

# 灌溉模式与施氮量交互作用对水稻产量以及水、氮利用效率的影响

褚光<sup>#</sup> 陈婷婷<sup>#</sup> 陈松 徐春梅 王丹英 章秀福<sup>\*</sup>

(中国水稻研究所 水稻生物学国家重点实验室, 杭州 311400; <sup>#</sup>共同第一作者; <sup>\*</sup>通讯联系人, E-mail: zhangxf169@sohu.com)

## Effects of Interaction Between Irrigation Regimes and Nitrogen Rates on Rice Yield and Water and Nitrogen Use Efficiencies

CHU Guang<sup>#</sup>, CHEN Tingting<sup>#</sup>, CHEN Song, XU Chunmei, WANG Danying, ZHANG Xiufu<sup>\*</sup>

(State Key Laboratory of Rice Biology, China National Rice Research Institute, Hangzhou 311400, China; <sup>#</sup>These authors contributed equally to this work;

<sup>\*</sup>Corresponding author, E-mail: zhangxf169@sohu.com)

**Abstract:** 【Objective】In order to lay a scientific basis for high yield and high water and nitrogen use efficiencies in rice production, we estimated the effects of the interaction between the alternate wetting and drying (AWD) regime and different nitrogen rates on grain yield, water and nitrogen use efficiencies. 【Method】The field experiments were conducted with two irrigation regimes, AWD and conventional irrigation (CI) and three N rates, 80 (low amount, LN), 160 (medium amount, MN) and 240 kg/hm<sup>2</sup> (high amount, HN) in Fuyang, Zhejiang Province in 2015 and 2016. The local high-yielding rice cultivar Tianyouhuazhan (three-line *indica* hybrid combination) was used as experimental material. 【Result】There was an obvious interaction between irrigation regimes and N rates. When compared with CI regime, AWD could reduce redundant vegetative growth and control the number of rice tillers, improve the percentage of productive tillers by 8.1%–10.7%; increase the leaf area duration (LAD) and crop growth rate (CGR) from heading to maturity; increase root dry weight at a depth of 10–20 cm at heading by 24.4%–32.3%, and the root oxidation activity (ROA) during the re-watering period after heading; AWD could promote the remobilization of non-structural carbohydrates (NSC) in culms and sheaths for grain filling. The grain yield, water and nitrogen use efficiencies were the highest in the combination of AWD and MN due to the improved population quality and grain filling, and the combination of AWD and MN was the best water-nitrogen management model in this study. 【Conclusion】The aim of high grain yield and high water and nitrogen use efficiencies could be achieved through integrating AWD with the medium amount of nitrogen application in rice production.

**Key words:** rice; yield; water use efficiency; nitrogen use efficiency; interaction between nitrogen rates and irrigation regimes

**摘 要:** 【目的】研究不同水、氮管理模式对水稻产量以及水、氮利用效率的影响, 以为水稻高产与水、氮高效利用提供理论依据和技术参考。【方法】大田试验于 2015–2016 年在浙江富阳进行, 供试品种为三系籼型杂交稻天优华占。设置常规灌溉(CI)和干湿交替灌溉(AWD)两种灌溉模式, 同时设置低氮(LN, 80 kg/hm<sup>2</sup>)、中氮(MN, 160 kg/hm<sup>2</sup>)和高氮(HN, 240 kg/hm<sup>2</sup>)3 种施氮水平。【结果】灌溉模式与施氮量对水稻产量以及水、氮利用效率有显著互作效应。与 CI 相比, AWD 抑制无效分蘖, 分蘖成穗率提高 8.1%~10.7%; 提高抽穗期至成熟期的光合势(LAD)与群体生长率(CGR); 促进根系下扎, 10~20 cm 根层根系生物量增加了 24.4%~32.3%, 同时提高了结实期根系活性; 促使茎鞘中非结构性碳水化合物(NSC)向籽粒中运转; 且 AWD 在 160 kg/hm<sup>2</sup>(中氮)施氮水平下可显著提高产量与水、氮利用效率, 为本研究最佳的水、氮运筹模式。【结论】通过适宜的水、氮运筹可充分发挥其互作效应, 提高水稻产量与水、氮利用效率。

**关键词:** 水稻; 产量; 水分利用率; 氮肥利用效率; 水氮互作

中图分类号: S143.1; S511.06

文献标识码: A

文章编号: 1001-7216(2017)05-0513-11

收稿日期: 2017-04-28; 修改稿收到日期: 2017-06-10。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31501264, 31371581, 31671638); 国家重点研发项目(2016YFD0300108, 2016YFD0300507); 浙江省自然科学基金资助项目(LQ15C130003)。

水稻是我国最重要的粮食作物,也是农业用水第一大户,约有70%的农业用水用于稻田灌溉<sup>[1-2]</sup>。随着人口的增长、城镇和工业的发展、全球气候的变化以及环境污染的加重,用于稻田灌溉的水资源愈来愈匮乏,严重威胁水稻生产的发展<sup>[3-4]</sup>。干湿交替灌溉(AWD)被认为是一种行之有效的节水新技术。所谓干湿交替灌溉,是指在水稻生育过程中,在一段时间里保持水层,自然落干至土壤不严重干裂时再灌水,再落干,再灌水,如此循环。然而,目前AWD对水稻产量的影响存在争议<sup>[5]</sup>,有待于进一步深入研究。

氮素是影响水稻产量的另一关键因子,也是构成水稻生产成本投入的重要部分。近年来随着品种改良与氮肥投入的持续增加,我国水稻单产已超过6.6 t/hm<sup>2</sup>,高出世界平均水平55%,这对于我国粮食安全与社会稳定起到了十分重要的作用<sup>[6]</sup>。但目前我国稻田单季氮肥用量平均为185 kg/hm<sup>2</sup>,比世界平均用量高约75%。在施氮较高的太湖稻区,平均单季氮肥用量超过300 kg/hm<sup>2</sup>,氮肥农学利用率(单位施氮量增加的产量)小于12 kg/kg,不足发达国家一半<sup>[7-8]</sup>。过高的氮肥投入,不仅降低了氮肥利用率,还造成一系列不良的环境反应。因此,如何通过合理的氮肥投入与运筹,同步提高水稻产量与氮肥利用效率?这是农业生产中迫切需要研究的课题。

以往有关水、氮的研究多集中在单因子效应上,对于双因子效应的研究较少,且结果存在较大的争议。杨建昌等<sup>[9]</sup>认为,水分管理、施氮量对水稻产量有显著的互作效应;Cabangon等<sup>[10]</sup>则认为水分管理、施氮量对水稻产量、生物量、养分吸收没有显著的交互作用;Sharma等<sup>[11]</sup>认为,在土壤干旱状况下施氮可促进作物对深层土壤水分的利用而增加产量,适宜的水分供应可促进肥料转化及吸收,提高肥料利用率。因此,本研究拟通过控制土壤落干程度,观察灌溉模式与施氮量的交互作用对水稻产量以及水、氮利用效率的影响,旨在补充与完善前人的研究结果,为节水灌溉条件下合理施肥提供理论依据和技术参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试验地基本情况

试验于2015—2016年在浙江省杭州市中国水稻研究所富阳试验基地(30.45°N,119.56°E)进行。供试品种为天优华占(三系杂交籼稻)。试验地土壤

含有机质55.8 g/kg、全氮2.45 g/kg、全磷0.57 g/kg、全钾20.5 g/kg、碱解氮258 mg/kg、铵态氮9.54 mg/kg、速效磷24.9 mg/kg、速效钾59 mg/kg。2年试验均为5月15日播种,6月10日移栽,8月18至21日抽穗,10月1日收获。2015年与2016年稻季降雨量分别为507 mm与659 mm,由靠近试验田的小型气象站自动记录。2年栽插株、行距均为16 cm×25 cm。

