

## 增氧模式对水稻光合特性及产量的影响

胡继杰<sup>1,#</sup> 朱练峰<sup>1,#</sup> 钟楚<sup>1,2</sup> 林育炯<sup>1</sup> 张均华<sup>1</sup> 曹小闯<sup>1</sup> 禹盛苗<sup>1</sup>  
Allen Bohr JAMES<sup>1</sup> 金千瑜<sup>1,\*</sup>

(<sup>1</sup> 中国水稻研究所 水稻生物学国家重点实验室, 杭州 310006; <sup>2</sup> 华中农业大学 植物科学技术学院, 武汉 430070; #共同第一作者; \*通讯联系人, E-mail: jinqy@mail.hz.zj.cn)

### Effects of Aeration Methods on Photosynthetic Characteristics and Yield of Rice

HU Jijie<sup>1,#</sup>, ZHU Lianfeng<sup>1,#</sup>, ZHONG Chu<sup>1,2</sup>, LIN Yujiong<sup>1</sup>, ZHANG Junhua<sup>1</sup>, CAO Xiaochuang<sup>1</sup>,  
YU Shengmiao<sup>1</sup>, Allen Bohr JAMES<sup>1</sup>, JIN Qianyu<sup>1,\*</sup>

(<sup>1</sup> State Key Laboratory of Rice Biology, China National Rice Research Institute, Hangzhou 310006, China; <sup>2</sup> College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; #These authors contributed equally to this work; \*Corresponding author, E-mail: jinqy@mail.hz.zj.cn)

**Abstract: 【Objective】**The objective is to reveal the effects of different aeration methods on photosynthetic characteristics and dry matter production of rice, and to determine the suitable aeration method for the growth and improvement of grain yield of rice. The results will contribute to the understanding of the role of root aeration on rice growth, and provide a reference and a theoretical basis for aerobic cultivation of rice. **【Method】**Three rice varieties falling into different ecotypes, Zhongzheyou 1 (lowland rice), IR45765-3B (deep-water rice) and Zhonghan 221 (upland rice), were used to study the effects of aeration methods on rice photosynthetic characteristics and yield. Under such four oxygen enrichment treatments as calcium peroxide application (T<sub>1</sub>), micro-bubble aerated water irrigation (T<sub>2</sub>), water-controlled irrigation (T<sub>3</sub>) and water-logging (control). **【Result】**T<sub>1</sub> and T<sub>2</sub> increased the leaf SPAD value, leaf area index, net photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance and dry matter accumulation of the three rice varieties during the main growth stages, and significantly improved the effective panicle numbers and seed setting rate. Compared with the control, the SPAD value, leaf area index, photosynthetic parameters and dry matter weight were decreased in T<sub>3</sub>, and the seed setting rate also significantly declined, but the water use efficiency of leaves was increased. At full ripe stage, compared with the control the grain yield of Zhongzheyou 1, IR45765-3B and Zhonghan 221 increased by 22.38%, 18.27% and 18.17%, respectively, in T<sub>1</sub> and by 13.89%, 10.67% and 8.85%, respectively, in T<sub>2</sub>. However, it was 5.86%, 8.19% and 6.16%, respectively, lower than that of control in T<sub>3</sub>, with considerable differences between treatments. **【Conclusion】**T<sub>1</sub> and T<sub>2</sub> retarded leaf senescence, and improved leaf area index and photosynthetic capacity, and significantly increased the dry matter accumulation and yield of rice. The main reason for the decline of photosynthesis and yield of rice under T<sub>3</sub> was the shortage of water supply.

