

适雨灌溉下氮肥运筹对水稻光合特性、氮素吸收及产量形成的影响

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; *通讯联系人, E-mail: zyjb@sina.com)

Effects of Nitrogen Application on Rice Photosynthetic Characteristics, Nitrogen Uptake and Grain Yield Formation Under Rainfall-adapted Water Management

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; *Corresponding author, E-mail: zyjb@sina.com)

Abstract: 【Objective】 The research aims to make rational use of rainfall during rice growth, improve paddy nitrogen fertilizer management practice in the Jiangnan Plain. **【Method】** The field plot experiment with two irrigation regimes (conventional flooding irrigation, FI; rainfall-adapted irrigation, RAI) and three nitrogen fertilizer managements (farmers' fertilization practice, FFP; 30% urea+70% controlled release compound fertilizer, 30%N+70%CRF; optimized and reduced nitrogen fertilizer application, OPT-N) were carried out to study the effects of water and fertilizer managements on rainfall utilization rate, rice yield, photosynthetic characteristics, dry matter accumulation and nitrogen uptake and utilization. **【Result】** 1) Compared with FI, RAI reduced the irrigation quantity by 41.7%, economized water resources while improved the ability of paddy to saving and utilizing rainfall, net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s), intercellular CO_2 concentration (C_i) and transpiration rate (T_r), dry matter accumulation, nitrogen absorption and grain yield in varying degrees during rice growth. 2) Compared with FFP treatment under two water management modes, OPT-N significantly decreased P_n , G_s , C_i , T_r , dry matter accumulation and nitrogen uptake of rice at tillering stage, but increased the above-mentioned indexes from booting to filling stages, but had little effect on final yield formation. 3) RAI combined with 30% N + 70% CRF treatment helped increase P_n , G_s , C_i and T_r in the early growth stage, and promoted the accumulation of dry matter significantly in the middle and late growth stages. The nitrogen uptake was significantly higher than in OPT-N and FFP during the tillering stage, and was significantly higher than FFP at the full heading stage and mature stage. Effective panicle number, panicle length, 1000-grain quality and seed setting rate were the highest among treatments, and the actual yield was 10.4% higher than that in conventional water and fertilizer management. **【Conclusion】** Under the rainfall-adapted irrigation, OPT-N had no significant effect on rice growth and yield, 30% N+70% CRF was helpful to increase photosynthesis, nitrogen uptake and yield of rice.

Key words: rainfall-adapted water management; nitrogen application; yield; photosynthetic characteristics; nitrogen uptake

摘 要: 【目的】为合理利用水稻生长期间的降雨,改善江汉平原地区稻田氮肥管理。**【方法】**采用田间小区试验,研究了常规淹灌(FI)和适雨灌溉(RAI)条件下,农民习惯施肥(FFP)、30%尿素+70%控释掺混肥(30%N+70%CRF)和优化减氮施肥(OPT-N)对降雨利用率、水稻产量、光合特性、干物质积累及氮吸收利用的影响。**【结果】**1)RAI能在节省水资源同时提升稻田对雨水的储蓄和利用能力,与FI相比可减少田间灌溉水量41.7%,各生育阶段水稻叶片净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r)、干物质积累、氮素吸收以及产量均有不同程度的增加;2)两种水管理方式下,与FFP处理相比,OPT-N处理水稻在分蘖期的 P_n 、 G_s 、 C_i 、 T_r 、干物质积累和氮素吸收显著降低,但在孕穗期-灌浆期有所增加,对最终产量形成影响不大;RAI结合30%N+70%CRF处理有利于水稻生育前期 P_n 、 G_s 、 C_i 、 T_r 的增加,提升生育中后期干物质积累量,氮素吸收量在分蘖期显著高于OPT-N和FFP,在齐穗期和成熟期显著高于FFP,有效穗数、穗长、千粒质量和结实率在各处理间表现最高,实际产量相较常规水肥管理可增产10.4%。**【结论】**适雨灌溉条件下,OPT-N不会显著影响水稻的生长及产

收稿日期: 2018-12-24; 修改稿收到日期: 2019-02-21。

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

量, 30%N+70%CRF 有助于水稻光合作用、氮素吸收及产量的增加。

关键词: 适雨灌溉; 氮肥运筹; 产量; 光合特性; 氮素吸收

中图分类号: S143.1; S511.01; S511.071

文献标识码: A

文章编号: 1001-7216(2019)04-0347-10

水稻是我国的主要粮食作物, 年种植面积达 3100 万 hm^2 , 也是灌溉用水量最大、化肥消费量最多的农作物^[1]。水稻需水时期贯穿整个生长阶段, 养分管理中氮肥是水稻生长发育和产量形成的重要因素^[2,3]。目前, 国内外学者就稻田节水灌溉和施肥技术进行了大量的研究。俞双恩等^[4]、高世凯等^[5,6]和 Djaman 等^[7]研究表明控制灌排通过对稻田水位的调控, 灌水量与排水量显著减少, 同时能有效地削减稻田地表排水中氮磷负荷, 提高水稻水氮利用效率。有机无机肥配施, 缓/控释肥或添加氮抑制剂等新型肥料的研发与施用, 氮肥实时实地管理等施肥技术一直是研究的热点^[8-11]。然而, 由于水稻类型、区域气候特征、耕作和施肥的不同, 不同地点的产量响应差异很大。江汉平原地区是我国水稻种植的主要区域, 近年来, 该区域瞬时暴雨与间歇性干旱多发, 水稻产量受到营养和水分供应不协调的限制。上述研究关于在降雨时空分布不均的平原湖区如何合理进行稻田水肥管理研究较少, 从水稻光合特性、产量形成及养分利用等方面综合考量适雨灌溉下氮肥运筹效应鲜见报道。

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、减少灌溉次数与水量、降低农田排水污染、提高氮肥利用效率并为农民所接受的肥水管理技术势在必行。本研究基于田间试验, 研究了常规淹灌和适雨灌溉条件下, 氮肥运筹对水稻产量、各生育期光合特征、干物质积累及氮素吸收利用的影响, 以期江汉平原地区合理利用水稻生长期间的降雨, 改善稻田氮肥管理措施提供理论依据。

