

持续秸秆还田减施化肥对水稻产量和氮磷流失的影响

姚莉¹, 王宏¹, 张奇¹, 刘海涛¹, 罗付香¹, 王谢¹, 郑盛华¹, 梁繁², 林超文¹

(1.四川省农业科学院 农业资源与环境研究所, 四川 成都 610066; 2.南充市仪陇县农业农村局, 四川 南充 637676)

摘要: [目的] 探究持续性秸秆还田减施化肥对水稻产量和氮磷随径流流失的影响, 为当地农业资源循环再利用和防控农业面源污染提供科学依据。[方法] 在四川省广汉市开展连续3 a(2018—2020年)的田间小区试验, 设置常规施肥处理(T_1)和秸秆还田+常规施肥减氮28.57%, 减磷25.11% (T_2) 2种施肥方式, 分别测定了地表径流中氮磷浓度、流失量, 水稻秸秆、籽粒的产量和氮磷吸收量、水稻收获时土壤养分。[结果] 随着秸秆还田年限的增加, T_2 可达到显著的增产效果, 其中2020年 T_2 比 T_1 增产16.93%。与 T_1 相比, T_2 的总氮和硝态氮流失量分别增加6.25%~14.97%, 6.99%~15.03%, 可溶性总氮、总磷和可溶性总磷流失量分别降低0.94%~6.03%, 4.66%~10.32%和5.77%~21.15%。土壤中全磷、速效磷、硝态氮和铵态氮含量的年际变化显著($p < 0.05$)。与 T_1 相比, T_2 处理显著降低了土壤8.79%的全磷和30.56%的速效磷。[结论] 持续秸秆还田与减施化肥在保证作物产量的同时, 减少了化肥投入量, 降低了磷素的径流流失量, 但增加了氮素径流流失的风险, 在实际农业生产中应进一步优化处理。

关键词: 秸秆还田; 施肥; 水稻; 径流; 氮磷流失; 产量; 四川省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)04-0018-07

中图分类号: S158.5, X52

文献参数: 姚莉, 王宏, 张奇, 等. 持续秸秆还田减施化肥对水稻产量和氮磷流失的影响[J]. 水土保持通报, 2022, 42(4): 18-24. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.04.003; Yao Li, Wang Hong, Zhang Qi, et al. Effects of continuous straw returning combined with reduced fertilizer application on rice yield and loss of nitrogen and phosphorus [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4): 18-24.

Effects of Continuous Straw Returning Combined with Reduced Fertilizer Application on Rice Yield and Loss of Nitrogen and Phosphorus

Yao Li¹, Wang Hong¹, Zhang Qi¹, Liu Haitao¹,

Luo Fuxiang¹, Wang Xie¹, Zheng Shenghua¹, Liang Fan², Lin Chaowen¹

(1. Agricultural Resources and Environment Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu, Sichuan 610066, China; 2. Agricultural and Rural Bureau of Yilong County, Nanchong, Sichuan 637676, China)

Abstract: [Objective] The effects of straw returning combined with reduced chemical fertilizer application on rice yield and nitrogen and phosphorus losses with runoff were studied in order to provide a scientific basis for the recycling and reuse of local agricultural resources and the prevention and control of agricultural non-point source pollution. [Methods] A three-year (2018—2020) field plot experiment was conducted that included two treatments: conventional fertilization (T_1), and straw returning + conventional fertilization reduced by 28.57% for nitrogen and 25.11% for phosphorous (T_2). The concentrations and losses of nitrogen and phosphorus in farmland surface runoff, yield, nitrogen and phosphorus uptake by rice straw and grain, and soil nutrients at harvest were determined. [Results] As the number of straw returning years increased, T_2 achieved a significant increase in yield. Compared with T_1 , the yield of T_2 increased by 16.93% in 2020. Compared with T_1 , the loss of the total nitrogen and NO_3^- -N for T_2 increased by 6.25%~14.97% and 6.99%

收稿日期: 2022-02-14

修回日期: 2022-03-10

资助项目: 四川省农业科学院现代农业学科建设推进工程“坡耕地旱地氮挥发防控技术研究”(2021XKJS014); 四川省财政自主创新专项项目(2022ZZCX013); 四川省科技成果中试熟化与示范转化工程项目(2021ZSSF); “1+9”揭榜挂帅科技攻关项目(1+9KJGG005)

第一作者: 姚莉(1987—), 女(汉族), 安徽省安庆市人, 博士, 助理研究员, 主要从事农业资源与环境保护方面的研究。Email: yaolisfri@qq.com。

通讯作者: 林超文(1968—), 男(汉族), 四川省资中县人, 博士, 研究员, 主要从事农业面源污染研究。Email: lew-11@163.com。

~15.03%, respectively. The loss of the soluble total nitrogen, the total phosphorus, and the soluble total phosphorus for T_2 was 0.94%~6.03%, 4.66%~10.32%. and 5.77%~21.15%, respectively, lower than observed for T_1 . The interannual changes of total phosphorus, available phosphorus, nitrate nitrogen, and ammonium nitrogen in soil were significant ($p < 0.05$). Compared with T_1 , T_2 significantly reduced soil total phosphorus by 8.79% and available phosphorus by 30.56%. [Conclusion] Continuous straw returning combined with reduced chemical fertilizer application ensured the crop yield and reduced the input of chemical fertilizer and the loss of phosphorus in farmland runoff, but increased the risk of nitrogen runoff loss. Therefore, the continuous straw-returning system should be further optimized in actual agricultural production.