自移栽后7 d至成熟,设置2种灌溉模式:1)常规灌溉(CI, conventional irrigation),保持浅水层,中期搁田与收获前一周断水;2)干湿交替灌溉(AWD, alternate wetting and drying irrigation),除移栽至返青田间保持浅水层外,其余时期采用干湿交替灌溉技术,即自浅水层自然落干到土壤水势达-15 kPa时,灌水1~2 cm,再自然落干至土壤水势为-15 kPa,再上浅层水,如此循环。小区面积为7 m×6.5 m,3次重复,完全随机区组排列。在AWD处理小区安装真空表式土壤负压计(中国科学院南京土壤研究所生产),每小区安装4支土壤负压计监测15 cm深处土壤水势。每天12:00记录土壤水势,当读数达到阈值时,灌1~2 cm水层。在进水管安装水表用以监测用水量。每种灌溉方式下设置3种氮肥(尿素)处理,即低氮(LN, 80 kg/hm<sup>2</sup>)、中氮(MN, 160 kg/hm<sup>2</sup>)和高氮(HN, 240 kg/hm<sup>2</sup>),按 $m_{\text{基肥}}:m_{\text{分蘖肥}}:m_{\text{粒肥}}=5:3:2$ 施用。基施过磷酸钙(含P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 13.5%) 445 kg/hm<sup>2</sup>。移栽前1 d和穗分化始期分别施用氯化钾(含K<sub>2</sub>O 62.5%) 60和60 kg/hm<sup>2</sup>。全生育期严格防治病虫害。

### 1.2 取样与测定

#### 1.2.1 叶片水势测定

抽穗后当AWD处理小区土壤水势第一次达到-15 kPa时,从6:00至18:00,每隔2 h采用压力室法测定剑叶水势(Model 3000, 土壤水分仪器公司, 美国),每个处理重复测定6张叶片。

#### 1.2.2 农艺特性测定

于拔节期、抽穗期、成熟期考查每个小区100穴植株的分蘖数,按平均茎蘖数取6穴植株,采用美国LI-COR公司生产的Li-Cor 3100型叶面积仪测定叶面积;随后将植株分解为绿叶、枯叶、茎、鞘和穗(除拔节期),烘干测定干物质量,并用FOSS公司的Kjeltec™8400全自动凯氏定氮仪测定植株含氮量。于抽穗期各小区取6穴稻株,每穴稻株以基部为中心,挖取16 cm×25 cm×20 cm的土块,每个土块被一分为二,切割成上下两部分,每部分土块为16 cm×25 cm×10 cm,分别装于70目的筛

网袋中, 先用流水冲洗, 然后用农用压缩喷雾器将根冲洗干净, 烘干后称干质量。

### 1.2.3 生理特性测定

于抽穗后 AWD 处理小区第一次与第二次土壤水势达到 $-15\text{ kPa}$  当日以及次日复水后, 于 9:00 采用美国 LI-COR 公司生产的 LI-6400 便携式光合测定仪测定稻株最上展开叶的光合速率, 期间天气晴朗无风。叶室  $\text{CO}_2$  浓度为  $380\text{ }\mu\text{mol/mol}$ , 使用红蓝光源, 光量子通量密度(PFD)为  $1400\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ , 温度  $28\sim 30^\circ\text{C}$ , 各处理重复测定 6 张叶片。分别于光合速率测定相同时期, 用上述取根法各小区取 6 穴根系, 用于测定根系氧化力, 具体参照杨建昌等<sup>[9]</sup>方法。将抽穗期和成熟期茎鞘样品烘干后, 采用全自动样品快速研磨仪(Tissuelyser-48, 净信科技, 上海)粉碎后过  $0.15\text{ mm}$  筛, 参照杨建昌等<sup>[12]</sup>方法, 用 80%乙醇和蒸馏水提取(淀粉用高氯酸水解), 用蒽酮法测定茎鞘中的 NSC(可溶性糖与淀粉之和)含量。

### 1.2.4 考种与计产

取成熟期各小区 50 穴考查每穴穗数, 10 穴用于测定结实率(水漂法, 沉入水底者为饱粒)和千粒重。去除边行后, 剩余稻株实收计产。

### 1.3 数据处理

采用以下公式计算相关参数:

光合势(LAD) $[\text{m}^2/(\text{m}^2\cdot\text{d})]=1/2(L_1+L_2)\times(T_2-T_1)$ ,

式中  $L_1$  和  $L_2$  为前后两次测定的叶面积( $\text{m}^2/\text{m}^2$ ),  $T_1$  和  $T_2$  为前后测定的时间(d);

群体生长速率(CGR) $[\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})]= (W_2-W_1)/$

$(T_2-T_1)$ , 式中  $W_1$  和  $W_2$  为前后两次测定的地上部干物质质量( $\text{g}/\text{m}^2$ ),  $T_1$  和  $T_2$  为前后测定的时间(d);

水分利用效率(WUE)( $\text{kg}/\text{m}^3$ )= 稻谷产量/(灌溉用水量+降雨量);

氮肥偏生产力(PFP<sub>N</sub>)( $\text{kg}/\text{kg}$ )= 稻谷产量/施氮量;

产谷利用效率(IE<sub>N</sub>) ( $\text{kg}/\text{kg}$ )=稻谷产量/稻株氮素吸收量;

氮收获指数(HI<sub>N</sub>)=成熟期单位面积植株穗部氮积累量/植株氮素积累总量;

茎鞘中 NSC 的运转率=(抽穗期茎鞘中 NSC 含量-成熟期茎鞘中 NSC 含量)/抽穗期茎鞘中 NSC 含量 $\times 100\%$ ;

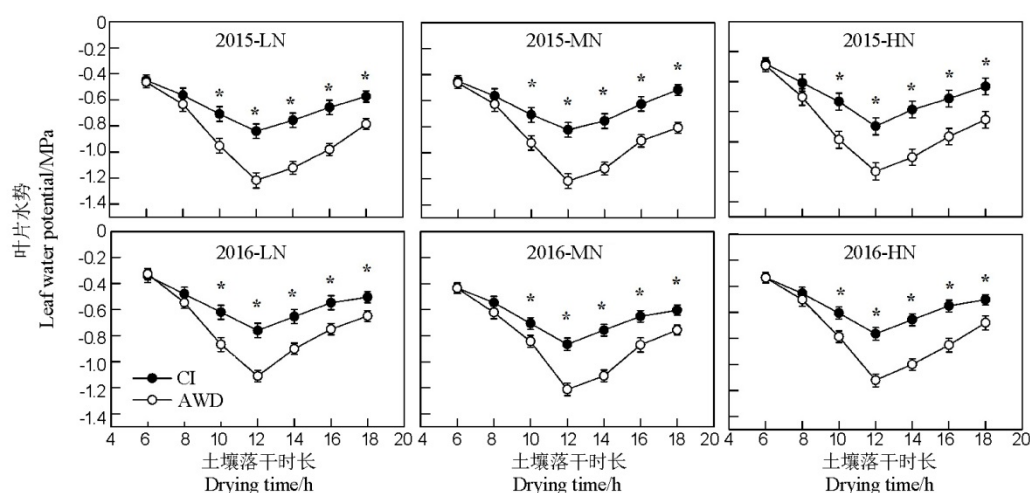
茎鞘中 NSC 对产量的贡献率=(抽穗期茎鞘中 NSC 含量-成熟期茎鞘中 NSC 含量)/ 稻谷产量 $\times 100\%$ ;

采用 Microsoft Excel 2007、SPSS 16.0 和 SAS 统计软件分析试验数据, 用 SigmaPlot 10.0 绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 叶片水势

图 1 是抽穗后当 AWD 小区达到低限水势( $-15\text{ kPa}$ )时, 不同水、氮处理下水稻剑叶水势的日变化。由图可知, 在土壤落干期 AWD 显著降低了午后(12:00—18:00)的剑叶水势, 而 6:00—8:00 叶片水势与 CI 无显著性差异, 表明当土壤低限水势为 $-15\text{ kPa}$  时, AWD 处理植株的水分状况能在夜间恢复到



CI—常规灌溉; AWD—干湿交替灌溉; \*表示差异显著。LN—低氮( $80\text{ kg}/\text{hm}^2$ ); MN—中氮( $160\text{ kg}/\text{hm}^2$ ); HN—高氮( $240\text{ kg}/\text{hm}^2$ )。

CI, Conventional irrigation; AWD, Alternate wetting and drying. \*Significant difference at the 0.05 level compared with CI. LN, Low nitrogen application rate( $80\text{ kg}/\text{hm}^2$ ); MN, Medium nitrogen application rate( $160\text{ kg}/\text{hm}^2$ ); HN, High nitrogen application rate( $240\text{ kg}/\text{hm}^2$ ).