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农学院试验基地(30°21'N, 112°09'E), 属北亚热带农业气候带, 年平均气温 16.5 °C, ≥ 10 °C 积温 5 094.9~5 204.3 °C d, 年平均降水量 1 095 mm, 年平均日照时数 1 718 h。耕作层(0~20 cm)土壤基本性状如下: pH 7.4, 全氮 2.0 g/kg, 全磷 0.5 g/kg, 碱解氮 79.5 mg/kg, 速效磷 38.5 mg/kg 和速效钾 108.7 mg/kg。用于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进行试验, 采用随机区组排列。两种灌排模式为常规淹灌(FI)和适雨灌溉(RAI)。水稻移栽后的 10~14 d, 所有的试验小区均维持 10~40 mm 浅水层。水稻返青过后, FI 和 RAI 处理分别进行田间水分管理。FI 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, 遇到降雨按照当地习惯正常排水, 收获前 10 d 自然落干; RAI 适雨灌溉: 水稻适雨灌溉技术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, 减少灌水量(灌水后田面不留水层); 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, 最大程度利用降雨资源, 消减降雨及排峰值, 减少灌溉水量^[12]。具体措施为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 左右(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, 维持田面水深 30~50 mm 一周, 收获前 10 d 自然落干; 依据前人研究^[13]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 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, 超过蓄水深度则进行排水。依据当地农民习惯施肥量设置 3 种氮肥管理: 农民习惯施肥(FFP)、30% 尿素(30%N)+70% 金正大控释掺混肥(70%CRF, 70%为氮素比例, 释放周期为 70 d)和优化减氮施肥(OPT-N)。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 含量为 46%), 基肥施入; 优化减氮施肥中 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中磷肥和钾肥不足部分用过磷酸钙(P_2O_5 含量为 12%)和氯化钾(K_2O 含量为 60%)

表 1 试验施肥方案

Table 1. Fertilization scheme of experiment		kg/hm ²						
施肥处理 Fertilization treatment	施肥量 Fertilizer rate (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)	基肥 Base-manure amounts					分蘖初期 TS	幼穗分化期 PDS
		控释掺混肥 CRF	普通复合肥 CF	尿素 Urea	过磷酸钙 S	氯化钾 MP	尿素 Urea	尿素 Urea
农民习惯施肥 FFP	180-75-105	0.0	700.0	0.0	158.3	0.0	117.4	0.0
30%N+70%CRF	180-75-105	450.0	0.0	117.4	437.5	107.5	0.0	0.0
优化减氮施肥 OPT-N	150-75-105	0.0	416.7	0.0	347.2	70.8	114.1	48.9

FFP, Farmers' fertilization practice; 30%N+70%CRF, 30%urea+70% controlled release compound fertilizer; OPT-N, Optimized and reduced nitrogen fertilizer application; CF, Common compound fertilizer; S, Calcium superphosphate; MP, Muriate of potash; TS, Early tillering stage; PDS, Panicle initiation stage.

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, 其养分含量为 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, 其养分含量为 N, 28%(包膜); P₂O₅, 5%; K₂O, 9%。具体施肥方案如表 1 所示。试验共设 6 个处理, 3 次重复。依照试验田大小将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, 隔水板埋设深度为田表土层往下各 30 cm, 防止试验过程中小区间串水。常规淹灌和适雨灌溉区组在南北两边各 9 个小区, 降雨时常规淹灌正常排水, 适雨灌溉在不同时期超过蓄水深度进行排水, 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。于 2016 年 5 月 5 日播种, 6 月 5 日移栽, 每穴 1 株秧苗, 种植间距为 25 cm×30 cm, 9 月 18 日收获。

1.3 测定项目与分析方法

1.3.1 降雨量及灌溉量

降雨量由荆州农业气象试验站提供; 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分管理方法进行排水。

1.3.2 光合指标测定

分别于水稻的分蘖期、拔节期、孕穗期、齐穗期、灌浆期和乳熟期在晴天上午 9:00—11:00 利用便携式光合作用测定仪(LI-6400, USA)测定水稻叶片净光合速率(P_n)、气孔导度(C_s)、细胞间 CO₂ 浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r), 分蘖期、拔节期和孕穗期测定最上部叶片, 齐穗期、灌浆期和乳熟期测定水稻剑叶。开放式气路, CO₂ 浓度约为 385 $\mu\text{mol/L}$, 选择红蓝光源叶室, 设定光合有效辐射为 1500 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$, 测定部位为叶片叶尖下 1/3 处, 每处理测定 5 片具有代表性的叶片, 3 次重复。

1.3.3 干物质积累量测定

分别于水稻的分蘖期、齐穗期和成熟期田间取样, 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, 按茎、叶、穗分装, 105℃ 下杀青, 80℃ 下烘干、称量。各生育期干物质积累量为茎、叶、穗干物质质量之和。

1.3.4 水稻植株样采集及测定

分别测定水稻的分蘖期、齐穗期和成熟期水稻植株全氮含量, 测定样品为 1.3.3 中水稻植株, 直接粉碎。采用浓 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮凯氏定氮法测定全氮量^[14]。

1.3.5 测产

成熟期每小区随机选取 5 株具有代表性的水稻植株用于考种, 测定有效穗数、穗长、每穗总粒数、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 2016 作图。相关指标计算方法^[15]如下:

氮素积累量(nitrogen accumulation, NTA, kg/hm²) = 成熟期单位面积全株地上部秸秆和籽粒氮素吸收量之和, 即秸秆干物质质量(W) × 秸秆含氮量 + 籽粒干质量 × 籽粒含氮量。

氮素收获指数(N harvest index, NHI, %) = 成熟期植株穗部氮积累量/植株氮素积累总量 × 100%。

氮素干物质生产效率(nitrogen dry matter production efficiency, NDMPE, kg/kg) = 单位面积水稻植株干物质(W) / 单位面积植株氮素积累总量。

氮素籽粒生产效率(nitrogen grain production efficiency, NGPE, kg/kg N) = 单位面积水稻籽粒产量/单位面积植株 N 积累量。

氮肥偏生产力(partial factor productivity of nitrogen, NPFP, kg/kg) = 单位面积稻谷产量/单位

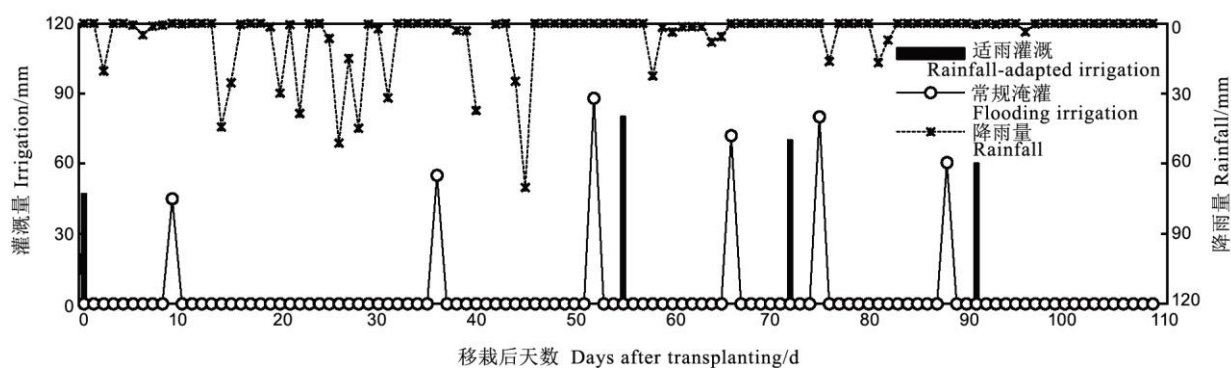


图1 不同灌溉模式的灌溉量与降雨量

Fig. 1. Irrigation amount under different irrigation patterns and rainfalls.

