

干湿交替灌溉下氮素形态对水稻花期 光合及产量形成的影响

何海兵¹, 杨 茹¹, 吴 汉¹, 尤翠翠¹, 朱德泉², 时强强¹, 武立权^{1*}

(1 安徽农业大学 农学院, 合肥 230036; 2 安徽农业大学 工学院, 合肥 230036)

摘 要: 干湿交替灌溉(节水栽培)水稻较传统淹灌栽培表现出较高的生产潜力, 其高产形成除因土壤水分改变有关外, 可能还与根区水分变化引起的土壤氮素形态改变有关。该研究于 2016 年通过设置传统淹灌(W₁)和干湿交替灌溉(W₂)水分处理, 以及氮素形态配比[硝态氮: 氨态氮=100: 0(N₁), 50: 50(N₂)和 0: 100(N₃)]处理, 并通过温室盆栽试验探讨水分与氮素形态互作对水稻花期光合生理及产量形成的影响。结果表明: (1) W₂ 水分处理产量及其构成因子、光合生产能力、收获指数、氮素收获指数以及氮素籽粒生产效率均显著高于 W₁ 处理, 其 N 素累积量略低于 W₁ 处理。(2) 在不同氮素形态之间, N₂ 处理的产量水平显著高于 N₃ 和 N₁ 处理, 这主要是 N₂ 处理加强了水稻物质转运以及光合生产能力, 其中叶片含氮量和 N 素浓度提高可能是 N₂ 处理呈现出高光合性能的重要原因。(3) 氮素利用效率以 N₁ 处理最高, 随后依次分别为 N₂ 和 N₃ 处理。研究发现, 土壤水分与氮素形态对促进水稻产量、产量构成因子、收获指数等形成均存在显著的互作效应, 且 W₂N₂ 处理的效应较其他处理更明显。

关键词: 水稻; 氮素形态; 水分管理; 光合生理; 氮素积累与分配; 籽粒产量

中图分类号: Q945.79

文献标志码: A

Effects of N Forms on Photosynthesis at Flowering and Yield Formation in Wetting-drying Alternation Irrigation

HE Haibing¹, YANG Ru¹, WU Han¹, YOU Cuicui¹,
ZHU Dequan², SHI Qiangqiang¹, WU Liquan^{1*}

(1 College of Agronomy, Anhui Agricultural University, Hefei, 230036, China; 2 School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei, 230036, China)

Abstract: Wetting-drying alternation irrigation, which has a higher grain yield than traditional flooded rice because the water regime is more favorable to yield formation, is considered as an important water-saving cultivation technology in rice plants. In addition, the two different irrigation regimes have significant effects on ratios of ammonia nitrogen and nitrate nitrogen in the root zone, and then could alter the growth and development of rice plants. Therefore, soil water and nitrogen forms could be critical regulatory factors affecting yield formation of rice plants in wetting-drying alternation irrigation. To investigate the interaction effect, we conducted pot experiments in 2016 with cultivar Ningjeng 8 in different water regimes and N forms. In this study, water regimes included traditional flooding irrigation (W₁) and wetting-drying alternation irrigation (W₂), and N forms treatments set three categories; ammonia and nitrate nitrogen ra-

收稿日期: 2017-06-29; 修改稿收到日期: 2017-11-20

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFD0301305, 2016YFD0300505, 2016YFD0300608); 安徽省教育厅自然科学基金(KJ2016A842)

作者简介: 何海兵(1986—), 博士研究生, 讲师, 主要从事水稻节水栽培生理生态研究。E-mail: hhb_agr@ahau.edu.cn

* 通信作者: 武立权, 教授, 硕士生导师, 主要从事水稻高产高效栽培生理生态。E-mail: wlq-001@163.com

tio=0 : 100 (N_1), ammonia and nitrate nitrogen ratio=50 : 50 (N_2), ammonia and nitrate nitrogen ratio=100 : 0 (N_3). The results showed that: (1) the grain yield, yield components, photosynthetic production, harvest index, N harvest index, and nitrogen grain production efficiency in the W_2 treatment are significantly higher than that in the W_1 treatment ($P<0.05$). But slightly lower N content in the W_2 treatment was observed when compared with the W_1 treatment. From the perspective of N forms, grain yield in the N_2 treatment was the greatest, and yield in the N_1 treatment was the minimum among N treatments, which were mainly from a higher matter translocation from sheath to kernel and photosynthetic produce ability during grain filling stage in the N_2 treatment than that in the N_3 and N_1 treatments. The greater N content and N concentration could be an important physiological basis for high photosynthetic ability in the N_2 treatment than the others. The N_1 treatment had the highest N use efficiency, and then followed by the N_2 and N_3 treatments. Moreover, there were significant interaction effects between water regimes and N forms for grain yield, yield components, and harvest index ($P<0.05$). The W_2 treatment coupled N_2 treatment was the optimal combination for yield formation of rice plants.

