

适雨灌溉下不同施肥模式对机插稻稻田水环境及产量的影响

晏军^{1,2}, 吴启侠¹, 朱建强^{1*}, 张露萍³

(1.长江大学 农学院, 湖北 荆州 434025; 2.盐城市新洋农业试验站, 江苏 盐城 224049;

3.湖北省荆州农业气象试验站, 湖北 荆州 434025)

摘要:【目的】探讨江汉平原地区适雨灌溉条件下不同施肥模式对机插稻稻田水环境及水稻生长的影响, 为当地机插稻水肥管理措施的改善提供理论和数据支撑。【方法】采用田间小区试验, 研究了适雨灌溉条件下, 农民习惯施肥(FFP)、70%控释掺混肥+30%尿素(70%CRF+30%N)和有机无机复混肥(OIF)对稻田降雨利用率、田面水氮磷质量浓度的动态变化与径流流失量、干物质积累及水稻产量的影响。【结果】适雨灌溉下, 返青期、分蘖期、拔节孕穗期和灌浆成熟期的降雨利用率分别为 17.5%、100%、100%和 84.2%; 基肥和分蘖肥施用过后, FFP、70%CRF+30%N 和 OIF 处理田面水 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TP 质量浓度迅速提高, 在第 1 天达到峰值, 水稻移栽后 30 d 内 70%CRF+30%N 处理田面水 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TP 的平均质量浓度较 FFP 处理分别降低 40.4%、47.4%和 0.5%; 稻田氮磷径流流失量的 90%左右在返青期, 10%左右在灌浆成熟期, 70%CRF+30%N 处理 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TP 径流损失量较 FFP 处理分别降低 31.4%、30.9%、1.9%; 70%CRF+30%N 处理在返青期干物质积累量显著低于 FFP 和 OIF 处理, 移栽一返青期阶段干物质积累量占总积累量比例表现为 FFP 处理>OIF 处理>70%CRF+30%N 处理, 成熟期 OIF 处理干物质积累量显著高于 70%CRF+30%N 和 FFP 处理, 实际产量表现为 OIF 处理>70%CRF+30%N 处理>FFP 处理。【结论】适雨灌溉条件下, 70%CRF+30%N 处理有助于减少稻田氮素流失, OIF 处理有助于机插稻干物质积累与产量的增加。

关键词: 机插稻; 适雨灌溉; 施肥模式; 氮磷流失; 干物质积累; 产量

中图分类号: S511; S275

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2019024

晏军, 吴启侠, 朱建强, 等. 适雨灌溉下不同施肥模式对机插稻稻田水环境及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(2):56-63.

YAN Jun, WU Qixia, ZHU Jianqiang, et al. Effects of different fertilization models on paddy water environment and yield in machine-transplanted rice under irrigation adjusted by rainfall[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(2): 56-63.

0 引言

水稻是我国的主要粮食作物, 年种植面积达 3 100万 hm^2 , 水稻机械化生产是提高劳动生产率、节本增效和增加农民收入的重要措施^[1]。近年来, 劳动力短缺和大规模的农业种植加快了我国水稻机械化生产技术的发展^[2-3]。江汉平原地区水土资源丰富, 适宜机械化种植水稻, 而普通机插稻存在秧苗小、机插植伤重、秧苗素质弱、返青期时间长等问题^[4-5], 生产中人们常通过增施氮肥来缩短机插稻缓苗期、促进前期分蘖的发生, 但氮肥施用量过多如遇降雨极易导致稻田养分流失等问题, 因此, 机插稻移栽后的配

套水肥管理尤为重要。目前, 前人就机插稻农机与育苗技术^[6-7]、播种期与播种量^[8-9]、机插密度与基本苗数^[10-11]、肥料运筹^[12-13]等开展了大量的研究, 这些研究多集中在对水稻生长发育特征、产量及养分利用效率的影响上, 针对灌排调控下不同施肥模式机插稻稻田水环境的研究较少。且由于区域气候特征、农艺措施和水肥管理模式的不同, 不同地点的稻田水环境及产量响应差异很大。江汉平原地区是我国水稻种植的主要区域, 近年来, 机插稻面积不断增加, 但该区域在水稻生长季期间瞬时暴雨与间歇性干旱多发, 水稻生长受到营养和水分供应不协调的限制, 特别是对机插稻生长前期的影响较大。

为此, 根据江汉平原地区降雨特点和机插稻的生长发育进程, 研究适雨灌溉条件下, 不同施肥模式对机插稻稻田降雨利用效率、田面水氮、磷的质量浓度的动态变化与径流流失量、干物质积累及产量的影响, 明确机插稻田适宜的水肥管理模式, 为江汉平原地区

收稿日期: 2019-04-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0800500); 湖北省科技支撑计划项目(2014BCB038)

