

基于稻田控水减排的氮肥运筹试验研究

晏军^{1,2}, 吴启侠^{1,2}, 朱建强^{1,2}, 张露萍¹, 李继福¹

(1. 长江大学农学院, 湖北 荆州 434025; 2. 主要粮食作物产业化湖北省协同创新中心, 湖北 荆州 434025)

摘要: 为改善江汉平原地区稻田水肥管理措施, 采用田间小区试验, 研究了常规淹灌(CF)和浅灌深蓄(SIDS)条件下, 农民习惯施肥(FFP)、30%尿素+70%控释参混肥(30%N+70%CRF)和优化减氮施肥(OPT-N)对水稻各生育阶段稻田氮磷流失特征、养分吸收和土壤养分积累的影响。结果表明: 与CF处理相比, SIDS处理田间灌溉水量、总用水量、径流量和渗漏量分别降低41.7%、18.5%、45.8%和21.9%, 降雨利用率增加16.2%, TN和TP径流流失量分别降低32.6%~35.9%和36.4%~53.1%, 渗漏流失量分别降低22.8%~32.0%和16.2%~33.3%, 水稻返青期—拔节孕穗期分别占稻田氮磷径流和渗漏流失总量的70%以上。30%N+70%CRF处理、OPT-N处理较FFP处理, TN径流流失量分别降低19.7%~29.2%、15.1%~25.2%, 渗漏流失量分别降低25.4%~51.7%、20.9%~26.4%, TP渗漏流失量分别降低18.4%~24.5%、20.4%~31.6%, 但TP径流流失量差别很小。从水稻养分吸收和土壤养分积累来看, SIDS处理实际产量相对CF处理可增产4.4%, 但对0~40 cm土层氮磷养分累积影响不大, 30%N+70%CRF处理和OPT-N处理相对FFP处理可增产5.6%和0.4%, 且0~20 cm土层速效态氮磷养分能维持在一个较高且相对稳定的水平。综上, 浅灌深蓄结合30%N+70%CRF施用有利于稻田节水、减少氮磷流失、水稻增产以及土壤肥力改善。

关键词: 水肥管理; 氮磷流失; 径流; 渗漏; 产量

中图分类号: S275; S365; S511

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)02-0229-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.02.034

Experimental Research on Nitrogen Management Based on Emission Controlling for Paddy Field

YAN Jun^{1,2}, WU Qixia^{1,2}, ZHU Jianqiang^{1,2}, ZHANG Luping¹, LI Jifu¹

(1. College of Agriculture, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434025;

2. Hubei Collaborative Innovation Center for Grain Industry, Jingzhou, Hubei 434025)

Abstract: In order to improve paddy water and fertilizer management measures in Jianghan Plain, a field plot experiment with two irrigation regimes (conventional flooding irrigation, CF; shallow irrigation and deep storage, SIDS) and three nitrogen (N) managements (farmers' fertilization practice, FFP; 30% urea+70% controlled release compound fertilizer, 30%N+70%CRF; optimized and reduced nitrogen fertilizer application, OPT-N) was carried out to study the effects of water and fertilizer managements on losses of N and phosphorus (P), nutrition uptake of rice and nutrition accumulation of soil during different growth stages. The results were: (1) Compared with CF, SIDS reduced the irrigation quantity, total water use, runoff and leakage by 41.7%, 18.5%, 45.8% and 21.9%, respectively, but increased rainfall use efficiency by 16.2%. The amounts of total N (TN) from runoff and leakage in SIDS were 32.6%~35.9% and 22.8%~32.0% respectively lower than in CF. SIDS also decreased the amounts of total P (TP) from runoff and leakage by 36.4%~53.1% and 16.2%~33.3%, respectively. Meanwhile, the paddy runoff and leaching losses of TN and TP from re-greening to jointing and booting stages accounted for more than 70% of the whole growing season. (2) Compared with FFP, 30%N+70%CRF and OPT-N decreased runoff of TN by 19.7%~29.2% and 15.1%~25.2%, leaching losses of TN by 25.4%~51.7% and 20.9%~26.4%, leaching losses of TP by 18.4%~24.5% and 20.4%~31.6%, respectively, but no obvious difference was found in runoff of TP. (3) Considering the nutrients uptake of rice and nutrition accumulation in soil, compared with FFP, SIDS

收稿日期: 2017-10-13

资助项目: 国家重点研发计划重点专项(2016YFD0800500); 长江大学青年基金项目(2016cqj38); 湖北省科技支撑计划项目(2014BCB038)

第一作者: 晏军(1992—), 男, 汉族, 硕士, 主要从事农业生产的水土环境调控研究。E-mail: yj111708@sina.com

通信作者: 吴启侠(1982—), 男, 汉族, 博士, 高级实验师, 主要从事农业渍涝灾害、水土环境研究。E-mail: wqx1144@163.com

increased yield by 4.4%, but had no significant effects on N and P accumulation in soil (0—40 cm depth). Compared with FFP, 30%N+70% and OPT-N improved 5.6% and 0.4% yields respectively, and also giving the high and stable available N and available P in soil (0—20 cm depth). In generally, the combination of SIDS and 30%N+70% CRF could be effective in saving water, reducing N and P losses, promoting rice yields and improving soil fertility.

