

# 不同施肥模式对稻田氮磷流失及产量的影响

缪杰杰, 刘运峰, 胡宏祥, 屠人凤, 詹林川, 薛中俊, 徐启荣

(安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036)

**摘要:** 通过在巢湖派河小流域进行田间小区试验, 研究了 T1(常规复合肥)、T2(生物有机肥替代 30% 氮肥)、T3(控失肥替代 30% 氮肥)、T4(生物有机肥和控失肥各替代 15% 氮肥) 不同施肥模式下水稻田面水中氮磷浓度变化、径流氮磷流失以及水稻产量。结果表明: 处理 T1 的田面水总氮、总磷平均浓度分别为 10.30, 0.45 mg/L, 与 T1 相比, T2、T3、T4 的田面水总氮平均浓度分别降低了 12.2%, 6.5%, 5.3%, 田面水总磷平均浓度分别降低了 26.7%, 15.6%, 13.3%。T1 的径流总氮、总磷累积流失量分别达 17.68, 1.60 kg/hm<sup>2</sup>, 处理 T2、T3、T4 的径流总氮累积流失量较 T1 分别降低了 35.0%, 30.8%, 25.5%, 径流总磷累积流失量较 T1 分别降低了 16.3%, 21.9%, 22.5%。处理 T1 的籽粒产量为 8.95 t/hm<sup>2</sup>, 处理 T2、T4 的产量较 T1 分别增加了 7.8%, 6.5%, 差异显著, 处理 T3 的产量较 T1 降低了 2.2%, 差异不显著。与施用常规复合肥 (T1) 相比, 生物有机肥替代 30% 氮肥 (T2)、生物有机肥与控失肥各替代 15% 氮肥 (T4) 这 2 种施肥模式既可显著提高作物产量, 又能有效降低稻田氮磷流失风险。研究结果可为巢湖流域稻田面源污染的防治提供理论依据。

**关键词:** 施肥模式; 氮磷流失; 田面水; 径流; 产量

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)05-0086-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.05.013

## Effects of Different Fertilization Modes on Nitrogen and Phosphorus Loss and Yield in Paddy Fields

MIAO Jiejie, LIU Yunfeng, HU Hongxiang, TU Renfeng,

ZHAN Linchuan, XUE Zhongjun, XU Qirong

(School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036)

**Abstract:** In the field plot experiment of the Chaohu Paihe small watershed, four treatments, including T1 (conventional compound fertilizer), T2 (bio-organic fertilizer replacing 30% nitrogen fertilizer), T3 (loss-of-control fertilizer replacing 30% nitrogen fertilizer), and T4 (bio-organic fertilizer and loss-of-control fertilizer replacing 15% nitrogen fertilizer respectively) were set up to study the effects of dynamic changes of nitrogen and phosphorus concentrations in the surface water, nitrogen and phosphorus loss in the runoff, and rice yield under several different fertilization modes. The results showed that the average concentrations of total nitrogen and total phosphorus in the surface water of treatment T1 were 10.30 and 0.45 mg/L, respectively. Compared with treatment T1, the average concentrations of total nitrogen in the surface water of treatment T2, T3, and T4 decreased by 12.2%, 6.5%, 5.3%, the average concentrations of total phosphorus in the surface water decreased by 26.7%, 15.6% and 13.3%, respectively. The total loss of total nitrogen and total phosphorus in the runoff with treatment T1 reached 17.68 and 1.60 kg/hm<sup>2</sup>. Compared with treatment T1, the total loss of total nitrogen in the runoff of treatment T2, T3, and T4 decreased by 35.0%, 30.8% and 25.5%, the total loss of total phosphorus in the runoff of treatment T2, T3, and T4 decreased by 16.3%, 21.9% and 22.5%, respectively. The yield of grain of treatment T1 was 8.95 t/hm<sup>2</sup>. The yields of treatment T2 and T4 increased by 7.8% and 6.5%, respectively, showing a significant difference with T1. The yield of treatment T3 decreased by 2.2% compared with T1, and the difference was not significant. The experimental results show that compared with

收稿日期: 2020-03-22

资助项目: 国家“十三五”水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07603002); 国家“十二五”水体污染控制与治理科技重大专项 (2013ZX07103006)

第一作者: 缪杰杰 (1994—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事农田生态环境保护研究。E-mail: 945360684@qq.com

通信作者: 胡宏祥 (1971—), 男, 教授, 主要从事土壤质量提升、农业面源和重金属污染防控等研究。E-mail: hongxianghu@163.com

treatment T1(conventional compound fertilizer), T2(bio-organic fertilizer replaces 30% nitrogen fertilizer), and T4(bio-organic fertilizer and loss-of-control fertilizer replacing 15% nitrogen fertilizer respectively) can significantly increase crop yield, and at the same time, reduce the risk of nitrogen and phosphorus loss from paddy fields effectively. The research results provide a theoretical basis for the prevention and control of non-point source pollution in rice fields of Chaohu Basin.

**Keywords:** fertilization modes; nitrogen and phosphorus loss; surface water; runoff; yield

我国水稻种植面积约占粮食种植总面积的30%<sup>[1]</sup>,施肥是保持水稻高产、稳产的一个重要措施<sup>[2]</sup>,人们常施用大量化肥以供应农作物生长所需的氮、磷等养分,然而我国化肥施用量大,利用率却较低,我国稻田单季平均施氮量为150 kg/hm<sup>2</sup>,氮肥利用率仅27%~35%,单季平均施磷量为90 kg/hm<sup>2</sup>,磷肥利用率仅10%~20%<sup>[3-5]</sup>,富余的氮、磷会通过地表径流及渗漏、淋溶等途径<sup>[6]</sup>,增加农田周围水体中氮磷含量,进而造成环境污染。因此,科学管理稻田氮磷输入并防止其向水体迁移对控制和减少氮磷的地表流失及农业面源污染的降低具有重要意义。

