

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.04.006

祝海竣, 唐舟, 石爱龙, 等. 灌溉模式和有机肥配施对水稻产量、光合特性和氮肥利用率的影响. 土壤, 2022, 54(4): 700–707.

灌溉模式和有机肥配施对水稻产量、光合特性和氮肥利用率的影响^①

祝海竣^{1,2}, 唐舟^{1,2}, 石爱龙^{1,2}, 文天^{1,2}, 文璨^{1,2}, 薛华良³, 王学华^{1,2*}

(1 教育部作物生理与分子生物学重点实验室, 长沙 410128; 2 南方粮油作物协同创新中心, 长沙 410128; 3 益阳市赫山区农业农村局, 湖南益阳 413000)

摘要: 针对湘北地区农业水资源日益紧缺和水稻生产上滥施化学氮肥的现状, 为了节约淡水资源、降低化肥用量、实现水肥协同和资源高效利用, 设置 2 种灌溉方式(W_1 : 全生育期淹水灌溉; W_2 : 全生育期湿润灌溉)和 4 个施氮水平(N_0 : 不施氮肥; N_1 : 施 N 量 150 kg/hm², 肥料为尿素氮 100%; N_2 : 施 N 量 150 kg/hm², 肥料为尿素氮 80%+有机氮(菜枯)20%; N_3 : 施 N 量 150 kg/hm², 肥料为尿素氮 60%+有机氮(菜枯)40%), 分析水稻产量、光合特性、氮素代谢和氮肥利用率对灌溉模式和有机肥配施的响应规律。结果表明: 与 W_1 相比, W_2 显著增加水稻产量、氮肥利用率、净光合速率、蒸腾速率、气孔导度等; 在不同施氮处理下, 增加有机肥比例能显著提高产量, N_3 、 N_2 、 N_1 分别比 N_0 增产 28.32%、25.52%、18.88%, 同时氮肥吸收利用率、氮肥农学利用率和氮肥偏生产力也表现为 $N_3 > N_2 > N_1$, N_3 的氮肥吸收利用率、氮肥农学利用率、氮肥偏生产力分别达到了 78.52%、9.77 kg/kg、46.91 kg/kg。综合评分法表明, 灌溉模式和有机肥配施的最佳模式为 W_2N_3 , 即湿润灌溉、施 N 量 150 kg/hm²、肥料为尿素氮 60%+有机氮(菜枯)40% 组合。该研究结果可为湘北地区水稻水肥管理提供科学依据。

关键词: 水稻; 灌溉方式; 有机无机肥配施; 产量; 氮肥利用率

中图分类号: S511.3 文献标志码: A

Effects of Irrigation Patterns and Combined Application of Organic Fertilizer on Rice Yield, Photosynthetic Characteristics and Nitrogen Use Efficiency

ZHU Haijun^{1,2}, TANG Zhou^{1,2}, SHI Ailong^{1,2}, WEN Tian^{1,2}, WEN Can^{1,2}, XUE Hualiang³, WANG Xuehua^{1,2*}

(1 Key Laboratory of Crop Physiology and Molecular Biology, Ministry of Education, Changsha 410128, China; 2 Southern Grain and Oil Crops Collaborative Innovation Center, Changsha 410128, China; 3 Agriculture and Rural Bureau of Heshan District, Yiyang, Hunan 413000, China)

Abstract: In view of the growing shortage of agricultural water resources and the abuse of chemical nitrogen fertilizer on rice production in Northern Hunan Province, in order to save fresh water resources, reduce the dosage of chemical fertilizers, and realize the coordinated and efficient utilization of resources of water and fertilizer, two kinds of irrigation methods (W_1 : water irrigation in whole grow period; W_2 : wet irrigation in whole growth period) and four nitrogen levels (N_0 : no nitrogen; N_1 : N amount 150 kg/hm², fertilizer urea nitrogen 100%; N_2 : N amount 150 kg/hm², fertilizer urea nitrogen 80% + organic nitrogen 20%; N_3 : N amount 150 kg/hm², fertilizer urea nitrogen 60% + organic nitrogen 40%) were set up in this study, and then the yields, photosynthetic characteristics, nitrogen metabolism and nitrogen use efficiencies of rice under different treatments were analyzed. The results showed that, compared with W_1 , W_2 significantly increased yield, nitrogen use efficiency, net photosynthetic rate, transpiration rate and stomatal conductance. Under different nitrogen levels, increasing organic fertilizer ratio significantly increased yield, and N_3 , N_2 and N_1 increased the yield by 28.32%, 25.52% and 18.88% compared with N_0 , respectively. Meanwhile, the absorption efficiency, agronomic efficiency and partial productivity also in the order of $N_3 > N_2 > N_1$. The nitrogen absorption efficiency, agronomic efficiency and partial nitrogen productivity of N_3 reached 78.52%, 9.77 kg/kg and 46.91 kg/kg

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0301501, 2018YFD0301005)资助。

* 通讯作者(13873160151@163.com)

作者简介: 祝海竣(1997—), 男, 湖南益阳人, 博士研究生, 主要研究方向为水稻水肥高效利用。E-mail: 921706423@qq.com

respectively. The comprehensive scoring method showed that the best irrigation mode and organic fertilizer combination was W_2N_3 , that is, wet irrigation with N amount 150 kg/hm^2 , fertilizer combination of urea nitrogen 60% + organic nitrogen 40%. The above results can provide scientific basis for water and fertilizer management for rice growing in Northern Hunan Province.