图 1 灌溉模式与施氮量交互作用对水稻叶片水势的影响

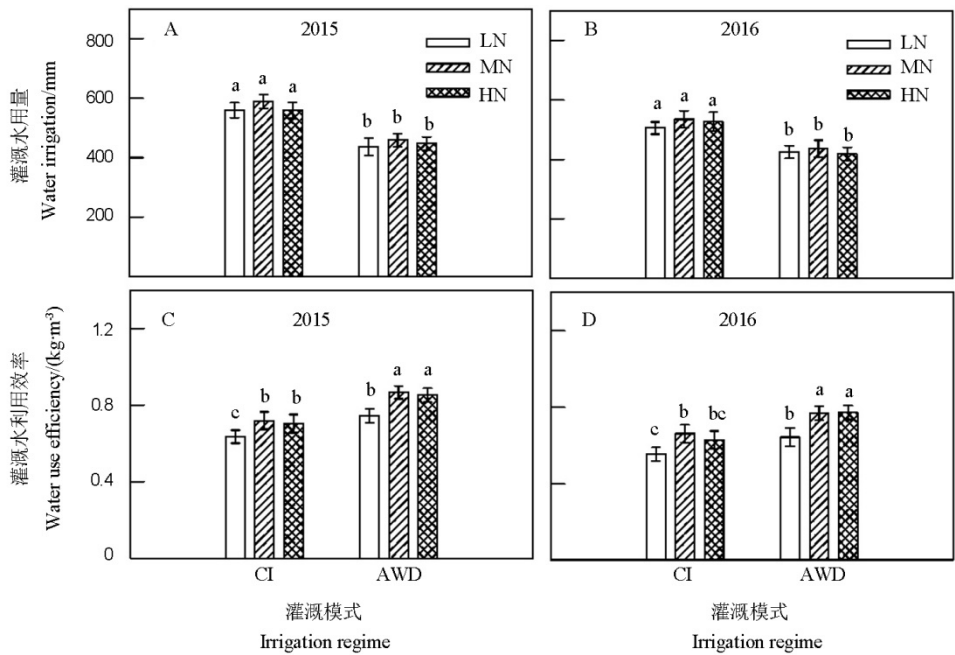
Fig. 1. Effects of the interaction between irrigation regimes and nitrogen rates on diurnal changes in leaf water potentials of rice.

表 1 灌溉模式与施氮量交互作用对水稻产量及其构成因素的影响

Table 1. Effects of interaction between irrigation regimes and nitrogen rates on grain its and its components.

年度与处理	产量	单位面积穗数	每穗粒数	结实率	千粒重
Year and treatment	Grain yield/(t·hm <sup>-2</sup> )	No.of panicles/(×10 <sup>4</sup> hm <sup>-2</sup> )	Spikelets per panicle	Seed setting rate/%	1000-grain weight/g
2015					
CI+LN	7.34±0.22 d	245.4±3.9 b	143.2±2.5 d	82.5±1.0 b	25.4±0.3 a
CI+MN	8.53±0.23 b	284.2±5.5 a	150.8±1.8 c	78.9±1.2 c	25.2±0.2 ab
CI+HN	8.12±0.15 c	286.4±5.3 a	156.2±2.3 b	72.5±1.3 d	25.1±0.2 b
AWD+LN	8.06±0.20 c	243.5±4.1 b	146.3±2.1 d	89.1±1.5 a	25.5±0.2 a
AWD+MN	9.20±0.26 a	279.9±5.5 a	154.9±3.1 b	83.5±1.0 b	25.4±0.2 a
AWD+HN	9.03±0.28 a	282.5±4.9 a	162.4±2.6 a	78.1±1.8 c	25.3±0.2 ab
2016					
CI+LN	7.18±0.12 e	224.4±3.8 b	150.3±2.2 d	84.8±1.0 bc	25.2±0.4 a
CI+MN	8.83±0.20 b	274.2±4.8 a	155.2±2.7 c	82.8±0.8 c	25.1±0.2 a
CI+HN	8.40±0.18 c	272.9±5.2 a	162.3±3.7 ab	75.4±1.5 d	25.2±0.1 a
AWD+LN	7.78±0.24 d	225.3±4.2 b	153.8±4.2 c	88.7±0.9 a	25.3±0.2 a
AWD+MN	9.38±0.21 a	270.8±3.5 a	160.2±1.6 b	85.8±1.1 b	25.2±0.3 a
AWD+HN	9.27±0.29 a	270.5±4.4 a	164.2±2.1 a	83.1±1.4 c	25.2±0.2 a

CI—常规灌溉; AWD—干湿交替灌溉; LN—低氮; MN—中氮; HN—高氮; 同列同年不同字母表示在 0.05 水平上差异显著。下同。  
CI, Conventional irrigation; AWD, Alternate wetting and drying; LN, Low amount of nitrogen; MN, Medium amount of nitrogen; HN, High amount of nitrogen. Different letters within the same column at the same year mean significant difference at the 0.05 level. The same as below.



CI—常规灌溉; AWD—干湿交替灌溉。不同处理间比较, 柱上标不同字母者差异显著。下同。  
CI, Conventional irrigation; AWD, Alternate wetting and drying. Bars subscripted by different letters are significantly different at the 0.05 level between two treatments. The same as below.

图 2 灌溉模式与施氮量交互作用对灌溉用水量(A-B)与水分利用效率(C-D)的影响

Fig. 2. Effects of interaction between irrigation regimes and nitrogen rates on the amount of irrigated water (A-B) and water use efficiency(C-D).

CI 处理的相同水平。

2.2 产量及其构成因素

相同灌溉模式下, MH 与 NH 均较 LN 有不同

程度的增产, 但增产效应因灌溉模式而异。在 CI 下, MN 和 HN 分别较 LN 产量提高了 14.1%~22.9 % 和 10.6%~17.0 %, 且 HN 的产量显著低于 MN, 主

要是由于 MN 处理下结实率较低。在 AWD 下, MH 与 HN 的产量均较 LN 显著增加,增幅为 14.2%~20.5% 和 12.0%~19.2%, 且 MN 与 HN 的产量之间无显著差异(表 1)。在相同施氮水平下, AWD 没有减少单位面积穗数, 但显著提高了每穗颖花数, 以足量大穗形成高库容, 并显著提高了结实率, 有效缓和了库容与结实率的矛盾, 同时也保持了正常的千粒重。

2.3 水、氮利用效率

与 CI 相比, AWD 显著降低了 3 种施氮水平下的灌溉用水量(图 2-A~B), 降幅为 16.0%~22.1%; 并显著提高了 3 种施氮水平下的水分利用效率, 增幅

为 16.3~23.5 % (图 2-C~D), 其中, AWD+HN 组合水分利用效率增幅最大, 为 22.3%~23.5%, 说明高氮肥投入条件下更适合采用干湿交替灌溉技术。

在相同灌溉模式下, 随着施氮量的提高, 植株吸氮量表现为 HN>MN>LN(表 2); 籽粒吸氮量在 CI 下表现为 MN>HN>LN, 而在 AWD 下则表现为 MN 与 HN 显著高于 LN, 且 MN 与 HN 之间无显著性差异; 氮收获指数表现为 MN>LN>HN, 产谷利用效率与氮肥偏生产力均表现为 LN>MN>HN。相同施氮水平下, AWD 显著提高了植株吸氮量、籽粒吸氮量、氮收获指数、产谷利用效率以及氮肥

表 2 灌溉模式与施氮量交互作用对水稻氮肥利用效率的影响

Table 2. Effects of interaction between irrigation regimes and nitrogen rates on nitrogen use efficiency of rice.