2015年我国农业部提出,要大力推广与使用新型肥料,利用“有机肥部分替代化肥”的措施实现养分高效利用的目标<sup>[7]</sup>。生物有机肥能促进微生物繁殖、改善土壤的生态条件,协调土壤的水肥供应能力,增加作物产量<sup>[8]</sup>。控失肥是一种新型的缓控释肥料产品,主要是通过其中的控失剂固定养分来减少养分的流失<sup>[9]</sup>。有研究<sup>[10]</sup>表明,控失肥能提高氮素利用率6%~13%,增产10%以上,在大田作物施肥中有广阔的应用前景。但是不同地区和流域,由于具体情况不同,前人研究<sup>[8-10]</sup>结果仅具有参考意义,而对于巢湖地区派河小流域低山丘陵区种植模式下的相关施肥与农田氮磷流失等相关性研究罕见报道,具体结果有待于根据实际特点进行系统性研究。因此,针对巢湖派河小流域内农田种植区面源污染重的问题,本试验通过田间试验法设置不同的施肥模式,分析不同肥料处理对田面水氮磷浓度动态变化、径流氮磷损失及对水稻产量的影响,以期寻找较优的肥料配施方案,在保证作物产量的基础上减少巢湖派河小流域的氮磷流失,为巢湖流域稻田面源污染的防治和巢湖水质的改善,提供基础参数。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

本试验于2019年5月13日至9月24日在安徽省肥西县紫蓬镇新农村试验田进行。区域年平均气温15.7℃,无霜期228天,年日照时间2000h,年平均降水量1000mm,属北亚热带湿润性季风气候。土壤类型为水稻土,试验前采集0—20cm土壤混合样品测定理化性质,土壤pH为6.95,全氮含量1.38g/kg,碱解

氮含量138.86mg/kg,全磷含量0.59g/kg,速效磷含量14.85mg/kg,有机质含量23.34g/kg。

### 1.2 试验设计

本试验共设置4个处理,分别为常规复合肥(T1)、生物有机肥替代30%氮肥+无机肥(T2)、控失肥替代30%氮肥+无机肥(T3)、生物有机肥替代15%氮肥+控失肥替代15%氮肥+无机肥(T4),每个处理3个重复,共设置12个小区,小区长宽为6m×5m,分布采用随机区组的方式,小区周围设置保护行。田埂高20cm,用薄膜覆盖,以减少小区间侧渗与串流。各小区设单独的进、排水口及径流水收集池,径流池长宽高为2.0m×1.0m×1.5m。降雨产生径流后,测定径流池中径流水高度,计算径流量,采集径流水后进行排水,以便收集下次径流或排水。

试验时间为2019年5—9月,水稻品种为“深两优3206”。整个水稻生育期施基肥1次,追肥2次,氮肥基追比均为4:4:2。各处理总施肥量相同,折合施N量均为206kg/hm<sup>2</sup>,折合施P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>量均为82.5kg/hm<sup>2</sup>,折合施K<sub>2</sub>O量均为132kg/hm<sup>2</sup>。处理T1按照农户施肥习惯,将复合肥料分3次施用,施用比例为4:4:2。处理T2、T3、T4分别将有机肥、控失肥、有机肥及控失肥做基肥一次性施入,不足的氮素用尿素补齐,分蘖期和抽穗期追施尿素,氮肥基追比均为4:4:2;磷肥做基肥一次性施入,不足的磷素用过磷酸钙补充;钾肥做基肥和穗肥,施用量比例为8:2,穗肥施用氯化钾,基肥时不足的钾素用氯化钾补充。复合肥氮磷钾含量为25—10—16,生物有机肥氮磷钾含量为15—5—10,控失肥氮磷钾含量为24—12—12,另用过磷酸钙,氯化钾进行磷和钾的调补。田间采用常规水分管理,即水稻生育前期保持5cm以上水层,每隔7~10天灌水1次,生育后期保持浅水层,分蘖末期及黄熟期自然落干田面水,共烤田2次。

### 1.3 样品采集与测定

每次施肥后第1,3,5,7,9天采集田面水,用100mL的注射器在田面分5个点采集水样,装入500mL的塑料瓶,混合均匀。研究期间降水量数据采用区域田间设置的小型气象站(Hobeware)记录,每次降雨产生径流后,立即测量径流池水位,计算径流量,并采集地表径流水装入500mL塑料瓶,水样采集后

立即放入冰箱 4 °C 冷藏保存,并在 48 h 内测定其总磷、可溶性磷、总氮、铵态氮、硝态氮浓度。

水样总氮的测定:碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度法;铵态氮的测定:水样经滤纸过滤,用纳氏试剂分光光度法测定;硝态氮的测定:水样经滤纸过滤,用紫外分光光度法测定;总磷用钼酸铵分光光度法测定;可溶性磷经 0.45 μm 孔径滤膜过滤后,用钼酸铵分光光度法测定;颗粒磷用差减法<sup>[1]</sup>测定。

水稻产量及影响因素:水稻成熟后,调查 1 m<sup>2</sup> 水稻的总有效穗数,并随机选取植株样 6 穴,脱粒后用水漂法区分饱粒和瘪粒(漂浮在水面),测定穗粒数,结实率,待水稻风干后测定千粒重,计算其理论产量。

#### 1.4 计算方法和数据处理

降雨径流事件氮、磷径流流失量的计算公式为:

$$Q_i = \sum_{i=1}^n (C_i \times V_i) \quad (1)$$

式中: $Q_i$ 为径流事件中氮、磷径流流失量(kg/hm<sup>2</sup>); $C_i$ 为第*i*次径流事件径流水样中氮、磷质量浓度(mg/L); $V_i$ 为第*i*次径流事件中小区径流量(L); $n$ 是 1 个完整的监测期(水稻季)的径流事件总数。

各小区氮磷径流流失率计算公式为:

$$R = F/N \times 100\% \quad (2)$$

式中: $R$ 为氮、磷径流流失率(%); $F$ 为小区氮、磷径流流失量(kg/hm<sup>2</sup>); $N$ 为小区施入的氮、磷量(kg/hm<sup>2</sup>)。