Keywords: water and fertilizer management; nitrogen and phosphorus losses; runoff; leakage; yield

水稻是我国主要的粮食作物,年种植面积达 3 000 万 hm^2 ,也是我国灌溉用水量最大、化肥消费量最多的农作物^[1]。一方面,我国水资源紧缺,且时空分布极不均匀,占全国总用水量 45%~50% 的水稻种植系统,水浪费现象却相当严重^[2];另一方面,稻田过量施肥会导致氮磷等养分流失和稻田周边水体污染^[3-4]。研究表明,农田土壤养分的流失已成为农业面源污染的主要来源^[5],而施肥和水管理是影响农田氮、磷迁移的重要因素。因此,水稻季进行节水、减污和增产显得尤为重要。

近年来,国内外学者就稻田节水灌溉和施肥技术进行了大量研究,水稻“浅、湿、晒”灌溉、间歇灌溉、干湿交替灌溉以及水稻旱作等节水灌溉措施,新型肥料的研究与施用、氮肥实时实地管理等施肥技术一直是研究的热点。相关研究^[6-11]表明节水灌溉技术、缓/控释肥和有机无机肥的施用,在不影响水稻产量的情况下能有效降低稻田用水量,同时减少稻田氮磷径流和渗漏损失,提高水稻水氮利用效率。然而,这些研究主要集中在我国太湖流域等地区,且水稻各个生育阶段稻田的径流产生量及氮磷流失规律还不明确。江汉平原地区水稻关键生育期与梅雨期同步,降雨引起的地表和地下排水较其他作物及地区的水稻更为频繁,排水量也更大,且梅雨期过后又容易出现间接性干旱现象。为此,根据江汉平原地区降雨特点和水稻各生育期的灌排水特点,有针对性地提出一套节水节肥不减产、降低农田排(渗)水污染并为农民所接受的水肥管理技术势在必行。本研究基于田间试验,研究了常规淹灌和浅灌深蓄条件下,氮肥运筹对水稻各生育期氮、磷流失特征、养分吸收和土壤养分积累的影响,为江汉平原地区稻田节水节肥减排和农业面源污染防治提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验点位于江汉平原腹地的长江大学试验基地(30°21'N, 112°09'E),属北亚热带农业气候带,年平均气温 16.5℃,≥10℃积温 5 094.9~5 204.3℃,年平均降水量 1 095 mm,年平均日照时间 1 718 h。耕作层(0—20 cm)土壤基本性状为:pH 7.4,全氮含量 2.04 g/kg,全磷含量 0.48 g/kg,碱解氮含量 79.5

mg/kg,速效磷含量 38.5 mg/kg,速效钾含量 108.7 mg/kg。用于本试验的水稻田南北方向长 52 m,东西方向长 18 m,长年种植水稻,属于典型的水稻田。供试品种为汇丰 8 号,属中熟中粳两系杂交稻,在湖北省作一季中稻栽培,全生育期 135 d 左右,株高 126 cm 左右,一般 4 月下旬到 5 月上旬播种,5 月下旬到 6 月上旬移栽,8 月上旬孕穗,9 月中旬成熟。

1.2 试验方法

按灌溉模式和氮肥管理二因素交互试验,采用随机区组排列。2 种灌溉模式为常规淹灌(CF)和浅灌深蓄(SIDS)。水稻移栽后的 10~14 天内,所有的试验小区均维持 10~40 mm 浅水层。此后,CF 和 SIDS 处理分别进行田间水分管理。CF 常规淹灌:水稻秧苗返青后田面保持 10~80 mm 水层,整个生育期不晒田,收获前 10 天自然落干;SIDS 浅灌深蓄:秧苗返青后将稻田一次性灌溉至田面水深 40~60 mm,待其自然落干至表土以下 100 mm(视稻田土壤湿润状况和水稻生长而定),再次灌溉至 40~60 mm,往复进行,水稻扬花期,维持田面水深 30~50 mm 一周,收获前 10 天自然落干;依据本研究^[12]调节稻田蓄水深度为:水稻返青期间如遇降雨稻田可蓄水至 50 mm;分蘖期—拔节期间如遇降雨稻田可蓄水至 100 mm;拔节期—成熟期间如遇降雨稻田可蓄水至 150 mm。3 种氮肥管理为:农民习惯施肥(FFP)、30%尿素(30%N)+70%金正大控释掺混肥(70%CRF,释放周期为 70 天)和优化减氮施肥(OPT-N)。农民习惯施肥处理中 70%氮肥为普通复合肥,基肥施入,30%氮肥为尿素,分蘖期施入;控释掺混肥处理中 70%氮肥为控释掺混肥,30%氮肥为尿素(N 含量 46%),基肥施入;优化减氮施肥处理中 50%氮肥为普通复合肥,基肥施入,50%氮肥为尿素,分别在分蘖期施入 35%,幼穗分化期施入 15%。习惯施肥、控释掺混肥和减氮优化施肥处理中磷肥和钾肥不足部分用过磷酸钙(P_2O_5 含量 12%)和氯化钾(K_2O 含量 60%)补充,全部基施。普通复合肥由湖北中化东方肥料有限公司提供,其养分含量为:N 18%, P_2O_5 8%, K_2O 15%;控释掺混肥由金正大生态工程集团股份有限公司提供,其养分含量为:N 28%(包膜), P_2O_5 5%, K_2O 9%。具体施肥方案见表 1。

表 1 试验施肥方案

单位:kg/hm²

处理	施肥量 (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)	基肥			分蘖期		幼穗分化期	
		缓释肥	普通复合肥	尿素	过磷酸钙	氯化钾	尿素	尿素
FFP	180-75-105	—	700	—	158.3	—	117.4	—
30%N+70%CRF	180-75-105	450	—	117.4	437.5	107.5	—	—
OPT-N	150-75-105	—	416.7	—	347.2	70.8	114.1	48.9