年度与处理 Year and Treatment	植株吸氮量 N uptake of plants/(kg·hm <sup>-2</sup> )	籽粒吸氮量 N uptake of grains/(kg·hm <sup>-2</sup> )	产谷利用效率 IE <sub>N</sub> /(kg·kg <sup>-1</sup> )	氮肥偏生产力 PFP <sub>N</sub> /(kg·kg <sup>-1</sup> )	氮收获指数 HI <sub>N</sub> /%
2015					
CI+LN	106.2±4.5 c	66.7±2.2 d	69.5±2.5 b	91.8±3.2 b	63.1±1.1 b
CI+MN	134.8±3.2 b	82.0±1.8 b	63.2±3.3 c	53.3±1.8 d	60.8±0.8 c
CI+HN	140.8±4.7 a	76.1±3.0 c	57.4±1.8 d	33.8±1.9 f	53.8±0.5 d
AWD+LN	109.3±5.1 c	73.7±2.4 c	73.8±2.3 a	100.8±2.1 a	67.5±0.9 a
AWD+MN	132.4±3.0 b	86.0±1.9 a	69.7±3.0 b	57.5±2.5 c	65.1±0.9 ab
AWD+HN	140.2±3.3 a	86.3±1.5 a	64.5±2.8 c	37.6±1.5 e	61.7±1.3 bc
2016					
CI+LN	108.4±4.2 c	66.1±3.2 d	66.7±2.4 bc	89.8±1.8 b	61.8±1.2 bc
CI+MN	136.9±3.4 b	79.4±1.8 b	64.5±2.1 c	55.2±2.2 d	58.0±1.0 c
CI+HN	138.7±2.9 ab	73.1±1.7 c	60.5±1.4 d	35.0±1.6 f	52.6±0.8 d
AWD+LN	110.4±3.3 c	75.0±2.3 bc	70.9±1.7 a	97.2±2.4 a	68.4±0.8 a
AWD+MN	140.2±4.8 ab	88.0±2.4 a	67.2±2.1 b	58.6±1.4 c	63.1±0.9 b
AWD+HN	144.3±3.5 a	87.4±1.9 a	63.5±2.3 c	38.6±1.3 e	60.8±0.7 c

表 3 灌溉模式与施氮量交互作用对水稻分蘖数与分蘖成穗率的影响

Table 3. Effects of interaction between irrigation regimes and nitrogen rates on number of tillers and percentage of productive tillers of rice.

年度与处理 Year and Treatment	分蘖数 Number of tillers per m <sup>2</sup>			分蘖成穗率 Percentage of productive tillers/%
	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading time	成熟期 Maturity	
2015				
CI+LN	289.3±4.8 e	198.4±3.2 b	195.3±2.7 b	67.5±1.0 d
CI+MN	356.2±6.6 b	236.4±2.8 a	234.2±3.6 a	65.8±1.3 d
CI+HN	387.8±6.6 a	237.8±4.2 a	235.8±3.1 a	60.9±3.5 e
AWD+LN	247.3±5.1 f	195.2±2.6 b	192.8±2.4 b	78.2±2.0 a
AWD+MN	310.4±7.7 d	234.8±2.0 a	230.0±3.2 a	74.1±1.6 b
AWD+HN	331.8±5.2 c	236.4±3.3 a	231.7±2.2 a	69.8±1.2 c
2016				
CI+LN	248.7±5.4 e	176.9±2.7 b	174.2±3.2 b	69.8±0.9 b
CI+MN	348.2±6.2 b	227.8±3.3 a	224.1±1.8 a	64.3±1.9 c
CI+HN	376.8±4.6 a	227.3±4.1 a	223.4±2.2 a	59.1±1.8 d
AWD+LN	225.4±6.4 f	180.4±3.5 b	175.2±2.0 b	77.9±1.4 a
AWD+MN	294.0±7.3 d	224.8±2.8 a	220.8±1.9 a	75.1±2.1 a
AWD+HN	306.6±5.3 c	224.3±4.1 a	219.7±2.4 a	71.7±1.6 b

偏生产力(表 2)。

2.4 农艺特性

2.4.1 分蘖与分蘖成穗率

不同水、氮处理下水稻分蘖数与分蘖成穗率存在显著性差异(表 3)。相同灌溉模式下,增施氮肥可显著提高拔节期分蘖数,表现为 HN>MN>LN;而在抽穗期与成熟期,过量施用氮肥则不再能提高分蘖,该时期 HN 与 MN 分蘖数无显著性差异;分蘖成穗率表现为 LN>MN>HN。就相同施氮量而言,与 CI 相比,AWD 可有效减少拔节期的分蘖数,但对抽穗与成熟期的分蘖数没有影响,显著提高了分

蘖成穗率。

2.4.2 叶面积指数(LAI)与光合势(LAD)

就同种灌溉模式而言,在 CI 下,拔节期与抽穗期的 LAI 以及拔节期至抽穗期的 LAD 均表现为 HN>MN>LN,成熟期的 LAI 表现为 MN>HN>LN,抽穗期至成熟期的 LAD 则表现为 HN 与 MN 均显著高于 LN,且 HN 与 MN 之间无显著性差异;在 AWD 下,各时期 LAI 以及相应阶段的光合势均表现为 HN>MN>LN。就相同施氮水平而言,与 CI 相比,AWD 显著降低了拔节期与抽穗期的 LAI 以及拔节期至抽穗期的 LAD,但显著提高了成熟期的

表 4 灌溉模式与施氮量交互作用对水稻叶面积指数(LAI)的影响

年度与处理		拔节期	抽穗期	成熟期
Year and Treatment		Jointing	Heading	Maturity
2015				
	CI+LN	4.23±0.15 d	6.12±0.13 d	0.75±0.11 f
	CI+MN	5.72±0.13 b	7.44±0.27 bc	1.69±0.08 c
	CI+HN	6.12±0.19 a	8.05±0.28 a	1.31±0.09 d
	AWD+LN	3.98±0.24 e	6.04±0.17 d	1.05±0.10 e
	AWD+MN	5.14±0.15 c	7.25±0.15 c	1.94±0.05 b
	AWD+HN	5.84±0.28 ab	7.64±0.20 b	2.16±0.06 a
2016				
	CI+LN	4.45±0.19 c	6.31±0.21 d	0.84±0.15 e
	CI+MN	5.51±0.32 b	7.61±0.12 b	1.52±0.06 c
	CI+HN	6.27±0.28 a	7.94±0.22 a	1.21±0.09 d
	AWD+LN	4.09±0.17 d	6.19±0.17 d	1.04±0.11 de
	AWD+MN	4.64±0.35 c	7.17±0.23 c	1.85±0.10 b
	AWD+HN	5.69±0.26 b	7.68±0.14 b	2.04±0.08 a