水稻理论产量=有效穗数×平均穗粒数×千粒重/1000  
(3)

运用 Excel 2007 处理数据并作图,SPSS 19.0 系

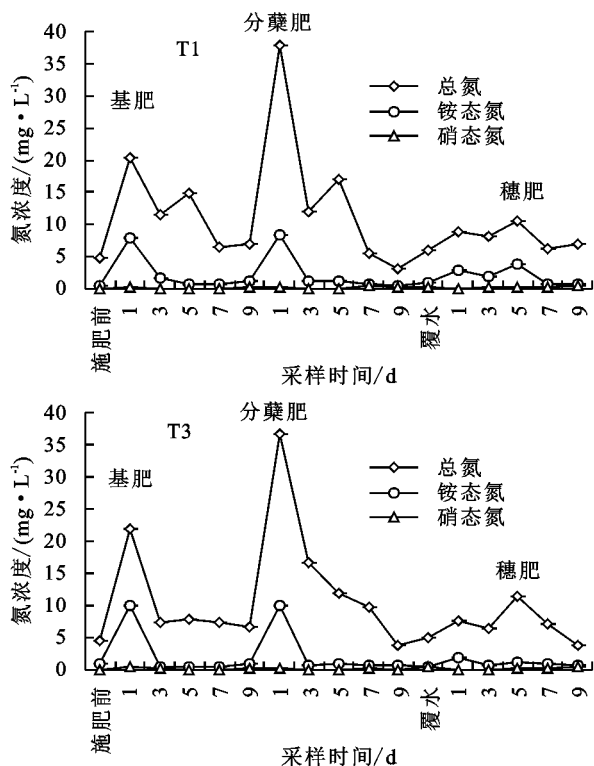


图 1 稻田田面水总氮、铵态氮、硝态氮浓度变化

统软件分析数据,图表数据均为 3 次重复的平均值±标准误。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同施肥模式下田面水氮磷动态变化特征

2.1.1 施肥后田面水氮素动态变化特征 由图 1 可知,各处理田面水氮素浓度的变化趋势基本一致。在施基肥后第 1 天,处理 T1、T3、T4 的田面水总氮浓度分别达到峰值 20.47, 21.89, 26.15 mg/L, 铵态氮浓度分别达到峰值 8.00, 9.93, 10.23 mg/L, 在施基肥后第 3 天,处理 T2 的田面水总氮浓度、铵态氮浓度分别达到峰值 19.61, 2.71 mg/L, 第 7 天,处理 T1、T2、T3、T4 的总氮浓度分别降至峰值的 31.4%, 44.5%, 33.7%, 28.6%。第 1 次追肥后的第 1 天,处理 T1、T2、T3、T4 的田面水总氮浓度分别达到峰值 37.82, 29.87, 36.73, 26.11 mg/L, 铵态氮浓度分别达到峰值 8.38, 9.04, 9.92, 9.61 mg/L, 第 7 天,处理 T1、T2、T3、T4 的田面水总氮浓度分别降至峰值的 4.5%, 21.5%, 26.8%, 32.4%。第 2 次追肥后第 1 天,各处理总氮浓度均有所升高,但峰值较前 2 次施肥有所滞后,处理 T1、T2、T3 田面水总氮浓度在第 5 天分别达到峰值 10.53, 11.09, 11.37 mg/L, 处理 T4 第 7 天达到峰值 11.00 mg/L。以上说明,施肥后 1 周内是控制稻田田面水氮素流失的关键时期。稻田田面水中硝态氮浓度较低,约占总氮浓度的 0.2%~16.4%, 铵态氮浓度约占总氮浓度的 4.2%~45.4%, 因此田面水中的氮素流失形态主要为铵态氮和总氮。

2.1.2 施肥后面水磷浓度变化特征 由图 2 可知,处理 T1 在整个生育期内,磷浓度一直处于波动状态,处理 T2 施基肥后面水中总磷一直保持在比较稳定的低浓度水平,直到施肥后第 7 天才出现峰值,处理 T3 和 T4 的总磷浓度在基肥施用后第 1 天达到峰值,然后急剧下降,并维持在比较稳定的水平。而施用分蘖肥和穗肥后,处理 T2、T3、T4 的田面水总磷浓度都有所升高,说明追施尿素会激发磷素的释放,促进磷素的流失。各处理田面水的总磷浓度在施

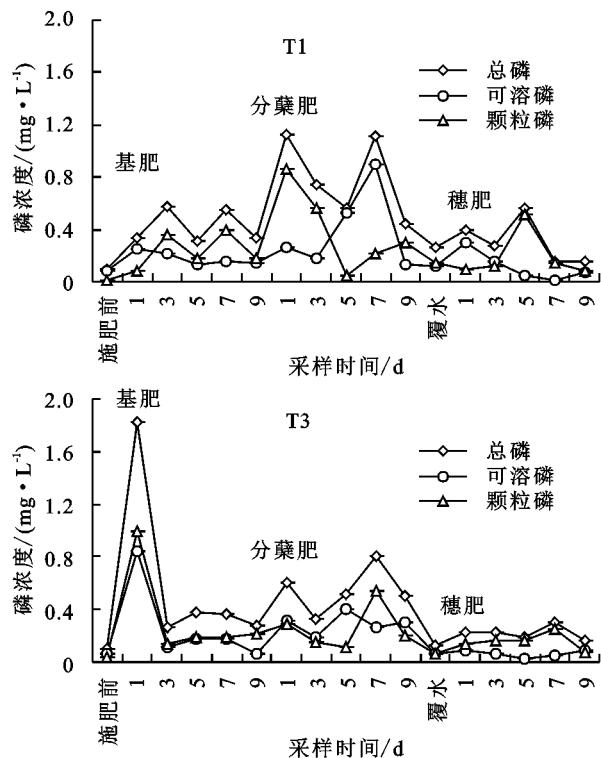
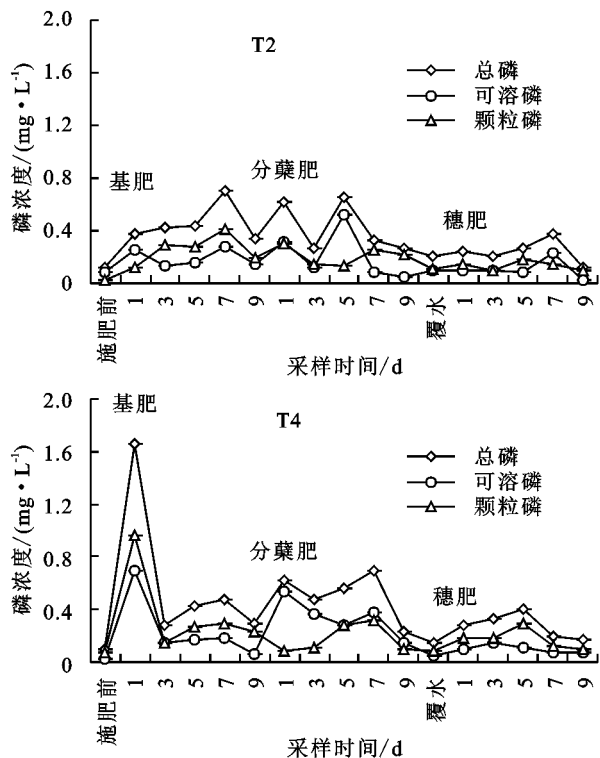