Key words: Rice; Irrigation method; Combination of organic and inorganic fertilizers; Production; Nitrogen use efficiency

水稻是我国重要的粮食作物, 全国有一半以上的人口以稻米为主食, 对稻米的需求还在不断增加^[1]。水稻是耗水量最多的作物, 其耗水量约为其他谷类作物的2~3倍^[2]。在我国的传统农业中, 淡水资源浪费非常严重, 只有不到一半的水分能被水稻利用消耗^[3]。因此, 必须寻求节水灌溉技术提高水分的利用率, 保证灌溉的可持续性, 缓解水资源供需矛盾, 同时保证水稻的正常生长和发育^[4]。

除水分外, 肥料也是影响作物生长发育的主要限制因子^[5]。人们把增加化肥用量作为提高作物产量的重要手段, 目前中国已成为世界氮肥的第一大消费国^[6]。过高的施氮量和较低的氮肥利用率, 不但增加了生产成本, 降低了氮肥生产力^[7], 造成氮肥资源的浪费^[8], 还会造成水稻贪青迟熟, 降低了稻米食味等品质^[9], 并导致农田土壤环境的恶化^[10]、土壤微生物的多样性下降^[11]等一系列的环境问题。李燕青等^[12]提出鸡粪或猪粪单独施用或配施少量化肥氮, 牛粪配施75%左右的化肥氮可实现与化肥相当的氮素利用效率, 同时提升土壤肥力。许小伟等^[13]提出, 配施40%猪粪氮更有利于红壤地区土壤肥力及产量的改善。陶磊等^[14]提出化肥减量20%~40%配施以3000、6000 kg/hm^2 有机肥不仅不会导致棉花减产, 而且对提高土壤酶活性, 调节土壤细菌、真菌、放线菌群落组成结构, 改善北疆绿洲滴灌棉田土壤生物学性状有显著作用。赵雱等^[15]提出有机无机肥配施可以延缓灌浆中后期叶片衰老, 维持合理的冠层结构, 使小麦具有较强的光合性能, 进而获得较高的籽粒产量。

湖北地区是长江中下游重要的双季稻区, 光、热、水资源丰富, 水稻产量高, 品质好^[16]。经调查, 湖北地区的水稻种植户均习惯在淹水条件下种植水稻, 也存在着过度施肥的现象^[17-18]。为此, 本研究以洞庭湖区的双季早稻为研究对象, 设置系列肥料的用量、不同灌溉条件, 旨在探明配施有机肥减量施肥对不同水肥耦合条件下水稻产量和氮肥利用率的影响, 量化有机肥替代部分化肥的比例, 搭配较好的节水灌溉模式, 为当地水稻生产、节水灌溉及土壤培肥提供科学依据, 最大限度地发挥和利用水肥耦合优势在水稻生产过程中的作用, 以达到以水调肥, 提高肥料利用率, 有效地保护农业生态环境, 以期对湖北地区稻田灌水

施肥提供有益指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于2020年4—7月在益阳市赫山区笔架山乡中塘村进行。试验地位于 $27^{\circ}58'38'' \sim 29^{\circ}31'42''\text{N}$ 、 $110^{\circ}43'02'' \sim 112^{\circ}55'48''\text{E}$, 海拔31.63 m, 属亚热带气候季风, 四季分明, 降水充足。年平均气温 $16.1 \sim 16.9^{\circ}\text{C}$, 年降水量1230~1700 mm, 土壤基本理化性质为pH 5.46, 碱解氮164.2 mg/kg, 有效磷11.7 mg/kg, 速效钾73.3 mg/kg, 全氮1.64 g/kg, 全钾0.343 g/kg, 全磷0.658 g/kg, 有机质29.04 g/kg。供试水稻品种为株两优819, 种植密度为300000株/ hm^2 。

1.2 试验设计

试验设灌溉方式和氮肥运筹2个因素, 灌溉方式2水平, 氮肥运筹4水平, 组合成共8个处理。灌溉方式2个水平: W_1 (淹水灌溉: 全期保持3~5 cm水层, 收获前1周断水)、 W_2 (湿润灌溉: 全期湿润无水层)。氮肥运筹4个水平: N_0 (不施氮肥)、 N_1 (施N量150 kg/hm^2 , 肥料为尿素氮100%)、 N_2 (施N量150 kg/hm^2 , 肥料为尿素氮80%+有机氮(菜枯)20%)、 N_3 (施N量150 kg/hm^2 , 肥料为尿素氮60%+有机氮(菜枯)40%)。试验采用裂区设计, 以灌溉方式为主区, 氮肥运筹为副区, 小区(裂区)面积20 m^2 , 重复3次, 栽插规格为16.7 cm \times 20 cm。各处理磷钾肥等量, P_2O_5 90 kg/hm^2 , K_2O 180 kg/hm^2 。氮肥为尿素(含N 46%)和菜枯(含N 4.60%, P_2O_5 2.48%, K_2O 1.40%), 磷肥用过磷酸钙(含 P_2O_5 12%), 钾肥用氯化钾(含 K_2O 60%)。氮肥的施用按氮肥运筹方式, 磷肥作基肥一次性施用, 钾肥作基肥: 分蘖肥=1:1施用。分小区单排单灌, 田埂用塑料薄膜覆盖, 防止窜水窜肥。田间精细管理, 及时控制和防治病虫害的发生。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 叶片光合特性 在分蘖盛期(取上数第二全展叶)、孕穗期、齐穗期、乳熟期(取剑叶), 采用便携式光合作用测定仪LI-6400光合测定系统测定光合速率。测定水稻叶片光合特性尽量选在晴朗、无云、无风的天气, 时间为9:00—12:00。选择具有代表性的2株, 每株重复测3次, 取其平均值为该株的测量值。