作者简介: 晏军(1992-), 男, 研究实习员, 主要从事作物逆境生理、农业生产的水土环境调控研究。E-mail: yj111708@sina.com

通信作者: 朱建强(1963-), 男, 陕西周至人, 教授, 博士生导师, 主要从事农业涝渍灾害、水土环境方面研究。E-mail: zyj@sina.com

机插水稻应对气候变化的响应机制，机插稻提质增效栽培技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验点位于江汉平原长江大学农业科技示范基地（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 值 7.6，全氮量 2.12 g/kg，全磷量 0.51 g/kg，碱解氮量 82.5 mg/kg，速效磷量 48.5 mg/kg，速效钾量 112.3 mg/kg。本试验的水稻田南北方向长 44 m，东西方向长 35 m，常年种植水稻，属于典型的水稻田。供试品种为全两优 681，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 140 d 左右，株高 122 cm 左右，一般 4 月下旬至 5 月上旬大棚育苗，5 月下旬至 6 月上旬机插移栽，8 月上旬孕穗，9 月中下旬成熟。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计

水稻生长期采用适雨灌溉技术，其要点是干旱无雨期间，尽量降低田间水分下限（适度干旱胁迫），推后灌水时间，减少灌水次数；遇到降雨尽量利用降雨（雨量较大时适度受涝胁迫），在不降低水稻产量的前提下，最大程度的利用降雨资源，消减降雨及排峰值，减少灌溉水量^[14]。

适雨灌溉灌排水管理具体措施为：水稻机插移栽后的 20 d 内，所有的实验小区均维持 5~15 mm 浅水层（如遇降雨必须排水），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（根据埋设的地下水位观测管，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 1 周内田面水深 30~50 mm，收获前 10 d 自然落干。机插稻调节稻田蓄水深度如下，水稻返青期间如遇降雨稻田可蓄水至 20 mm，分蘖期一拔节期间如遇降雨稻田可蓄水至 80 mm，拔节期一成熟期间如遇降雨稻田可蓄水至 100 mm，超过蓄水深度则进行排水。

3 种氮肥管理措施为：农民习惯施肥（FFP）、70%金正大控释掺混肥（70%CRF，70%为氮素比例，释放周期为 70 d）+30%尿素（30%N）和有机无机复混肥（OIF）。农民习惯施肥中 70%氮肥为普通复合肥，基肥施入，30%氮肥为尿素，分蘖期施入。控释掺混肥中 70%氮肥为控释掺混肥，30%氮肥为尿素（N-46%），基肥施入；有机无机复混肥中 75%氮肥为有机无机复混肥，基肥施入，25%氮肥为尿素，分蘖期施入。习惯施肥、控释掺混肥和有机无机复混肥施肥中磷肥和钾肥不足部分用过磷酸钙（P₂O₅-12%）和氯化钾（K₂O-60%）补充，全部基施，施肥时间结合水稻生育期与灌溉或降雨时机进行。普通复合肥由湖北中化东方肥料有限公司提供，其含养分量为：N-18%，P₂O₅-8%，K₂O-15%；控释掺混肥由金正大生态工程集团股份有限公司提供，其含养分量为：N-28%（包膜），P₂O₅-5%，K₂O-9%，有机无机复混肥由湖北中化东方肥料有限公司提供，其总养分为 N-18%，P₂O₅-10%，K₂O-12%，有机质 OM≥15%。具体施肥方案如表 1 所示。

表 1 试验处理施肥量

Table 1 Fertilization scheme of experiment

kg/hm²

处理 Treatments	施肥量 Fertilizer rate (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)	基肥 Base-manure amounts					分蘖期追肥 Topdressing at tilling stage
		控释掺混肥	有机无机复混肥	普通复合肥	过磷酸钙	氯化钾	尿素
FFP	180-75-105	-	-	700	158.3	-	117.4
70%CRF+30%N	180-75-105	450	-	-	437.5	107.5	117.4
OIF	180-75-105	-	750	-	-	25	97.8

试验采用完全随机设计，共设 3 个处理，每个处理设 3 次重复。依照本试验田大小将稻田沿东西向划分为 9 个 25 m×4 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、宽 30 cm 防渗水泥墙隔开，田面表土层上下各 30 cm，防止试验过程中小区间串水。3 种氮肥处理随机排布，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 2017 年 5 月 6 日大棚育苗，

6 月 7 日移栽，机插种植间距为 25 cm×30 cm，移栽后第 15 d 施分蘖肥，9 月 25 日收获。

1.2.2 测定项目与分析方法

试验期内的降雨气象数据来源于荆州区农业气象试验站，农田灌水量通过水表测量，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，地表排水量（径流量）采用水位差法，通过水尺定点观测排水前后田间水层深度差。

各小区径流通过带盖溢流桶收集，若径流量较大

则分雨中和雨后 2 次采样。总氮 (TN) 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法 (GB11894—89); 氨氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) 采用纳氏试剂紫外分光光度法 (本法与 GB7479—87 等效); 总磷 (TP) 采用钼酸铵分光光度法^[15]。