Keywords: straw returning; fertilization; rice; runoff; loss of nitrogen and phosphorus; yield; Sichuan Province

根据《四川省第二次全国污染源普查公报》,四川省种植业水污染排放总氮量为 3.60×10^4 t,总磷为 3 900 t,分别占农业源水污染排放总氮和总磷量的 54.2%和 42.4%^[1]。种植业中肥料不合理利用所造成的农业面源污染问题日渐受到重视。施入农田的肥料除了被作物吸收和土壤固定外,其余以农田地表径流、渗漏、氨挥发、反硝化等途径损失进入周围环境^[2-3],不仅降低了氮肥利用率,还导致环境水体的富营养化、土壤酸化和温室气体排放等环境问题^[4-5]。其中,地表径流是农田养分流失的主要途径^[6]。因此,从污染的源头施肥入手,减少农田氮磷排放,是控制农田面源污染的关键。应用秸秆还田、控释肥减量和有机肥替代等措施减少化肥的投入,已经成为目前减少农田氮磷径流损失,提高化肥利用率,降低农业面源污染的重要措施^[7-9]。其中,秸秆还田是合理利用生物质资源和促进农业可持续发展的一种有效方式,还可以优化农田生态环境,在蓄水保墒、减少土壤表面雨水的侵蚀,降低产沙量,提高固氮能力,增加土壤微生物,提高作物产量等方面具有优势^[10-11]。包菡等研究发现秸秆还田并减氮 23.63%、减磷 26.55%的施肥方式可以保证玉米作物产量,总氮和总磷累计流失量分别减少了 52.43%和 59.18%^[12]。朱坚等^[13]研究发现秸秆还田替代 38.7%氮、40.8%磷和 42.7%钾处理下,早稻较常规化肥处理有增产趋势,增幅为 4.5%~10.1%,晚稻平均减产 6.3%,总氮和总磷流失量减少 12.6%和 9.7%。农田土壤中氮、磷流失程度受降雨情况、施肥状况、作物类型、土壤条件及人为管理措施等多种因素的综合影响,不同试验研究报告农田养分径流流失结果差异较大。目前,关于秸秆还田的研究报道主要集中于土壤理化性状、土壤养分淋溶、温室气体排放等领域^[14-16],并且多集中于秸秆还田的短期效应,而针对持续秸秆还田对农田养分径流流失的研究报道较少。成都平原降雨多集中在水稻季,农田氮磷流失严重。因此,本研究以四川省德阳市广汉市种植业面源污染长期监测点为试验点,以稻田减肥增效和面源污染防控为目标,从氮磷流失的源

头施肥为出发点,研究常规施肥和秸秆还田+常规施肥减氮减磷 2 种施肥模式对稻田产量和农田氮磷径流流失的影响,从而揭示持续秸秆还田与减施化肥对于控制稻田氮磷径流流失的作用和效果,为当地种植业合理施肥,实现农业资源循环的再利用和防控农业面源污染提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验于 2018—2020 年在德阳市广汉市连山镇锦花村进行。试验地属亚热带湿润季风性气候,四季分明,多年平均气温 16.5 °C。无霜期年平均 298.5 d,年平均日照时数 1 290 h,年平均降水量 910.7 mm。试验土壤为水稻土,耕层土壤 pH 值为 6.90,全氮含量 2.78 g/kg,有机质 50.50 g/kg,全磷 1.12 g/kg,全钾 18.92 g/kg,硝态氮 26.18 mg/kg,铵态氮 1.82 mg/kg,速效磷 35.17 mg/kg,速效钾 115.67 mg/kg。供试水稻品种为“宜香 2115”,供试肥料为尿素(含 N 46%)、磷一铵(含 P_2O_5 44%,N 46%)和氯化钾(含 K_2O 60%)。

1.2 试验设计

开展连续 3 a(2018—2020 年)的田间小区试验,水稻前茬作物均为小麦,常规施肥。试验共设置 2 种施肥方式。处理 1(T_1)按当地农民的种植习惯施肥,全生育期施肥一次,施肥量为 $210 \text{ kg/hm}^2 \text{ N}$, $90 \text{ kg/hm}^2 \text{ P}_2\text{O}_5$, $105 \text{ kg/hm}^2 \text{ K}_2\text{O}$;处理 2(T_2)将上一年的水稻秸秆全量还田,秸秆中氮含量约为 60 kg/hm^2 ,因此 T_2 处理减氮 28.57%即 60 kg/hm^2 ,磷肥也按照相近比例减量。全生育期施肥 2 次,施肥量为 $150 \text{ kg/hm}^2 \text{ N}$, $67.4 \text{ kg/hm}^2 \text{ P}_2\text{O}_5$, $105 \text{ kg/hm}^2 \text{ K}_2\text{O}$,氮肥基肥和追肥比例为 1:1,磷肥和钾肥全做基肥一次性施入。各处理采用随机区组排列,每个处理重复 3 次。试验小区长度为 6 m,宽度为 4 m,面积为 24 m^2 。每年 4 月中旬移栽,9 月中旬收获,田间灌溉和病虫害管理均按照当地的常规方式进行。本研究中地表径