Key words: rice; N forms; water regime; photosynthetic physiology; accumulation and distribution of N; grain yield

水稻是全球重要的口粮作物,随着消费需求不断增加,水稻产出需保持逐年增长趋势^[1],然而,水资源亏缺正制约着水稻生产,在 2008~2033 年间,仅中国、印度及巴基斯坦等水稻种植国家约有 1 500~2 000 万 hm^2 稻田因缺水而遭受影响^[2]。因此,在节水条件下实现更高产量水平对中国乃至全球水稻安全高效生产都具有重要意义。水稻干湿交替灌溉是一种水资源高效利用与高产并重的栽培模式^[3-4],在节水的情况下,因协调土壤水分和氧气的矛盾,能显著促进根系的生长,有利于光合生产,进而促进产量形成^[4];此外,在干湿交替灌溉下,高产高效形成的机理可能还与吲哚乙酸(IAA)、玉米素(Z)及玉米素核苷(ZR)等激素含量的明显增加有关。IAA 增加可促进细胞伸长和调节核酸参与蛋白质的合成,加快灌浆和同化物向籽粒运输速率,而 Z+ZR 可促进细胞分裂,延缓植株衰老,确保水稻在干湿交替灌溉下处于较高的生长活力^[5-6]。

在干湿交替灌溉条件下,水稻生长季内稻田不定期的经历水层-旱地水分管理制度,干-湿水分管理对土壤中氮素形态有重要的调控作用。一般来说,传统栽培水稻生长在水层条件下,氮素形态以铵态氮为主,即铵态氮是传统水稻的主要氮素来源,但当水稻生长在非淹水层条件后,土壤中的氮素形态逐渐由铵态氮向硝态氮转化,非淹灌水稻田的氮素形态是铵态氮和硝态氮的混合模式^[7]。水培法研究氮素形态水稻苗期生长发育的结果表明,在铵态氮环境增施硝态氮更有利于水稻生长发育^[8-9],其中当铵态氮与硝态氮比例为 1 : 1 时能最大程度发挥水稻的生长潜力,其机理与加快根系生长、促进氮同化

以及促进激素如 CKT 和 IAA 在根系中的合成与分配,并加强激素朝地上部的转运能力等有关^[9]。由此表明,单从氮肥管理体系上讲,传统淹灌下以铵态氮为主的 N 源并不是水稻最优的生长环境,铵态氮与硝态氮的混合使用可能是进一步提高稻田水稻生长的重要途径。在干湿交替灌溉模式下,水稻产量水平的提高可能与氮素形态的改变有关,即干湿交替灌溉对水稻生长发育的调控本质是水分和氮素形态互作调控的结果,但关于该假说的研究目前尚欠缺,因此,本研究拟通过探讨干湿交替灌溉下氮素形态对水稻产量形成的影响及其调控机理,为水稻干湿交替灌溉以及水稻节水高产栽培提供一定的理论依据和指导。

1 材料和方法

1.1 试验设计

盆栽试验于 2016 年在安徽农业大学庐江郭河基地(31°48'N, 117°23' E)进行,试验用土来自于多年种植的稻田土(典型沙壤土),有机质含量 28.76 $mg \cdot kg^{-1}$,碱解氮、有效磷和速效钾含量分别为 62.45、14.66 及 222 $mg \cdot kg^{-1}$,土壤 pH 值为 6.78。

试验以‘宁粳 8 号’为参试水稻品种,设置土壤水分和氮素形态双因素多水平处理。其中,水分因素包括传统淹灌(W_1)和干湿交替灌溉(W_2)2 个处理水平,传统淹灌处理整个生育期内维持 3~5 cm 浅水层,干湿交替灌溉处理当 0~15 cm 土层土壤水势降低到 -25 kPa 时进行补充灌溉至形成 2 cm 浅水层,整个生育期内如此循环,土壤水势用 TDR 张

力计监测。氮素形态因素设置 3 个处理水平($N_1 \sim N_3$), 分别以硝酸钠、硝酸铵和分析纯硫酸铵为肥源施入以调节土壤中的氮素形态, 3 个处理硝态氮: 铵态氮比例(硝铵比)分别为 100 : 0(N_1)、50 : 50(N_2)以及 0 : 100(N_3), 为抑制硝化作用, 各处理均加入氮素用量 5% 的硝化抑制剂双氰胺。

试验采用随机区组设计, 共组成 6 个处理组合(W_1N_1 、 W_1N_2 、 W_1N_3 、 W_2N_1 、 W_2N_2 、 W_2N_3), 每处理组合设置 3 个区组(重复), 每重复下各处理随机摆放 18 盆。钵钵高 35 cm, 直径 20 cm, 为模拟大田环境, 钵底留孔便于水分渗漏, 根据稻田土壤容重精确称装磨碎过筛土 13 kg(土壤装至桶高 30 cm 处, 预留 5 cm 桶高便于水分管理), 装土后桶中保持 1 ~ 2 cm 浅水层, 一直持续到水稻移栽缓苗后进行相应的水分处理。每盆钵施入 N、P、K 分别为 2 g、1 g 和 2.4 g。氮肥运筹的基肥 : 穗肥比例为 5 : 5, 50% 氮肥和所有磷钾肥拌匀至细土后装桶, 剩余 50% 氮肥在水稻倒 4 叶期按 $5\text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 浓度施入土壤中。所有处理于同一天移栽, 每盆移栽 2 株, 生长过程中人工除草, 病虫害防治参照大田管理; 盆钵置于温室大棚内, 非降雨时期, 大棚完全敞开, 水稻生长环境同外界, 降雨时及时覆盖, 阻止雨水进入。