分别于水稻的返青期、分蘖期、齐穗期和成熟期进行田间取样, 每小区随机选取 3 株具有代表性的水稻植株, 地上部分全部带回实验室, 去除地下部后按茎、叶、穗分装, 经 105 °C 杀青、80 °C 烘干、称量。各小区实收 3 m² 测产, 分别在离小区进水口的 5、15、20 m 处各收 1 m²。各生育期干物质积累量为茎、叶、穗干物质质量之和。

1.3 数据分析

应用 DPS 15.10 进行方差分析, LSD 法进行处理间的多重比较, 利用 Excel 2016 作图。相关指标计算方法如下:

降雨期间, 忽略不计其地下深层渗漏 (地下水位较高^[16]) 和植物截留 (多年平均值在 0.2% 左右^[17]), 降雨利用率 Y 按式 (1) 计算:

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

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 按式 (2) 计算:

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

式中: C_i 为第 i 次径流水中氮 (或磷) 的质量浓度 (mg/L); V_i 为第 i 次径流水的体积 (L)。

2 结果与分析

2.1 田间降雨量、径流量与灌溉量

机插稻移栽后适雨灌溉下的降雨量、灌溉量与稻田径流量如图 1 所示。水稻移栽后 110 d 内累积降雨量为 492.3 mm, 日降雨量最大为 83.6 mm (6 月 9 日, 第 2 天), 各处理田间灌溉 6 次, 灌溉量为 325.2 mm, 总用水量为 931.9 mm, 径流量为 114.4 mm (返青期产生 69.0 mm, 灌浆成熟期产生 47.4 mm)。返青期、分蘖期、拔节孕穗期和灌浆成熟期的降雨量分别为 134.3、57.1、36.7 和 264.2 mm, 其降雨利用率分别为 17.5%、100%、100% 和 84.2%, 表明返青期是稻田排水管理的关键时期。

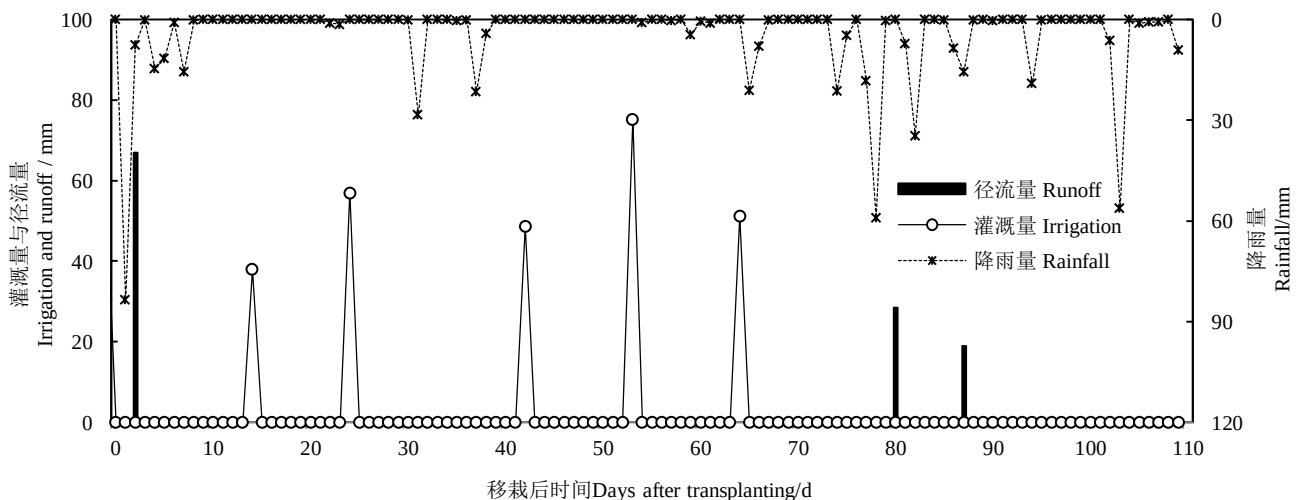


图 1 适雨灌溉下的降雨量、径流量与灌溉量

Fig. 1 The amount of rainfall, runoff and irrigation under irrigation adjusted by rainfall

2.2 田面水氮素、磷素质量浓度的动态变化

适雨灌溉下, 水稻移栽后不同施肥模式对机插水稻稻田田面水氮素 (TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$) 和磷素 (TP) 质量浓度动态变化的影响如图 2 所示。FFP 处理水稻生育期内田面水 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TP 平均质量浓度分别为 12.00、7.35 和 0.42 mg/L, 70%CRF+30%N 和 OIF 处理相较 FFP 处理分别降低 33.0%、44.8%、5.7% 和 16.4%、17.1%、-17.6%, 表明 70%CRF+30%N 能有效降低水稻各生育期稻田田面水氮素质量浓度。基肥和分蘖肥施用过后, FFP、70%CRF+30%N 和 OIF 处理田面水 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TP 质量浓度迅速提高, 在