流样、土壤样品、作物样品的采集方法、样品编号、保存及分析测试方法均参照《农田面源污染监测方法与实践》^[17]。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 地表径流收集与监测 在每次降雨产生径流后,测量径流池水位,计算径流量,并将地表径流水混合收集到 500 ml 矿泉水瓶中,立即放入冰箱冷冻。实验室分析测定水样中总氮、可溶性总氮、硝态氮、铵态氮、总磷和可溶性总磷含量,然后折算每个试验小区和单位面积氮磷径流损失量。

1.3.2 植株样品采集 水稻收获后各田块单独收割,记载每个小区的经济产量部分(籽粒)和废弃物产量部分(秸秆)质量并风干测定质量,根据小区面积换算出对应的单位产量。用不锈钢磨样机磨碎植株样品过筛备用,测定氮磷含量,计算地上部氮磷累积量。

1.3.3 样品检测分析方法 土壤基本理化性质采用常规方法测定^[18]。植物样品采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮,消煮待测液中氮、磷分别采用靛酚蓝比色法、钒钼黄比色法测定^[19]。径流样中总氮和可溶性总氮采用

过硫酸钾—紫外分光光度法测定,硝态氮采用紫外分光光度法测定,铵态氮采用靛酚蓝比色法测定,径流样中总磷和可溶性总磷采用过硫酸钾—钼锑抗比色法测定^[3]。颗粒态氮(磷)浓度为总氮(磷)浓度减去可溶性总氮(磷)浓度。

1.4 数据处理与统计分析

试验数据利用 Excel 2007 软件处理计算数据并作图,用 Origin Pro8 软件对试验数据进行方差分析和显著性检验。

2 结果与讨论

2.1 不同施肥方式对水稻产量与养分累积量的影响

由图 1 可知,在连续秸秆还田定位试验中,2018—2020 年水稻产量达到 9.39~14.92 t/hm²,秸秆产量达到 10.77~15.96 t/hm²。2018 年,与 T₁ 相比,T₂ 水稻产量降低 6.59%。2020 年,与 T₁ 相比,T₂ 显著提高水稻产量,增幅为 16.93%。由此可见,随着秸秆还田年限的增加,T₂ 可达到显著的增产效果,适当减少氮肥和磷肥可以保证水稻产量。

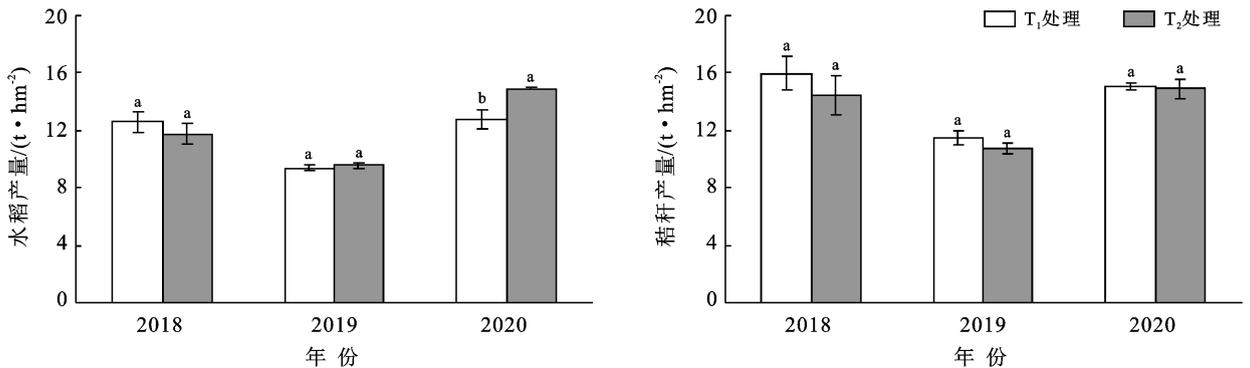


图 1 试验小区 2018—2020 年水稻产量和秸秆产量

根据表 1 可知,随着秸秆还田年限的增加,T₂ 处理籽粒中氮素和磷素累积量均高于 T₁ 处理。2020 年,T₂ 处理籽粒中氮素和磷素累积量分别高于 T₁ 的 1.82% 和 4.62%,但秸秆中氮素和磷素累积量均低于

T₂ 处理。3 a 间 T₁ 处理的水稻地上部氮素和磷素累积量均值为 143.95,33.90 kg/hm²。与 T₁ 相比,T₂ 处理的水稻地上部氮素和磷素累积量分别降低 4.25% 和 6.78%。