1.3.2 水稻氮代谢的测定 1)硝酸还原酶(NR)活性测定。在水稻的分蘖期、孕穗期、齐穗期、乳熟期,分别取水稻的叶片样测定氮代谢相关的酶活性及相应产物:①取适量诱导剂于烧杯中,将新鲜标本洗净,滤纸吸干,放入诱导剂应用中避光,浸泡 2 h,取出样本,试纸吸干,−20 °C 冷冻 30 min,取出样本,滤纸吸干;②酶的提取:称取 0.5 g 鲜样,剪碎于研钵中,取液氮及 1 ml 提取缓冲液,研磨匀浆,转移于离心管,在 4 °C、4 000 r/min 下离心 10 min,上清液即为粗酶提取液;③测定反应:加混合液(0.1 mol/L KNO₃、1% V/V 异丙醇)磷酸缓冲液(0.1 mol/L) 9 ml,其中一管立即加 1 ml 三氯乙酸(30%)作对照,放入真空泵中反复抽气,直至叶片沉至管底,将各试管置于 30 °C 暗处保温 30 min,分别加 1 ml 三氯乙酸(30%);④静置 2 min,然后吸取上清液 2 ml,加 4 ml 确胺试剂、4 ml 架服试剂,摇匀后静置 30 min,在 540 nm 处比色计算出酶活性。

2)谷氨酰胺合成酶活性测定。首先准备 0.6 ml 咪唑盐酸缓冲液(0.25 mol/L, pH 7.0)、0.4 ml ATP-Na 溶液(30 mol/L, pH 7.0)、0.4 ml 谷氨酸钠溶液(0.30 mol/L, pH 7.0)、0.2 ml MgSO₄ 溶液(0.5 mol/L)、提取液 1.2 ml。反应液在 25 °C 水浴锅中保温 5 min 后,加入 0.2 ml 羟胺试剂开始反应,倒计时 15 min 后立即加入 0.8 ml 酸性 FeCl₃ 试剂终止反应。混合液置于 4 000 r/min 离心机中离心 15 min,测定上清液在 540 nm 处的光密度。一个 GS 活性单位定义为该反应条件下,反应时间为 15 min 内催化形成 1 μmol Y-谷氨酰异羟肟酸需要的酶量,总活性为每克鲜样酶粗液在 15 min 的反应时间内消光值的变化量。

1.3.3 氮肥利用率 成熟期的茎鞘、实粒和秕粒经消化后,采用荷兰 Skalar 公司生产的 Skalar San⁺⁺ 流动注射分析仪测定氮素含量,计算氮肥利用率。

氮肥吸收利用率(NUE, %)=(施氮区地上部吸氮量-不施氮区地上部吸氮量)/施氮量×100;

氮肥生理利用率(NPE, kg/kg)=(施氮区稻谷产量-不施氮区稻谷产量)/(施氮区地上部吸氮量-不施氮区地上部吸氮量);

氮肥农学利用率(NAE, kg/kg)=(施氮区稻谷产量-不施氮区稻谷产量)×1000/施氮量;

氮肥偏生产力(PFP, kg/kg)=施氮区稻谷产量×1000/施氮量;

氮收获指数(NHI)=籽粒吸氮量/植株总吸氮量。

1.3.4 水稻产量的测定 水稻成熟期每小区调查 60 蔸计算有效穗,根据平均有效穗取样法每小区选取具有代表性的 5 蔸用于考察总粒数、实粒数、结实

率和千粒重。各小区分收分晒,计算实际产量。

1.4 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2019 软件进行数据分析,SPSS 22.0 统计软件进行方差分析, LSD 法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 灌溉模式和有机肥配施对水稻产量的影响

灌溉模式和有机肥配施显著影响水稻产量(表 1)。总体上来说,与 W₁ 相比, W₂ 增产了 4.07%。施用氮肥明显增产,处理间产量高低依次为 N₃>N₂>N₁>N₀, N₃、N₂、N₁ 分别比 N₀ 增产 28.32%、25.52%、18.88%,均达到显著水平,且 N₃、N₂ 与 N₁ 之间的差异也达到显著水平,说明用有机氮肥替代部分无机氮肥可以促进水稻产量提高。从水肥耦合来看,产量最高为 W₂N₃(7.42 t/hm²),产量最低的是 W₁N₀(5.51 t/hm²)。从产量构成因素来看,不同的水肥条件下,水稻千粒重差异并不显著。湿润灌溉 W₂ 在有效穗数和穗粒数上比淹水灌溉 W₁ 要多,且差异显著,但结实率和千粒重有所下降。施用氮肥能显著增加有效穗数和穗粒数,提高千粒重,且显著影响结实率,当氮肥为全化氮肥时,结实率为 66.47%,比不施氮低 7.40%;当用 20% 有机氮替代时,结实率比不施氮低 3.09%;当用 40% 有机氮替代时,比不施氮上升了 2.97%。