试验共设 6 个处理,3 次重复。依照本试验田大小和前人相关研究^[6-8]将水稻田沿东西向划分为 18 个 15 m×2.2 m 的规整小区,四周设置宽 1 m 的保护行,小区四周用高 60 cm PVC 隔水板隔开,田面表土层上下各 30 cm,防止试验过程中小区间串水。常规淹灌和浅灌深蓄区组在南北两边各 9 个小区,3 种氮肥处理在区组内随机排布。稻田东边田埂设有灌水管,西边外侧设有排水渠。每个小区单独灌排,进水管接装小型计量水表,排水管末端接径流收集桶。本试验于 2016 年 5 月 5 日播种,6 月 5 日移栽,种植间距为 25 cm×30 cm,9 月 18 号收获。

1.3 测定项目与分析方法

1.3.1 径流水、渗漏水的取样及测定 试验期内气象数据来源于荆州农业气象试验站。降雨过后,按照水稻不同生育期及上述的水管理方法进行排水,各小区径流量通过带盖溢流桶收集。每个处理埋置 1 个自制的铁渗漏桶(直径 30 cm,长 1 m),埋入地下 60 cm,管口高出地表 40 cm,上部加盖,以防止雨水、尘土或昆虫进入管内,用水位测针每 2~3 天测量 1 次,根据水位差计算每天稻田渗漏量。在各小区田面离进水口处 3,9,12 m 处地下人工埋设陶土头土壤渗流溶液采集器(30 cm 处),在水稻的返青期、分蘖期、拔节孕穗期、抽穗扬花期和灌浆成熟期灌水和降雨(雨量达 30 mm)结束 1,3,7 天后取土壤渗漏水样。

试验测定的水质指标与方法:总氮(TN)采用碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度法(GB 11894—89)测定;氨氮(NH₄⁺—N)含量采用纳氏试剂紫外分光光度法(本法与 GB 7479—87 等效)测定;硝氮(NO₃⁻—N)含量采用紫外分光光度法测定;总磷(TP)和溶解态磷(DP)含量采用钼酸铵分光光度法测定;颗粒态磷(PP)用差减法求得^[13]。

1.3.2 土样的采集与测定 于收获后每个小区各取 1 次 0—20,20—40 cm 深度的土壤混合样,土样全氮含量采用浓 H₂SO₄—H₂O₂ 消煮—凯氏定氮法测定;铵态氮(NH₄⁺—N)含量采用 KCl 浸提—靛酚蓝比色法测定;硝态氮(NO₃⁻—N)含量采用 KCl 浸提—紫外分光光度法测定;全磷含量采用 NaOH 熔融—钼锑抗比色法测定;速效磷含量采用 NaHCO₃ 浸提—钼锑抗比色法^[14]测定。

1.3.3 水稻植株样采集与测定 于水稻各生育期按

各小区的平均茎蘖数各取有代表性的稻株的 5 株,105 ℃杀青,80 ℃烘干至恒重,称重并粉碎。植株全氮含量采用浓 H₂SO₄—H₂O₂ 消煮—凯氏定氮法测定;全磷含量采用浓 H₂SO₄—H₂O₂ 消煮—钼钼黄比色法^[14]测定。

1.3.4 测产 成熟期取各处理 2 个 5 穴用于考种,测定有效穗数、穗长、每穗粒数、结实率和千粒重。各小区实收 3 m² 测产。

1.4 数据分析

应用 DPS 15.10 高级版进行方差分析,LSD 法进行处理间多重比较,利用 MS Excel 2007 作图。降雨期间,忽略不计其地下深层渗漏(地下水位较高^[15])和植物截留(多年平均值在 0.2%左右^[16]),降雨利用率 Y 按公式(1)计算:

$$Y=\frac{R_T-R_t}{R_T}\times 100\%$$
 (1)

式中:R_T 为农田某时段的降雨总量(mm);R_t 为农田某时段的径流量(mm)。

氮、磷流失量 P 按公式(2)计算:

$$P=\sum_{i=1}^n(C_i\times V_i)$$
 (2)

式中:C_i 为第 i 次径流(或渗漏)水中氮(或磷)的浓度(mg/L);V_i 为第 i 次径流(或渗漏)水的体积(L)。

2 结果与分析

2.1 田间降雨量、径流量、灌溉量与渗漏量

水稻移栽后不同灌溉模式的降雨量、灌溉量与稻田径流量见图 1。水稻移栽后 110 天内累积降雨量为 550.3 mm,日降雨量最大为 70.3 mm(7 月 2 日,第 46 天),CF 处理田间灌溉 7 次,灌溉量为 440.5 mm,总用水量为 990.8 mm,径流量为 194.8 mm(分蘖期产生 157.3 mm,拔节孕穗期产生 37.5 mm);而 SIDS 处理田间灌溉 4 次,灌溉量为 257 mm,总用水量为 807.3 mm,径流量为 105.6 mm(全部在分蘖期产生)。SIDS 处理田间灌溉水量、总用水量和径流量较 CF 处理分别降低 41.7%,18.5%和 45.8%,降雨利用率增加 16.2%。经估算,CF 和 SIDS 处理水稻全生育期累计渗漏水量分别为 343,268 mm,浅灌深蓄处理渗漏水量较淹灌降低 21.9%。由于 SIDS 处理显著削减了灌溉次数和灌溉量,使得田间水分负荷、径流量和渗漏量明显下降。