表 1 试验小区 2018—2020 年水稻不同部位养分累积量

年份	处理	氮素累积量/(kg·hm ⁻²)			磷素累积量/(kg·hm ⁻²)		
		秸秆	籽粒	地上部	秸秆	籽粒	地上部
2018	T ₁	65.48±1.34 ^a	87.15±3.67 ^a	152.63±8.61 ^a	9.69±0.65 ^a	25.73±3.02 ^a	35.42±3.09 ^a
	T ₂	58.79±2.99 ^b	79.19±3.50 ^b	137.98±3.05 ^b	8.76±0.55 ^a	24.85±0.31 ^a	33.61±1.74 ^a
2019	T ₁	47.29±4.01 ^a	71.40±6.09 ^a	118.69±8.13 ^a	7.87±1.26 ^a	19.05±1.22 ^b	26.91±1.97 ^a
	T ₂	39.67±2.81 ^b	79.56±0.95 ^a	119.24±5.23 ^a	5.71±0.40 ^b	21.16±0.72 ^a	26.87±0.94 ^a
2020	T ₁	64.25±5.80 ^a	96.27±5.87 ^a	160.52±4.23 ^a	10.17±1.27 ^a	29.19±0.54 ^a	39.36±1.01 ^a
	T ₂	58.24±7.67 ^a	98.02±2.28 ^a	156.26±5.14 ^a	10.01±1.21 ^a	30.54±1.23 ^a	40.55±1.14 ^a

注:数据为平均值±标准差;同一年同列数据标不同小写字母表示处理间差异显著通过 LSD 检验<0.05。下同。

2.2 农田径流量及径流氮磷的质量浓度变化

2018—2020 年农田径流量如图 2 所示。3 a 间共

发生径流 17 次,均发生在水稻季。T₁ 和 T₂ 的平均径流量分别为 731,742 m³/hm²,累计径流量分别为

12419, 12 619 m³/hm², 两种处理对每次产流事件的径流量和累计径流量无显著差异。2018—2020 年农田径流中各氮素浓度变化如图 3 所示。T₁ 处理径流水中总氮和可溶性总氮平均浓度分别为 1.31, 1.09 mg/L。T₂ 处理总氮平均浓度比 T₁ 增加 3.82%, 可溶性总氮浓度降低 0.92%。农田径流水中磷素浓度变化如图 4 所示。T₁ 处理径流水中总磷和可溶性总磷平均浓度分别为 0.36, 0.27 mg/L。T₂ 处理总磷和可溶性总磷平均浓度较 T₁ 分别降低 5.56% 和 3.70%。