图 2 稻田田面水总磷、可溶磷、颗粒磷浓度变化

2.1.3 不同施肥模式下田面水氮磷的平均浓度 稻田径流的氮磷主要来自田面水,因此,在一定程度上,田面水的氮磷浓度,可以表征径流中氮磷流失的潜力<sup>[13]</sup>。由表 1 可知,基肥期和穗肥期,处理 T1 的田面水总氮平均浓度分别达 12.07, 8.13 mg/L, 高于 T2、T3、T4, 差异不显著; 全生育期内处理 T1 田面水的总氮平均浓度达 10.30 mg/L, T2、T3、T4 较 T1 分别降低了 12.2%, 6.5%, 5.3%, 这说明处理 T1 的氮素流失潜力较其他处理高。由表 2 可知,基肥期,处理 T1 的田面水总磷平均浓度低于 T2、T3、T4, 处理 T1 与 T3、T4 差异显著; 而蘖肥期处理 T1 的田面水总磷平均浓度显著高于 T2、T3、T4; 穗肥期,田面水的总磷平均浓度表现为 T1 大于 T2、T3、T4, T1 与 T2、T3 差异显著。可能的原因是处理 T2、T3、T4 的磷肥做基肥一次施入, 而处理 T1 基肥期、蘖肥期和穗肥期, 均施复合肥, 因此各生育期均有磷素施入, 所以, 处理 T1 基肥期的田面水总磷平均浓度低于其他处理, 而蘖肥期和穗肥期的田面水总磷平均浓度高于

肥后第 9 天基本都降至最低, 说明施肥后 9 天内是控制稻田田面水磷素流失的关键时期。可溶磷浓度的变化趋势和总磷基本一致, 只是幅度相对较小, 而颗粒磷浓度与可溶磷浓度此消彼长, 因此田面水中磷素的主要流失形态也一直处于变化之中。各处理田面水总磷浓度变化范围为 0.12~1.83 mg/L, 均高于水体富营养化发生的临界浓度 0.02 mg/L<sup>[12]</sup>, 这说明在整个水稻生育期内, 任何一次降雨事件都可能导致水体富营养化, 增加水体磷素流失风险。



其他处理。这说明, 稻田田面水中磷素的浓度与磷素的施入量密切相关, 同一时期, 施入的磷肥越多, 田面水磷素浓度越高。计算 16 次田面水总磷浓度的平均值, 作为整个生育期内田面水总磷的平均浓度, 表现为处理 T1 显著高于处理 T2、T3、T4, 与磷肥做基肥一次性施入相比, 磷肥分多次施入会增加磷素流失的风险。与 T1 相比, T2、T3、T4 的田面水总磷平均浓度分别降低了 26.7%, 15.6%, 13.3%, 这说明处理 T1 的磷素流失潜力较其他处理高。

综上, 与施用常规复合肥相比, 有机肥替代 30% 氮肥、控失肥替代 30% 氮肥、有机肥和控失肥综合替代 30% 氮肥均能降低氮素流失风险, 尤其是有机肥替代处理效果较为明显。

2.2 不同施肥模式对农田径流氮、磷流失的影响

2.2.1 降雨量与田间径流量 由图 3 可知, 整个水稻季总降雨量为 413.62 mm, 共发生了 4 次径流事件, 产流日期依次为 5 月 26 日(基肥后第 9 天), 6 月 6 日(基肥后第 20 天), 6 月 20 日(基肥后第 34 天), 7



月 23 日(第 1 次追肥后第 18 天),这 4 个时期降雨量分别为 34.20,20.00,53.60,85.82 mm。4 次径流事件所产生的总径流量如图 4 所示,处理 T1、T2、T3、T4 分别为 10 781.99,9 874.78,10 768.72,11 609.99 L,处理 T1 与 T2、T3、T4 无显著差异。整个水稻生育期内稻田平均径流量为 10 758.87 L。

表 1 田面水总氮平均浓度 单位:mg/L

处理	基肥期	分蘖肥期	穗肥期	全生育期
T1	12.07±1.83a	15.07±0.80a	8.13±0.21a	10.30±0.77a
T2	10.96±0.59a	12.75±1.11b	7.20±0.86a	9.04±0.21b
T3	10.21±0.34a	15.76±1.03a	7.51±0.81a	9.64±0.11ab
T4	11.75±0.94a	13.99±0.89ab	7.73±0.54a	9.76±0.51ab