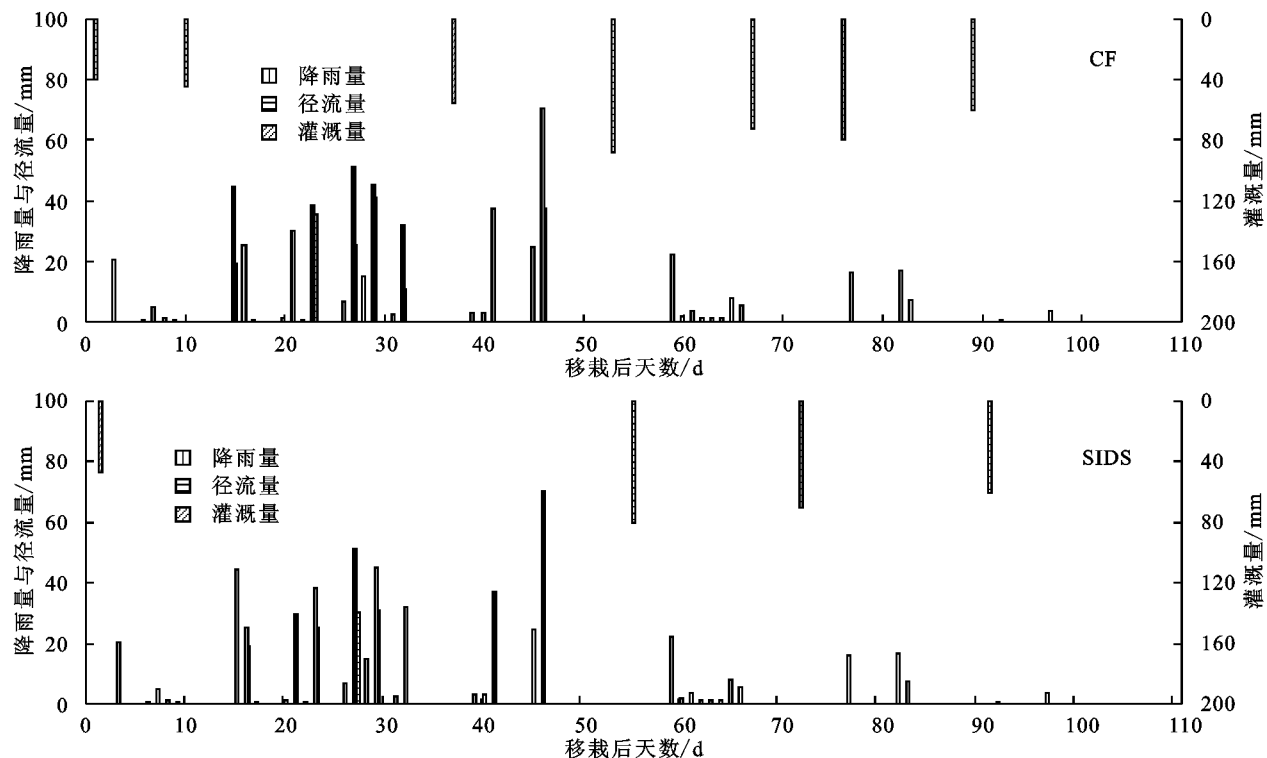


图 1 不同灌排模式的降雨量、径流量与灌溉量

2.2 水稻生育期稻田不同形态氮、磷径流流失量

江汉平原地区农田径流多发期主要集中在每年的梅雨期^[15]。不同水肥管理水稻各生育期稻田氮、磷径流流失量及总流失量见表 2。常规灌溉方式下,稻田氮磷径流流失总量的 70%在分蘖期,30%在拔节孕穗期;而浅灌深蓄条件下,稻田氮磷径流流失期全在分蘖期,因为江汉平原的梅雨季节正处于中稻的返青期—拔节孕穗期,而此时稻田的施肥量大,田面水氮素磷素浓度高,使得返青期—分蘖期成为降低稻田氮磷径流流失的关键时期。常规灌溉方式下,全生育期稻田 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、TN、DP 和 TP 径流流失量分别为 1.99~2.69,0.77~1.16,4.30~6.07,0.14~0.16,0.32~0.34 kg/hm²,而浅灌深蓄较常规灌溉方式 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、TN、DP 和 TP 径流流失量分别降低 28.5%~35.7%,22.4%~54.5%,32.6%~35.9%,35.7%~60.0%和 36.4%~53.1%;其中 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 和 PP 是 TN 和 TP 径流流失的主要形态。

2 种水管理方式下,30%N+70%CRF 处理和 OPT-N 处理较 FFP 处理,TN 径流流失量分别降低 19.7%~29.2%和 25.4%~51.7%,但 TP 径流流失量差别非常小;方差分析表明,常规灌溉和浅灌深蓄方式下 30%N+70%CRF、OPT-N 处理 TN 径流总流失量均显著低于 FFP 处理,SIDS+OPT-N 处理 TN 径流总流失量可降低至 2.90 kg/hm²,常规灌溉方式下 TP 径流总流失量在 3 种施肥处理之间差异不显著,但浅灌深蓄方式下 OPT-N 处理 TP 径流总流失量显著低于 FFP 处理,可达到 0.15 kg/

hm²,表明水稻生长前期氮肥控释或减量施用,可有效降低稻田氮素流失,但是对磷素流失的影响较小。

2.3 水稻生育期稻田不同形态氮、磷渗漏流失量

水分和养分管理是影响农田氮素和磷素淋失的重要因素。不同水肥管理水稻各生育期稻田氮素、磷素渗漏流失量及总流失量见表 3。不同生育阶段水稻的水肥需求也不同,营养生长期和生殖生长期对水肥需求的差别较大,返青期—拔节孕穗期是稻田施肥量和用水量最多的时期,从而稻田氮素和磷素的淋失量也会随之增加,本研究表明返青期—拔节孕穗期稻田氮素和磷素渗漏量占全生育期的 75%以上,因为此阶段稻田需水量较大,又正处于江汉平原梅雨期。常规灌溉方式下,全生育期稻田 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、TN、DP 和 TP 渗漏流失量分别为 8.98~13.83,1.40~2.83,14.16~19.38,0.22~0.32,0.37~0.49 kg/hm²,而浅灌深蓄较常规灌溉方式 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、TN、DP 和 TP 渗漏流失量分别降低 23.5%~28.1%,12.9%~37.5%,22.8%~32.0%,5.0%~36.4%和 16.2%~33.3%,其中 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 和 DP 是 TN 和 TP 淋失的主要形态,浅灌深蓄处理降低各形态氮素、磷素渗漏流失量主要在返青期—拔节孕穗期,因此此阶段是降低稻田氮磷淋失的关键时期。