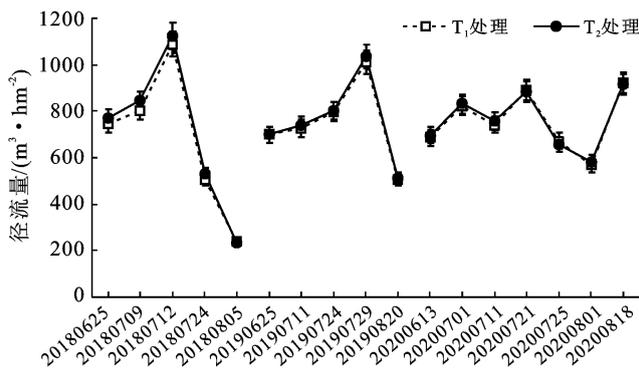


图 2 试验小区 2018—2020 年农田径流量变化

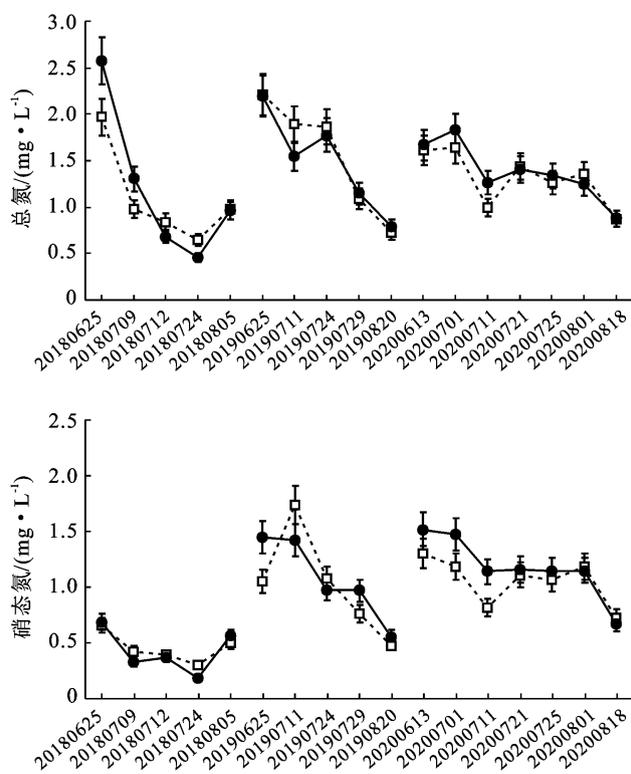


图 3 试验小区 2018—2020 年农田径流中氮质量浓度变化

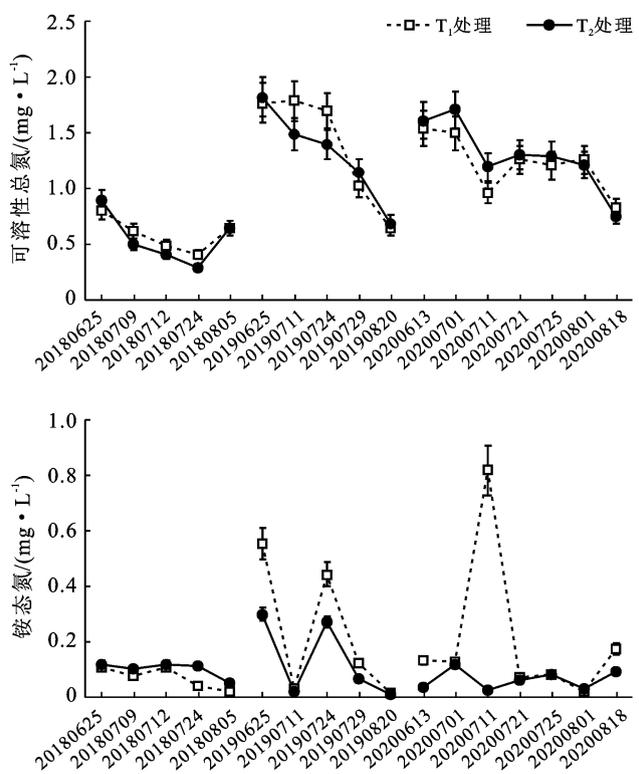


图 4 试验小区 2018—2020 年农田径流中磷质量浓度变化

2.3 不同施肥方式对农田氮磷流失量及流失形态特征的影响

不同处理对径流中氮素(总氮、可溶性总氮、

NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N)流失量的影响详见表 2。2018—2020 年,各处理的总氮、可溶性总氮、NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 流失量分别为 3.74~7.31 kg/hm², 1.87~

6.41 kg/hm², 1.53~6.22 kg/hm², 0.29~0.89 kg/hm²。径流中可溶性无机氮素输出以 NO₃⁻-N 的形态为主, 最高占总氮流失量的 85.09%, NH₄⁺-N 输出量较小, 最高占 14.95% (表 3)。与 T₁ 相比, T₂ 的总氮流失量增加 6.25%~14.97%, 可溶性总氮流失量降低 0.94%~6.03%, NO₃⁻-N 流失量增加 6.99%~15.03%。除 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 之外, 总氮的流失还有一部分以颗粒态流失, 颗粒态氮占总氮的流失比例为 5.75%~

56.51%。与 T₁ 相比, T₂ 处理颗粒态氮流失量增加 38.86%~203.13%。可见, 秸秆还田减施化肥明显增加了径流中颗粒态氮的流失。不同处理总磷流失量为 0.63~2.36 kg/hm², 可溶性总磷流失量为 0.49~1.98 kg/hm², 农田径流水中可溶性总磷流失量占总磷流失量比例为 58.14%~87.86%。与 T₁ 相比, T₂ 的总磷流失量降低 4.66%~10.32%, 可溶性总磷降低 5.77%~21.15%。

表 2 试验小区 2018—2020 年农田径流中氮素和磷素的流失量

kg/hm²

年份	处理	总氮	总可溶性氮	硝态氮	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N	总磷	可溶性总磷
2018	T ₁	3.74±0.18 ^b	1.99±0.20 ^a	1.53±0.35 ^a	0.29±0.16 ^a	1.55±0.07 ^a	1.04±0.32 ^a
	T ₂	4.30±0.19 ^a	1.87±0.24 ^a	1.76±0.21 ^a	0.38±0.13 ^a	1.39±0.05 ^b	0.82±0.32 ^a
2019	T ₁	5.57±0.40 ^a	5.25±0.36 ^a	3.86±0.22 ^a	0.89±0.20 ^a	2.36±0.12 ^a	1.98±0.12 ^a
	T ₂	6.01±0.22 ^a	5.04±0.72 ^a	4.13±0.82 ^a	0.52±0.10 ^b	2.25±0.83 ^a	1.86±0.13 ^a
2020	T ₁	6.88±0.18 ^b	6.41±0.22 ^a	5.52±0.23 ^b	0.54±0.12 ^a	0.63±0.07 ^a	0.52±0.05 ^a
	T ₂	7.31±0.20 ^a	6.35±0.30 ^a	6.22±0.34 ^a	0.35±0.12 ^a	0.57±0.16 ^a	0.49±0.07 ^a