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示差异显著性( $P<0.05$ )。下同。

表 2 田面水总磷平均浓度 单位:mg/L

处理	基肥期	分蘖肥期	穗肥期	全生育期
T1	0.41±0.01b	0.79±0.01a	0.32±0.02a	0.45±0.01a
T2	0.45±0.01b	0.42±0.01c	0.24±0.01bc	0.33±0.01c
T3	0.62±0.04a	0.55±0.03b	0.21±0.01c	0.37±0.01b
T4	0.62±0.07a	0.51±0.03b	0.28±0.01ab	0.39±0.02b

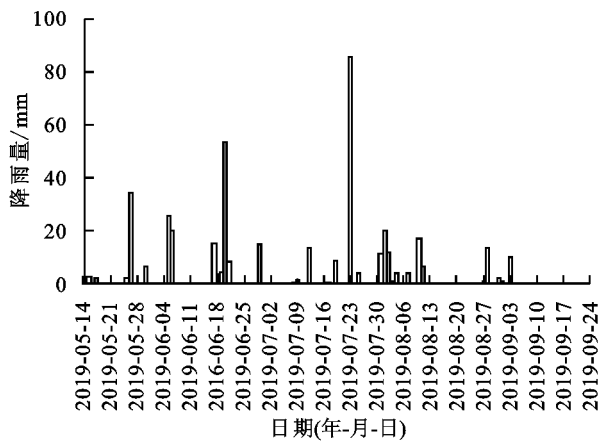


图 3 观测期间日降雨量

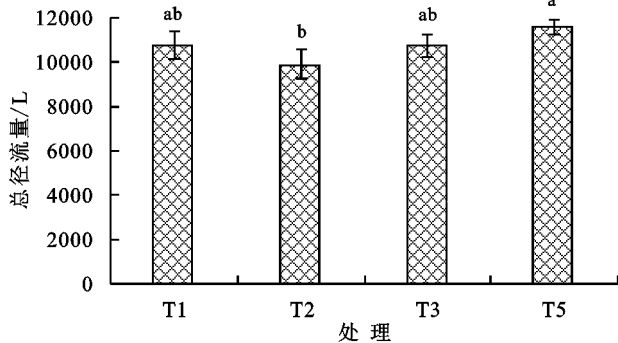


图 4 观测期间稻田径流量

2.2.2 各处理对地表径流氮、磷流失量的影响 由图 5 和图 6 可知,4 次径流事件中,总氮流失量从大到小依次为第 4 次、第 1 次、第 3 次、第 2 次,总磷流失量从大到小依次为第 4 次、第 3 次、第 1 次、第 2

次,而这 4 个时期的降雨量分别为 34.20,20.00,53.60,85.82 mm(图 3),说明降雨是地表径流氮磷流失的驱动力,降雨量越大,氮磷流失负荷越高。第 3 次径流事件降雨量大于第 1 次,而总氮流失量却较第 1 次小,说明径流氮素流失量还与径流发生时间距施肥日期间隔有关,距施肥时间间隔越小,径流水中总氮浓度越大,从而径流总氮流失量就越大。从表 3 可以看出,整个生育期内处理 T1 的 4 次径流累积总氮、总磷流失量分别达 17.68,1.60 kg/hm<sup>2</sup>,显著高于其他处理,T2、T3、T4 的总氮累积径流流失量较 T1 分别降低了 35.0%,30.8%,25.5%,总磷累积径流流失量较 T1 分别降低了 16.3%,21.9%,22.5%。处理 T2、T3、T4 的总氮径流流失量分别占当季施氮量的 5.6%,5.9%,6.4%,较 T1(8.6%)分别降低了 3.0%,2.7%,2.2%,总磷径流流失量分别占当季施磷量的 1.6%,1.5%,1.5%,较 T1(1.9%)分别降低了 0.3%,0.4%,0.4%。这说明与施用常规复合肥相比,生物有机肥替代 30%氮肥、控失肥替代 30%氮肥、生物有机肥与控失肥配合替代 30%氮肥,均可有效削减地表径流总氮、总磷流失量。

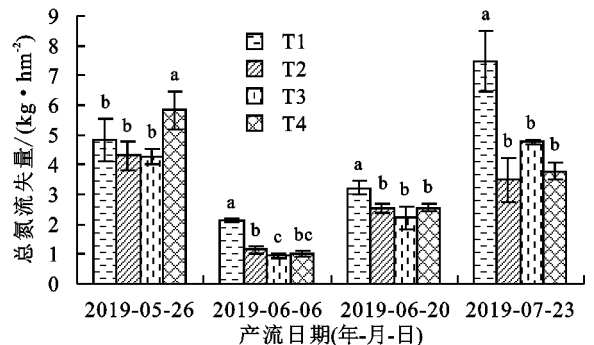


图 5 稻田径流总氮流失负荷

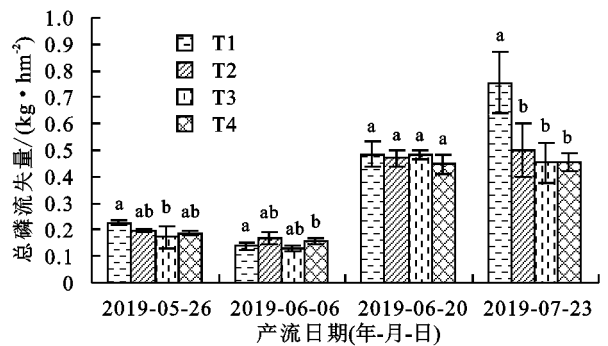


图 6 稻田径流总磷流失负荷

从表 3 中可以发现,除总氮、总磷外,稻田径流中铵态氮、硝态氮、可溶磷、颗粒磷的累积流失量均表现为 T1 显著高于其他处理。T2、T3、T4 的铵态氮累积径流流失量较 T1 分别降低了 11.4%,14.4%,15.5%,硝态氮累积径流流失量较 T1 分别降低了 17.8%,34.7%,30.1%,可溶磷累积径流流失量较 T1 分别降低了 24.0%,19.5%,9.4%,颗粒磷累积径流流失量较 T1