面积施氮量。

2 结果与分析

2.1 田间降雨量与灌溉量

水稻移栽后不同灌溉模式的降雨量与灌溉量如图1所示。水稻移栽后110 d累积降雨量为550.3 mm, 日降雨量最大为70.3 mm(7月2日, 移栽后46 d), 常规淹灌处理田间灌溉7次, 灌溉量为440.5 mm, 总用水量为990.8 mm, 而适雨灌溉处理田间灌溉4次, 灌溉量为257 mm, 总用水量为807.3 mm。适雨灌溉处理田间灌溉水量和总用水量较常规淹灌处理分别降低41.7%和18.5%, 减少灌溉次数3次, 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降雨比较集中且雨量较大, 是提升雨水的储蓄和利用的关键时期。由于适雨灌溉处理削减了灌溉次数和灌溉量, 使得田间水分负荷明显下降。

2.2 不同生育期水稻叶片的光合特征

不同水肥运筹下水稻不同生育期叶片的光合特征由表2可见。与常规淹灌灌溉方式相比, 适雨灌溉处理下30%N+70%CRF和OPT-N水稻净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r)在不同生育期均显著高于其他处理。在分蘖期分别增加5.5%、9.7%、5.4%和9.9%; 在拔节期分别增加3.0%、13.0%、5.8%和14.0%; 在孕穗期分别增加3.6%、12.1%、4.0%和11.6%; 在齐穗期分别增加1.4%、3.6%、1.0%和2.9%; 在灌浆期分别增加2.1%、2.6%、1.5%和5.5%; 表明适雨灌溉方式有助于水稻在分蘖期-灌浆期光合特性的增强。在乳熟期分别降低5.5%、1.4%、1.5%和3.1%, 表明相比适雨灌溉, 淹灌使水稻乳熟期叶片光合效率仍偏高, 从而可能影响水稻的成熟时期。

从施肥方式上来看, 两种水管理方式下, 在分蘖期30%N+70%CRF处理的 P_n 、 G_s 、 C_i 和 T_r 均显著高于农民习惯施肥处理, 而优化减氮施肥处理在分蘖期和拔节期的 P_n 均低于农民习惯施肥处理和30%N+70%CRF处理, 表明在施用控释氮肥时, 前期加入一定比例的常规氮肥, 对水稻在营养生长期光合产物的积累, 减氮优化施肥时对水稻生育前期光合速率有影响。水稻孕穗期、齐穗期和灌浆期30%N+70%CRF处理和优化减氮施肥处理的 P_n 、 G_s 、 C_i 和 T_r 与农民习惯施肥处理相比均有所增加, 表明氮肥后移有助于生育后期光合特性的增强。在乳熟期, 两种水管理方式下优化减氮施肥处理的 P_n 、 G_s 和 T_r 均高于30%N+70%CRF和农民习惯施肥处理, 且常规淹灌条件下优化减氮施肥处理的 P_n 、 G_s 和 T_r 与农民习惯施肥处理相比达到显著水平, 说明在减氮优化施肥时, 应注意后期的施肥量与田间的水分调控, 否则可能会造成水稻贪青晚熟。

2.3 不同生育期水稻地上部干物质的积累量

不同水肥管理条件对水稻不同生育时期地上部干物质的积累量影响不同(表3)。常规淹灌处理下, 30%N+70%CRF处理在分蘖期和齐穗期的地上部干物质积累量均显著高于其他两个处理。适雨灌溉处理下, 30%N+70%CRF处理在分蘖期和成熟期的地上部干物质积累量均显著高于农民习惯施肥处理。两种水管理方式相比, 适雨灌溉处理的水稻在分蘖期、齐穗期和成熟期的地上部干物质积累量均高于常规淹灌处理, 分别增加17.5%、35.0%和4.0%。从施肥方式上看, 30%N+70%CRF处理在分蘖期干物质积累量显著高于优化减氮施肥, 移栽期至分蘖期阶段干物质积累量占总积累量表现为30%N+70%CRF>农民习惯施肥>优化减氮施肥; 在齐穗期, 常规淹灌水管理方式下30%N+70%CRF

表 2 不同水肥管理对水稻不同生育期光合特征的影响
Table 2. Effect of photosynthetic characteristics at different rice growth stages under different water and fertilizer managements.