2 种水肥管理方式下,30%N+70%CRF 处理和 OPT-N 处理较 FFP 处理的 TN 渗漏流失量分别降低 15.1%~25.2%和 20.9%~26.4%,TP 渗漏流失量分别降低 18.4%~24.5%和 20.4%~31.6%。方差分析表明,常规灌溉和浅灌深蓄方式下 30%N+70%CRF 处

理、OPT-N 处理 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 和 TN 渗漏总流
失量均显著低于 FFP 处理,OPT-N 处理的 NH_4^+-N 、
 NO_3^--N 和 TN 渗漏总流失量低于 30%N+70%CRF 处
理,但无显著差异;DP 和 TP 渗漏总流失量在 3 种施肥
处理间表现为 $\text{FFP}>30\%\text{N}+70\%\text{CRF}>\text{OPT}-\text{N}$,
但各处理间差异均不显著。

表 2 不同水肥管理稻田各形态氮素和磷素径流流失量 单位:kg/hm²

生育期	指标	CF			SIDS		
		FFP	30%N+70%CRF	OPT-N	FFP	30%N+70%CRF	OPT-N
分蘖期	NH_4^+-N	2.27a	1.53b	1.54b	1.73a	1.43b	1.28b
	NO_3^--N	1.07a	0.90b	0.73b	0.90a	0.66b	0.35c
	TN	4.76a	3.20b	2.30c	3.89a	3.20b	2.90b
	DP	0.11a	0.12a	0.12a	0.09a	0.08a	0.06a
	TP	0.27a	0.27a	0.26a	0.21a	0.19a	0.15a
拔节孕穗期	NH_4^+-N	0.43a	0.47a	0.45a	—	—	—
	NO_3^--N	0.09a	0.06b	0.04b	—	—	—
	TN	1.31a	1.67a	1.51a	—	—	—
	DP	0.03a	0.03a	0.03a	—	—	—
	TP	0.06a	0.07a	0.06a	—	—	—
总流失量	NH_4^+-N	2.69a	2.00b	1.99b	1.73a	1.43b	1.28b
	NO_3^--N	1.16a	0.95b	0.77c	0.90a	0.66b	0.35c
	TN	6.07a	4.87b	4.30b	3.89a	3.20b	2.90b
	DP	0.14a	0.16a	0.15a	0.09a	0.08a	0.06a
	TP	0.33a	0.34a	0.32a	0.21a	0.19a	0.15a

注:表中数字后不同小写字母表示各处理间在 5%水平上的差异显著($P<0.05$)。下同。

表 3 不同水肥管理稻田各形态氮素和磷素渗漏流失量 单位:kg/hm²

生育期	指标	CF			SIDS		
		FFP	30%N+70%CRF	OPT-N	FFP	30%N+70%CRF	OPT-N
返青期—	NH_4^+-N	11.32a	8.64b	7.06b	8.58a	6.87ab	5.96b
	NO_3^--N	1.92a	1.26a	0.85a	1.48a	1.00ab	0.90b
拔节孕穗期	TN	15.08a	11.28b	10.35b	11.01a	9.19ab	8.58b
	DP	0.23a	0.15a	0.14a	0.21a	0.16a	0.10b
	TP	0.33a	0.28a	0.24a	0.30a	0.24ab	0.19b
抽穗扬花期— 一成熟期	NH_4^+-N	2.51a	1.88a	1.92a	1.36a	1.16a	0.91a
	NO_3^--N	0.91a	0.28b	0.55ab	0.29a	0.26a	0.32a
	TN	4.30a	3.21a	3.92a	2.17a	2.00a	1.84a
	DP	0.09a	0.05a	0.08a	0.04a	0.03a	0.04a
	TP	0.16a	0.09a	0.15a	0.08a	0.07a	0.07a
总流失量	NH_4^+-N	13.83a	10.52b	8.98b	9.94a	8.03ab	6.87b
	NO_3^--N	2.83a	1.54b	1.40b	1.77a	1.26a	1.22a
	TN	19.38a	14.49b	14.26b	13.18a	11.19ab	10.42b
	DP	0.32a	0.20a	0.22a	0.25a	0.19a	0.14a
	TP	0.49a	0.37a	0.39a	0.38a	0.31a	0.26a

2.4 不同水肥管理下水稻地上部的氮磷吸收量与实际产量

不同水肥管理对不同生育时期水稻氮、磷积累量
和实际产量的影响见表 4。随生育进程,稻株氮、磷
积累量呈逐渐增加趋势,由于各生育期稻田水肥管理
方式不同,水稻氮、磷吸收量趋势不太一致,2 种水肥
管理方式相比,水稻返青期—分蘖前期氮磷吸收量差
别不大,主要是因为前期水肥管理一样,后期 SIDS
处理水稻的氮磷吸收量略高于 CF 处理,主要是因为
土壤的通气状况得以改善,可向土壤(水稻根区)提供
足够的氧,有利于改善水稻的根系系统,从而促进水
稻后期对养分的吸收利用。从实际产量上来看,