第 1 天就达到峰值, 之后随着时间急剧下降。70%CRF+30%N 处理田面水 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TP 质量浓度在水稻移栽后 30 d 内的平均质量浓度为 11.45、6.42 和 0.49 mg/L, 较 FFP 处理分别降低 40.4%、47.4% 和 0.5%, 较 OIF 处理分别降低 19.3%、20.3% 和 28.5%, 因机插稻移栽后 30 d 内田间施肥量较大, 秧苗小、田间蓄水能力低, 如遇降雨径流, 70%CRF+30%N 处理可明显减少氮素的输出, 有效降低其流失量。

2.3 不同生育期稻田不同形态氮、磷素径流流失量

不同施肥模式对机插稻各生育期稻田氮、磷素径流流失量及总流失量的影响如表 2 所示。适雨灌溉方

式下，稻田氮、磷径流流失量的 90%左右在返青期，10%左右在灌浆成熟期，江汉平原的梅雨季节正处于中稻的返青分蘖期—拔节孕穗期，降雨期间稻田径流量较大，而此时稻田的施肥量较大，田面水氮素和磷素的质量浓度高，因此返青期如遇降雨易造成稻田氮、磷流失。FFP 处理全生育期稻田 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TP 径流流失量平均分别为 6.72、4.11、0.52 kg/hm^2 ，70%CRF+30%N 和 OIF 处理相较 FFP 处理分别降低

31.4%、30.9%、1.9%和 20.1%、14.8%、11.5%，表明 70%CRF+30%N 能有效降低机插稻田氮素损失。各处理间方差分析表明，适雨灌溉方式下 70%CRF+30%N 处理 TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 径流总流失量均低于 FFP 和 OIF 处理，相较 FFP 处理达到显著水平，但 TP 径流总流失量在 3 种施肥处理之间差异不显著，表明水稻生长前期氮肥控释，可有效降低氮素流失，但是对磷素流失的影响较小。

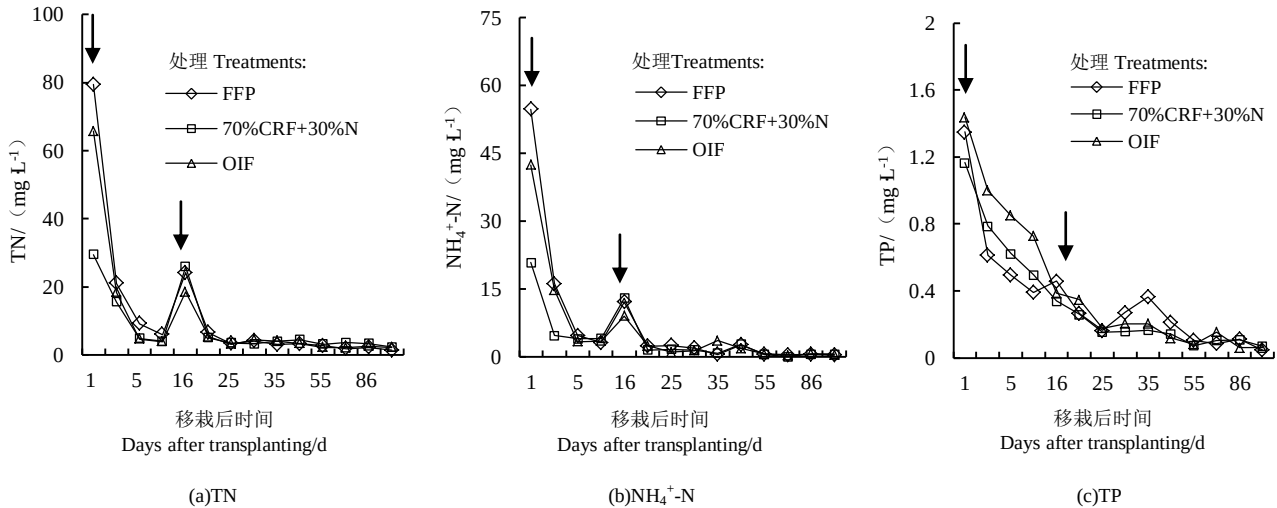


图 2 不同施肥模式下稻田田面水氮素 (TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$) 和磷素 (TP) 质量浓度的动态变化

Fig.2 Dynamic changes of TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TP mass concentration in paddy fields surface water under different fertilization modes

表 2 不同施肥模式下稻田氮素 (TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$) 和磷素 (TP) 径流流失量

Table 2 Runoff loss of TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TP in paddy fields under different fertilization modes kg/hm^2

生育期 Growing stage	指标 Index	处理 Treatments		
		FFP	70%CRF+30%N	OIF
返青期 Returning green stage	TN	5.69 a	3.63 b	4.52 ab
	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	3.58 a	2.40 b	3.21 ab
	TP	0.44 a	0.37 a	0.41 a
灌浆成熟期 Maturity of grouting	TN	1.03 a	0.98 a	0.85 a
	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	0.53 a	0.44 a	0.38 a
	TP	0.08 a	0.11 a	0.05 a
总流失量 Total runoff loss	TN	6.72 a	4.61 b	5.37 ab
	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	4.11 a	2.84 b	3.59 ab
	TP	0.52 a	0.51 a	0.46 a

注 同列数据后不同字母表示差异达 0.05 显著水平 ($P < 0.05$)，下同。

Note Values followed by different letters in the same column indicate significant differences among treatments at 0.05 level; RGS-Returning green stage.