光合特征指标 Indicators of photosynthetic characteristics	处理 Treatment		生育期 Growth stage					
			分蘖期	拔节期	孕穗期	齐穗期	灌浆期	乳熟期
			Tillering	Jointing	Booting	Full-heading	Filling	Maturity
$P_n/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1})$	FI	FFP	23.6±3.0 b	24.9±1.4 ab	21.2±5.4 b	26.0±0.8 a	15.9±3.4 a	7.3±1.4 b
		30%N+70%CRF	25.2±4.0 a	25.5±1.7 a	21.7±3.6 b	25.5±1.3 a	16.4±2.0 a	9.9±2.5 a
		OPT-N	21.7±3.2 b	23.6±1.5 b	26.8±5.1 a	26.6±2.3 a	16.7±2.0 a	11.0±3.2 a
	RAI	FFP	24.5±3.6 b	26.0±2.3 a	21.8±3.1 b	26.5±2.4 a	16.0±3.3 a	8.1±2.8 b
		30%N+70%CRF	27.7±1.8 a	25.4±2.1 a	24.6±3.0 ab	26.4±1.9 a	17.4±2.2 a	7.4±2.3 b
		OPT-N	22.0±2.3 b	24.8±1.3 a	25.9±2.9 a	26.2±2.9 a	16.7±2.2 a	11.2±2.9 a
$G_p/(\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1})$	FI	FFP	0.5±0.1 b	0.4±0.1 a	0.4±0.1 ab	0.5±0.1 ab	0.8±0.2 a	0.2±0.03 a
		30%N+70%CRF	0.6±0.1 a	0.4±0.1 a	0.3±0.1 b	0.5±0.1 b	0.5±0.1 b	0.2±0.04 a
		OPT-N	0.6±0.1 a	0.5±0.1 a	0.5±0.1 a	0.6±0.1 a	0.7±0.1 a	0.3±0.03 a
	RAI	FFP	0.4±0.2 b	0.4±0.2 b	0.4±0.1 b	0.6±0.1 ab	0.7±0.2 a	0.2±0.05 b
		30%N+70%CRF	0.6±0.1 a	0.4±0.1 b	0.4±0.1 ab	0.5±0.1 b	0.6±0.1 a	0.3±0.1 ab
		OPT-N	0.7±0.1 a	0.6±0.1 a	0.5±0.1 a	0.6±0.1 a	0.7±0.1 a	0.3±0.04 a
$C_p/(\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1})$	FI	FFP	285.2±33.4 b	241.0±38.5 a	289.0±18.8 a	294.0±5.7 a	323.9±15.4 a	355.3±8.7 a
		30%N+70%CRF	325.3±10.3 a	249.7±26.6 a	271.2±27.5 a	287.1±12.4 a	318.3±5.4 a	323.2±16.1 b
		OPT-N	301.8±3.7 b	261.9±5.0 a	273.1±8.6 a	293.4±7.7 a	318.5±8.2 a	346.8±23.8 ab
	RAI	FFP	305.5±16.4 b	253.2±21.9 b	300.2±8.8 a	292.9±7.5 a	319.9±1.5 a	354.0±18.1 b
		30%N+70%CRF	326.2±14.9 a	288.3±10.2 a	285.8±10.6 b	294.9±1.0 a	327.9±6.1 a	320.6±17.9 a
		OPT-N	330.1±8.0 a	254.4±22.6 b	280.6±7.2 b	295.4±9.2 a	327.0±9.1 a	335.1±9.6 a
$T_p/(\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1})$	FI	FFP	4.4±0.9 b	3.0±0.8 a	4.2±0.7 b	5.9±0.5 b	4.3±0.4 b	5.5±0.4 a
		30%N+70%CRF	6.1±0.6 a	3.4±0.6 a	4.3±0.8 b	6.0±0.6 ab	4.7±0.3 ab	5.9±0.8 ab
		OPT-N	6.4±0.6 a	3.5±0.6 a	5.6±0.9 a	6.4±0.3 a	5.2±0.4 a	6.3±0.5 b
	RAI	FFP	4.5±1.2 b	3.0±1.0 b	4.6±0.4 b	6.0±0.7 b	4.9±0.5 a	5.0±1.0 b
		30%N+70%CRF	6.9±0.6 a	4.9±0.9 a	5.4±0.6 a	6.1±0.4 ab	4.9±0.4 a	5.8±0.7 a
		OPT-N	7.1±0.5 a	3.4±0.7 b	5.8±0.6 a	6.6±0.6 a	5.0±0.5 a	6.4±0.5 a

平均数±标准差(n=3); 采用 LSD 最小显著性差异法进行差异显著性检验, 同列数据后不同字母表示差异达 0.05 显著水平。FI—常规淹灌; RAI—适雨灌溉; FFP—农民习惯施肥; 30%N+70%CRF—30%尿素+70%控释掺混肥; OPT-N—优化减氮施肥。下同。

Mean±SD(n=3); values followed by different letters in the same column indicate significant differences among treatments at 0.05 level by the least significant difference; FI, Flooding irrigation; RAI, Rainfall-adapted irrigation; FFP, Farmers conventional fertilization practice; 30%N+70%CRF, 30% urea+70% controlled release compound-fertilizer; OPT-N, Optimized and reduced nitrogen fertilizer application. The same as below.

表 3 不同水肥管理对水稻不同生育期地上部干物质积累量影响
Table 3. Amount of dry matter accumulation at different growth stages of rice under different water and fertilizer managements.

处理 Treatment		干物质积累量 Dry matter accumulation/(t hm ⁻²)			各生育阶段干物质质量所占比例 Proportion of dry matter accumulation in each growth stage/%		
		分蘖期 Tillering	齐穗期 Full-heading	成熟期 Maturity	移栽-分蘖期 Transplanting-Tillering	分蘖期-齐穗期 Tillering-Heading	齐穗期-成熟期 Heading-Maturity
FI	FFP	1.9±0.1 a	6.1±0.4 b	13.4±2.2 a	14.3 a	31.2 b	54.5 a
	30%N+70%CRF	2.3±0.3 a	8.8±0.9 a	15.0±1.9 a	15.4 a	42.8 a	41.8 b
	OPT-N	1.4±0.3 b	6.6±0.3 b	14.8±2.3 a	9.7 b	34.7 b	55.6 a
RAI	FFP	2.1±0.2 b	9.0±1.0 a	13.1±1.2 b	15.9 ab	52.6 a	31.5 b
	30%N+70%CRF	2.9±0.3 a	10.5±2.4 a	16.7±0.8 a	17.1 a	45.9 a	37.0 a
	OPT-N	1.7±0.2 c	9.4±1.5 a	15.2±1.3 ab	11.4 b	50.7 a	37.9 a

处理显著高于其他两种施肥处理, 而适雨灌溉水管理方式下三种施肥处理间无显著差异, 常规淹灌和适雨灌溉处理的分蘖期-齐穗期阶段干物质积累量占总积累量比例分别表现为 30%N+70%CRF>优化减氮施肥>农民习惯施肥和农民习惯施肥>优化减氮施肥>30%N+70%CRF; 在成熟期, 常规淹灌水管理方式下三种施肥处理间无显著差异, 适雨灌溉水管理方式下 30%N+70%CRF 处理显著高于农民习惯施肥施肥处理, 常规淹灌和适雨灌溉处理的齐穗期-成熟期阶段干物质积累量占总积累量比例分别表现为 30%N+70%CRF>优化减氮施肥>

农民习惯施肥和农民习惯施肥>优化减氮施肥>30%N+70%CRF, 表明适当的氮肥后移有利于中后期生育阶段干物质积累量的增加, 而适雨灌溉结合 30%N+70%CRF 处理的干物质积累在分蘖期-成熟期各阶段所占比例相对比较协调, 表明该阶段水稻的光合产物形成、干物质积累和转运顺畅, 而中后期是水稻产量形成的关键时期, 有利于达到水稻高产的目标。

2.4 不同生育期水稻地上部氮素吸收量和氮素利用效率

不同水肥管理对水稻不同生育时期氮吸收量

表 4 不同水肥管理下水稻地上部的氮吸收量

Table 4. Nitrogen accumulation of rice aboveground part under different water and fertilizer managements.