SIDS 处理相对 CF 处理可增产 4.4%,30%N+70%
CRF 处理和 OPT-N 处理相对 FFP 处理可增产
5.6%和 0.4%。从氮吸收和磷吸收的增幅来看,CF
和 SIDS 水管理下,返青期至分蘖期吸氮量增幅均为
30%N+70%CRF>FFP>OPT-N,吸磷量增幅均
为 30%N+70%CRF>OPT-N>FFP;分蘖期至拔
节孕穗期和灌浆期至成熟期吸氮量、吸磷量增幅均为
OPT-N>30%N+70%CRF>FFP;拔节孕穗期至
灌浆期吸氮量、吸磷量增幅均为 30%N+70%CRF>
FFP>OPT-N。差异性分析表明,2 种灌溉方式下
成熟期氮磷吸收量和实际产量均为 30%N+70%
CRF>OPT-N>FFP,常规灌溉下各处理间实际产

量无显著差异,但浅灌深蓄下 30% N+70% CRF 的氮、磷吸收量和实际产量与 OPT-N 无显著差异,却显著高于 FFP。总体而言,与 CF 灌溉方式相比,SIDS 灌溉方式下 30% N+70% CRF 施肥处理更

有助于水稻对氮、磷的吸收和实际产量的提高,但 OPT-N 处理有助于减少常规施肥量的 16.7%,同时也不会影响结实期氮、磷素向籽粒中转运及导致实际产量的降低。

表 4 不同水肥管理下水稻地上部的氮磷吸收量与实际产量 单位: kg/hm²

水分管理	氮肥运筹	返青期		分蘖期		拔节孕穗期		灌浆期		成熟期		实际 产量
		TN	TP	TN	TP	TN	TP	TN	TP	TN	TP	
CF	FFP	1.12a	0.13ab	41.53a	2.91b	61.19a	14.85a	124.51a	30.40a	153.64a	48.86a	8244a
	30%N+70%CRF	1.40a	0.23a	49.40a	5.49a	73.14b	13.56a	157.55b	25.13b	171.87b	55.96b	8602a
	OPT-N	1.05a	0.13b	26.21b	3.38b	70.59b	13.13a	138.82ab	30.93a	154.79ab	53.82ab	8302a
SIDS	FFP	1.13ab	0.16ab	41.66a	3.39a	71.13a	12.31a	137.51a	24.82a	157.37a	52.27a	8522a
	30%N+70%CRF	1.21a	0.19a	56.99b	6.39b	82.95b	16.78b	158.11b	30.38b	179.02b	63.29b	9100b
	OPT-N	0.92b	0.10b	30.23c	5.37b	76.06ab	15.90ab	139.00a	28.68ab	167.72ab	57.68ab	8642ab

注: TN 表示植株地上部总氮含量; TP 表示植株地上部总磷含量。

2.5 不同水肥管理下稻田土壤不同形态氮、磷含量

水稻收获后,不同土层铵态氮、硝态氮、速效磷、全氮和全磷含量见图 2。从图 2 可以看出,土壤铵态氮、硝态氮、速效磷、全氮和全磷含量在 0—40 cm 土层深度随着土壤深度的增加而呈降低趋势。2 种灌溉方式相比,SIDS 处理 0—20 cm 和 20—40 cm 土层铵态氮、硝态氮、速效磷、全氮和全磷含量差别不大,表明浅灌深蓄的灌溉方式不会造成稻田 0—40 cm 土层养分累积。30%N+70%CRF 处理 0—20 cm 和 20—40 cm 土层铵态氮、硝态氮含量均显著高于 FFP,这是因为 70 天控释尿素的释放期比较长,能够维持水稻生长中后期土壤较高的铵态氮、硝态氮含量;OPT-N 处理 0—20 cm 和 20—40 cm 土层铵态氮含量均显著高于 FFP,但与 30%N+70%CRF 处理差异不显著;除 30%N+70%CRF 处理 0—20 cm 土层速效磷含量显著高于 FFP 外,30%N+70%CRF 处理和 OPT-N 处理在 0—20 cm 和 20—40 cm 土层速效磷含量均高于 FFP 处理,但差异不显著;各处理间 0—20 cm 和 20—40 cm 土层全氮、全磷含量增加和减低的幅度非常小,差异均不显著。表明在水稻的整个生育期内,施用控释尿素或者优化减氮施肥,0—20 cm 土层土壤速效养分在水稻后期都能维持在一个较高且相对稳定的水平,比常规施肥处理更有利于满足水稻中后期生长对土壤氮素、磷素的需求,但是对 20—40 cm 土层土壤全氮、全磷养分含量影响较小,从而可以降低氮磷对浅层地下水的环境风险。

3 讨论

3.1 不同水肥管理对稻田氮、磷流失的影响

稻田氮磷径流和渗漏损失量与降雨量及灌溉量关系密切。一般而言,灌溉量和降雨量越大,降雨距灌溉过后的时间越近,径流和渗漏量就越大。本研究表明,浅灌深蓄处理较常规淹灌处理,田间灌溉水量、总用水量、径流量、渗漏量和降雨利用率分别降低

41.7%,18.5%,45.8%,21.9%和增加 16.2%,TN 和 TP 径流流失量分别降低 32.6%~35.9%和 36.4%~53.1%,TN 和 TP 渗漏流失量分别降低 22.8%~32.0%和 16.2%~33.3%。潘乐^[10]研究表明“浅、湿、晒”灌溉比常规淹灌排水量减少 10.3%,TN 流失量减少 19.1%,TP 流失量减少 11.3%。间歇灌溉比常规淹灌排水量减少 15.0%,TN 流失量减少 3.6%,TP 流失量减少 19.5%,相较“浅、湿、晒”灌溉和间歇灌溉,本研究稻田排水量和氮磷流失量更低;姜萍等^[8]研究表明与常规淹灌处理相比,湿润灌溉处理可减少 8.9%的灌水量,6.0%的径流排水量以及 17.3%的渗漏排水量,同时整个水稻季,减少了 38.2%的 TN 径流流失以及 42.1%的 TN 渗漏流失,相较湿润灌溉,本研究中浅灌深蓄处理的田间灌溉量可在其基础上再降低 30%左右。根据江汉平原地区降雨特点,本研究还发现稻田氮磷径流和渗漏损失的主要时期是在水稻返青分蘖期~拔节孕穗期,主要原因是这个生育阶段稻田施肥量最大,降雨比较集中且雨量较大,是控制稻田氮磷流失的关键时期。浅灌深蓄在节省水资源同时提升了雨水的蓄存和利用能力,减少灌溉水量,并有效削减径流发生次数和径流量,从而有助于削减稻田氮、磷等面源污染物的输出负荷。