1.2 测定指标与方法

1.2.1 干物质、叶面积以及物质转运量 于水稻开花期和成熟期随机选择生长健壮的稻株 3 盆, 按茎鞘、叶和穗器官分装, 其中花期叶片用便携式叶面积仪 Li-3000C 扫描获取每盆稻株叶面积, 扫描后同茎鞘和穗器官均置于 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘箱杀青 30 min, 后 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干并称重。花前累积于茎鞘器官的碳水化合物朝籽粒的转运情况用物质转运量来衡量。物质转运量($\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$) = 开花期茎鞘生物量 - 成熟期茎鞘生物量。

1.2.2 全氮含量 测定同物质累积同步, 对开花期和成熟期烘干的各器官进行氮素浓度的测定($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$), 氮素浓度测定采用凯氏定氮法, 最后通过器官氮素浓度($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)乘以对应器官的生物量($\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$)折算各器官的氮素含量($\text{mg} \cdot \text{pot}^{-1}$), 全株(每盆钵)氮素积累量为各器官含量之和。

1.2.3 光合气体交换参数 使用 Li-6400 便携式光合作用系统自带 6400-02LED 红/蓝光源叶室, 于开花期测定水稻剑叶的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间二氧化碳浓度, 测定时间为上午 9:00 ~ 11:30 间, 测定时 CO_2 浓度通过气体缓冲瓶与外界

保持一致, 测定光强为 $1\ 200\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 湿度与环境湿度一致, 每处理随机选 5 片剑叶测定。

1.2.4 产量及其构成因子 成熟期各处理在每个区组内随机选取 6 盆用于穗数、穗粒数、千粒重和结实率的调查计算, 并把各盆钵内的植株脱粒称重测产。

1.2.5 收获指数及氮素生产效率 根据以上测定结果计算收获指数及氮素生产效率, 相关公式如下:

收获指数 = 成熟期盆钵收获籽粒重量 / 盆钵总生物量

氮收获指数 = 成熟期盆钵植株籽粒氮积累量 / 盆钵全株氮积累量

氮素干物质生产效率($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) = 成熟期盆钵植株干物质积累量 / 盆钵稻株氮积累量

氮素籽粒生产效率($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) = 成熟期盆钵籽粒重量 / 盆钵稻株氮积累量

1.3 数据统计分析

数据用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS16.0 软件进行处理和分析, 利用一般线性模型(GLM)进行方差分析, 数据多重比较采用 LSD 方法, 用 Origin8.0 软件做图。

2 结果与分析

2.1 土壤水分和氮素形态对水稻产量及其构成因子的影响

土壤水分和氮素形态均对水稻产量及其构成因子具有显著的调控效应(表 1)。在相同氮素形态处理下, 干湿交替灌溉(W_2)处理水稻产量及其构成因子均显著高于传统淹灌(W_1)处理($P < 0.05$)。在相同土壤水分条件下, 产量水平在各氮素处理中以 N_2 (硝铵比 50 : 50)最高($38.48 \sim 40.51\text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$), 分别高出 N_3 (硝铵比 0 : 100)和 N_1 (硝铵比 100 : 0)处理 0.7% ~ 4.08% 和 12.34% ~ 15.85%; 千粒重和结实率在各氮素处理间的差异较小; 穗数和穗粒数在各氮素处理间的差异较大, 并以 N_2 处理最大, N_1 处理最小, 两者在处理间的变化范围分别达到 22.65% ~ 25.21% 和 11.34% ~ 12.57%(表 1)。同时, 方差分析表明, 土壤水分和氮素形态对产量及其构成因子表现出显著的互作效应, 且 W_2 水分管理耦合 N_2 氮素形态处理较其他处理表现出更高的产量水平(表 1)。

2.2 土壤水分和氮素形态对植株高度、叶面积、物质累积及其转运量的影响

在相同氮素形态处理下, W_2 处理较 W_1 处理表

现出更高的株高和物质转运量,但其花期干物质累积量和叶面积却低于 W₁ 处理;在相同水分条件下,各处理以上生长参数始终以 N₂ 处理最高,显著高于 N₃ 和 N₁ 处理($P<0.05$),特别是 N₂ 处理的物质转运量分别是 N₁ 和 N₃ 处理的 2.91~7.52 倍和 2.65~2.91 倍(表 2)。

2.3 土壤水分和氮素形态对花期光合生理特征的影响

水稻花期光合生理参数净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾系数(T_r)和胞间二氧化碳浓度(C_i)在水分处理间的差异明显小于氮素形态处理;总体来说,除 N₃ 处理的 P_n 参数外,W₁ 处理水稻花期 P_n 、 G_s 、 C_i 和 T_r 参数不同程度的低于 W₂ 处理,其中的 P_n 、 C_i 和 T_r 在 W₁ 和 W₂ 处理间的差异较小,而 W₂ 处理的 G_s 则显著高于 W₁ 处理(图 1)。在相同水分条件下,水稻 C_i 和 G_s 值在氮素形态处理间的差异不显著($P>0.05$),但 P_n 和 T_r 值在处理间的差异达显著水平($P<0.05$),并表现为 N₂ 处理最

大,N₃ 处理次之,N₁ 处理最小;特别对于 T_r 参数而言,N₂ 处理较 N₃ 和 N₁ 处理分别显著高出 13.99%~16.59%、28.21%~28.51%(图 1)。