2.2 灌溉模式和有机肥配施对水稻光合特性的影响

2.2.1 蒸腾速率 从表 2 中可以看出,叶片蒸腾速率在分蘖期至齐穗期保持在 7.65~12.59 mmol/(m²·s) 范围内,总体在齐穗期达到最高值。从灌溉方式来看, W₂ 的蒸腾速率大于 W₁,且在分蘖期到齐穗期差异显著,灌浆期差异不显著。从施氮处理来看,施氮比不施氮 N₀ 蒸腾速率高,且在分蘖期至齐穗期差异显著,在灌浆期差异不显著;施氮处理又以 N₁ 蒸腾速率最高, N₃ 最低,且在分蘖期至孕穗期差异显著,齐穗期至灌浆期差异不显著,说明施用有机肥有降低蒸腾速率的趋势。从水氮互作来看,从分蘖期到齐穗期,各处理间蒸腾速率存在显著或极显著差异,各时期均以 W₂N₁ 蒸腾速率最高,以 W₁N₀ 最低,即在湿润灌溉条件下,施用化学氮肥有促进蒸腾作用的效果。

2.2.2 光合速率 灌溉模式和有机肥配施显著影响水稻不同时期的光合速率,由表 3 可知,株两优 819 的光合速率在不同生育期呈现先升后降的趋势,孕穗期到达峰值。灌溉方式的不同对光合速率产生显著影响,各时期均以处理 W₂ 的光合速率显著高于 W₁。不同施氮处理下,生育前中期(分蘖期-孕穗

表 1 灌溉模式和有机肥配施对株两优 819 产量及产量构成的影响

Table 1 Effects of irrigation mode and combined application of organic fertilizer on yields and its components of Zhuliangyou 819

处理	有效穗数($10^4/\text{hm}^2$)	每穗粒数	结实率(%)	千粒重(g)	理论产量 (t/hm^2)	实际产量 (t/hm^2)
W ₁ N ₀	247.42 d	123.87 d	76.04 b	25.71 ab	5.98 d	5.51 e
W ₁ N ₁	328.50 a	127.53 c	67.80 d	25.63 ab	7.28 b	6.63 c
W ₁ N ₂	315.52 a	124.27 d	72.19 c	25.72 ab	7.28 b	7.11 b
W ₁ N ₃	296.31 bc	120.89 e	80.03 a	25.89 a	7.42 ab	7.25 ab
W ₂ N ₀	282.36 c	127.77 c	71.70 c	25.27 b	6.54 c	5.94 d
W ₂ N ₁	324.61 a	140.38 a	65.15 e	25.45 ab	7.55 ab	6.98 b
W ₂ N ₂	311.14 ab	133.84 b	69.37 d	25.72 ab	7.43 ab	7.25 ab
W ₂ N ₃	313.31 ab	129.05 c	73.66 c	25.50 ab	7.59 a	7.42 a
W	*	**	*	*	*	*
N	*	**	**	ns	ns	*
W×N	ns	*	*	ns	ns	ns

注：同列数据小写字母不同表示处理间差异显著($P<0.05$)；* 和 ** 分别表示影响达 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 显著水平，ns 表示没有显著影响；下表同。

表 2 灌溉模式和有机肥配施对株两优 819 蒸腾速率的影响($\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$)

Table 2 Effects of irrigation mode and combined application of organic fertilizer on transpiration rates of Zhuliangyou 819

处理	分蘖盛期	孕穗期	齐穗期	灌浆期
W ₁ N ₀	8.89 e	7.65 f	9.13 e	7.16 a
W ₁ N ₁	11.43 b	10.18 bc	10.48 cd	7.29 a
W ₁ N ₂	10.72 c	9.29 d	11.53 abc	6.95 a
W ₁ N ₃	9.51 d	8.49 e	10.52 cd	7.18 a
W ₂ N ₀	9.47 de	8.48 e	9.69 de	6.72 a
W ₂ N ₁	12.59 a	11.57 a	12.48 a	7.28 a
W ₂ N ₂	11.50 b	10.39 b	11.16 bc	6.76 a
W ₂ N ₃	10.54 c	9.78 c	11.80 ab	7.04 a
W	**	**	**	ns
N	**	**	ns	ns
W×N	*	**	ns	ns

期)表现为处理 $N_1>N_2>N_3>N_0$ ，在生育后期(齐穗期-灌浆期)表现为处理 $N_3>N_2>N_1>N_0$ ， N_3 、 N_2 与 N_1 、 N_0 差异显著，灌浆期差异不显著。以分蘖期为例， N_1 的光合速率达到 $20.85 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ，比 N_2 、 N_3 、 N_0 分别高出 4.41%、19.55%、17.53%，处理 N_3 与 N_0 差异不显著，其他处理间差异显著。

2.2.3 气孔导度 类似光合速率，不同处理的气孔导度在孕穗期达到最高值(表 4)。不同灌溉模式之间，各个时期的气孔导度均为湿润灌溉 W_2 大于淹水灌溉 W_1 ，在分蘖期、孕穗期、齐穗期和灌浆期， W_2 的气孔导度比 W_1 分别高出 6.71%、23.78%、2.53%、2.50%。从施氮处理来看，从分蘖期至齐穗期，不同处理间显

表 3 灌溉模式和有机肥配施对株两优 819 光合速率的影响($\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$)

Table 3 Effects of irrigation mode and combined application of organic fertilizer on photosynthetic rates of Zhuliangyou 819