分别降低了 7.9%, 24.9%, 37.2%, 这表明生物有机肥替代 30% 氮肥、控失肥替代 30% 氮肥、生物有机肥

与控失肥配合替代 30% 氮肥对径流中不同形态的氮磷流失均有削减作用。

表 3 稻田氮磷径流累积流失量

单位: kg/hm<sup>2</sup>

处理	总氮	铵态氮	硝态氮	总磷	可溶磷	颗粒磷
T1	17.68±0.88a	2.91±0.12a	1.62±0.11a	1.60±0.13a	0.87±0.07a	0.73±0.06a
T2	11.49±1.34b	2.57±0.21b	1.33±0.10b	1.33±0.14b	0.66±0.08c	0.67±0.06a
T3	12.23±0.28b	2.49±0.07b	1.05±0.01c	1.23±0.08b	0.70±0.00bc	0.55±0.06b
T4	13.17±0.64b	2.46±0.10b	1.13±0.03c	1.24±0.01b	0.78±0.01ab	0.46±0.02b

### 2.3 不同施肥模式对水稻产量的影响

从表 4 可以看出, 处理 T2、T4 的有效穗数、每穗粒数及千粒重均高于处理 T1, 籽粒理论产量较处理 T1 分别显著增加了 7.8%, 6.5%。处理 T3 的有效穗数、每穗粒数及千粒重较处理 T1 略低, 导致籽粒产量降低了 2.2%, 差异不显著。

表 4 各处理产量及其影响因素

处理	有效穗数/ (穗·m <sup>-2</sup> )	每穗 粒数/个	千粒重/ g	理论产量/ (t·hm <sup>-2</sup> )
T1	185.00±5.56ab	189.93±2.33b	25.48±0.48a	8.95±0.15b
T2	195.33±2.08a	190.13±2.80b	25.67±0.02a	9.53±0.07a
T3	184.00±3.61b	188.07±1.86b	25.30±0.78a	8.75±0.38b
T4	186.00±5.29ab	200.06±1.10a	25.95±0.71a	9.65±0.07a

## 3 讨论

### 3.1 对稻田田面水氮磷浓度变化特征的分析

各处理田面水氮素浓度变化趋势基本一致(图 1)。总氮浓度在施肥后急剧上升, 达到峰值, 之后随时间变化波动下降, 并在 1 周内降至比较稳定的水平, 说明施肥后 1 周内是控制稻田氮素流失的关键时期, 这与郑小龙等<sup>[14]</sup>的研究一致。因此施肥后 1 周内最好避免灌水排水, 以防止氮素随水流失。铵态氮在施肥后第 1 天急速上升, 达到峰值, 之后急剧下降, 逐渐平稳。这可能是因为尿素施入后, 首先在水体中转化为铵态氮, 因此施肥后田面水中铵态氮浓度急剧升高, 之后随时间的变化, 水中的铵态氮一部分转化为氨气, 一部分转化为硝态氮或被植物利用<sup>[15]</sup>, 因此铵态氮浓度降低, 而铵态氮在转化为硝态氮之前已经通过各种转化、迁移损失了许多, 因此田面水中硝态氮浓度较低。各处理田面水的总磷浓度在施肥后第 9 天基本都降至最低(图 2), 说明施肥后 9 天内是控制稻田田面水磷素流失的关键时期, 这与吕亚敏等<sup>[16]</sup>的研究结果一致, 因此施肥后 9 天之内要特别注意控制磷素的流失, 且施肥后第 9 天恰逢降雨, 各处理总磷浓度却并未升高, 这说明, 降雨对田面水总磷浓度具有一定的稀释作用, 因此, 降雨是否会增加稻田的氮磷流失潜力, 需要考虑降雨量和降雨强度 2 方面的因素, 降雨强度较大时, 地表土壤受到扰动释放养分, 使田面水养分浓度增大, 才会增加田面水养分流失的潜力。处

理 T3 和 T4 的总磷浓度在基肥施用后第 1 天就达到峰值, 然后急剧下降, 随后出现小的波动并维持在比较稳定的水平, 这可能是由于在降雨和灌水等因素下, 土壤受到冲刷、扰动, 释放出了一部分被固持在土壤中的磷素, 因此田面水中总磷浓度会出现小的波动<sup>[17]</sup>。处理 T1 在整个生育期内, 总磷浓度一直保持在较高水平并不断出现无规律的波峰, 这可能是由于该处理并未将磷肥做基肥一次性施入, 而是按照农户施肥习惯, 追肥期不追施尿素, 直接追施复合肥, 将磷素分次施入, 使得各生育期田面水中磷素总是保持在较高的浓度。处理 T2 施基肥后田面水总磷浓度保持在较低的水平, 直到第 7 天才达到峰值, 这可能是因为生物有机肥养分释放较为缓慢, 因此基肥后处理 T2 田面水总磷浓度的峰值较其他处理滞后, 基肥后田面水总磷浓度较低, 这可能是因为肥料中的有机分子能与 Ca<sup>2+</sup>、Fe<sup>3+</sup>、Al<sup>3+</sup> 等螯合, 提高土壤中磷的有效性, 且土壤中有机碳含量的增加能提高土壤中微生物的活性、改善土壤结构, 增强土壤的吸附性能, 从而降低田面水中的磷浓度, 因此施肥后田面水总磷浓度并未明显增大<sup>[18]</sup>。

施用分蘖肥和穗肥后, 处理 T2、T3、T4 的田面水总磷浓度都有所升高, 说明追施尿素会激发磷素的释放, 促进磷素的流失。这可能是因为磷参与了硝酸盐还原及氮代谢等反应过程, 而追肥时施入大量尿素, 水稻氮素吸收量急剧增加, 使得水稻对田面水中的磷素吸收也大大增加, 导致田面水中磷浓度迅速下降, 而为了使土壤固相—液相中的磷素达到新的平衡, 土壤中固定的磷则会进入田间水层中, 因此追施尿素会激发土壤磷素释放<sup>[19]</sup>。整个生育期内田面水总磷的平均浓度, 表现为 T1 显著高于其他处理, 这说明, 与磷肥做基肥一次性施入相比, 磷肥分多次施入会增加磷素流失的风险。处理 T2、T3、T4 中, T2 的田面水总磷平均浓度最低, 这可能是因为生物有机肥可以增强土壤对磷素的吸附, 减少田面水中溶解的磷素, 且肥料中养分释放速度比较缓慢<sup>[12]</sup>。