表 3 2018—2020 年农田氮磷流失特征

年份	处理	占总氮流失量比例/%		占总磷流失量比例/%
		NO ₃ ⁻ -N/TN	NH ₄ ⁺ -N/TN	TDP/TP
2018	T ₁	43.87±8.32 ^a	7.40±2.95 ^a	66.84±5.34 ^a
	T ₂	34.02±6.19 ^a	8.86±2.58 ^a	58.14±3.23 ^b
2019	T ₁	66.15±7.78 ^a	14.95±5.67 ^a	78.29±5.34 ^b
	T ₂	70.37±2.84 ^a	9.24±3.69 ^a	87.86±3.82 ^a
2020	T ₁	80.32±0.44 ^b	7.82±1.82 ^a	82.05±6.34 ^a
	T ₂	85.09±2.15 ^a	4.74±1.48 ^b	73.16±9.67 ^a

2.4 农田土壤养分及 pH 变化

由表 4 可知, 本研究中农田土壤养分含量及 pH 值对处理和年份的交互作用无显著响应 ($p>0.05$)。就年际变化而言, 农田土壤有机质含量、全氮含量和 pH 值年际间变化不显著 ($p>0.05$), 而全磷、速效磷、硝态氮、铵态氮含量的年际变化显著 ($p<0.05$)。全磷的年际浮动范围为 0.77~0.96 g/kg, 速效磷为 15.53

~31.17 mg/kg、硝态氮为 10.92~24.0 mg/kg、铵态氮为 0.51~6.07 mg/kg (表 5)。就处理而言, T₂ 处理显著降低了土壤全磷和速效磷的含量, 但对有机质、全氮、硝态氮、铵态氮和 pH 的影响不显著。研究期限内, 与 T₁ 相比, T₂ 平均降低了土壤 8.79% 的全磷和 30.56% 的速效磷 (表 5)。

表 4 基于方差分析的农田土壤养分含量及 pH 值对处理和年份的响应状况

指标	处理		年份		处理×年份	
	F 值	p 值	F 值	p 值	F 值	p 值
有机质	0.23	0.64	2.90	0.09	0.06	0.94
全氮	0.22	0.65	2.44	0.13	0.02	0.98
全磷	9.01	<0.05	5.70	<0.05	0.22	0.80
硝态氮	0.56	0.47	12.00	<0.01	0.49	0.62
铵态氮	3.65	0.08	95.45	<0.01	1.12	0.36
速效磷	23.88	<0.01	8.14	<0.01	1.89	0.19
pH 值	0.36	0.56	0.38	0.69	0.11	0.89

表 5 试验小区 2018—2020 年农田土壤养分含量及 pH 值的动态变化

年份	处理	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	硝态氮/ (mg·kg ⁻¹)	铵态氮/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	pH 值
2018	T ₁	45.43±3.13 ^a	2.52±0.15 ^a	0.96±0.05 ^a	19.41±0.96 ^a	3.01±0.77 ^a	31.17±3.03 ^a	7.09±0.40 ^a
	T ₂	44.13±8.89 ^a	2.48±0.49 ^a	0.90±0.06 ^a	21.17±4.54 ^a	2.01±1.15 ^a	20.13±5.48 ^b	6.84±0.53 ^a
2019	T ₁	52.20±4.29 ^a	2.81±0.18 ^a	0.92±0.06 ^a	10.92±1.20 ^a	0.54±0.19 ^a	19.17±4.95 ^a	6.94±0.50 ^a
	T ₂	50.87±2.63 ^a	2.72±0.06 ^a	0.85±0.02 ^b	11.25±0.46 ^a	0.51±0.11 ^a	15.53±0.90 ^a	6.80±0.54 ^a
2020	T ₁	46.40±4.07 ^a	2.48±0.28 ^a	0.88±0.08 ^a	18.0±0.96 ^b	6.07±0.61 ^a	26.73±3.20 ^a	7.21±0.33 ^a
	T ₂	44.30±5.03 ^a	2.43±0.20 ^a	0.77±0.04 ^b	24.0±1.47 ^a	5.27±0.42 ^a	16.77±1.20 ^b	7.08±0.34 ^a