处理 Treatment		氮吸收量 N accumulation/(kg hm ⁻²)			各生育阶段氮吸收量所占比例 Proportion of N accumulation in each growth stage/%		
		分蘖期 Tillering	齐穗期 Heading	成熟期 Maturity	移栽-分蘖期 Transplanting-Tillering	分蘖期-齐穗期 Tillering-Heading	齐穗期-成熟期 Heading-Maturity
FI	FFP	41.5±5.5 a	71.3±3.6 b	153.6±7.6 b	27.1 a	19.3 b	53.6 a
	30%N+70%CRF	49.4±6.0 a	84.2±8.4 a	171.9±7.9 a	28.9 a	20.2 b	50.9 a
	OPT-N	26.2±4.0 b	81.6±5.0 ab	154.8±5.4 b	16.9 b	35.8 a	47.3 a
RAI	FFP	41.7±5.7 b	80.4±7.9 b	157.4±11.7 b	26.7 a	24.6 a	48.8 a
	30%N+70%CRF	57.0±3.9 a	94.9±1.9 a	179.0±8.7 a	31.8 a	21.3 a	46.9 a
	OPT-N	30.2±5.5 c	84.3±5.0 ab	167.7±7.2 ab	18.0 b	32.2 a	49.7 a

表 5 不同水肥管理对水稻氮素利用效率的影响

Table 5. Effects of different water and fertilizer managements on nitrogen use efficiency.

处理 Treatment		氮素收获指数 NHI/%	氮素籽粒生产效率 NDMPE/(kg kg ⁻¹)	氮素干物质生产效率 NDMPE/(kg kg ⁻¹)	氮肥偏生产力 NPFP/(kg kg ⁻¹)
FI	FFP	53.8±1.9 b	45.7±2.0 b	84.3±2.0 a	38.8±5.1 b
	30%N+70%CRF	59.7±5.7 ab	48.9±3.1 ab	91.5±5.8 a	45.3±4.3 ab
	OPT-N	66.2±3.5 a	50.8±0.9 a	83.3±5.8 a	50.2±5.9 a
RAI	FFP	66.7±2.6 b	53.9±4.2 a	91.4±7.4 a	41.8±2.8 b
	30%N+70%CRF	66.1±2.7 b	53.0±2.3 a	94.1±5.1 a	45.7±8.5 b
	OPT-N	75.3±5.2 a	58.3±9.7 a	89.9±1.8 a	57.5±2.5 a

NHI, Nitrogen harvest index; NDMPE, Nitrogen dry matter production efficiency; NGPE, Nitrogen grain production efficiency; NPFP, Partial factor productivity of nitrogen.

和氮素利用效率的影响如表 4 所示。常规淹灌处理下, 30%N+70%CRF 处理在分蘖期和成熟期的地上部氮素吸收量均显著高于优化减氮施肥处理。适雨灌溉处理下, 30%N+70%CRF 处理在分蘖期、齐穗期和成熟期的地上部氮素吸收量均显著高于农民习惯施肥处理。随生育进程, 稻株氮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一样, 水稻氮吸收量趋势不太一致, 两种水管理方式相比, 水稻移栽-分蘖期氮吸收量差别不大, 主要可能是因为前期水管理都一样, 中后期适雨灌溉处理水稻的氮吸收量略高于常规淹灌处理, 可能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活力, 从而促进水稻后期对养分的吸收利用。从水稻各生育阶段氮吸收量所占比例来看, 氮素积累的主要生育时期为齐穗期-熟期, 常规淹灌和适雨灌溉管理下优化减氮施肥处理在移栽-分蘖期的氮吸收量及所占比例显著低于 30%N+70%CRF 和农民习惯施肥, 适雨灌溉水管理下 30%N+70%CRF 处理在移栽期显著高于优化减氮施肥和农民习惯施肥, 在齐穗期和成熟期的氮吸收量显著高于农民习惯施肥。

适雨灌溉下氮肥运筹对水稻氮素收获指数和生产效率也有明显影响, 如表 5 所示。两种水管理

方式下, 优化减氮施肥处理氮素籽粒生产效率和氮肥偏生产力均显著高于其他两个处理。适雨灌溉管理方式下氮素收获指数、氮素籽粒生产效率、氮素干物质生产效率和氮肥偏生产力均高于常规淹灌; 两种水管理方式下, 优化减氮施肥处理的氮素收获指数和氮肥偏生产力均显著高于农民习惯施肥, 但适雨灌溉灌溉方式下 30%N+70%CRF 施肥处理更有助于水稻各生育阶段对氮素的吸收累积。这一结果也说明, 适宜施氮量和基肥与穗肥比例可提高水稻对养分的吸收利用, 不管是控释还是分次施用均能有效增加水稻氮素吸收量和收获指数, 提高氮肥偏生产力。

2.5 水稻的产量及其构成因素

不同水肥运筹下水稻的产量及其构成因素见表 6。两种水管理方式下, 不同施肥处理对每穗总粒数和结实率均有显著影响。适雨灌溉水管理下的有效穗数、穗长、每穗总粒数、结实率、千粒重和实际产量均高于常规淹灌处理, 其中每穗总粒数、结实率和实际产量的增幅达 10.4%、5.3%和 4.4%, 而各施肥处理间产量最终表现为 30%N+70%CRF > 优化减氮施肥 > 农民习惯施肥。在常规淹灌水管理方式下, 三种施肥处理间的每 1m²有效穗数、穗长、千粒质量和实际产量以 30%N+70%CRF 处理最

表 6 不同水肥管理对水稻产量及构成因素的影响

Table 6. Effects of water and fertilizer management on grain yield and yield components.

处理 Treatment		每 1 m ² 有效穗数 Effective panicle number per 1m ²	穗长 Panicle length /cm	每穗总粒数 Grain number per panicle	结实率 Seed setting rate/%	千粒质量 1000-grain weight/g	实际产量 Grain yield /(kg hm ⁻²)
FI	FFP	236±8 a	29.7±1.0 a	265.2±9.2 b	70.3±2.4 c	26.8±0.1 a	8244 a
	30%N+70%CRF	238±10 a	30.4±1.0 a	270.4±1.4 ab	82.0±1.9 a	26.7±0.2 a	8602 a
	OPT-N	234±7 a	29.5±0.2 a	279.9±1.7 a	80.7±2.6 b	26.7±0.2 a	8302 a
RAI	FFP	232±9 ab	29.7±0.5 a	287.8±6.2 b	80.6±6.6 a	26.9±0.6 a	8522 a
	30%N+70%CRF	242±12 a	31.0±0.8 a	316.4±2.2 a	84.0±7.3 a	27.8±0.2 a	9100 b
	OPT-N	218±10 b	30.8±1.6 a	296.0±8.9 b	80.9±6.7 a	27.4±0.3 a	8642 ab

高, 但各处理间均无显著差异, 而 30%N+70%CRF 处理的结实率却显著高于农民习惯施肥处理和优化减氮施肥处理。在适雨灌溉管理方式下, 三种施肥处理间的穗长、千粒质量和结实率表现为 30%N+70%CRF 处理最高, 但各处理间均无显著差异, 30%N+70%CRF 处理的每 1 m² 有效穗数、每穗总粒数却显著高于优化减氮施肥处理, 实际产量相较常规水肥管理增产 10.4%, 表明与传统的灌溉和施肥方式相比, 适雨灌溉的管理方式下优化减氮施肥氮肥管理不会造成产量减少, 施用 30%N+70%CRF 更有助于产量的形成。