### 3.2 不同施肥模式对稻田径流养分流失及水稻产量的影响

生物有机肥可释放土壤固定态元素, 改善土壤结构和生态条件, 协调土壤的水肥供应能力<sup>[20]</sup>, 本试验

中,处理 T2(生物有机肥替代 30%氮肥),径流总氮、总磷累积流失量较 T1(常规复合肥)分别降低了 35.0%, 16.3%,产量提高了 7.8%,与前人<sup>[20-21]</sup>的研究结果一致。控失肥是一种新型缓控释肥料,主要采用控失剂固定肥料养分,达到减少养分流失的目的。有研究表明,施用控失复合肥能增加水稻的总粒数、千粒重,从而提高作物产量<sup>[9-10]</sup>,本试验中,采用控失肥替代 30%氮肥(T3),并未达到增产的效果,可能的原因是本试验中控失肥配施比例与施用量与前人<sup>[9-10]</sup>不同,前人关于控失肥对水稻产量的研究大多设置为控失肥多次施用或基肥只施控失肥,而本试验采用控失肥替代 30%氮肥,在基肥时将其一次性施入稻田,不足的养分用单质肥进行调补,更偏重于氮磷流失的控制效果,径流总氮、总磷累积流失量较 T1 分别降低了 30.8%,21.9%,该处理虽未达到增产的效果,但也并未显著减产,同时本试验中控失肥处理在水稻抽穗期发生了病害,对产量也有一定影响。处理 T4(有机、控失综合替代 30%氮肥)径流总氮、总磷累积流失量较 T1(常规复合肥)分别降低了 25.5%,22.5%,产量提高了 6.5%,这说明生物有机肥与控失肥配合施用既能降低氮磷流失,又能达到一定的增产效果,也侧面表明了控失肥具有一定的增产潜力。因此,关于控失肥在稻田中的配施比例及施用量还需要做进一步的优化,其应用效果也需通过长期试验进行验证。

### 3.3 对稻田径流氮、磷流失的主要影响因素分析

整个生育期内处理 T1 的总氮、总磷的径流累积流失量和流失率均高于处理 T2、T3、T4,这说明本试验中几种不同肥料替代配施对氮磷流失的控制效果都优于常规复合肥。稻田中的氮磷主要以径流和淋溶、渗漏等途径损失<sup>[22]</sup>,而径流氮磷流失量主要取决于地表径流量与径流水中氮磷浓度的高低,地表径流量与降雨量、降雨前田面水高度和降雨后水稻冠层截留量等诸多因素有关<sup>[23]</sup>,其中降雨量是最主要的一个影响因素<sup>[13]</sup>,降雨量的多少直接影响到地表径流量的多少,从而间接影响氮磷等养分的流失量,有研究<sup>[24]</sup>表明,降雨量与地表径流和渗漏水量呈显著的线性关系,降雨量越大,地表径流量越大。雨水击打地面引起的泥沙搅动会使田面水氮磷等养分的浓度增加,从而使氮磷流失的风险大大增加,因此,降雨强度也会对氮磷流失产生影响。

### 3.4 稻田氮、磷流失的防控措施

降雨和施肥是稻田径流氮磷流失的决定因素。降雨量和降雨强度是影响氮磷流失的重要因素。但是自然降雨属于不可抗力,人力无法控制,因此我们应当从施肥模式、灌水排水等田间管理措施入手控制氮磷等养分的流失。首先,要选择较优的施肥模式。

合理利用生物有机肥及控失肥等新型肥料替代常规复合肥,既能提高作物产量,又能减少氮磷流失。其次,要选择合适的施肥日期,在施肥前查看近期天气预报,避免施肥后短期内遇到降雨天气,引起稻田养分流失。再次,合理的灌排措施也很重要,降雨前稻田田面水高度越高,降雨后产生的径流量就越大,因此,控制田面水的高度显得尤为重要,尤其是烤田前应当尽量减少灌溉,使田面水量降到最低,降低排水量,最好自然落干,这样可大大降低氮磷流失的风险。

## 4 结论

(1)各处理田面水总氮浓度在施肥后先急剧上升,后波动下降,在 1 周内降至比较稳定的水平,总磷浓度在施肥后第 9 天降至最低。施肥后 1 周内是稻田氮素流失的关键防控期,施肥后 9 天内是控制稻田田面水磷素流失的关键时期。

(2)与 T1 相比,T2、T3、T4 的田面水总氮平均浓度分别降低了 12.2%,6.5%,5.3%,田面水总磷平均浓度分别降低了 26.7%,15.6%,13.3%,与施用常规复合肥相比,生物有机肥替代 30%氮肥、控失肥替代 30%氮肥、生物有机肥和控失肥综合替代 30%氮肥均能降低田面水氮磷流失潜力,其中有机肥替代 30%氮肥的控失效果更好。

(3)处理 T2、T3、T4 的径流总氮累积流失量较 T1 分别降低了 35.0%,30.8%,25.5%,径流总磷累积流失量较 T1 分别降低了 16.3%,21.9%,22.5%。这说明与施用常规化肥相较,生物有机肥替代 30%氮肥、控失肥替代 30%氮肥、生物有机肥与控失肥配合替代 30%氮肥,可以有效削减地表径流总氮、总磷流失量。

(4)处理 T2、T4 籽粒产量较处理 T1 分别增加了 7.8%,6.5%。处理 T3 籽粒产量降低了 2.2%。综合稻田田面水及径流的氮磷流失控制效果和产量效应,处理 T2、T4 即生物有机肥替代 30%氮肥、生物有机肥与控失肥配合替代 30%氮肥这 2 种施肥模式较为适合该地区。由于本试验为大田试验,受各种自然因素影响较大,且试验年限较短,因此还需进行长期定位试验,对所得结论做进一步的验证。