2.4 土壤水分和氮素形态对氮素在水稻各器官累积与分配的影响

水稻各处理器官 N 含量在开花期以叶片最高,穗部最低,但到成熟期却以穗部最高,而叶片最低,总氮含量表现为成熟期明显高于开花期(表 3)。在相同氮素形态处理下,各器官总 N 含量在开花期均表现为 W₁ 处理高于 W₂ 处理,而在成熟期却总体表现为 W₂ 处理明显高于 W₁ 处理。对氮素形态处理而言,各器官总含氮量在花期表现为 N₂ 处理显著高于 N₃ 和 N₁ 处理($P<0.05$),其中差异主要来自于穗部器官和叶器官(穗部和叶片器官 N 含量在处理间的差异分别为 19.45%~56.75%和 12.09%~39.63%);至开花期,各器官总含氮量以 N₃ 处理最大,而 N₁ 处理最低,差异仍以穗叶器官最大,穗器官在处理间的差异为 2.01%~21.39%,叶器官在

表 1 不同土壤水分和氮素形态下水稻籽粒产量及其构成因子的变化
Table 1 Grain yield and its components of rice with different water and nitrogen form treatments

处理 Treatment	有效穗数 Effective panicles (/No·pot ⁻¹)	穗粒数 Spikelets per panicle	千粒重 1000-grain weight /g	结实率 Filled grain /%	产量 Grain yield (/g·pot ⁻¹)
W ₁ N ₁	16.42c±0.85	94.51d±3.12	26.40d±0.33	86.59c±1.34	32.38c±3.57
W ₁ N ₂	21.23ab±1.33	113.74b±5.46	26.70c±0.51	90.23b±1.18	38.48ab±1.21
W ₁ N ₃	19.95b±1.12	100.63c±2.78	27.30bc±0.14	94.29ab±5.25	36.91b±2.13
W ₂ N ₁	17.54c±1.06	100.81c±4.51	28.07ab±0.63	91.82b±3.13	35.58b±2.02
W ₂ N ₂	23.45a±2.13	129.87a±3.44	29.67a±1.01	97.29a±1.43	40.51a±1.78
W ₂ N ₃	21.22ab±0.56	111.91b±5.15	27.67b±0.25	97.16a±0.89	40.24a±2.46

注:同列不同小写字母表示处理间在 5%水平存在显著性差异;下同
Note: The different normal letters within the same column indicate significant difference among treatments at 0.05 level;The same as below

表 2 水稻籽粒灌浆期不同土壤水分和氮素形态下株高、花期物质累积、叶面积及茎鞘物质表观转运量

Table 2 Plant height, accumulated dry matter and leaf area observed at flowering stage, and apparent matter translocation from sheath to kernel during grain filling stage in different water and nitrogen form treatments

处理 Treatment	株高 Plant height /cm	干物质积累量 Accumulated dry matter /(g·pot ⁻¹)	叶面积 Leaf area /(cm ² ·pot ⁻¹)	物质表观转运量 Matter translocation /(g·pot ⁻¹)
W ₁ N ₁	80.10c±2.93	51.94c±2.32	4388.01c±28.62	2.42e±0.32
W ₁ N ₂	85.65a±2.74	66.32a±4.62	5331.51a±62.26	7.04b±0.35
W ₁ N ₃	82.45b±2.79	55.81bc±1.41	4897.63b±4.76	3.12d±0.17
W ₂ N ₁	79.17c±1.68	43.81d±2.37	3616.22d±38.18	1.49e±0.45
W ₂ N ₂	87.35a±3.29	60.12ab±3.86	5320.18a±139.18	11.2a±0.58
W ₂ N ₃	84.10ab±3.79	55.52b±3.75	4371.39c±329.29	4.22c±0.49

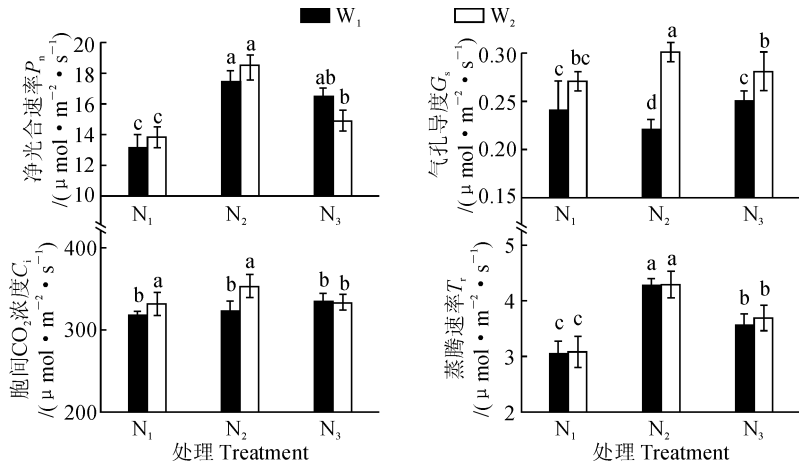


图 1 不同土壤水分和氮素形态下水稻光合生理特征参数

Fig.1 Photosynthetic characteristics of rice in different water and nitrogen form treatments