2.4 不同生育期水稻地上部干物质积累量及实际产量

适雨灌溉下，不同施肥模式对机插稻不同生育时期地上部干物质积累量及实际产量影响见表 3。70%CRF+30%N 处理在返青期干物质积累量低于 FFP 和 OIF 处理 31.8%和 30.2%，达到显著水平，在分蘖期和齐穗期 3 个处理间无显著差异，但是在成熟期 OIF 处理干物质积累量高于 70%CRF+30%N 和 FFP 处理 11.9%和 15.9%，达到显著水平。从干物质积累量占总积累量的比例来看，移栽—返青期阶段

表现为 FFP 处理 > OIF 处理 > 70%CRF+30%N 处理，表明单用缓释氮肥可能无法满足作物生长初期对氮素的需求；在齐穗期—成熟期表现为 OIF 处理 > 70%CRF+30%N 处理 > FFP 处理，其实际产量表现为 OIF 处理 > 70%CRF+30%N 处理 > FFP 处理，OIF 处理实际产量高于 70%CRF+30%N 和 FFP 处理 3.8%和 6.7%，但是各处理间无显著差异，表明有机无机复混肥处理有利于中后期生育阶段干物质积累量的增加和产量的提升。

表 3 不同施肥模式对水稻不同生育期地上部干物质积累量影响

Table 3 Effects of different fertilization patterns on dry matter accumulation in different growth stages of rice									kg/hm ²
处理 Treatments	干物质积累量 Dry matter accumulation				各生育阶段干物质质量所占比例 The proportion of N accumulation in each growth stage/%				实际产量 Actual yield
	返青期	分蘖期	齐穗期	成熟期	移栽—	返青期—	分蘖期—	齐穗期—	
					返青期	分蘖期	齐穗期	成熟期	
FFP	0.44±0.13a	4.21±0.34a	6.45±0.53a	10.13±0.50a	4.3	37.2	22.2	36.3	7 522a
70%CRF+30%N	0.30±0.03b	4.56±1.30a	6.59±0.94a	10.49±0.89a	2.9	40.6	19.4	37.1	7 734a
OIF	0.43±0.09a	4.95±0.91a	7.09±0.84a	11.74±0.93b	3.7	38.5	18.2	39.6	8 028a

3 讨论

水分是制约作物生长及产量的重要因素之一，水稻适雨灌溉将田间水分转化利用作为一个系统来考虑，立足农业灌溉与降雨相协调的灌溉理念，有利于提高雨水资源利用率。本研究中返青期和灌浆成熟期的降雨利用率分别为 17.5% 和 84.2%，主要原因是机插稻返青期期间秧苗小、素质弱，田间蓄水能力差，所以导致降雨利用率很低，但需要强调的是，降雨利用率的高低与各时期降雨量的大小密切相关。

不同的水分管理方式对稻田系统水分的输入和输出均有显著影响，而降雨和施肥是影响氮磷素径流输出的主要因子，径流中氮磷素质量浓度的大小与降雨强度关系很密切^[18]。本研究表明，基肥和分蘖肥施用过后，FFP、70%CRF+30%N 和 OIF 处理田面水 TN、NH₄⁺-N 和 TP 质量浓度迅速提高，在第 1 天就达到峰值，之后随着时间急剧下降，这与叶玉适等^[19]研究结果相一致。本研究明确了机插稻田氮磷径流流失量的 90% 左右在返青期，10% 左右径流流失量在灌浆成熟期，主要原因是返青期期间降雨量大，而田间蓄水能力小。控释肥具有前期养分释放不致过多，后期不致太少的特点^[20-21]，从而显著降低田面水氮素质量浓度及其径流流失风险，本研究中 70%CRF+30%N 处理稻田 TN 和 NH₄⁺-N 在水稻移栽后 30 d 内田面水平均质量浓度和径流损失量较 FFP 处理均降低 30% 以上，表明在降雨量相同时，各生育阶段施肥量和降雨量的不同是导致稻田径流水中氮磷质量浓度差异的另一个重要原因。