### 参考文献:

- [1] 胡冰涛,张龙江,杨士红,等.稻田氮、磷损失与过程监测方法研究进展[J].生态与农村环境学报,2018,34(9): 788-796.
- [2] 冀建华,侯红乾,刘益仁,等.长期施肥对双季稻产量变化趋势、稳定性和可持续性的影响[J].土壤学报,2015, 52(3):607-619.
- [3] Wang J, Wang D J, Zhang G, et al. Nitrogen and phosphorus leaching losses from intensively managed paddy fields with straw retention[J]. Agricultural Water Man-



- agement, 2014, 141: 66-73.
- [4] Zhang D, Wang H Y, Pan J T, et al. Nitrogen application rates need to be reduced for half of the rice paddy fields in China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2018, 265: 8-14.
- [5] Liu J, Zuo Q, Zhai L M, et al. Phosphorus losses via surface runoff in rice-wheat cropping systems as impacted by rainfall regimes and fertilizer applications[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(3): 667-677.
- [6] Kopacek J, Hejzlar J, Posch M. Factors controlling the export of nitrogen from agricultural land in a large central European catchment during 1900 - 2010 [J]. *Environmental Science Technology*, 2013, 47(12): 6400-6407.
- [7] 李新华, 巩前文. 从“增量增产”到“减量增效”: 农户施肥调控政策演变及走向[J]. *农业现代化研究*, 2016, 37(5): 877-884.
- [8] 鲁洪娟, 周德林, 叶文玲, 等. 生物有机肥在土壤改良和重金属污染修复中的研究进展[J]. *环境污染与防治*, 2019, 41(11): 1378-1383.
- [9] 李磊, 安浩军, 岳茂武, 等. 控失肥与普通复合肥对小麦生长发育及产量的影响[J]. *中国农学通报*, 2017, 33(24): 1-6.
- [10] 章辉. 控失肥对单季稻生长发育、产量及效益的影响研究[J]. *安徽农学通报*, 2013, 19(14): 80-81.
- [11] 国家环保总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [12] 张翼, 岳玉波, 赵峥, 等. 不同施肥方式下稻田氮磷流失特征[J]. *上海交通大学学报(农业科学版)*, 2015, 33(1): 1-7.
- [13] 杨坤宇, 王美慧, 王毅, 等. 不同农艺管理措施下双季稻田氮磷径流流失特征及其主控因子研究[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(8): 1723-1734.
- [14] 郑小龙, 吴家森, 陈裴裴, 等. 不同施肥与生物质炭配施对水稻田面水氮磷流失及产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(4): 39-43, 48.
- [15] 吴俊, 樊剑波, 何园球, 等. 不同减量施肥条件下稻田田面水氮素动态变化及径流损失研究[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(9): 1561-1566.
- [16] 吕亚敏, 吴玉红, 李洪达, 等. 减肥措施对稻田田面水氮、磷动态变化特征的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2018, 34(4): 349-355.
- [17] 夏小江, 胡清宇, 朱利群, 等. 太湖地区稻田田面水氮磷动态特征及径流流失研究[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(4): 21-25.
- [18] 张一. 不同外源添加物质对土壤氮磷素淋溶特征的影响[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [19] 叶玉适, 梁新强, 李亮, 等. 不同水肥管理对太湖流域稻田磷素径流和渗漏损失的影响[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(4): 1125-1135.
- [20] 王兴龙, 朱敏, 杨帆, 等. 配施有机肥减氮对川中丘区土壤微生物量与酶活性的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(3): 271-276.
- [21] 周伟, 吕腾飞, 杨志平, 等. 氮肥种类及运筹技术调控土壤氮素损失的研究进展[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(9): 3051-3058.
- [22] Cherobim V F, Huang C H, Favaretto N. Tillage system and time post-liquid dairy manure: Effects on runoff, sediment and nutrients losses[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 184: 96-103.
- [23] 俞巧钢, 叶静, 马军伟, 等. 不同施氮水平下油菜地土壤氮素径流流失特征研究[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(3): 22-25, 30.
- [24] 胡昱彦, 庄舜尧, 郭益昌, 等. 不同施肥模式对雷竹林氮磷流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(3): 51-57.

(上接第85页)

- [14] 王计磊, 李子忠. 东北黑土区水力侵蚀研究进展[J]. *农业资源与环境学报*, 2018, 35(5): 389-397.
- [15] Ouyang W, Wu Y, Hao Z, et al. Combined impacts of land use and soil property changes on soil erosion in a mollisol area under long-term agricultural development [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 613/614: 798-809.
- [16] Xin Y, Xie Y, Liu Y, et al. Residue cover effects on soil erosion and the infiltration in black soil under simulated rainfall experiments[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 543: 651-658.
- [17] 张光辉, 刘宝元, 李平康. 槽式人工模拟降雨机的工作原理与特性[J]. *水土保持通报*, 2007, 27(6): 56-60.
- [18] 水利部水文局, 南京水利科学研究院. 中国暴雨统计参数图集[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006: 9-39.
- [19] 中华人民共和国水利部. SL 446-2009 黑土区水土流失综合防治技术标准[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009: 5-6.
- [20] Gregory J M. Soil cover prediction with various amounts and types of crop residue[J]. *Transactions of the Asae*, 1982, 5(25): 1333-1337.
- [21] 刘雨鑫, 谢云, 辛艳, 等. 基于人工模拟降雨试验的垄作区田水土保持效益的变化研究[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(4): 227-231.
- [22] 唐涛, 郝明德, 单凤霞. 人工降雨条件下秸秆覆盖减少水土流失的效应研究[J]. *水土保持研究*, 2008, 15(1): 9-11.
- [23] 杨青森, 郑粉莉, 温磊磊, 等. 秸秆覆盖对东北黑土区土壤侵蚀及养分流失的影响[J]. *水土保持通报*, 2011, 31(2): 1-5.