表 3 水稻开花期和成熟期不同土壤水分和氮素形态下各器官氮素累积与分配特性

Table 3 Accumulated and distributed characteristics of N in leaf, stem-sheath, and panicle organs of rice at flowering stage and maturity stages in different water and nitrogen form treatments

处理 Treatment	开花期 Flowering stage/(mg · pot ⁻¹)				成熟期 Maturity stage/(mg · pot ⁻¹)			
	茎鞘 Stem	叶 Leaf	穗 Panicle	总氮含量 Total	茎鞘 Stem	叶 Leaf	穗 Panicle	总氮含量 Total
W ₁ N ₁	407.81d±6.54	631.89c±42.14	13.42d±0.89	1054.65d±28.45	268.23b±6.58	250.17e±10.42	1146.13d±20.41	1666.78d±31.86
W ₁ N ₂	479.91c±10.17	830.89a±16.73	37.12ab±4.33	1348.23a±16.74	264.78b±4.73	284.35cd±13.43	1456.58b±26.44	2002.74c±60.41
W ₁ N ₃	514.93b±17.63	748.61b±10.96	24.57c±2.19	1289.45b±9.67	327.89a±10.24	570.41a±25.36	1458.84b±18.93	2361.11a±58.95
W ₂ N ₁	362.47e±20.14	453.68d±22.61	15.27d±3.67	832.14e±17.84	241.44c±9.49	265.36de±10.62	1286.13c±51.44	1795.03d±40.48
W ₂ N ₂	499.26bc±15.68	757.59b±21.43	43.75a±5.48	1299.15b±24.31	227.16c±15.46	294.78c±13.45	1634.94a±60.78	2157.12bc±81.44
W ₂ N ₃	559.82a±9.89	650.23c±16.95	35.24b±1.42	1247.31c±14.35	316.18a±21.31	388.15b±10.88	1602.25a±110.41	2307.42ab±104.16

处理间的差异为 10.18%~56.14%。

从 N 素在各器官的浓度分配情况来看,生育期间比较,茎鞘和叶片的 N 浓度表现为开花期明显高于成熟期,但穗部的 N 浓度则为开花期显著低于成熟期($P<0.05$);器官间相比较,开花期表现为叶片 N 浓度大幅高于茎鞘和穗器官,而成熟期穗部 N 浓度则明显高于叶片和茎鞘器官(图 2)。此外,除成熟期叶片 N 浓度在水分处理间差异较大外,无论成熟期还是开花期,其余各器官 N 浓度在水分处理间的差异均较小;对 N 形态处理而言,各器官 N 浓度始终以 N₃ 处理最高,其次依次为 N₂ 和 N₁ 处理(图 2)。

2.5 土壤水分和氮素形态对水稻收获指数及氮素利用的影响

表 4 显示,在相同水分条件下,N₂ 处理水稻收获指数(0.45~0.54)显著高于 N₃ 和 N₁ 处理 8.89%~14.81%和 22.22%~25.93%,且其氮素收获指数在处理间也表现出相似的 N₂>N₃>N₁ 趋势,且处理间差异达显著水平($P<0.05$);对于氮素干物质生产效率和氮素籽粒生产效率参数,N₁ 处理最高,其后依次分别为 N₂ 和 N₃ 处理。总体来说,

W₂ 处理较 W₁ 处理表现出较高的收获指数、氮素收获指数、氮素干物质生产效率和氮素籽粒生产效率,且水分处理和氮素处理对收获指数有显著的互作效应($P<0.05$)。

3 讨论

在农田生态系统中,水分和养分之间及作物与水肥间相互促进与拮抗的动态关系,以及作物生长发育和产量的形成对这些相互作用的反应叫做水肥耦合效应。N 素是除 C、H、O 外第 4 大主要元素,在植物体中氮素含量约占总干重的 1.5%~5%,因此,水-氮耦合效应的研究一直是大田作物实现高产高效的关注热点^[10]。对水稻而言,水-氮耦合效应中水因子常指因不同栽培模式如淹灌栽培或非淹灌栽培所引起根层中水分含量的改变,氮因子常指施氮量^[11-13]。相关研究表明:发挥水氮互促效应能显著提高氮素在作物体内的累积及向籽粒的转运能力^[14-15],促进叶面积和地上部物质累积、优化光在冠层分布^[16]、开花后叶片氮代谢的关键酶活性^[13]以及花后籽粒的充实和灌浆能力^[17],最终显著提升