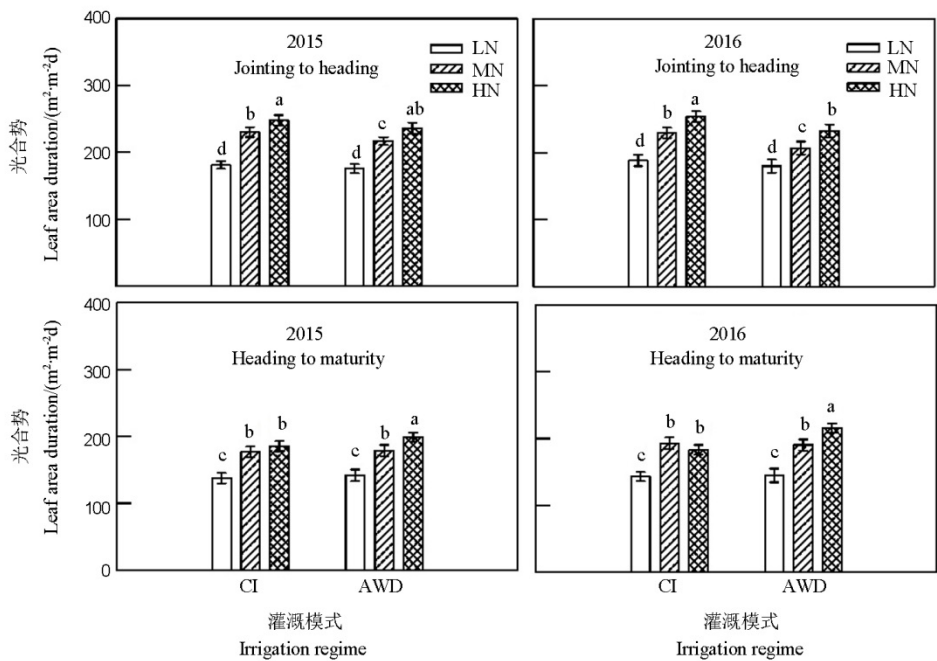


图 3 灌溉模式与施氮量交互作用对水稻光合势的影响

Fig. 3. Effects of interaction between irrigation regimes and nitrogen rates on leaf area duration.

LAI 以及抽穗期至成熟期的 LAD(表 4, 图 3)。

2.4.3 地上部干物质量与群体生长率(CGR)

就相同灌溉模式而言, 地上部干物质量在拔节期与抽穗期表现为  $HN>MN>LN$ , 成熟期则表现为  $MN$  与  $HN$  大于  $LN$ , 且  $MN$  与  $HN$  之间无显著性差异; CGR 在拔节期至抽穗期表现为  $MN$  和  $HN$  大于  $LN$ , 且  $MN$  与  $HN$  之间无显著性差异, 而抽穗期至成熟期则表现为  $MN>HN>LN$ 。就相同施氮水

平而言, 与  $CI$  相比,  $AWD$  显著降低了抽穗期地上部干物质量以及拔节期至抽穗期的  $CGR$ , 显著提高了抽穗期至成熟期的  $CGR$ (表 5, 图 4)。 $AWD$  显著增加了抽穗期 10~20cm 根层的根系生物量, 而对 0~10cm 根层根系生物量并无影响(表 5)。

2.5 生理特性

2.5.1 剑叶净光合速率与根系氧化力

在抽穗后 2 次土壤落干期与复水期, 我们测定

表 5 灌溉模式与施氮量交互作用对水稻地上部干物质量与抽穗期根干质量的影响

Table 5. Effects of interaction between irrigation regimes and nitrogen rates on shoot dry weight and root dry weight at heading in rice.

年度与处理 Year and Treatment	地上部干物质量 Shoot dry weight/(t·hm <sup>-2</sup> )			抽穗期根干质量 Root dry weight at heading/(g·m <sup>-2</sup> )	
	拔节期	抽穗期	成熟期	0~10 cm 根层	10~20 cm 根层
	Jointing	Heading	Maturity	0~10 cm soil layer	10~20 cm soil layer
2015					
CI+LN	3.58±0.12 c	8.27±0.38 d	12.8±0.2 c	66.0±2.9 b	28.3±1.1 b
CI+MN	4.02±0.13 b	9.54±0.22 b	15.5±0.3 a	76.4±2.5 a	31.2±2.1 b
CI+HN	4.51±0.08 a	10.10±0.31 a	15.5±0.3 a	75.3±3.2 a	31.0±1.4 b
AWD+LN	3.43±0.09 c	8.02±0.21 d	13.2±0.3 b	67.4±2.5 b	36.3±0.9 ab
AWD+MN	3.97±0.15 b	8.95±0.32 c	15.4±0.2 a	80.0±1.6 a	39.3±2.0 a
AWD+HN	4.42±0.11 a	9.46±0.25 b	15.5±0.4 a	79.4±2.2 a	39.1±1.5 a
2016					
CI+LN	3.34±0.09 c	8.45±0.26 d	12.4±0.2 c	60.7±1.2 c	26.0±1.3 c
CI+MN	4.26±0.07 b	9.85±0.29 b	15.9±0.4 a	72.1±2.7 a	29.8±1.7 b
CI+HN	4.52±0.11 a	10.20±0.16 a	15.7±0.2 a	73.8±2.9 a	30.4±2.0 b
AWD+LN	3.28±0.14 c	7.86±0.31 e	13.0±0.2 b	64.0±1.9 b	34.4±1.6 ab
AWD+MN	4.12±0.07 b	9.01±0.25 c	15.7±0.3 a	75.3±2.1 a	37.1±0.9 a
AWD+HN	4.65±0.15 a	9.75±0.20 b	15.8±0.3 a	75.1±3.2 a	38.7±1.4 a

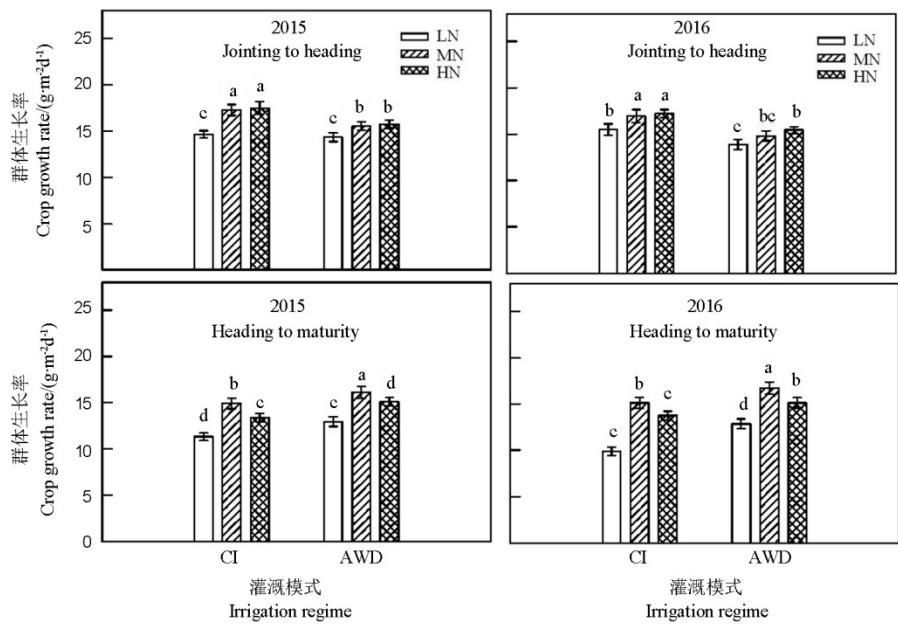


图 4 灌溉模式与施氮量交互作用对水稻群体生长率的影响

Fig. 4. Effects of interaction between irrigation regimes and nitrogen rates on crop growth rate.

了水稻剑叶净光合速率与根系氧化力。就相同灌溉模式而言,在 CI 下,HN 的剑叶净光合速率和根系氧化力在灌浆前期与 MN 无显著性差异,但在灌浆中后期则要显著低于 MN;而在 AWD 下随着施氮量的提高,剑叶净光合速率和根系氧化力表现为 HN 与 MN 均显著高于 LN,且 HN 与 MN 之间无显著性差异(表 6)。就相同施氮水平而言,与 CI 相比,AWD 下上述 2 指标在落干期并没有降低,而在复水期则显著提高。

2.5.2 茎鞘中 NSC 的运转

如表 7 所示,2 种灌溉模式下,抽穗期与成熟期茎鞘中 NSC 含量均表现为 HN>MN>LN,除了 CI 下 HN 与 MN 无显著性差异。与 NSC 的含量变化趋势相反,NSC 的运转率在 CI 下表现为 LN>MN>HN,而在 AWD 下表现为 LN 与 MN 之间无显著性差异,并同时高于 HN。就相同施氮水平而言,与 CI 相比,AWD 显著降低了成熟期茎鞘中 NSC 含量,提高了 NSC 的转运率以及对产量的贡

表 6 灌溉模式与施氮量交互作用对剑叶净光合速率与根系氧化力的影响

Table 6. Effects of interaction between irrigation regimes and nitrogen rates on photosynthetic rate of the flag leaf and root oxidation activity of rice during grain filling.