施肥量、施肥时间及施肥方式是影响稻田氮磷流失的另一个主要因素。本研究表明,30%N+70%CRF 处理、OPT-N 处理较 FFP 处理 TN 径流和渗漏流失量可分别降低 19.7%~29.2%,15.1%~25.2%和 25.4%~51.7%,20.9%~26.4%,但 TP 径流流失量差别非常小,TP 渗漏流失量可降低 18.4%~24.5%,20.4%~31.6%。纪雄辉等^[17]研究报道,与常规氮肥相比,100%氮肥控释处理和 70%氮肥控释处理稻田 TN 径流流失量较常规氮肥处理分别降低 24.5%和 27.2%。李娟^[18]研究表明减量 20%的氮磷施用量,不仅能有效降低稻田氮磷流失风险,还能保障水稻产量和提高氮磷利用率,这与本研究结论相一致。这

主要是因为控释氮肥和氮肥减量后移可以避开本地区梅雨季节, 进而减少氮素的损失, 同时也可以

保证水稻生育后期对养分的吸收利用, 这也成为今后的主要研究方向。

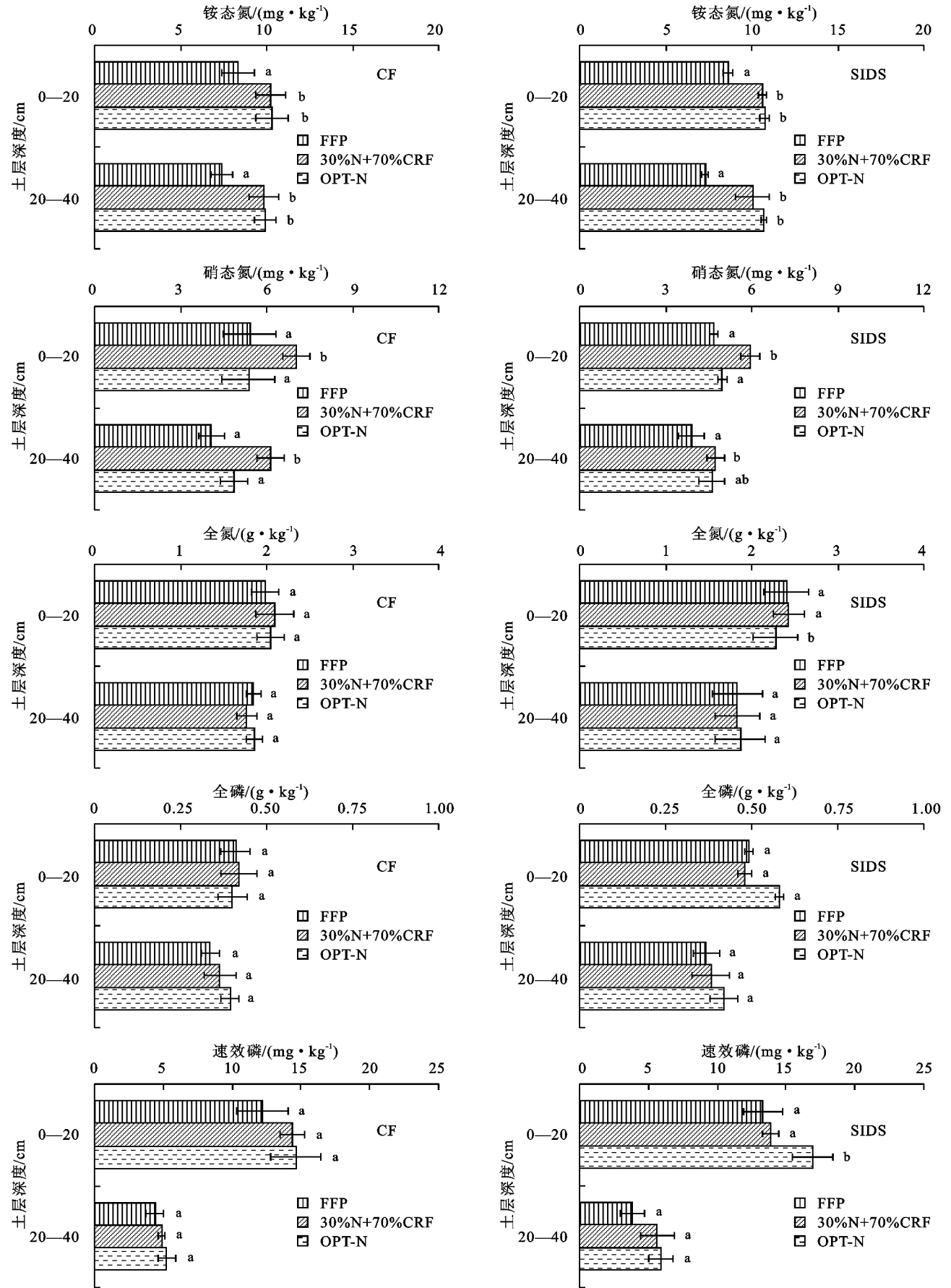


图 2 不同水肥管理稻田土壤氮、磷的垂直分布

3.2 不同水肥管理对水稻养分吸收及土壤养分积累的影响

水、肥在水稻生长发育过程中是相互影响和制约的两个因子。一方面,优化水、肥管理技术,达到以水促肥、以肥调水的目的,对减少水稻灌溉用水、高效利用肥料来实现水稻稳产高产有重要意义^[19];另一方面,稻田生产需要提高土壤养分,土壤养分管理要求综合运用各种施肥措施,并将施肥措施进行优化,以达到保育土壤养分同时减少过多养分流失形成水体富营养化^[20]。本研究表明,SIDS 处理水稻的氮磷吸收量略高于 CF 处理,但 0—40 cm 土层土壤铵态氮、硝态氮、速效磷、全氮和全磷含量差别不大,SIDS 处理其实际产量相对 CF 处理可增产 4.4%,表明浅灌深蓄可能有利于水稻根系生长和发育,促进水稻生育后期对养分的吸收,保障实际产量有所增加,同时又不会造成土壤养分累积,进而降低氮磷对浅层地下水的风险。

合理平衡施肥是保证水稻正常生长的关键因子。研究表明减量 10%~20% 的氮磷用量短期内不会对水稻植株的氮磷吸收量产生显著影响^[18],而缓控释肥可以推迟施入土壤中肥料的初始养分释放速率或者延长肥料后期的养分释放来促进作物的养分吸收利用^[21]。本研究表明,30%N+70%CRF 处理和 OPT-N 处理 0—20 cm 和 20—40 cm 土层铵态氮、硝态氮、速效磷含量均高于 FFP,各处理 0—20 cm 和 20—40 cm 土层全氮、全磷含量增加和减低的幅度非常小,说明控释氮肥和减量优化施氮可提高土壤中速效养分,但不会导致全量养分的过度累积。针对实际产量,30%N+70%CRF 处理和 OPT-N 处理相对 FFP 处理可增产 5.6%和 0.4%,表明相对常规施肥,30%N+70%CRF 一次施用可提高实际产量,并能较好地与水稻各生长阶段对各养分的需求速度同步,促进水稻对养分的吸收和养分向籽粒中的转移转化,而减量优化施肥也可以获得最高的经济产量、籽粒营养物质含量以及土壤养分保持量。

4 结论

(1)SIDS 处理较 CF 处理,田间灌溉水量、总用水量、径流量和渗漏量分别降低 41.7%,18.5%,45.8%和 21.9%,降雨利用率增加 16.2%,全生育期稻田 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、TN、DP 和 TP 径流流失量分别降低 28.5%~35.7%,22.4%~54.5%,32.6%~35.9%,35.7%~60.0%和 36.4%~53.1%,渗漏流失量分别降低 23.5%~28.1%,12.9%~37.5%,22.8%~32.0%,5.0%~36.4%和 16.2%~33.3%,且水稻返青期一拔节孕穗期占稻田氮磷径流和渗漏流失量的 70%以上。