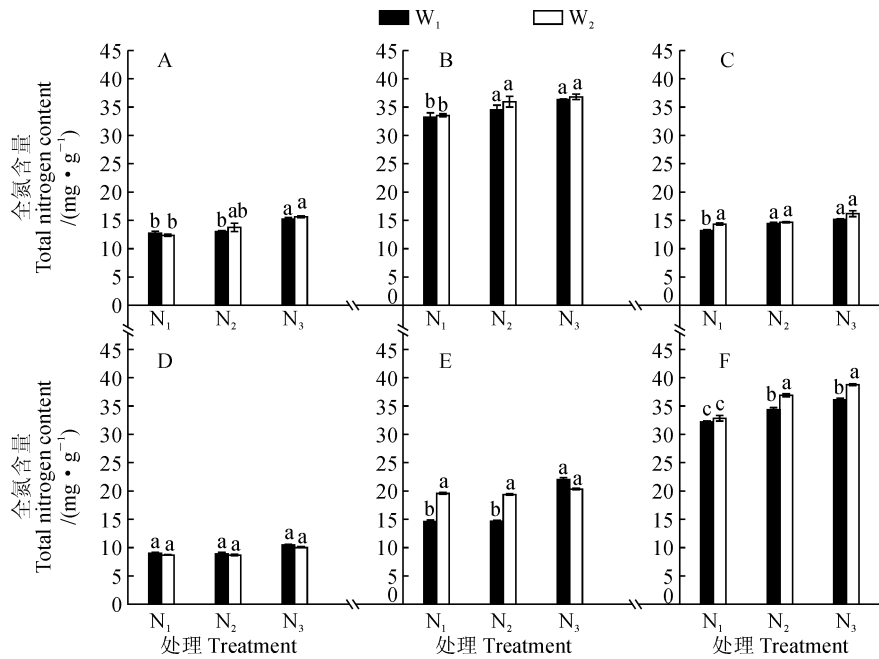


图 2 水稻开花期(A~C)和成熟期(D~F)不同土壤水分和氮素形态下各器官的氮素含量
A,D. Stem;B,E. Leaf;C,F. Panicle

Fig. 2 N content in leaf, stem-sheath, and panicle organs of rice during flowering stage(A—C) and maturity stage(D—F) in different water and nitrogen form treatments

表 4 不同土壤水分和氮素形态下水稻收获指数以及氮素生产效率

处理 Treatment	收获指数 Harvest index	氮素收获指数 N harvest index	氮素干物质生产效率 NDMPE(g · g ⁻¹)	氮素籽粒生产效率 NGPE(g · g ⁻¹)
W ₁ N ₁	0.35d±0.01	0.33c±0.02	55.51a±4.16	19.43a±0.68
W ₁ N ₂	0.45b±0.02	0.41a±0.01	42.69b±5.01	19.22a±0.41
W ₁ N ₃	0.41c±0.01	0.37b±0.01	38.13c±2.77	15.63c±1.02
W ₂ N ₁	0.40c±0.02	0.38b±0.02	50.57a±6.89	20.22a±1.23
W ₂ N ₂	0.54a±0.01	0.42a±0.01	37.55c±4.33	18.65ab±0.65
W ₂ N ₃	0.46b±0.03	0.38b±0.01	35.34c±3.64	16.26b±1.67

水稻的产量水平和水氮利用效率^[13,15]。在水氮耦合条件下,当水稻栽培环境由淹灌变为非淹灌后,土壤中的氧分压增加,溶氧能力增强,土壤好氧微生物加快生长,促进土层中发生硝化反应^[17],最终结果表现为非淹水栽培条件下 NO₃⁻-N 浓度增加。当水稻生长环境完全处于旱地栽培条件下时,土壤中的氮素形态甚至以 NO₃⁻-N 为主^[7]。因此,水氮耦合对水稻生长发育的调控机制可能与根际/非根际氮素形态的改变有关,本研究结果证实,无论在淹水灌溉条件下,还是在干湿交替灌溉下,铵硝态氮混合使用较单一使用铵态氮及硝态氮更有利于水稻产量形成;水稻生长对氮素形态的这一响应特性与其他

作物如油菜、冬小麦、大豆、莴笋等相似^[18-19],其高产形成的主要机理是促进水稻花前累积物质朝籽粒的转运,提高了灌浆期光合生产潜力,其中光合生产能力的提高与叶片 N 浓度显著提升密切相关^[20]。此外,N₂ 氮素形态处理促使高产实现背景下,其对稻米品质特征的调控效应尚需进一步研究,以此探明土壤水分和氮素形态耦合对水稻产量和质量的协同调控效应及其机理。

同时,从本试验水稻穗部 N 素累积情况来看,N₃ 和 N₂ 处理表现出较高的累积量。穗部的 N 素一部分来自于灌浆期间根系的吸收,另一部分来自于茎鞘及叶片 N 素朝籽粒的转运^[10]。虽然 N₂ 处

理的茎鞘和叶器官氮肥转运量均明显高于 N_3 和 N_1 处理,但最终穗部氮素累计量在 N_2 和 N_3 间差异不显著($P>0.05$),这是否意味着 N_3 处理在灌浆期表现出更高的根系吸收能力,以此弥补转运量的不足;或是 N_2 处理在灌浆期间可能因叶片中 NH_4^+-N 浓度显著增加,在谷草转氨酶催化作用下,叶片中 NH_4^+-N 以 NH_3 的形式挥发损失^[21-22],进而增加了 N_2 处理的 N 素损失率,最终 N_2 处理相对于 N_3 处理表现出相对较低的氮素利用效率,但关于该推测需后续试验系统研究验证。

节水栽培一直是水稻高效栽培研究重点,但在节水栽培条件下,常遭受产量降低的风险^[23-24],其中蒸腾受限(特别是生殖生长阶段)是作物生长和产量降低的重要生理因子^[25]。本研究表明, N_2 处理表现出更高的蒸腾速率,结果对于未来提高节水栽培水稻的生产潜力具有一定的指导意义和参考价值。此外,氮素形态对水稻的蒸腾作用具有明显的调控效应可能与根区土壤氮素形态的改变引起根系