年度与处理 Year and Treatment	剑叶净光合速率 Leaf photosynthetic rate/( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )				根系氧化力 Root oxidation activity/( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ )			
	D <sub>1</sub>	W <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	W <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	W <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	W <sub>2</sub>
2015								
CI+LN	17.4±0.5 b	16.9±0.5 c	13.9±0.6 c	13.6±0.7 e	408.7±22.5 b	414.3±19.5 d	261.7±16.6 c	254.3±21.9 d
CI+MN	21.5±0.5 a	21.0±0.5 b	17.1±0.5 a	16.6±0.6 c	595.2±26.5 a	587.3±14.6 b	392.4±17.5 a	379.8±15.5 b
CI+HN	21.9±0.7 a	21.7±0.4 b	15.1±0.5 b	15.0±0.5 d	611.0±27.4 a	599.7±27.8 b	354.3±16.9 b	336.8±17.6 c
AWD+LN	16.9±0.5 b	21.7±0.4 b	13.6±0.7 c	18.3±0.8 b	398.8±31.2 b	547.3±18.2 c	270.3±23.5 c	358.7±25.5 bc
AWD+MN	20.7±0.5 a	25.2±0.6 a	16.8±0.7 a	21.5±0.6 a	589.7±19.4 a	650.3±16.5 a	403.8±13.4 a	454.3±24.8 a
AWD+HN	21.5±0.5 a	25.3±0.6 a	17.9±0.5 a	22.6±0.5 a	600.4±16.4 a	665.7±13.4 a	406.7±24.8 a	486.8±19.7 a
2016								
CI+LN	16.6±0.6 b	17.1±0.5 c	14.2±0.5 c	13.8±0.6 e	436.2±22.2 b	420.3±16.9 d	270.3±16.8 c	251.8±25.5 d
CI+MN	19.9±0.8 a	20.2±0.6 b	17.4±0.5 a	17.3±0.7 c	625.5±23.1 a	608.3±19.5 b	393.8±25.1 a	388.7±21.3 b
CI+HN	20.7±0.6 a	21.3±0.8 b	16.3±0.8 b	15.1±0.8 d	616.3±24.8 a	624.4±15.5 b	342.0±21.5 b	348.4±15.1 c
AWD+LN	16.1±0.5 b	20.6±0.4 b	13.8±0.8 c	18.2±0.8 b	418.3±24.5 b	568.7±22.4 c	260.3±24.6 c	390.5±22.7 b
AWD+MN	19.4±0.7 a	24.5±0.6 a	17.3±0.6 a	21.2±0.5 a	607.8±11.5 a	658.7±12.8 a	389.0±31.8 a	454.2±27.9 a
AWD+HN	20.2±0.5 a	23.5±0.5 a	18.3±0.8 a	22.7±0.7 a	625.3±19.8 a	670.3±20.5 a	403.8±22.7 a	488.5±27.2 a

D<sub>1</sub> 和 D<sub>2</sub>—土壤落干期; W<sub>1</sub> 和 W<sub>2</sub>—复水期。  
D<sub>1</sub> and D<sub>2</sub>, Soil drying period; W<sub>1</sub> and W<sub>2</sub>, Re-watering period.

表 7 灌溉模式与施氮量交互作用对茎鞘中非结构性碳水化合物(NSC)运转的影响

Table 7. Effects of interaction between irrigation regimes and nitrogen rates on remobilization of non-structural carbohydrates(NSC) in culms and sheaths during grain filling.

年度与处理 Year and Treatment	抽穗期 NSC	成熟期 NSC	NSC 运转率	NSC 对产量贡献率
	NSC at heading/( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ )	NSC at maturity/( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ )	Remobilized NSC/%	NSC contributed to grain yield /%
2015				
CI+LN	202.3±4.41 c	90.5±2.3 d	55.3±1.4 b	15.1±0.8 c
CI+MN	252.4±3.26 b	131±1.8 b	47.9±1.3 d	14.0±0.5 c
CI+HN	257.1±3.83 b	171±3.6 a	33.4±2.7 e	10.5±0.5 d
AWD+LN	207.3±5.16 c	80.7±3.2 d	61.5±2.2 a	16.1±0.3 b
AWD+MN	257.8±6.88 b	103±2.8 c	60.2±3.0 a	16.9±0.3 a
AWD+HN	284.3±3.42 a	139±2.5 b	51.2±2.9 c	15.9±0.4 b
2016				
CI+LN	204.3±4.25 d	91.7±3.2 d	55.2±1.3 b	15.8±0.5 b
CI+MN	254.3±3.19 c	137±2.8 b	46.2±1.9 c	13.5±0.6 c
CI+HN	251.7±5.28 c	175±3.6 a	30.3±2.0 d	9.32±0.7 d
AWD+LN	211.7±6.51 d	81.1±5.2 d	61.8±1.3 a	16.8±0.6 a
AWD+MN	262.9±4.03 b	107±2.8 c	59.2±2.9 a	16.6±0.5 a
AWD+HN	291.7±4.92 a	135±4.3 b	53.6±3.0 b	16.9±0.6 a



献率, 表明 AWD 可以促进生育前期储存于茎鞘中的同化物质向籽粒中运转(表 7)。

### 3 讨论

干湿交替灌溉(AWD)是目前生产中应用最为广泛的一项节水灌溉技术, 但 AWD 是否能够增产, 目前还存在较大的争议。究其原因, 可能与品种、种植制度、施氮量、栽插密度、土壤落干程度、气象以及水文条件等诸多因素有关。笔者先前的研究认为采用轻度干湿交替灌溉技术(土壤低限水势 $\geq -15$  kPa 或中午叶片水势 $\geq -1.2$  MPa)既可以节约灌溉用水, 又显著提高产量<sup>[13-15]</sup>。这与本研究结果较为一致。水稻产量形成取决于单位面积穗数、每穗颖花数、结实率与粒重 4 个因素。其中, 单位面积穗数受到分蘖数以及分蘖成穗率的影响; 每穗颖花数受颖花分化与退化的影响; 结实率与粒重则与籽粒灌浆有关, 而土壤水分对以上 4 个因素都有不同程度的调控作用。我们认为, 本研究中 AWD 之所以能提高水稻产量, 可能与以下 3 点有关:

#### 1) 抑制无效分蘖, 利于大穗形成

分蘖能力是水稻的重要特性之一, 也是决定水稻产量的重要因素, 而分蘖成穗率是水稻进入结实期前群体质量的一项综合诊断指标。干旱会造成水稻分蘖数减少, 穗长缩短。而长期淹水则会导致大量无效分蘖发生, 群体结构恶化, 不利于高产形成。本研究中 AWD 显著降低了拔节期的分蘖数, 而对成熟期的穗数没有影响, 显著提高了分蘖成穗率, 将更多的肥水资源集中至有效分蘖中。水稻的每穗颖花数具有较大的变异性 and 可调性, 目前调控水稻颖花形成的农艺措施主要有氮肥管理与水分管理, 其中形成共识的是穗轴分化期施用氮肥可以促进颖花分化, 在雌雄蕊分化期至减数分裂期前期施用氮肥可以减少颖花退化<sup>[16-17]</sup>。较多的研究认为, 水稻减数分裂期是对外界环境较敏感的时期, 此时遇到干旱等不良外界条件, 会加剧颖花退化<sup>[18-20]</sup>。因此, 自减数分裂期至抽穗开花结束, 在生产上一般采用水层灌溉的方法保证穗的正常发育。本研究中我们发现, AWD 较 CI 更有利于形成大穗。以往研究表明, AWD 可以增加从穗分化期到籽粒灌浆后期根、叶、穗中细胞分裂素含量, 较高的细胞分裂素含量不仅更有利于大穗的形成, 而且延迟植株衰老并且调控籽粒中蔗糖淀粉代谢途径关键酶的活性<sup>[21]</sup>。最近, 我们在研究中发现, AWD 可以增加减数分裂期幼穗中内源多胺以及油菜素甾醇的含量(数据未