处理	分蘖盛期	孕穗期	齐穗期	灌浆期
W ₁ N ₀	15.90 e	17.47 d	14.54 c	13.47 b
W ₁ N ₁	19.84 b	20.17 bc	16.78 bc	15.00 ab
W ₁ N ₂	18.63 c	18.97 cd	17.91 ab	15.23 ab
W ₁ N ₃	16.77 d	17.90 d	19.38 a	15.64 ab
W ₂ N ₀	19.59 b	20.58 abc	19.13 a	16.31 a
W ₂ N ₁	21.87 a	22.53 a	15.47 c	16.05 a
W ₂ N ₂	21.31 a	21.68 ab	19.29 a	15.88 a
W ₂ N ₃	18.12 c	20.67 abc	18.45 ab	16.88 a
W	**	**	ns	*
N	**	ns	ns	ns
W×N	**	*	ns	ns

著差异，灌浆期差异不显著。从水氮互作来看，不同时期的气孔导度基本上保持 W_2N_1 最大，而 W_1N_0 最小，且在生育前期差异显著，后期不显著。

2.2.4 胞间 CO_2 浓度 从表 5 可看出，各处理的胞间 CO_2 浓度在前 3 个时期比较稳定，而在灌浆期明显增大，这可能与灌浆期光合速率下降有关。在两种灌溉方式之间，各个时期的胞间 CO_2 浓度均为湿润灌溉 W_2 大于淹水灌溉 W_1 ，分蘖期、孕穗期、齐穗期和灌浆期， W_2 的胞间 CO_2 浓度比 W_1 分别高出 3.61%、3.01%、4.49%、1.54%。从不同施氮处理来看，胞间 CO_2 浓度没有明显规律，且没有差异。从水氮互作来看，在分蘖期以 W_2N_3 最大，为 $319.59 \mu\text{mol}/\text{mol}$ ， W_1N_1 最小，为 $304.81 \mu\text{mol}/\text{mol}$ ，差异显著；在孕穗期以 W_2N_3 最大，为 $315.31 \mu\text{mol}/\text{mol}$ ，

表 4 灌溉模式和有机肥配施对株两优 819 气孔导度的影响(mol/(m²·s))

Table 4 Effects of irrigation mode and combined application of organic fertilizer on stomatal conductance of Zhuliangyou 819

处理	分蘖盛期	孕穗期	齐穗期	灌浆期
W ₁ N ₀	1.32 d	1.41 d	0.67 b	1.11 a
W ₁ N ₁	1.65 ab	1.79 c	0.86 a	1.24 a
W ₁ N ₂	1.50 bc	1.68 c	0.80 ab	1.21 a
W ₁ N ₃	1.48 c	1.69 c	0.82 ab	1.23 a
W ₂ N ₀	1.40 cd	1.60 cd	0.68 b	1.17 a
W ₂ N ₁	1.80 a	2.42 a	0.86 a	1.25 a
W ₂ N ₂	1.64 ab	2.08 b	0.88 a	1.21 a
W ₂ N ₃	1.53 bc	2.04 b	0.83 ab	1.28 a
W	*	**	ns	ns
N	*	*	ns	ns
W×N	ns	ns	ns	ns

W₁N₃ 最小, 为 304.28 μmol/mol, 差异显著; 在齐穗期以 W₂N₂ 最大, 为 321.25 μmol/mol, W₁N₂ 最小, 为 303.70 μmol/mol, 差异显著; 而灌浆期处理间差异不显著。说明胞间 CO₂ 浓度的差异来源主要是灌溉方式, 而施氮处理对胞间 CO₂ 浓度没有明显影响。

2.3 灌溉模式和有机肥配施对水稻硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶的影响

从表 6 可知, 灌溉模式和有机肥配施显著影响水稻不同时期的硝酸还原酶的活性。在不同灌溉模式下, 在分蘖期、孕穗期、齐穗期、灌浆期, W₂ 比 W₁ 分别增加 19.14%、14.25%、20.59%、30.83%。从施氮处理来看, N₁>N₂>N₃>N₀。从水氮互作来看, 总的趋势是 W₂N₁>W₁N₁>W₂N₂>W₁N₂>W₂N₃>W₁N₃>W₂N₀>W₁N₀。在孕穗期 W₂N₁ 条件下酶活性为最高, 达到了 10.77 μg/(g·h)。

表 6 灌溉模式和有机肥配施对株两优 819 叶片硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶活性的影响(μg/(g·h))

Table 6 Effects of irrigation mode and combined application of organic fertilizer on leaf nitrate reductase and glutamine synthetase activities of Zhuliangyou 819

处理	硝酸还原酶				谷氨酰胺合成酶			
	分蘖盛期	孕穗期	齐穗期	灌浆期	分蘖盛期	孕穗期	齐穗期	灌浆期
W ₁ N ₀	3.42 b	6.77 e	4.50 d	3.30 e	36.21 e	59.65 f	106.44 d	84.03 f
W ₁ N ₁	4.72 a	9.5 b	6.18 abc	5.44 bc	72.85 b	105.10 b	179.45 a	131.75 bc
W ₁ N ₂	3.58 b	8.57 c	5.17 cd	4.45 d	62.47 bc	84.63 cd	157.41 b	127.32 cd
W ₁ N ₃	3.62 b	7.14 de	4.55 d	3.27 e	54.85 cd	74.24 e	143.18 c	119.11 d
W ₂ N ₀	3.49 b	7.88 cd	5.38 bcd	4.49 d	50.52 d	77.57 de	116.64 d	95.95 e
W ₂ N ₁	5.21 a	10.77 a	7.31 a	6.64 a	85.14 a	126.05 a	185.49 a	154.64 a
W ₂ N ₂	3.73 b	9.48 b	6.51 ab	5.79 b	64.69 bc	101.58 b	164.62 b	148.61 a
W ₂ N ₃	4.31 ab	8.42 c	5.41 bcd	4.65 cd	54.98 cd	85.65 c	142.75 c	139.88 b
W	*	**	**	**	**	**	*	**
N	*	**	**	**	**	**	**	**
W×N	ns	*	ns	*	*	**	ns	**