对水分的吸收能力有关。一般来说,铵态氮营养处理水稻根系较硝态氮营养表现出更高的吸水能力^[26],水培条件下的研究结果表明,水稻苗期在硝态氮为主的营养液中水分吸收量明显低于铵态氮为主或硝铵态氮混合溶液,硝铵态氮混合营养液被视为提高作物吸水和抗旱能力的优化氮素供应模式,其水稻吸水和抗性增强的一个重要途径是加强了细胞-细胞水分吸收过程^[27-28]。蒸腾作用除受根系吸水能力制约外,叶片导水能力也对其产生显著影响,叶片解剖结构如叶片厚度、气孔密度、叶脉密度、维管束内栅栏组织和海绵组织等参数是衡量水分潜在蒸腾能力的指标^[29],当叶片的导水能力增加(受限)时,会反馈根系的吸水过程并促进(下调)其吸水能力,进而共同决定蒸腾速率^[30]。由此可见,N 素形态对蒸腾速率的调控实质为根叶吸水和导水能力协同作用调控结果。那么,根系吸水和叶片导水能力如何高效发挥协调作用从而调控蒸腾速率尚待进一步研究。

参考文献:

[1] KUMAR V, LADHA JK. Direct seeding of rice. Recent developments and future research needs[J]. *Advances in Agronomy*, 2010, 111: 297-413.

[2] MARRIS E. Water: More crop per drop[J]. *Nature*, 2008, 452: 273-277.

[3] ZHANG Z C, YANG J C, ZHANG J H, *et al.* Yield, grain quality and water use efficiency of rice under non-flooded mulching cultivation[J]. *Field Crops Research*, 2008, 108, 71-81.

[4] CHU G, YANG J C, ZHANG J H, *et al.* Morphological and physiological traits of roots and their relationships with water productivity in water-saving and drought-resistant rice[J]. *Field Crops Research*, 2014, 162: 108-119.

[5] 张自常,李鸿伟,杨建昌,等. 畦沟灌溉和干湿交替灌溉对水稻产量与品质的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(24): 4 988-4 998.

ZHANG Z C, LI H W, YANG J C, *et al.* Effect of furrow irrigation and alternate wetting and drying irrigation on grain yield and quality of rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(24): 4 988-4 998.

[6] 张自常,李鸿伟,杨建昌,等. 施氮量和灌溉方式的交互作用对水稻产量和品质影响[J]. 作物学报, 2013, 39(1): 84-92.

ZHANG Z C, LI H W, YANG J C, *et al.* Effect of interaction between nitrogen rate and irrigation regime on grain yield and quality of rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(1): 84-92.

[7] ZHU Q C, WEI C Z, LI M L, *et al.* Nutrient availability in the rhizosphere of rice grown with plastic film mulch and drip irrigation[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2013, 13(4): 943-953.

[8] 段英华,张亚丽,沈其荣. 水稻根际的硝化作用与水稻的硝态氮营养[J]. 土壤学报, 2004, 41(5): 803-809.

DUAN Y H, ZHANG Y L, SHEN Q R. Nitrification in rice rhizosphere and the nitrate nutrition of rice[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(5): 803-809.

[9] LI S X, WANG Z H, STEWART B A. Responses of crop plants to ammonium and nitrate N[J]. *Advances in Agronomy*, 2013, 118: 205-396.

[10] 何海兵,杨茹,武立权,等. 水分和氮肥管理对灌溉水稻优质高产高效调控机制的研究进展[J]. 中国农业科学, 2016, 49(2):305-318.

HE H B, YANG R, WU L Q, *et al.* Research advance of high-yielding and high efficiency in resource use and improving grain quality of rice plants under water and nitrogen managements in an irrigated region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(2):305-318.

[11] 杨建昌,王志琴,朱庆森. 不同土壤水分状况下氮素营养对水稻产量的影响及其生理机制的研究[J]. 中国农业科学, 1996, 29(4):58-66.

YANG J C, WANG Z Q, ZHU Q S. Effect of nitrogen nutrition on rice yield and its physiological mechanism under different status of soil moisture[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1996, 29(4):58-66.

[12] 王绍华,曹卫星,丁艳锋,等. 水氮互作对水稻氮吸收与利用的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37:497-501.

WANG S H, CAO W X, DING Y F, *et al.* Interactions of water management and nitrogen fertilizer on nitrogen absorption and utilization in rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37: 497-501.