3 讨论

秸秆还田是秸秆肥料化的最直接方式。秸秆的

腐解及其中养分的释放, 不仅改良了土壤的物理性状, 也为微生物供给了碳源, 增加了微生物数量和酶活性, 从而有利于提高土壤的肥力和作物产量^[20-21]。

因此,秸秆还田可为作物减肥不减产以及粮食生产的提质增效提供实际举措。作物产量高低受到秸秆还田量、施肥量和土壤背景条件等影响。周怀平等经过连续 19 a 的不同秸秆还田方式的春玉米长期定位试验,研究发现秸秆还田较秸秆不还田增产 11.57%~20.92%^[22]。徐蒋来等研究发现 50% 秸秆还田对小麦的增产效果在 3 a 中均达到显著水平,增产幅度分别为 11.23%、14.74% 和 14.29%^[23]。张刚等研究发现与单施氮肥相比,秸秆全量还田配施适量氮肥增产 6.3%,显著提高了氮肥的利用率^[24]。靳玉婷等研究发现秸秆还田+常规施肥处理较常规处理的周年作物产量增加了 6.4%~7.8%,秸秆还田+常规施肥减 15% 处理能保证作物产量^[7]。本试验结果表明,在减施条件下,随着秸秆还田年限的增加水稻产量由前期的减产逐渐向增产转变,这可能因为秸秆的碳氮比较高,自然状态下难以被微生物分解,在土壤中分解缓慢,只能用作后效肥源^[25]。可见,秸秆还田适当减少氮肥和磷肥,可以满足水稻的营养需求,保持其正常生长和产量,这与朱坚等研究结果相似^[13]。随着秸秆还田年限的增加,减施化肥处理的水稻籽粒中氮素和磷素累积量高于常规施肥,但秸秆中氮素和磷素累积量均低于常规施肥。由此可见,秸秆还田配施氮肥可以促进土壤中有效氮素在作物体内的代谢,增加水稻对氮的吸收,并促使氮素由茎秆向籽粒迁移,这与张刚等研究发现一致^[24]。

地表径流是农田氮磷流失的主要途径之一,优化施肥可有效降低农田氮磷径流流失,但目前对于秸秆还田对农田地表径流的影响的结论并不统一。刘红江等^[26]研究发现,与常规处理相比,秸秆还田和秸秆还田减肥处理地表径流总氮和总磷流失量分别降低 7.7%~12.2%,6.9%~11.9%。Yang 等认为秸秆还田量超过 500 kg/hm²,在降雨条件下总氮损失量显著增加^[27]。朱坚等研究显示,秸秆还田与减肥配施使稻田径流水中总氮和总磷流失量减少 12.6% 和 9.7%^[13]。在本试验条件下,与常规施肥相比,秸秆还田减氮 28.57%、减磷 25.11% 处理平均降低了土壤中 8.79% 的全磷和 30.56% 的速效磷,对土壤有机质、全氮、硝态氮、铵态氮和 pH 值的影响不显著,增加了地表径流中总氮(6.25%~14.97%)和 NO₃⁻-N 流失量(6.99%~15.03%),但减低了径流中可溶性总氮(0.94%~6.03%)、可溶性总磷(5.77%~21.15%)和总磷(4.66%~10.32%)的流失量。地表径流中可溶性无机氮素以 NO₃⁻-N 的形态为主,这可能是因为 NO₃⁻-N 带负电荷,不容易被土壤胶体吸附,容易随着径流流出^[28]。通过对总氮和可溶性总氮流失量、总

磷和可溶性总磷流失量的差值分析,发现存在较多的氮和磷以颗粒态的形式流出。与常规施肥相比,秸秆还田减施化肥明显增加了颗粒态氮的流失量。径流水中颗粒态氮流失量与降雨量和降雨强度相关,强降雨对表层土壤的物理冲刷作用较强,故颗粒态氮流失较多^[29-31]。此外,还可能与秸秆未完全腐解,秸秆中木质素、单宁等难分解有机物随着强降雨以颗粒态形式流失有关。本研究中秸秆长期还田减施化肥对土壤养分影响的结果与武际等报道的结果不同^[32],这是因为在本试验开始前农民过度施肥导致土壤中速效磷含量高达 35.17 mg/kg,而武际的试验地土壤初始速效磷含量为 11.12 mg/kg。本研究施肥量大幅度减少,从而导致土壤中磷含量下降,而武际的研究中由于初始肥力不足,所以秸秆还田造成了土壤速效磷含量增加,两研究多年秸秆还田后土壤磷的含量水平接近。土壤不同养分差异趋势不同,可能与化学氮磷投入、土壤微生物活动、径流流失有关^[7],具体原因需要进一步研究。

4 结论

本研究中,与常规施肥相比,秸秆还田减氮、减磷的施肥方式可以满足作物对养分的需求,保证水稻的产量,有效降低径流水中磷素和可溶性总氮的累积流失量,但会增加颗粒态氮和硝态氮的流失风险,有待进一步研究秸秆还田量和添加硝化抑制剂对水稻产量和农田氮磷径流流失的影响。

[参 考 文 献]

- [1] 四川省生态环境厅.四川省第二次全国污染源普查公报[R/OL].<http://sthjt.sc.gov.cn/sthjt/c104110/2020/9/21/2acc59a4a91e42a3acc9bae1fe51a5ef/files/57347bca634546afbaffe59964025893.Pdf>,2020.
- [2] 朱兆良.农田中氮肥的损失与对策[J].土壤与环境,2000,9(1):1-6.
- [3] 张奇,徐娅玲,姚莉,等.有机无机肥配施对川中紫色土丘陵区稻田氨挥发的影响[J].四川农业大学学报,2021,39(4):518-523.
- [4] 张维理,徐爱国,冀宏杰,等.中国农业面源污染形势估计及控制对策(Ⅲ):中国农业面源污染控制中存在问题分析[J].中国农业科学,2004,37(7):1026-1033.
- [5] 舒晓晓,门杰,马阳,等.减氮配施有机物质对土壤氮素流失的调控作用[J].水土保持学报,2019,33(1):186-191.
- [6] 袁浩凌,黄思怡,孔小亮,等.不同施肥模式对早稻季农田氮磷径流流失的影响[J].农业现代化研究,2021,42(4):776-784.
- [7] 靳玉婷,刘运峰,胡宏祥,等.持续性秸秆还田配施化肥对