3 讨论

3.1 适雨灌溉和氮肥运筹对水稻生长及产量的影响

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, 提高雨水资源利用率, 减少灌溉水量和次数。姜萍等^[16]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。相较湿润灌溉, 本研究中适雨灌溉处理的田间灌溉量可在其基础上再降低30%左右, 这与肖万川等^[12]研究结果一致。主要原因是江汉平原地区水稻返青分蘖期-拔节孕穗期与该区域梅雨期重合, 降雨比较集中且雨量较大, 适雨灌溉能在节省水资源同时提升雨水的蓄存和利用能力, 减少稻田总灌水量。水稻作为需水量最多的农作物, 较重的干旱胁迫和淹水灌溉均会降低叶片光合能力^[17]。赵黎明等^[18]发现在轻度干湿交替的灌溉方式下, 水稻生育后期光合物质生产能力强, 最终籽粒产量较高。本研究中水稻适雨灌溉条件下在分蘖期、齐穗期和成熟期水稻叶片光合作用、植株干物质质量均高于淹水对照, 且到生育中后期阶段干物质积累量差异进一步扩大。可见, 在降雨较多的生

育期, 提高稻田蓄水量, 减少灌溉次数, 不会影响水稻光合产物在植株体内积累、分配、运输与转化。但是, 由于年度间降水存在较大差异且降水量和降水时期不可控, 本研究数据只有1年, 后续还将进行跟踪研究, 以确保研究结果的准确性。

作物的光合作用受到诸多因素的影响, 例如温度、光照度和气体等生境因子, 但是在农作措施上水肥管理起到决定性作用。裴鹏刚等^[19]的研究结果表明, 增施氮肥能显著增加水稻生育后期的光合速率, 提高水稻产量。本研究优化减氮施肥处理水稻在分蘖期各生育阶段的 P_n 、 G_s 、 C_i 、 T_r 干物质积累和氮素吸收相较农民习惯施肥处理和 30%N+70%CRF 处理显著降低, 但在孕穗期-灌浆期有所增加, 30%N+70%CRF 处理的水稻前期光合作用和中后期生育阶段干物质积累量明显增加, 有研究报道抽穗期至成熟期光合生产能力则会影响水稻产量, 稻谷中 60%~80%粒重来自抽穗期的光合产物^[20], 表明适当的氮肥后移(控释或者分次施氮)有助于后期养分供应和光合产物向籽粒中转移。李录久等^[15]研究表明, 氮肥后移比例不宜过大, 否则氮素会较多地向秸秆转移并积累, 导致秸秆含氮量过高, 造成水稻贪青晚熟。本研究也表明减氮优化施肥时, 应注意后期的施肥量与田间的水分调控, 否则可能推迟水稻成熟期。然而, 也有研究认为, 提高抽穗前干物质积累量并使之有效地向穗部转运, 是提高产量的有效途径^[21,22], 而本研究表明适雨灌溉结合 30%N+70%CRF 处理的干物质积累在分蘖期-成熟期各阶段所占比例比较协调, 成熟期干物质积累总量和产量最高, 表明生育中后期各阶段干物质积累协调有利于高产形成。

水稻产量形成取决于单位面积穗数、每穗总粒数、结实率和千粒质量^[18], 合理的水肥调控是保证水稻高产的关键因子。有关水稻水肥管理, 以往大量的研究多集中在水、肥单因子效应试验, 而水肥互作效应试验结果及其生理机制的分析结论不太

一致。本研究中是否存在互作效应影响水稻产量形成需进一步证实。本研究表明,在适雨灌溉水管理方式下水稻有效穗数、穗长、每穗总粒数、结实率、千粒重和实际产量均高于常规淹灌处理,适雨灌溉在水稻生育中后期更有利于同化物的输出,使产量构成更合理,每穗粒数、结实率和千粒质量均提高。郭智等^[23]研究表明氮肥减施15%~30%降低水稻产量达6.27%~12.91%。本研究中减氮优化施肥处理水稻产量并未降低,这与李娟等^[24]研究结果一致。研究发现与单独施用常规尿素或缓释尿素相同量相比,缓释尿素联合常规尿素30%~70%可使单株水稻产量增加6.0%~31.2%^[25]。本研究中三种施肥处理间的有效穗数、穗长、千粒质量和结实率表现为30%N+70%CRF处理最高,实际产量相较于常规水肥管理可增产10.4%,因此,施用控释氮肥加入一定比例的常规氮肥有助于增产。

3.2 适雨灌溉和氮肥运筹对水稻氮素吸收利用的影响

因地制宜的水肥管理能改善水稻生长发育,提高水稻对养分的吸收利用。谭亦杭等^[26]研究表明间歇灌溉和长期淹水灌溉两种水分管理方式对水稻氮素吸收及氮肥利用率的影响差异不显著。本研究表明适雨灌溉水管理方式下,水稻的氮吸收量略高于常规淹灌处理,氮素收获指数、氮素籽粒生产效率、氮素干物质生产效率和氮肥偏生产力均高于常规淹灌。肥料类型及运筹模式对水稻氮素利用影响显著,已有研究报道,前氮后移在低施氮量下能够提高氮肥的利用效率,而在高施氮量下反而使氮肥的利用受到限制^[27-29]。本研究中优化减氮施肥处理的氮素收获指数和氮肥偏生产力均显著高于农民习惯施肥,表明适宜施氮量和基肥与穗肥比例,能为水稻整个生育期提供比较平衡的氮素供应,可促进氮素吸收,提高氮肥利用效率,而缓控释肥一次施用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,满足水稻各生育期的养分需求,促进养分的吸收利用。相关研究表明,与普通尿素相比,尿素控释能显著提高水稻籽粒产量和氮肥利用率^[30],尽管缓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,适雨灌溉水管理下30%N+70%CRF处理氮吸收量在移栽期显著高于优化减氮施肥和农民习惯施肥,在齐穗期和成熟期显著高于农民习惯施肥,表明施用控释氮肥下加入30%速效常规氮肥是有助于水稻的氮素吸收。这与Ding等^[31]研究结果一致。