表 5 灌溉模式和有机肥配施对株两优 819 胞间 CO₂ 浓度的影响(μmol/mol)

Table 5 Effects of irrigation mode and combined application of organic fertilizer on intercellular CO₂ concentrations of Zhuliangyou 819

处理	分蘖盛期	孕穗期	齐穗期	灌浆期
W ₁ N ₀	305.25 c	305.88 bc	304.64 bc	327.88 b
W ₁ N ₁	304.81 c	306.85 bc	305.72 bc	334.00 ab
W ₁ N ₂	306.35 bc	304.52 c	303.70 c	334.25 ab
W ₁ N ₃	309.36 abc	304.28 c	305.31 bc	333.08 ab
W ₂ N ₀	315.23 abc	314.99 a	317.84 ab	338.98 a
W ₂ N ₁	317.47 ab	315.24 a	314.43 abc	339.42 a
W ₂ N ₂	317.70 a	312.70 ab	321.25 a	335.93 ab
W ₂ N ₃	319.59 a	315.31 a	320.63 a	335.35 ab
W	ns	ns	ns	ns
N	ns	ns	ns	ns
W×N	ns	ns	ns	ns

与硝酸还原酶类似, 不同处理能影响水稻不同时期的谷氨酰胺合成酶的活性, 但在齐穗期达到最高值(表 6)。从灌溉模式来看, 在各个生育期谷氨酰胺合成酶均表现为 W₂ 大于 W₁, 在分蘖期、孕穗期、齐穗期、灌浆期, W₂ 比 W₁ 分别增加 12.79%、20.76%、3.92%、16.63%。从施氮处理来看, 以齐穗期为例, N₁ 分别比 N₀、N₂、N₃ 增加 63.59%、13.33%、27.64%; 从水氮互作来看, 前 3 个时期总的趋势是 W₂N₁>W₁N₁>W₂N₂>W₁N₂>W₂N₃>W₁N₃>W₂N₀>W₁N₀, 且处理之间存在显著或极显著差异。综上所述, 湿润灌溉和施用氮肥有利于提高谷氨酰胺合成酶活性, 氮肥种类以化学氮肥更能促进谷氨酰胺合成酶活性的提高, 而用有机氮肥替代化学氮肥则对谷氨酰胺合成酶活性有影响。

2.4 灌溉模式和有机肥配施对超级稻氮肥利用率的影响

由表7可以看出,不同灌溉模式下,氮肥吸收利用率、氮肥生理利用率、氮肥农学利用率、氮肥偏生产力及氮收获指数表现出一定差异。湿润灌溉 W_2 的氮肥吸收利用率、氮肥农学利用率和氮肥偏生产力较淹水灌溉要高,而氮肥生理利用率稍低。从施氮处理来看,氮肥吸收利用率、氮肥农学利用率和氮肥偏生产力都是 $N_3 > N_2 > N_1$ 。氮肥吸收利用率, N_3 为 78.52%, 比 N_1 高出 27.01%; 氮肥农学利用率, N_3 为 9.77 kg/kg, 比 N_1 高出 15.62%; 氮肥偏生产力, N_3 为 46.91 kg/kg, 比 N_1 高出 15.62%。氮肥生理利用率则刚好相反, $N_1 > N_2 > N_3$, N_1 为 70.45 kg/kg, 比 N_3 高出 14.64%。从水氮互作来看, W_2N_3 的氮肥吸收利用率和氮肥农学利用率最高, 分别为 78.64%、10.37 kg/kg; 处理 W_1N_3 的氮肥偏生产力和氮收获指数最高, 分别为 46.98%、0.79; 而氮肥生理利用率则以处理 W_1N_1 最高, 为 72.86 kg/kg。

表7 灌溉模式和有机肥配施对株两优 819 氮肥利用率的影响

Table 7 Effects of irrigation mode and combined application of organic fertilizer on nitrogen utilization efficiencies of Zhuliangyou 819

处理	NUE (%)	NPE (kg/kg)	NAE (kg/kg)	PFP (kg/kg)	NHI
W_1N_1	70.20 c	72.86 a	8.01 c	42.59 c	0.77 a
W_1N_2	72.94 bc	57.94 b	9.40 abc	46.65 a	0.76 a
W_1N_3	78.41 a	55.85 b	9.18 abc	46.98 a	0.79 a
W_2N_1	72.82 bc	68.03 a	8.90 bc	39.66 d	0.79 a
W_2N_2	75.59 ab	57.51 b	9.73 ab	46.05 b	0.77 a
W_2N_3	78.64 a	55.77 b	10.37 a	46.85 a	0.76 a
W	*	ns	**	**	ns
N	*	*	*	**	ns
W×N	ns	ns	ns	*	ns

3 讨论

3.1 不同灌溉模式和有机肥配施耦合对水稻产量及其产量构成的影响

湿润灌溉和化肥减量配施有机肥对水稻产量及其构成的提高都有着积极作用^[19]。高菊生等^[20]和徐明岗等^[21]都提出化肥有机肥配合施用能促进水稻中后期的干物质积累和养分吸收,并能提高稻田单位面积总穗数和穗粒数,从而提高水稻产量。因为化肥作为速效肥料能支撑水稻生长前期的营养需求,而有机肥作为缓释肥料能够为水稻生长后期提供养分^[22-23]。