- 油菜—水稻轮作周年氮磷径流损失的影响[J].中国农业科学,2021,54(9):1937-1951.
- [8] Xie Yong, Tang Li, Han Yongliang, et al. Reduction in nitrogen fertilizer applications by the use of polymer-coated urea: Effect on maize yields and environmental impacts of nitrogen losses [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99(5): 2259-2266.
- [9] 马凡凡,邢素林,甘曼琴,等.有机肥替代化肥对水稻产量、土壤肥力及农田氮磷流失的影响[J].作物杂志,2019(5):89-96.
- [10] 张帆,紫云英与水稻秸秆联合还田下双季稻田土壤氮磷平衡状况及化肥减施策略[J].植物营养与肥料学报,2021,27(8):1376-1387.
- [11] 何如海,薛中俊,汪玉芳,等.油菜秸秆还田及化肥配施的水稻经济环境效益分析[J].中国农业资源与区划,2021,42(6):42-49.
- [12] 包菡,傅建伟,张雷,等.不同施肥方式对玉米产量和农田氮磷淋溶流失的影响[J].北方农业学报,2021,49(4):57-61.
- [13] 朱坚,纪雄辉,田发祥,等.秸秆还田对双季稻产量及氮磷径流损失的影响[J].环境科学研究,2016,29(11):1626-1634.
- [14] 田慎重,宁堂原,王瑜,等.不同耕作方式和秸秆还田对麦田土壤有机碳含量的影响[J].应用生态学报,2010,21(23):373-378.
- [15] 李杨,孙玉禄,刘晓辉,等.秸秆还田和氮肥供应对设施番茄土壤肥力与氮素淋溶的影响[J/OL].吉林农业大学学报:1-9[2022-08-05].DOI:10.13327/j.jjlau.2021.1318.
- [16] 田卡,张丽,钟旭华,等.稻草还田和冬种绿肥对华南双季稻产量及稻田 CH₄ 排放的影响[J].农业环境科学学报,2015,34(3):592-598.
- [17] 刘宏斌,邹国元,范先鹏.农田面源污染监测方法与实践[M].北京:科学出版社,2015.
- [18] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [19] 王新霞,左婷,王肖君,等.稻—麦轮作条件下 2 种施肥模式作物产量和农田氮磷径流流失比较[J].水土保持学报,2020,34(3):20-27.
- [20] 刘骁蓓,涂仕华,孙锡发,等.秸秆还田与施肥对稻田土壤微生物量及固氮菌群落结构的影响[J].生态学报,2013,33(17):5210-5218.
- [21] 王学敏,刘兴,郝丽英,等.秸秆还田结合氮肥减施对玉米产量和土壤性质的影响[J].生态学杂志,2020,39(2):507-516.
- [22] 周怀平,解文艳,关春林,等.长期秸秆还田对旱地玉米产量、效益及水分利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2013,19(2):321-330.
- [23] 徐蒋来,胡乃娟,朱利群.周年秸秆还田量对麦田土壤养分及产量的影响[J].麦类作物学报,2016,36(2):215-222.
- [24] 张刚,王德建,俞元春,等.秸秆全量还田与氮肥用量对水稻产量、氮肥利用率及氮素损失的影响[J].植物营养与肥料学报,2016,22(4):877-885.
- [25] Huang F, Wei H, Cao Jianhua. The degradation rate of straw returned to limestone soil and the effect on soil fertility [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2015, 6(4):217-223.
- [26] 刘红江,郑建初,陈留根,等.秸秆还田对农田周年地表径流氮、磷、钾流失的影响[J].生态环境学报,2012,21(6):1031-1036.
- [27] Yang Haishui, Xu Mingmin, Koide R T, et al. Effects of ditch-buried straw return on water percolation, nitrogen leaching and crop yields in a rice-wheat rotation system [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2016, 96(4):1141-1149.
- [28] 华玲玲,李文超,翟丽梅,等.三峡库区古夫河小流域氮磷排放特征[J].环境科学,2017,38(1):138-146.
- [29] 王宏,徐娅玲,张奇,等.沱江流域典型农业小流域氮和磷排放特征[J].环境科学,2020,41(10):4547-4554.
- [30] 陈玲,宋林旭,崔玉洁,等.模拟降雨条件下黄棕壤坡耕地磷素流失规律研究[J].农业环境科学学报,2013,32(1):49-55.
- [31] 梁斐斐,蒋先军,袁俊吉,等.降雨强度对三峡库区坡耕地土壤氮、磷流失主要形态的影响[J].水土保持学报,2012,26(4):81-85.
- [32] 武际.水旱轮作条件下秸秆还田的培肥和增产效应[D].湖北 武汉:华中农业大学,2012.