相关研究表明，与普通尿素相比，氮肥控释能显著提高水稻籽粒产量和氮肥利用率^[22]，本研究表明，70%CRF+30%N 处理在返青期干物质积累量显著低于 FFP 和 OIF 处理，移栽—返青期阶段干物质积累量占总积累量比例表现为 FFP 处理 > OIF 处理 > 70%CRF+30%N 处理，说明尽管控释氮肥比常规氮肥具有更长的使用寿命，但单用缓释氮肥可能无法满足作物生长初期对氮素的需求。Miao 等^[23]研究表明，控释氮肥（硫包尿素）不能满足生长中后期对营养物

质的需求，因为它们们在生长初期释放出更多的营养物质，本研究中控释掺混肥与分蘖期尿素联合施用可以有效提高机插稻干物质质量积累和产量。有机肥的有机质量高，养分全面，肥力持久稳定，能有效提高土壤碳库水平、促进作物生长发育，有利于氮素利用率的提高和产量的增加^[24-26]，本研究表明，成熟期 OIF 处理干物质积累量显著高于 70%CRF+30%N 和 FFP 处理，其实际产量表现为 OIF 处理最高，针对土壤供氮水平和水稻养分利用效率还需进一步研究，以确保数据的准确性与试验结果的可靠性。

4 结论

适雨灌溉条件下，返青期、分蘖期、拔节孕穗期和灌浆成熟期的降雨利用率分别为 17.5%、100%、100% 和 84.2%；基肥和分蘖肥施用过后，FFP、70%CRF+30%N 和 OIF 处理田面水 TN、NH₄⁺-N 和 TP 质量浓度迅速提高，在第 1 天就达到峰值，70%CRF+30%N 处理田面水 TN、NH₄⁺-N 和 TP 质量浓度在水稻移栽后 30 d 内的平均质量浓度较 FFP 处理分别降低 40.4%、47.4% 和 0.5%；稻田氮磷径流流失量的 90% 左右在返青期，10% 左右径流流失量在灌浆成熟期，70%CRF+30%N 处理 TN、NH₄⁺-N 和 TP 径流流失量较 FFP 处理分别降低 31.4%、30.9%、1.9%；70%CRF+30%N 处理在返青期干物质积累量显著低于 FFP 和 OIF 处理，移栽—返青期阶段干物质积累量占总积累量比例表现为 FFP 处理 > OIF 处理 > 70%CRF+30%N 处理，成熟期 OIF 处理干物质积累量显著高于 70%CRF+30%N 和 FFP 处理，其实际产量表现为 OIF 处理 > 70%CRF+30%N 处理 > FFP 处理。综上，70%CRF+30%N 处理有助于减少机插稻田氮、磷流失，OIF 处理有助于机插稻干物质积累与产量增加。

参考文献:

- [1] 章起明, 曾勇军, 吕伟生, 等. 每穴苗数和施氮量对双季机插稻产量及氮肥利用率的影响[J]. 作物杂志, 2016(3): 144-150.
- ZHANG Qiming, ZENG Yongjun, LYU Weisheng, et al. Effects of nitrogen application and transplanting seedlings number per hole on the