刘红江等^[24]提出了有机肥和无机肥各占 50% 能够实现水稻产量最高化。本研究有机肥占比 40% 能达到最高产,和前人的研究结果接近,后续需要细化占比开展新的试验。在灌溉模式方面,全生育期湿润灌溉有利于水稻生长发育,在全生育期湿润灌溉处理下土壤表面的透气性增强,有利于水稻干物质的积累,从而叶片光合速率及产量因素得以提高,水分的利用率随着提高^[25]。本研究结果与前人一致,全生育期湿润灌溉优于长期淹水灌溉,在同一施肥水平下,湿润灌溉的产量要高于淹水灌溉。

3.2 不同灌溉模式和有机肥配施耦合对水稻光合特性的影响

光合作用是影响作物产量的重要生理过程,对实现自然界的能量转换、维持大气的碳-氧平衡具有重要意义,已有研究表明施用有机肥可以提高植物的光合作用强度^[26]。本研究结果表明,有机肥配施处理下的叶片气孔导度、蒸腾作用、胞间 CO_2 浓度都低于化肥处理,与净光合速率负相关,这可能是因为有机肥提高了叶肉细胞光合性能^[27]。水分因子主要通过影响水稻光合速率、蒸腾速率,进而影响光合生理特性。大量研究表明,供水不足导致水稻叶绿素含量降低,减少剑叶功能期,降低光合速率^[28],而淹水处理使作物总叶绿素含量随着淹水天数的延长而呈下降趋势,色素破坏明显,从而导致光合速率下降,最终导致减产,因此,适当的水分灌溉有利于提高光合速率^[29]。

3.3 不同灌溉模式和有机肥配施耦合对水稻叶片硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶的影响

硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶在水稻氮代谢过程中起调节和限速的作用,其活性影响着水稻氮素利用和中心调节作用^[2]。不同的研究中,有机肥对植物叶片中硝酸还原酶含量的影响不一,陈星峰等人^[30]研究表明施用饼肥、牛粪、猪粪能提高硝酸还原酶活性,而施用鸡粪和稻草则降低硝酸还原酶活性,烤烟硝酸还原酶活性随有机氮配施比例的增加而提高;而袁玉伟等^[31]认为随着有机肥配施比例的降低,叶片中硝酸还原酶活性逐渐提高,100% 化肥处理时达到最高。本研究结果与后者一致,这可能是硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶与土壤含氮量关系密切,化肥直接进入土壤,导致含氮量明显增高,植株体内硝酸还原酶活性也就越强,氮素代谢也就越旺盛。陈仁天等人^[32]认为采用湿润灌溉处理相对有利于提高水稻叶片硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶的活性,本研究结果与此一致。同时湿润灌溉和施用氮肥有利于提高谷氨酰胺

合成酶活性。

3.4 不同灌溉模式和有机肥配施耦合对水稻氮肥利用率的影响

适当的施氮条件下, 有机肥代替部分化学肥料, 可以提高水稻的氮肥利用率^[33]。本研究中, 有机肥配施无机肥处理较单施有机肥处理能显著提高氮肥农学效率、氮肥吸收利用率和氮肥偏生产力, 且其比例为 40% 时达到最高, 这与魏静等人^[34]研究基本一致, 这可能是有机肥比较全面, 促进水稻根系生长, 减少氮素损失, 促进氮素吸收。表土湿润灌溉能有效改善稻田土壤氧化还原状况, 不仅显著提高水稻产量, 而且显著增强稻田氮的硝化而减少氮素损失, 从而提高水稻氮素积累量和氮素收获指数, 这与胡继杰等人^[35]的研究结果一致。综上, 说明优化灌溉、配施有机肥能够提高氮肥的利用效率。

4 结论

适当有机肥替代配施无机肥, 以及湿润灌溉条件下, 能在不同程度上提高水稻的光合利用率、氮肥利用率和氮肥贡献率, 增加水稻籽粒秸秆吸氮量, 增加水稻穗数、穗粒数或千粒重, 最终提高水稻的产量。综合水稻产量、光合特性、氮肥利用率以及环境影响等方面, 在施用中氮量的基础条件下, 对田间采用湿润灌溉模式, 并配施 40% 的有机肥为最优有机无机配施方案。

参考文献:

