil water erosion: a review. Earth-Science Reviews, 2016, 161: 191-203.
- [14] Rahma A E, Wang W, Tang Z J, Lei T W, Warrington D N, Zhao J. Straw mulch can induce greater soil losses from losses from losses slopes than no mulch under extreme rainfall conditions. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 232: 141-151.
- [15] Jin K, Cornelis W M, Gabriels D, Baert M, Wu H J, Schiettecatte W, Cai D X, De Neve S, Jin J Y, Hartmann R, Hofman G. Residue cover and rainfall intensity effects on runoff soil organic carbon losses. CATENA, 2009, 78(1): 81-86.
- [16] Jordán A, Zavala L M, Gil J. Effects of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain. CATENA, 2010, 81(1): 77-85.
- [17] 莫明浩,谢颂华,张杰,涂安国. 红壤坡地氮溶质分层输出特征试验研究. 水利学报, 2016, 47(7): 924-933.
- [18] 徐亚娟,高扬,朱宁华,朱波,陈维梁,于贵瑞.紫色土流域次降雨条件下碳、磷非点源输出过程及其流失负荷.生态学报,2014,34 (17):5021-5029.
- [19] 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. 中国农业科学, 2013, 46(12): 2492-2500.
- [20] 杜映妮,李天阳,何丙辉.不同施肥和耕作处理紫色土坡耕地碳、氮、磷流失特征.植物营养与肥料学报, 2021, 27(12): 2149-2159.
- [21] 刘海涛,姚莉,朱永群,王宏,许文志,王谢,林超文.深松和秸秆覆盖条件下紫色土坡耕地水分养分流失特征.水土保持学报,2018, 32(6):52-57,165.
- [22] 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. 中国生态农业学报:中英文, 2022, 30(3): 431-440.
- [23] Huang R, Gao X S, Wang F H, Xu G X, Long Y, Wang C Q, Wang Z F, Gao M. Effects of biochar incorporation and fertilizations on nitrogen and phosphorus losses through surface and subsurface flows in a sloping farmland of Entisol. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 300: 106988.
- [24] 重庆市水利局. 重庆市水资源公报 2001—2021. 重庆: 重庆市水利局, 2001—2021.
- [25] 国家环境保护总局,水和废水监测分析方法编委会编.水和废水监测分析方法.4版.北京:中国环境科学出版社,2002.
- [26] 魏海峰, 刘长发, 张俊新. 靛酚蓝法测定水中氨氮方法的改进. 实验室研究与探索, 2013, 32(7): 17-19.
- [27] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 28592-2012 降水量等级. 北京:中国标准出版 社, 2012.
- [28] Bandyopadhyay K K, Misra A K, Ghosh P K, Hati K M. Effect of integrated use of farmyard manure and chemical fertilizers on soil physical properties and productivity of soybean. Soil and Tillage Research, 2010, 110(1): 115-125.
- [29] Dhiman D, Sharma R, Sankhyan N K, Sepehya S, Sharma S K, Kumar R. Effect of regular application of fertilizers, manure and lime on soil health and productivity of wheat in an acid Alfisol. Journal of Plant Nutrition, 2019, 42(19): 2507-2521.

- [30] Li T Y, Zhang Y, He B H, Wu X Y, Du Y N. Nitrate loss by runoff in response to rainfall amount category and different combinations of fertilization and cultivation in sloping croplands. Agricultural Water Management, 2022, 273: 107916.
- [31] 杨任翔,邱凡,郑佳舜,赵子贵,罗骆,李桂芳.赤红壤植蔗坡地坡面径流及溶解态氮磷流失特征.生态学报,2022,42(3):904-913.
- [32] Meng X M, Zhu Y, Yin M S, Liu D F. The impact of land use and rainfall patterns on the soil loss of the hillslope. Scientific Reports, 2021, 11 (1): 1-10.
- [33] Sarkar R, Dutta S, Dubey A K. An insight into the runoff generation processes in wet sub-tropics: field evidences from a vegetated hillslope plot. CATENA, 2015, 128: 31-43.
- [34] Wei L H, Zhang B, Wang M Z. Effects of antecedent soil moisture on runoff and soil erosion in alley cropping systems. Agricultural Water Management, 2007, 94(1/2/3): 54-62.
- [35] 任雨之,郑江坤,付滟,王文武,曾倩婷,向明辉,陈鑫.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.中国水土保持科学,2020,18(3):90-98.
- [36] Edwards D R, Daniel T C. Effects of poultry litter application rate and rainfall intensity on quality of runoff from fescuegrass plots. Journal of Environmental Quality, 1993, 22(2): 361-365.
- [37] Xue L H, Yu Y L, Yang L Z. Maintaining yields and reducing nitrogen loss in rice wheat rotation system in Taihu Lake region with proper fertilizer management. Environmental Research Letters, 2014, 9(11): 115010.
- [38] Eghball B, Gilley J E, Baltensperger D D, Blumenthal J M. Long? term manure and fertilizer application effects on phosphorus and nitrogen in runoff. Transactions of the ASAE, 2002, 45(3): 687-694.
- [39] 王静,王允青,郭熙盛,吕国安,叶寅,丁树文.不同农艺措施对巢湖沿岸坡耕地水土及径流氮输出的控制效果.水土保持学报,2016, 30(4):38-43,48.
- [40] Park S I, Yang H I, Park H J, Seo B S, Jeong Y J, Lim S S, Kwak J H, Kim H Y, Yoon K S, Lee S M, Choi W J. Rice straw cover decreases soil erosion and sediment-bound C, N, and P losses but increases dissolved organic C export from upland maize fields as evidenced by δ¹³ C. Science of the Total Environment, 2021, 753: 142053.
- [41] Udawatta R P, Motavalli P P, Garrett H E, Krstansky J J. Nitrogen losses in runoff from three adjacent agricultural watersheds with claypan soils. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2006, 117(1); 39-48.
- [42] 王静,郭熙盛,王允青.秸秆覆盖与平衡施肥对巢湖流域农田氮素流失的影响研究.土壤通报,2011,42(2):331-335.
- [43] Cade-Menun B J, Bell G, Baker-Ismail S, Fouli Y, Hodder K, McMartin D W, Perez-Valdivia C, Wu K S. Nutrient loss from Saskatchewan cropland and pasture in spring snowmelt runoff. Canadian Journal of Soil Science, 2013, 93(4): 445-458.
- [44] 蒲玉琳,谢德体,林超文,倪九派,魏朝富.紫色土区不同植物篱模式控制坡耕地氮素流失效应.农业工程学报,2014,30(23): 138-147.

10 期