4 结论

江汉平原地区适雨灌溉能在节省水资源同时提升稻田对雨水的储蓄和利用能力,与常规淹灌相比可减少田间灌溉水量41.7%,各生育阶段的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r)、干物质积累、氮素吸收以及产量均有不同程度的增加。两种水管理方式下,优化减氮施肥处理水稻在分蘖期各生育阶段的 P_n 、 G_s 、 C_i 、 T_r 干物质积累和氮素吸收相较于农民习惯施肥处理和30%N+70%CRF处理显著降低,但在孕穗期-灌浆期有所增加,最终产量影响不大,适雨灌溉结合30%N+70%CRF处理水稻生育前期 P_n 、 G_s 、 C_i 、 T_r 和中后期干物质积累量显著增加,氮素吸收量在分蘖期显著高于优化减氮施肥和农民习惯施肥,在齐穗期和成熟期显著高于农民习惯施肥,有效穗数、穗长、千粒质量和结实率在各处理间表现最高,实际产量相较于常规水肥管理可增加10.4%。综上,适雨灌溉条件下,优化减氮施肥不会显著影响水稻的生长及产量,30%N+70%CRF有助于水稻光合作用、氮素吸收及产量的增加。

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. 水资源保护, 2003(6): 56-58.
Zhu C L, Zhang Z Y. Research prospect of irrigation mode on nitrogen and phosphorus losses and environmental impact in paddy fields. *Wat Resour Prot*, 2003(6): 56-58. (in Chinese with English abstract)
- [2] Belder P, Bouman B A M, Cabangon R, Lu G A, Quilang E J P, Li Y H, Spiertz J H J, Tuong T P. Effect of water-saving irrigation on rice yield and water use in typical lowland conditions in Asia. *Agric Water Manag*, 2004, 65: 193-210.
- [3] Zou J, Huang Y, Jiang J, Zheng X, Sass R L. A 3-year field measurement of methane and nitrous oxide emissions from rice paddies in China: effects of water regime, crop residue, and fertilizer application. *Glob Biogeochem Cycles*, 2005, 19: 153-174.
- [4] 俞双恩, 李偲, 高世凯, 王梅, 孟佳佳, 汤树海. 水稻控制灌排模式的节水高产减排控污效果. 农业工程学报, 2018, 34(7): 128-136.
Yu S E, Li S, Gao S K, Wang M, Meng J J, Tang S H. Effect of controlled irrigation and drainage on water saving, nitrogen and phosphorus loss reduction with high yield in paddy field. *Tran Chin Soc Agric Engin*, 2018, 34(7): 128-136. (in Chinese with English abstract)

- [5] 高世凯, 俞双恩, 王梅, 曹睿哲, 郭蓉. 旱涝交替下控制灌溉对稻田节水及氮磷减排的影响. *农业工程学报*, 2017, 33(5): 122-128.
Gao S K, Yu S E, Wang M, Cao R Z, Guo R. Effect of controlled irrigation and drainage on saving water and reducing nitrogen and phosphorus loss in paddy field under alternate drought and flooding condition. *Trans Chin Soc Agric Engin*, 2017, 33(5): 122-128. (in Chinese with English abstract)
- [6] Gao S K, Yu S E, Wang M, Meng, J J, Tang S H, Ding J H, Li S, Miao Z M. Improving water productivity and reducing nutrient losses by controlled irrigation and drainage in paddy fields. *Pol J Environ Stud*, 2018, 27(3): 1049-1059.
- [7] Djaman K, Mel V C, Diop L, Sow L, Ei-namaky R, Manneh B, Saito K, Futakuchi K, Irmak S. Effects of alternate wetting and drying irrigation regime and nitrogen fertilizer on yield and nitrogen use efficiency of irrigated rice in the Sahel. *Water*, 2018, 10(6), 711; <https://doi.org/10.3390/w10060711>
- [8] 鲁艳红, 廖育林, 聂军, 周兴, 谢坚, 杨曾平. 紫云英与尿素或控释尿素配施对双季稻产量及氮钾利用率的影响. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(2): 360-368.
Lu Y H, Liao Y L, Nie J, Zhou X, Xie J, Yang Z P. Effect of incorporation of Chinese milk vetch coupled with urea or controlled release urea on yield and nitrogen and potassium nutrient use efficiency in double-cropping rice system. *J Plant Nutr Fert*, 2017, 23(2): 360-368. (in Chinese with English abstract)
- [9] 张文学, 孙刚, 何萍, 梁国庆, 余喜初, 刘光荣, 周卫. 双季稻田添加脲酶抑制剂 NBPT 氮肥的最高减量潜力研究. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(4): 821-830.
Zhang W X, Sun G, He P, Liang G Q, Yu X C, Liu G R, Zhou W. Highest potential of subtracting nitrogen fertilizer through addition of urease inhibitor NBPT in double-cropping paddy field. *J Plant Nutr Fert*, 2014, 20(4): 821-830. (in Chinese with English abstract)
- [10] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(2): 259-273.
Zhu Z L, Jin J Y. Fertilizer use and food security in China. *J Plant Nutr Fert*, 2013, 19(2): 259-273. (in Chinese with English abstract)
- [11] 刘立军, 徐伟, 桑大志, 刘翠莲, 周家麟, 杨建昌. 实地氮肥管理提高水稻氮肥利用效率. *作物学报*, 2006, 32(7): 987-994.
Liu L J, Xu W, Sang D Z, Liu C L, Zhou J L, Yang J C. site-specific nitrogen management increases fertilizer-nitrogen use efficiency in rice. *Acta Agron Sin*, 2006, 32(7): 987-994. (in Chinese with English abstract)
- [12] 肖万川, 贾宏伟, 邱昕恺, 黄万勇. 水稻适雨灌溉对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响. *灌溉排水学报*, 2017, 36(11): 36-40.
- Xiao W C, Jia H W, Qiu X K, Huang W Y. Effects of irrigation adjusted by rainfall on emissions of CH₄ and N₂O from paddy fields. *J Irrig Drain*, 2017, 36(11): 36-40. (in Chinese with English abstract)
- [13] 吴启侠, 朱建强, 晏军, 黄成涛. 涝胁迫对杂交中稻形态和产量的影响. *中国农业气象*, 2016, 37(2): 188-198.
Wu Q X, Zhu J Q, Yan J, Huang C T. Morphology of middle-season hybrid rice in Hubei province and its yield under different waterlogging stresses. *Chin J Agrometeorol*, 2016, 37(2): 188-198. (in Chinese with English abstract)
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [15] 李录久, 王家嘉, 吴萍萍, 黄厚宽, 蒋荫锡. 秸秆还田下氮肥运筹对白土田水稻产量和氮吸收利用的影响. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(1): 254-262.
Li L J, Wang J J, Wu P P, Huang H K, Jiang Y X. Effect of different nitrogen application on rice yield and N uptake of white soil under wheat straw turnover. *J Plant Nutr Fert*, 2016, 22(1): 254-262. (in Chinese with English abstract)
- [16] 姜萍, 袁永坤, 朱日恒, 戴耀文, 沈逸菲, 赵峥, 岳玉波, 赵琦, 曹林奎. 节水灌溉条件下稻田氮素径流与渗漏流失特征研究. *农业环境科学学报*, 2013, 32(8): 1592-1596.
Jiang P, Yuan Y K, Zhu R H, Dai Y W, Shen Y F, Zhao F, Yue Y B, Zhao Q, Cao L K. Study on the nitrogen loss from paddy fields on different water management. *J Agro-Environ Sci*, 2013, 32(8): 1592-1596. (in Chinese with English abstract)
- [17] 王唯逍, 刘小军, 田永超, 等. 不同土壤水分处理对水稻光合特性及产量的影响. *生态学报*, 2012, 32(22): 7053-7060.
Wang W X, Liu X J, Tian Y C, et al. Effects of different soil water treatments on photosynthetic characteristics and grain yield in rice. *Acta Ecol Sin*, 2012, 32(22): 7053-7060. (in Chinese with English abstract)
- [18] 赵黎明, 李明, 郑殿峰, 姚霞, 曹卫星, 朱艳. 灌溉方式与种植密度对寒地水稻产量及光合物质生产特性的影响. *农业工程学报*, 2015, 31(6): 159-169.
Zhao L M, Li M, Zheng D F, Yao X, Cao W X, Zhu Y. Effects of irrigation methods and rice planting densities on yield and photosynthetic characteristics of matter production in cold area. *Trans Chin Soc Agric Engin* (Transactions of the CSAE), 2015, 31(6): 159-169. (in Chinese with English abstract)
- [19] 裴鹏刚, 张均华, 朱练峰, 胡志华, 金千瑜. 秸秆还田耦合施氮水平对水稻光合特性、氮素吸收及产量形成的影响. *中国水稻科学*, 2015, 29(3): 282-290.