- [1] 朱德峰, 张玉屏, 陈惠哲, 等. 中国水稻高产栽培技术创新与实践[J]. 中国农业科学, 2015, 48(17): 3404-3414.
- [2] Zhu H, Zhang T, Zhang C, et al. Optimizing Irrigation and Nitrogen Management to Increase Yield and Nitrogen Recovery Efficiency in Double-Cropping Rice. *Agronomy*. 2022; 12(5): 1190.
- [3] Meng X P, Lian Y H, Liu Q, et al. Optimizing the planting density under the ridge and furrow rainwater harvesting system to improve crop water productivity for foxtail millet in semiarid areas[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 238: 106220.
- [4] 祝海竣, 张听, 王学华, 等. ¹⁵N 示踪技术分析不同灌溉模式下水稻对氮素的利用规律[J]. 分子植物育种, 2021, 19(11): 3687-3697.
- [5] 王瑞昕, 杨静, 方正, 等. 水分管理对水稻籽粒氮积累及根际土壤细菌群落多样性的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(6): 1574-1584.
- [6] 黄东风, 李卫华, 王利民, 等. 水肥管理措施对水稻产量、养分吸收及稻田氮磷流失的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(2): 62-66.
- [7] 赵玉芬, 尹应武. 我国肥料使用中存在的问题及对策[J]. 科学通报, 2015, 60(36): 3527-3534.
- [8] Nkebiwe P M, Weinmann M, Bar-Tal A, et al. Fertilizer placement to improve crop nutrient acquisition and yield: A review and meta-analysis[J]. *Field Crops Research*, 2016, 196: 389-401.
- [9] 侯萌瑶, 张丽, 王知文, 等. 中国主要农作物化肥用量估算[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(4): 360-367.
- [10] 廖超林, 黎丽娜, 谢丽华, 等. 增减施有机肥对红壤性水稻土团聚体稳定性及胶结物的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(4): 978-988.
- [11] 王艳群, 彭正萍, 薛世川, 等. 过量施肥对设施农田土壤生态环境的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(S1): 81-84.
- [12] 李燕青, 温延臣, 林治安, 等. 不同有机肥与化肥配施对氮素利用率和土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(10): 1669-1678.
- [13] 许小伟, 樊剑波, 陈晏, 等. 不同有机无机肥配施比例对红壤旱地花生产量、土壤速效养分和生物学性质的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(18): 5182-5190.
- [14] 陶磊, 褚贵新, 刘涛, 等. 有机肥替代部分化肥对长期连作棉田产量、土壤微生物数量及酶活性的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(21): 6137-6146.
- [15] 赵隽, 董树亭, 刘鹏, 等. 有机无机肥长期定位配施对冬小麦群体光合特性及籽粒产量的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(8): 2362-2370.
- [16] Han J P, Shi J C, Zeng L Z, et al. Impacts of continuous excessive fertilization on soil potential nitrification activity and nitrifying microbial community dynamics in greenhouse system[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17(2): 471-480.
- [17] 杜东升, 廖玉芳, 陆魁东, 等. 湖南双季超级稻熟性搭配精细化气候区划研究[J]. 中国稻米, 2015, 21(4): 49-52.
- [18] 曹俏, 余展, 周清, 等. 湘北地区典型水稻土的发生特性及其在中国土壤系统分类中的归属[J]. 土壤, 2019, 51(1): 168-177.
- [19] 解开治, 徐培智, 蒋瑞萍, 等. 有机无机肥配施提升冷浸田土壤氮转化相关微生物丰度和水稻产量[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(5): 1267-1277.
- [20] 高菊生, 黄晶, 董春华, 等. 长期有机无机肥配施对水稻产量及土壤有效养分影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(2): 314-324.
- [21] 徐明岗, 李冬初, 李菊梅, 等. 化肥有机肥配施对水稻养分吸收和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(10): 3133-3139.
- [22] 陈贵, 张红梅, 沈亚强, 等. 猪粪与牛粪有机肥对水稻产量、养分利用和土壤肥力的影响[J]. 土壤, 2018, 50(1): 59-65.
- [23] Subedi K D, Ma B L. Effects of N-deficiency and timing of N supply on the recovery and distribution of labeled ¹⁵N in contrasting maize hybrids[J]. *Plant and Soil*, 2005, 273(1/2): 189-202.
- [24] 刘红江, 陈虞雯, 孙国峰, 等. 有机肥-无机肥不同配施比例对水稻产量和农田养分流失的影响[J]. 生态学杂志, 2017, 36(2): 405-412.
- [25] Kaur A, Bedi S, Kumar M. Physiological basis of nitrogen use efficiency at variable nitrogen application rates in maize[J]. *Agricultural Research Journal*, 2019, 56(1): 40.

- [26] Nguyen T T N, Wallace H M, Xu C Y, et al. Short-term effects of organo-mineral biochar and organic fertilisers on nitrogen cycling, plant photosynthesis, and nitrogen use efficiency[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17(12): 2763–2774.
- [27] 赵旭, 宋清晖, 王晓慧, 等. 几种有机肥对玉米光合特性及土壤酶活性的影响[J]. *中国农学通报*, 2021, 37(3): 36–42.
- [28] 张帆, 周加森, 马阳, 等. 水氮调控对冬小麦光合特性和产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2021(1): 70–74.
- [29] 卢雪琴, 夏汉平, 彭长连. 淹水对5种禾本科植物光合特性的影响[J]. *福建林学院学报*, 2004, 24(4): 374–378.
- [30] 陈星峰, 陈朝阳, 陈巧萍, 等. 配施不同种类有机肥对烤烟若干生理指标的影响[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(22): 178–181.
- [31] 袁玉伟, 张志恒, 赵明, 等. 施肥对土壤及黄瓜中稳定性氮同位素丰度的影响[J]. *核农学报*, 2010, 24(1): 108–113.
- [32] 陈仁天, 唐茂艳, 赵荣德, 等. 耕作方式和大田水管理对水稻氮素吸收利用的影响[J]. *南方农业学报*, 2012, 43(7): 942–946.
- [33] Nishikawa T, Li K Z, Inoue H, et al. Effects of the long-term application of anaerobically-digested cattle manure on growth, yield and nitrogen uptake of paddy rice (*Oryza sativa* L.), and soil fertility in warmer region of Japan[J]. *Plant Production Science*, 2012, 15(4): 284–292.
- [34] 魏静, 郭树芳, 翟丽梅, 等. 有机无机肥配施对水稻氮素利用率与氮流失风险的影响[J]. *土壤*, 2018, 50(5): 874–880.
- [35] 胡继杰, 朱练峰, 胡志华, 等. 土壤增氧方式对其氮素转化和水稻氮素利用及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(1): 167–174.