- grain yield and nitrogen use efficiency of double-rice by machine plug[J]. *Crops*, 2016(3): 144-150.
- [2] HUANG Min, TIAN Alin, ZHOU Xuefeng, et al. Yield performance of machine-transplanted double-season rice grown following oilseed rape[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 6 818-6 826.
- [3] CHEN Jiana, CAO Fangbo, YIN Xiaohong, et al. Yield performance of early-season rice cultivars grown in the late season of double-season crop production under machine-transplanted conditions[J]. *PloS one*, 2019, 14(3): e0213075.
- [4] 朱德峰, 陈惠哲, 徐一成, 等. 我国双季稻生产机械化制约因子与发展对策[J]. *中国稻米*, 2013, 19(4): 1-4.
- ZHU Defeng, CHEN Huizhe, XU Yicheng, et al. Factors and development countermeasures restricting the mechanization of double-rice by machine production in China[J]. *China Rice*, 2013, 19(4): 1-4.
- [5] 高立均, 张巫军, 段秀建, 等. 南方水稻机插秧技术的最新研究进展与发展建议[J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 42(6): 59-64.
- GAO Lijun, ZHANG Wujun, DUAN Xiujian, et al. Latest research on machine-transplanted rice in Southern China[J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 2017, 42(6): 59-64.
- [6] 任丹华, 戴冬梅. 四川浅丘区杂交水稻机械化插秧生产技术研究 with 示范[J]. *杂交水稻*, 2014, 29(4): 41-43, 80.
- REN Danhua, DAI Dongmei. Research and demonstration of mechanized transplanting cultivation techniques of Hybrid rice in shallow hilly region of Sichuan province[J]. *Hybrid Rice*, 2014, 29(4): 41-43, 80.
- [7] 孙建军, 张洪程, 尹海庆, 等. 不同生态区播期对机插水稻产量、生育期及温光利用的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(6): 113-121.
- SUN Jianjun, ZHANG Hongcheng, YIN Haiqing, et al. Effects of seeding date on yield, growth period and utilization of temperature and sunshine of mechanical transplanting rice in different ecological regions[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(6): 113-121.
- [8] CHENG S R, ASHRAF U, ZHANG T T. Different seedling raising methods affect characteristics of machine-transplanted rice seedlings[J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2018, 16(2): 1 399-1 412.
- [9] 史鸿志, 朱德峰, 张玉屏, 等. 生物降解秧盘及播种量对机插水稻秧苗素质及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(24): 27-34.
- SHI Hongzhi, ZHU Defeng, ZHANG Yuping, et al. Effects of biodegradable seedling tray and sowing rate on seedling quality and yield of mechanical transplanting rice[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(24): 27-34.
- [10] 陈佳娜, 谢小兵, 伍丹丹, 等. 机插密度与氮肥运筹对中嘉早 17 产量形成及氮肥利用率的影响[J]. *中国水稻科学*, 2015, 29(6): 628-636.
- CHEN Jiana, XIE Xiaobing, WU Dandan, et al. Effects of nitrogen application and mechanical transplanting density on yield formation and nitrogen use efficiency of conventional rice Zhongjiazao 17[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2015, 29(6): 628-636.
- [11] 吴文革, 杨剑波, 张健美, 等. 穴基本苗对机插杂交中籼稻群体构建及产量的影响[J]. *安徽农业大学学报*, 2014, 41(3): 401-405.
- WU Wenge, YANG Jianbo, ZHANG Jianmei, et al. Effects of seedling number per hole on population quality and yield of mechanical transplanting middle-season Indica hybrid rice[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2014, 41(3): 401-405.
- [12] 张巫军, 高立均, 段秀建, 等. 氮肥后移对长江上游机插杂交稻群体质量和产量的影响[J]. *杂交水稻*, 2018, 33(2): 52-57, 79.
- ZHANG Wujun, GAO Lijun, DUAN Xiujian, et al. Effects of Nitrogen Application Transition to Later Stage on Grain Yield and Population Quality of Machine-transplanted Indica Hybrid Rice in the Upper Reaches of the Yangtze River[J]. *Hybrid Rice*, 2018, 33(2): 52-57, 79.
- [13] 吕伟生, 曾勇军, 石庆华, 等. 合理氮肥运筹提高双季机插稻产量及氮肥利用率[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(6): 259-268.
- LYU Weisheng, ZENNG Yongjun, SHI Qinghua, et al. Proper nitrogen fertilizer application improving yield and nitrogen use efficiency of machine-transplanted double rice[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(6): 259-268.
- [14] 肖万川, 贾宏伟, 邱昕恺, 等. 水稻适雨灌溉对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(11): 36-40.
- XIAO Wanchuan, JIA Hongwei, QIU Xinkai, et al. Effects of irrigation adjusted by rainfall on emissions of CH_4 and N_2O from paddy fields[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2017, 36(11): 36-40.
- [15] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- Editorial board of water and wastewater monitoring and analysis methods in the state environmental protection administration. *Water and wastewater monitoring and analysis methods*[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [16] 朱建强. 易涝易渍农田排水应用基础研究[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- ZHU Jianqiang. Basic research on drainage application in waterlogged farmland[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [17] 朱士江, 孙爱华, 张忠学, 等. 节水灌溉条件下水稻生长季降雨利用率的试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2013, 32(5): 11-13, 37.
- ZHU Shijiang, SUN Aihua, ZHANG Zhongxue, et al. Study on rainfall utilization rate of rice under different water-saving irrigation modes[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2013, 32(5): 11-13, 37.