- Pei P G, Zhang J H, Zhu L F, Hu Z H, Jin Q Y. Effects of straw returning coupled with N application on rice photosynthetic characteristics, nitrogen uptake and grain yield formation. *Chin J Rice Sci*, 2015, 29(3): 282-290. (in Chinese with English abstract)
- [20] 曹树青, 翟虎渠, 杨图南, 张荣铨, 匡廷云. 水稻种质资源光合速率及光合功能期的研究. 中国水稻科学, 2001, 15(1): 29-34.
- Cao S Q, Zhai H Q, Yang T N, Zhang R X, Kuang T Y. Studies on photosynthetic rate and function duration of rice germplasm resources. *Chin J Rice Sci*, 2001, 15(1): 29-34. (in Chinese with English abstract)
- [21] 陈温福, 徐正进, 张龙步. 水稻超高产育种生理基础. 沈阳: 辽宁科技出版社, 1995.
- Chen W F, Xu Z J, Zhang L B. Physiological basis of rice breeding for super high yield. Shenyang: Liaoning Science and Technology Publishing House, 1995.
- [22] Yang Z, Inoue N, Fujita K, Kato M. Analysis of dry-matter translocation during grain filling stage of rice. *Jpn J Crop Sci*, 2004, 73(3): 416-423.
- [23] 郭智, 刘红江, 张岳芳, 周炜, 陈留根. 氮磷减施对水稻剑叶光合特性、产量及氮素利用率的影响. 西南农业学报, 2017, 30(10): 2263-2269.
- Guo Z, Liu H J, Zhang Y F, Zhou W, Chen L G. Effects of reducing nitrogen and phosphorus application on photosynthetic characteristics of flag leaves, grain yield, and nitrogen use efficiency. *Southwest China J Agric Sci*, 2017, 30(10): 2263-2269. (in Chinese with English abstract)
- [24] 李娟. 不同施肥处理对稻田氮磷流失风险及水稻产量的影响. 杭州: 浙江大学, 2016.
- Li J. Effects of different fertilization treatments on rice yield and the risk of nitrogen and phosphorus losses from paddy field. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [25] 刘忠新, 孙磊, 吴英, 刘玉林. 包膜控释尿素对寒地水稻产量与氮肥利用率的影响. 北方水稻, 2009, 39(5): 10-12, 15.
- Liu, Z X, Sun L, Wu Y, Liu Y L. Effect of coated controlled released urea in yield and nitrogen utilization efficiency of rice in cold region. *North Rice*, 2009(5): 10-12, 15. (in Chinese with English abstract)
- [26] 谭亦杭, 沈健林, 蒋炳伸, 李巧云, 李勇, 吴金水. 秸秆还田与水分管理对双季水稻氮素吸收及氮肥利用率的影响. 农业现代化研究, 2018, 39(3): 511-519.
- Tan Y H, Shen J L, Jiang B S, Li Q Y, Li Y, Wu J S. The effects of straw incorporation and water management on nitrogen uptake and nitrogen use efficiency in a double rice cropping system. *Res Agric Moder*, 2018, 39(3): 511-519. (in Chinese with English abstract)
- [27] 李珣, 苗立新, 孙杰, 刘忠卓, 姚红军. 氮肥运筹对北方超级稻水稻氮素利用率的影响. 北方水稻, 2014, 44(5): 15-18.
- Li X, Miao L X, Sun J, Liu Z Z, Yao H J. Effect of N-management on the nitrogen using efficiency of north super rice. *North Rice*, 2014, 44(5): 15-18. (in Chinese with English abstract)
- [28] 卢铁钢, 崔月峰, 孙国才, 王俊茹, 王桂艳, 王健. 氮肥运筹对水稻产量及氮素利用率的影响. 作物研究, 2012, 26(4): 320-323.
- Lu T G, Cui Y F, Sun G C, Wang J R, Wang G Y, Wang J. Effects of nitrogen application on yield formation and nitrogen use efficiency of rice. *Crop Res*, 2012, 26(4): 320-323. (in Chinese with English abstract)
- [29] 吴文革, 张四海, 赵决建, 吴桂成, 李泽福, 夏加发. 氮肥运筹模式对双季稻北缘水稻氮素吸收利用及产量的影响. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(5): 757-764.
- Wu W G, Zhang S H, Zhao J J, Wu G C, Li Z F, Xia J F. Nitrogen uptake, utilization and rice yield in the north rim land of double-cropping rice region as affected by different nitrogen management strategies. *Plant Nutr Fert Sci*, 2007, 13(5): 757-764. (in Chinese with English abstract)
- [30] 李敏, 郭熙盛, 叶舒娅, 刘枫, 袁漫漫, 黄义德. 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. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(4): 808-815.
- Li M, Guo X S, Ye S Y, Liu F, Yuan M M, Huang Y D. Effects of sulfur and polymer-coated controlled release urea on yield, photosynthetic characteristics and nitrogen fertilizer efficiency of rice. *Plant Nutr Fert Sci*, 2013, 19(4): 808-815. (in Chinese with English abstract)
- [31] Ding W C, Xu X P, He P, Sami U, Zhang J J, Cui Z L, Zhou W. Improving yield and nitrogen use efficiency through alternative fertilization options for rice in China: A meta-analysis. *Field Crops Res*, 2018, 227: 11-18.