[13] 孙永健,孙园园,马均,等. 水分管理和氮肥运筹对水稻养

- 分吸收、转运及分配的影响[J]. 作物学报, 2011, 37: 2 221-2 232.
- SUN Y J, SUN Y Y, MA J, *et al.* Effects of water management and nitrogen application strategies on nutrient absorption, transfer, and distribution in rice[J]. *Aata Agronomica Sinica*, 2011, 37: 2 221-2 232.
- [14] 孙永健, 孙园园, 马 均, 等. 水氮管理模式与磷钾肥配施对杂交水稻冈优 725 养分吸收的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(7): 1 335-1 346.
- SUN Y J, SUN Y Y, MA J, *et al.* Effects of water-nitrogen management patterns and combined application of phosphorus and potassium fertilizers on nutrient absorption of hybrid rice Gangyou 725[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(7): 1 335-1 346.
- [15] 孙永健, 孙园园, 马 均, 等. 水氮管理模式对不同氮效率水稻氮素利用特性及产量的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(9): 1-11.
- SUN Y J, SUN Y Y, MA J, *et al.* Effects of water-nitrogen management patterns on nitrogen utilization characteristics and yield in rice cultivars with different nitrogen use efficiencies[J]. *Aata Agronomica Sinica*, 2014, 40(9): 1-11.
- [16] 孙永健, 孙园园, 马 均, 等. 水氮互作对水稻氮磷钾吸收、转运及分配的影响[J]. 作物学报, 2010, 36(4): 655-664.
- SUN Y J, SUN Y Y, MA J, *et al.* Effects of water-nitrogen interaction on absorption, translocation and distribution of nitrogen, phosphorus, and potassium in rice[J]. *Aata Agronomica Sinica*, 2010, 36(4): 655-664.
- [17] 李俊周, 李 磊, 孙传范, 等. 水氮互作对水稻籽粒充实及产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(3): 42-47.
- LI J Z, LI L, SUN C F, *et al.* Effects of water-nitrogen interaction on rice grain plumpness and yield[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2011, 16(3): 42-47.
- [18] 田霄鸿, 李生秀, 王朝辉. 冬小麦等 4 种作物对铵、硝态氮的吸收能力[J]. 西北植物学报, 2000, 20(1): 29-37.
- TIAN X H, LI S X, WANG C H. Uptake capacity of ammonium and nitrate to several crops[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2000, 20(1): 29-37.
- [19] 王 晋, 周相助, 钟凤林, 等. 硝态和铵态氮配比对水培油菜苗期生长及生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2016, 36(3): 542-550.
- WANG J, ZHOU X Z, ZHONG F L, *et al.* Effect of nitrogen forms on the growth and physiological characteristics of *Lactuca sativa* L. seedlings[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2016, 36(3): 542-550.
- [20] MAE T. Physiological nitrogen efficiency in rice: nitrogen utilization, photosynthesis, and yield potential [C]. // Proceedings of the XIII International Plant Nutrition Colloquium. Plant Nutrition For Sustainable Food Production and Environment, Springer, Amsterdam, The Netherlands, 1997: 51-60.
- [21] 陈 刚, 徐阳春, 沈其荣. 施氮水平对水稻生育后期地上部氮挥发的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(7): 1 483-1 488.
- CHEN G, XU Y C, SHEN Q R. Effects of N fertilization levels on ammonia volatilization from rice shoot at later growth stages[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(7): 1 483-1 488.
- [22] 王巧兰, 吴礼树, 赵竹青, 等. 氮水平对水稻植株氮素损失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1): 14-19.
- WANG Q L, WU L S, ZHAO Z Q, *et al.* Effects of nitrogen rate on nitrogen loss from rice plant tissue[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(1): 14-19.
- [23] KATO Y, OKAMI M. Root morphology, hydraulic conductivity and plant water relations of high-yielding rice grown under aerobic conditions[J]. *Annals of Botany*, 2011, 108: 575-583.
- [24] KADIYALA M D M, MYLAVARAPU R S, LI Y C. Impact of aerobic rice cultivation on growth, yield, water productivity of rice maize rotation in semiarid tropics[J]. *Agronomy Journal*, 2012, 6: 1 757-1 765.
- [25] 何海兵, 武立权, 马富裕, 等. 干旱区控制灌溉下水稻光合特性与蒸腾效率研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47: 186-193.
- HE H B, WU L Q, MA F Y, *et al.* Photosynthesis characteristics and transpiration efficiency of rice plants under controlled irrigation technology in arid region[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47: 186-193.
- [26] 李 勇, 周 毅, 沈其荣, 等. 铵态氮和硝态氮营养对水、旱稻根系形态及水分吸收的影响[J]. 中国水稻科学, 2007, 21(3): 294-298.
- LI Y, ZHOU Y, SHEN Q R, *et al.* Effects of different N forms on root morphology and water absorption of lowland and upland rice plants[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2007, 21(3): 294-298.
- [27] 吴 芳, 高迎旭, 沈其荣, 等. 氮素形态及水分胁迫对水稻根系生理特性的影响[J]. 南京农业大学学报, 2008, 31(1): 63-66.
- WU F, GAO Y X, SHEN Q R, *et al.* Effects of nitrogen form and water stress on root physiological characteristics of rice plants[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2008, 31(1): 63-66.
- [28] 柏彦超, 钱晓晴, 周雄飞, 等. 不同氮素形态和水分胁迫对水稻水分吸收及光合特性的影响[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2010, 31(3): 50-54.
- BAI Y C, QIAN X Q, ZHOU X F, *et al.* Effect of nitrogen form and water stress on photosynthetic characteristics and water uptake in rice[J]. *Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition)*, 2010, 31(3): 50-54.
- [29] SACK L, HOLBROOK M. Leaf hydraulics[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2006, 57: 361-381.
- [30] BRODRIBB T J, HOLLOWAY-PHILLIPS M, BRAMLEY H. Improving water transport for carbon gain in crops [M]. // SADRAS V O AND CALDERINI D F. Crop Physiology: Applications for Genetic Improvement and Agronomy (second edition). USA: Academic press publications, 2014.

(编辑:裴阿卫)