发表), 这可能与其颖花增加有关。但 AWD 调控水稻颖花形成的机理, 亟待进一步研究。

#### 2) 促进同化物运转, 提高光合生产能力

灌浆期水稻同化物的供给主要来源于两个方面: 一方面是花前累积的同化物, 它们来源于花前冠层群体的光合, 主要以非结构性碳水化合物的形式贮存在茎鞘中, 对产量的贡献为 30%左右<sup>[22]</sup>, 本研究中我们发现 AWD 可以促进茎鞘中非结构性碳水化合物向籽粒中运转, 提高了茎鞘中非结构性碳水化合物的运转率以及对产量的贡献率(表 7), 并显著提高抽穗后群体生长率; 另一方面是花后冠层群体的光合, 抽穗后水稻籽粒灌浆所需营养物质的 60%~80%来自叶片的光合作用。我们观察到, 与 CI 处理相比, 在土壤落干期, AWD 没有显著降低叶片光合速率, 而在复水后, AWD 显著增加了剑叶光合速率, 增强了源器官功能, 进而增加了产量。

#### 3) 优化根系构型, 提高根系活性

根系的形态及代谢特性与养分吸收利用及地上部生长发育和产量关系密切, 高产与资源高效利用的水稻应该具有什么样的根系特性一直是水稻根系研究的热点。前人研究表明, 长期淹水会导致土壤中某些有毒还原性产物的积累, 如  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  等<sup>[23]</sup>, 影响根系的生长。AWD 则可有效改善土壤的氧化还原性, 去除土壤中具有毒性的还原性产物, 降低其对细胞的伤害, 有利于根系的生长<sup>[22]</sup>。本研究表明, AWD 可以优化根系形态, 促进根系下扎, 增加 10~20 cm 根层根系生物量(表 7)。强大的深层根系有利于土壤水分的保持, 提高干旱条件下植株水势, 并可以提高根系吸收与同化深层土壤养分的能力<sup>[13-15, 24]</sup>。根系氧化力被认为是水稻根系最重要的生理指标, 其高低直接影响水稻植株对水分与氮素的吸收与利用、地上部生长发育和产量形成<sup>[25]</sup>。本研究表明在 AWD 下, 复水后根系氧化力显著提高, 活跃根系可为地上部提供充足的营养、水分和植物激素, 促进地上部生长; 另一方面, 地上部良好的生长又可以保证充足的碳水化合物向根部输送, 维持根系的功能。

氮素是影响作物生长发育的另一个重要因素, 如何通过水、氮运筹来实现水稻稳产高产的理论和已有较多报道。有研究者提出实地养分管理技术(SSNM)和 AWD 相结合可有效提高产量与氮肥利用效率<sup>[26-27]</sup>。本研究中, 我们发现不同水、氮组合中, AWD+MN 与 AWD+HN 产量与水分利用效率最高; 而与 AWD+MN 组合相比, AWD+HN 组

合植株的氮素积累总量虽然显著提高,但产谷利用率偏低,因此,本研究中AWD+MN组合为最佳水氮组合,该组合可充分发挥以肥促水、以水调肥的优势。关于土壤水分对氮肥利用效率的影响,前人得出的结论存在较大的争议。有研究认为,由于稻田硝化与反硝化作用的存在,AWD会导致土壤中氮素流失,植株氮素吸收下降,造成产量与氮肥利用效率降低<sup>[28]</sup>。而Belder等<sup>[29]</sup>研究认为当地下水深超过40 cm时,AWD才会影响产量、植株体内氮的积累量和氮肥利用效率。王绍华等<sup>[30]</sup>研究认为,轻度水分胁迫并不会降低水稻氮吸收,相反可动员水稻抽穗前叶片和茎鞘中储存的氮素参与再分配和再利用,从而减少稻草中氮素的滞留。本研究中我们发现,相同施氮水平下2种灌溉模式对植株的吸氮量没有影响,说明本研究设置的AWD处理并不会阻碍植株对氮素的吸收;此外,我们还发现AWD可促进氮素向籽粒中运转,这可能是由于AWD提高了灌浆期的水稻植株的生理活性所致。

总而言之,灌溉模式与施氮量对水稻产量、水分和氮肥利用效率的影响存在着明显的互作效应。干湿交替灌溉可抑制无效分蘖生长,利于大穗形成,促进同化物运转,提高光合生产能力,改善根系形态与生理特征。干湿交替灌溉结合适宜施氮量(160 kg/hm<sup>2</sup>)可同步提高水、氮利用效率,既可保证水稻产量,又能降低稻田灌溉用水与施氮量,充分发挥水氮互作的优势,为可以推广的最佳水氮管理模式。

#### 参考文献:

- [1] Fageria N. Plant tissue test for determination of optimum concentration and uptake of nitrogen at different growth stages in low land rice. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 2003, 34(1): 259-270.
- [2] Belder P, Bouman B, Cabangon R, Guoan L, Quilang E, Li Y, Spiertz J, Tuong T. Effect of water-saving irrigation on rice yield and water use in typical lowland conditions in Asia. *Agric Water Manag*, 2004, 65(3): 193-210.
- [3] Bouman B. A conceptual framework for the improvement of cropwater productivity at different spatial scales. *Agric Syst*, 2007, 93(3): 43-60.
- [4] Borrell A, Garside A, Fukai S. Improving efficiency of water use for irrigated rice in a semi-arid tropical environment. *Field Crops Res*, 1997, 52(3): 231-248.
- [5] Carrijo D, Lundy M, Linquist B. Rice yields and water use under alternate wetting and drying irrigation: A meta-analysis. *Field Crops Res*, 2017, 203(3): 173-180.
- [6] FAOSTAT. FAO Statistical Databases, Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations, Rome, 2013. <http://www.fao.org/statistics/en/> [2017-09-05].
- [7] Peng S, Buresh R, Huang J, Zhong X, Zou Y, Yang J, Wang G, Liu Y, Tang Q, Cui K, Zhang F, Dobermann A. Improving nitrogen fertilization in rice by site-specific N management: A review. *Agron Sustain Dev*, 2010, 30(3): 649-656.
- [8] Ju X, Xing G, Chen X, Zhang S, Zhang L, Liu X, Cui Z, Yin B, Christea P, Zhu Z, Zhang F. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 2009, 106(19), 3041-3046.
- [9] 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. *中国农业科学*, 1996, 29(4): 58-66.
- [10] 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. *Sci Agric Sin*, 1996, 29(4): 58-66. (in Chinese with English abstract)
- [11] Cabangon R, Tuong T, Castillo E. Effect of irrigation method and N-fertilizer management on rice yield, water productivity and nutrient use efficiencies in typical lowland rice conditions in China. *Paddy Water Environ*, 2004, 2(4): 195-206.
- [12] Sharma B, Kar S, Cheema S. Yield, water use and nitrogen uptake for different water and N levels in winter wheat. *Fert Res*, 1990, 22(1): 119-127.
- [13] 杨建昌, 杜永, 刘辉. 长江下游稻麦周年超高产栽培途径与技术. *中国农业科学*, 2008, 41(6): 1611-1621.
- [14] Yang J C, Du Y, Liu H. Cultivation approaches and techniques for annual super-high-yielding of rice and wheat in the lower reaches of Yangtze river. *Sci Agric Sin*, 2008, 41(6): 1611-1621. (in Chinese with English abstract)
- [15] Chu G, Chen T, Wang Z, Yang J, Zhang J. Morphological and physiological traits of roots and their relationships with water productivity in water-saving and drought-resistant rice. *Field Crops Res*, 2014, 162(8): 108-119.
- [16] Chu G, Wang Z, Zhang H, Liu L, Yang J, Zhang J. Alternate wetting and moderate drying increases rice yield and reduces methane emission in paddy field with wheat straw residue incorporation. *Food and Energy Sec*, 2015, 4(3): 238-254.
- [17] 褚光, 展明飞, 朱宽宇, 王志琴, 杨建昌. 干湿交替灌溉对水稻产量与水分利用效率的影响. *作物学报*, 2016, 42(7): 1026-1036.
- [18] Chu G, Zhan M F, Zhu K Y, Wang Z Q, Yang J C. Effects of alternate wetting and drying irrigation on yield and water use efficiency of rice. *Acta Agron Sin*, 2016, 42(7): 1026-1036.
- [19] Fu J, Huang Z, Wang Z, Yang J, Zhang J. Pre-anthesis non-structural carbohydrate reserve in the stem enhances the sink strength of inferior spikelets during grain filling of rice. *Field Crops Res*, 2011, 123(2): 170-182.