(2)30%N+70%CRF 处理、OPT-N 处理较 FFP 处理,TN 径流流失量可分别降低 19.7%~29.2%,15.1%~25.2%,渗漏流失量可分别降低 25.4%~51.7%,20.9%~26.4%,TP 渗漏流失量可分别降低 18.4%~24.5%,20.4%~31.6%,但 TP 径流流失量差别非常小。

(3)SIDS 处理实际产量相对 CF 处理可增产 4.4%,但对 0—40 cm 土层养分累积影响不大,30%N+70%CRF 处理和 OPT-N 处理相对 FFP 处理可增产 5.6%和 0.4%,且 0—20 cm 土层速效态氮磷养分能维持在一个较高且相对稳定的水平。

(4)浅灌深蓄结合 30%N+70%CRF 施用有利于稻田节水,减少氮磷流失、水稻增产以及土壤肥力的改善。

参考文献:

- [1] 朱成立,张展羽.灌溉模式对稻田氮磷损失及环境影响研究展望[J].水资源保护,2003(6):56-58.
- [2] 叶玉适,梁新强,周柯锦,等.节水灌溉与控释肥施用对太湖地区稻田土壤氮素渗漏流失的影响[J].环境科学学报,2015,35(1):270-279.
- [3] Chirinda N, Cater M S, Albertb K R, et al. Emissions of nitrous oxide from arable organic and conventional cropping systems on two soil types[J]. Agriculture Ecosystems and Environment,2010,136(3/4):199-208.
- [4] Li H, Liang X Q, Chen Y X, et al. Ammonia volatilization from urea in rice fields with zero-drainage water management [J]. Agricultural Water Management, 2008,95(8):887-894.
- [5] Schoumans O F, Chardon W J. Risk assessment methodologies for predicting phosphorus losses[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science,2003,166(4):403-408.
- [6] 叶玉适,梁新强,金熠,等.节水灌溉与控释肥施用对稻田田面水氮素变化及径流流失的影响[J].水土保持学报,2014,28(5):105-112,118.
- [7] 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.
- [8] 姜萍,袁永坤,朱日恒,等.节水灌溉条件下稻田氮素径流与渗漏流失特征研究[J].农业环境科学学报,2013,32(8):1592-1596.
- [9] 褚光,陈婷婷,陈松,等.灌溉模式与施氮量交互作用对水稻产量以及水、氮利用效率的影响[J].中国水稻科学,2017(5):513-523.
- [10] 潘乐.水稻灌区节水防污型农田水利系统减轻农业面源水污染研究[D].武汉:武汉大学,2012.
- [11] 刘立军,徐伟,桑大志,等.实地氮肥管理提高水稻氮肥利用效率[J].作物学报,2006,32(7):987-994.