- [18] 梁新强, 田光明, 李华, 等. 天然降雨条件下水稻田氮磷径流失特征研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(2): 59-63.
- LIANG Xinqiang, TIAN Guangming, LI Hua, et al. Study on Characteristic of Nitrogen and Phosphorus Loss from Rice Field by Natural Rainfall Runoff[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(2): 59-63.
- [19] 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.
- YE Yushi, LIANG Xinqiang, JIN Yi, et al. Dynamic variation and runoff loss of nitrogen in surface water of paddy field as affected by water-saving irrigation and controlled-release fertilizer application[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(5): 105-112, 118.
- [20] YING Tang, XUN Li, SHEN Wenzhong, et al. Effect of the slow-release nitrogen fertilizer oxamide on ammonia volatilization and nitrogen use efficiency in paddy soil[J]. Agronomy, 2018, 8(4): 53-62.
- [21] 杜建军, 毋永龙, 田吉林, 等. 控/缓释肥料减少氨挥发和氮淋溶的效果研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(2): 49-52.
- DU Jianjun, WU Yonglong, TIAN Jilin, et al. Effect of several controlled/slow-release fertilizers on decreasing ammonia volatilization and N leaching[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(2): 49-52.
- [22] 李敏, 郭熙盛, 叶舒娅, 等. 硫膜和树脂膜控释尿素对水稻产量、光合特性及氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(4): 808-815.
- LI Min, GUO Xisheng, YE Shuya, et al. Effects of sulfur and polymer-coated controlled release urea on yield, photosynthetic characteristics and nitrogen fertilizer efficiency of rice[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(4): 808-815.
- [23] MIAO Xuekai, XING Xiaoming, DING Yanfeng, et al. Yield and nitrogen uptake of bowl-seedling machine-transplanted rice with slow-release nitrogen fertilizer[J]. Agronomy, 2016, 108: 313-320.
- [24] 王成己, 潘根兴, 田有国. 保护性耕作下农田表土有机碳含量变化特征分析: 基于中国农业生态系统长期试验资料[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2 464-2 475.
- WANG Chengji, PAN Genxing, TIAN Youguo. Characteristics of Cropland Topsoil Organic Carbon Dynamics Under Different Conservation Tillage Treatments Based on Long-term Agro-ecosystem Experiments Across Mainland China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(12): 2 464-2 475.
- [25] 张小莉, 孟琳, 王秋君, 等. 不同有机无机复混肥对水稻产量和氮素利用率的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(3): 624-630.
- ZHANG Xiaoli, MENG Lin, WANG Qiujun, et al. Effects of organic-inorganic mixed fertilizers on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(3): 624-630.
- [26] 周卫军, 王凯荣, 张光远. 有机无机结合施肥对红壤稻田土壤氮素供应和水稻生产的影响[J]. 生态学报, 2003, 23(5): 914-921.
- ZHOU Weijun, WANG Kairong, ZHANG Guangyuan, et al. Some effects of inorganic fertilizer and recycled crop nutrients on soil nitrogen supply and paddy rice production in the red earth region of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(5): 914-921.

Effects of Different Fertilization Models on Paddy Water Environment and Yield in Machine-transplanted Rice under Irrigation Adjusted by Rainfall

YAN Jun^{1,2}, WU Qixia¹, ZHU Jianqiang^{1*}, ZHANG Luping³

(1.College of Agriculture, Yangtze University, Jingzhou 434025, China; 2. Xinyang Experimental Station of Agriculture, Yancheng 224049, China; 3. Jingzhou Agricultural Meteorological Trial Station, Jingzhou 434025, China)

Abstract: 【Objective】Machine-transplanted rice has the characteristics of young seedling age, long seedling stage and heavy plant injury, etc.. Exploring the effects of different fertilization modes on paddy water environment of machine-transplanted rice and rice growth under rainfall adaption irrigation in Jiangnan Plain can provide theoretical and data support for the improvement of water and fertilizer management measures of local machine-transplanted rice.【Method】The field plot experiments were carried out to study the effects of farmers' fertilization practice (FFP), 70% controlled release compound fertilizer+30% urea(70%CRF+30%N), Organic-inorganic mixed fertilizer(OIF) on rainfall utilization rate, dynamic changes of nitrogen and phosphorus concentration in surface water, runoff loss, dry matter accumulation and rice yield under rainfall adaption irrigation. 【Result】Rainfall utilization efficiency at the re-greening stage, tillering stage, jointing booting stage and filling maturity stage were 17.5%, 100%, 100% and

84.2%, respectively, under rainfall adaption irrigation. After application of base fertilizer and tillering fertilizer, the concentrations of TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TP increased rapidly in surface water of FFP, 70% CRF+30% N and OIF treatments, reaching the peak value on the first day. The average concentrations of TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TP in surface water with 70% CRF+30% N decreased by 40.4%, 47.4% and 0.5%, respectively, in 30 days after rice transplantation compared with FFP treatment. About 90% of nitrogen and phosphorus runoff loss in paddy field was in the re-greening stage, and about 10% was between grouting to ripe period, and the runoff loss of TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TP were 31.4%, 30.9% and 1.9% lower in 70% CRF+30% N than that in FFP; The dry matter accumulation of 70% CRF+30% N treatment was significantly lower than that in FFP and OIF treatment at the re-greening stage. The proportion of dry matter accumulation in total accumulation was shown as FFP>OIF>70% CRF+30% N in the transplant to re-greening stage. The dry matter accumulation of OIF treatment at the mature stage was significantly higher than that in 70% CRF+30% N and FFP treatment, and the actual yield was as bellow: OIF>70% CRF+30% N>FFP.【Conclusion】Under the condition of rainfall adaption irrigation, 70% CRF+30% N was helpful to decrease nitrogen runoff loss in paddy, and OIF was contributive to increase dry matter accumulation and yield of machine-transplanted rice.

Key words: machine-transplanted rice; rainfall adaption irrigation; fertilization mode; nitrogen and phosphorus loss; dry matter accumulation; yield

责任编辑：白芳芳

关于评选优秀论文的公告

本刊已开启优秀论文评选活动，每年评选优秀论文 10 篇，每篇奖励 800 元，并颁发获奖证书，届时将在期刊网站首页展示，同时微信公众号推送。欢迎广大读者、作者积极向我刊投稿。

《灌溉排水学报》编辑部