- [17] Zhang Z, Chu G, Liu L, Wang Z, Yang J, Zhang J. Mid-season nitrogen application strategies for rice varieties differing in panicle size. *Field Crops Res*, 2013, 150: 9-18.
- [18] Boyer J, Westgate M. Grain yields with limited water. *J Exp Bot*, 2004, 55(407): 2385-2349.
- [19] Saini H, Westgate M. Reproductive development in grain crops during drought. *Adv Agron*, 2000, 68(2): 59-96.
- [20] Yang J, Zhang J, Liu K, et al. Absciscic acid and ethylene interact in rice spikelets in response to water stress during meiosis. *J Plant Growth Regul*, 2007, 26(4): 318-328.
- [21] Zhang H, Xue Y, Wang Z, Yang J, Zhang J. An alternate wetting and moderate soil drying regime improves root and shoot growth in rice. *Crop Sci*, 2009, 49(6): 2246-2260.
- [22] Takai T, Fukuta Y, Shirawa T, Horie T. Time-related mapping of quantitative trait loci controlling grain-filling in rice. *J Exp Bot*, 2005, 56: 2107-2118.
- [23] Ramasamy S, Berge H, Purushothaman S. Yield formation in rice in response to drainage and nitrogen application. *Field Crops Res*, 1997, 51(1): 65-82.
- [24] Ju C, Buresh R, Wang Z, Zhang H, Liu L, Yang J, Zhang J. Root and shoot traits for rice varieties with higher grain yield and higher nitrogen use efficiency at lower nitrogen rates application. *Field Crops Res*, 2015, 175: 47-55.
- [25] Yang C, Yang L, Yang X, Zhu O. Rice root growth and nutrient uptake as influenced by organic manure in continuously and alternately flooded paddy soils. *Agr Water Manag*, 2004, 70(1): 67-81.
- [26] Liu L, Chen T, Wang Z, Zhang H, Yang J, Zhang J. Combination of site-specific nitrogen management and alternate wetting and drying irrigation increases grain yield and nitrogen and water use efficiency in super rice. *Field Crops Res*, 2013, 154: 226-235.
- [27] Xue Y, Duan H, Liu L, Wang Z, Yang J, Zhang J. An improved crop management increases grain yield and nitrogen and water use efficiency in rice. *Crop Sci*, 2013, 53(1): 271-284.
- [28] Vitousek P, Mooney H, Lubchenco J, Melillo J. Human domination of earth's ecosystems. *Science*, 1997, 277(5325): 494-499.
- [29] Belder P, Spiertz J, Bouman B, Lu G, Tuong T. Nitrogen economy and water productivity of lowland rice under water-saving irrigation. *Field Crops Res*, 2005, 93(2): 169-185.
- [30] 王绍华, 曹卫星, 丁艳锋, 田永超, 姜东. 水氮互作对水稻氮吸收与利用的影响. *中国农业科学*, 2004, 37(4): 497-501.
- Wang S H, Cao W X, Ding Y F, Tian Y C, Jiang D. Interactions of water management and nitrogen fertilizer on nitrogen absorption and utilization in rice. *Sci Agric Sin*, 2004, 37(4): 497-501. (in Chinese with English abstract)

## 欢迎订阅 2018 年《作物学报》中、英文版

《作物学报》是中国科学技术协会主管、中国作物学会和中国农业科学院作物科学研究所共同主办、科学出版社出版的有关作物科学的学术期刊。前身可追溯到 1919 年创办的《中华农学会丛刊》。主要刊载农作物遗传育种、耕作栽培、生理生化、种质资源以及与作物生产有关的生物技术、生物数学等学科具基础理论或实践应用性的原始研究论文、专题评述和研究简报等。《作物学报》是我国作物科学研究领域的领衔期刊, 长期以来形成了稳定的学术选题和报道方向, 发表的论文代表了我国作物科学的最高水平, 是我国几代农业科技工作者辛勤培育的一块重要学术园地。《作物学报》从 2001 年起连续 15 年被中国科技信息研究所授予“百种中国杰出学术期刊”称号。2013 年和 2015 年被国家新闻出版广电总局评为“百强科技期刊”, 2011 年和 2017 年获“第二届中国出版政府奖期刊奖提名奖”。据北京大学图书馆编著的《中文核心期刊要目总览》(2004、2008、2011 和 2014 年版)登载, 《作物学报》被列在“农学、农作物类核心期刊表”的首位。《作物学报》为月刊, 每期 160 页, 定价 60 元/册, 全年 720 元。可通过全国各地邮局订阅, 刊号: ISSN 0496-3490, CN 11-1809/S, 邮发代号: 82-336。也可向编辑部直接订购。网址: <http://zwxb.chinacrops.org/>; E-mail: [zwxb301@caas.cn](mailto:zwxb301@caas.cn)。

*The Crop Journal* (《作物学报(英文版)》)是中国科协主管, 中国作物学会、中国农业科学院作物科学研究所和中国科技出版传媒股份有限公司共同主办的学术期刊。创刊于 2013 年 10 月。主要刊登农作物遗传育种、耕作栽培、生理生化、生态、种质资源以及与农作物有关的生物技术、生物数学、农业气象等领域以第一手资料撰写的研究论文、研究简报以及专题综述等。2016 年被中国科学技术信息研究所评选为“中国科技核心期刊”, 被中国知网评选为“2016 中国最具国际影响力学术期刊”。目前收录 *The Crop Journal* 的国内、外数据库有: ESCI 数据库、Scopus 数据库、美国化学文摘(CA)、英国国际农业与生物科学研究中心文摘(CABI)、英国食品科学与技术文摘、联合国粮农组织的 AGRIS 数据库、DOAJ、中国科学引文数据库(CSCD)等。*The Crop Journal* 与国际知名出版商 Elsevier 合作, 在 ScienceDirect 网络出版平台实现全文开放获取(Open Access)和在线预出版(Online first), 免收作者任何费用。*The Crop Journal* 为双月刊, 每期 90 页, 定价 60 元/册, 全年 360 元。可通过全国各地邮局订阅, 刊号: CN 10-1112/S, ISSN 2095-5421, 2214-5141 (Online), 邮发代号: 80-668。也可向编辑部直接订购。网址: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/22145141>, E-mail: [cropjournal@caas.cn](mailto:cropjournal@caas.cn)

地址: 北京市海淀区中关村南大街 12 号, 中国农业科学院作物科学研究所《作物学报》编辑部(邮编 100081); 电话: 010-82108548; 010-82105793。