**Key words:** rice variety; aeration method; SPAD value; leaf area index; photosynthetic characteristics; yield

**摘要: 【目的】**研究不同增氧模式对水稻光合特性和物质生产的影响,并探讨适宜不同生态型水稻品种生长以及提高其产量的增氧模式,进一步明确稻田根部增氧对水稻生长的作用,为水稻好氧栽培提供参考和理论依据。 **【方法】**以中浙优1号(水稻)、IR45765-3B(深水稻)和中早221(旱稻)3种不同生态型水稻品种为材料,设置增施过氧化钙(T<sub>1</sub>)、微纳气泡水灌溉(T<sub>2</sub>)和表土湿润灌溉(T<sub>3</sub>)等不同增氧模式以及淹水对照(CK),分别测定水稻叶片光合特性、干物质积累量和产量等指标。 **【结果】**增施过氧化钙和微纳气泡水灌溉处理增加了3个水稻品种主要生育期的叶片SPAD值、叶面积指数、净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和干物质量,水稻有效穗数和结实率显著高于对照;表土湿润灌溉处理下,3个品种的叶片SPAD值、叶面积指数、光合参数和干物质量下降,结实率显著低于对照,但提高了叶片水分利用率。完熟期,增施过氧化钙处理下,中浙优1号、IR45765-3B和中早221稻谷产量分别较

收稿日期: 2016-10-09; 修改稿收到日期: 2016-11-19。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31270035, 30900880); 国家重点研发计划资助项目(2016YFD0101801); 浙江省重点研发计划资助项目(2016C02050-3)。

对照增加了 22.38%、18.27%和 18.17%; 微纳气泡水灌溉处理下, 3 个品种稻谷产量分别较对照增加了 13.89%、10.67%和 8.85%; 表土湿润灌溉处理下, 产量分别比对照减少 5.86%、8.19%和 6.16%。【结论】增施过氧化钙和微纳气泡水灌溉有助于提高水稻叶片叶绿素含量、叶面积指数和光合作用能力, 并显著增加水稻干物质积累和产量; 而表土湿润灌溉处理下, 水稻水分供应不足, 叶片光合作用及产量均有所下降。

关键词: 水稻品种; 增氧模式; SPAD 值; 叶面积指数; 光合特性; 产量

中图分类号: Q945.1; S511.01

文献标志码: A

文章编号: 1001-7216(2017)03-0278-10

水稻(*Oryza sativa* L.)是我国主要的口粮作物, 常年产量在 2 亿 t 左右, 约占全国粮食总产量的 1/3<sup>[1]</sup>。近年来, 受全球气候变化影响, 中国南方地区强降雨频发, 加之多雨潮湿以及长期漫灌的传统耕作模式影响, 水稻易遭受淹水缺氧胁迫<sup>[2,3]</sup>。此外, 我国还存在大面积的次生潜育化稻田<sup>[4]</sup>, 土表渍水严重, 降低了土壤溶氧量。有研究表明, 植物根系在低氧逆境下从有氧呼吸变为无氧呼吸, 导致根系形态发生改变, 根系活力下降, 根干质量下降, 产能减少<sup>[5-8]</sup>。低氧环境下, 由于水稻地下部生长受到不利影响, 地上部分蘖也相应减少, 节间徒长, 导致营养生长阶段干物质积累量减少, 孕穗期叶绿素含量下降显著, 颖花分化受到抑制, 进而导致结实率和千粒重降低, 产量损失严重<sup>[3,9-11]</sup>。针对水稻长期淹水缺氧问题, 前人利用水稻不同生育时期需水差异特性, 通过水分管理来调控土壤含水量, 进而提升土壤氧化还原电位, 改善稻田供氧状况<sup>[12-14]</sup>。另有研究证明, 施用过氧化钙、过氧化尿素等“氧肥”<sup>[15]</sup>或通过超微气泡水、磁化水<sup>[16,17]</sup>灌溉措施也均能提高稻田土壤溶氧量。研究<sup>[18-20]</sup>表明, 增氧处理下水稻对 N、P、K、Mn、Mg 和 Ca 等营养元素吸收量提高, 地上部及根系干物质积累量也有不同程度的上升, 而这 90%以上的干物质量来源于水稻的光合作用。

植物以水和二氧化碳为原料, 通过光合作用合成葡萄糖并释放氧气, 为其生命活动提供能量和物质基础。水稻自身遗传特性以及外界环境均会对其光合作用产生影响<sup>[21]</sup>, 不同土壤水分条件下, 水稻和旱稻的叶片净光合速率、气孔导度以及水分利用率发生改变<sup>[22,23]</sup>; 灌溉方式和耕作模式也会导致水稻光合作用、生理形态以及产量产生差异<sup>[24,25]</sup>。而目前有关增氧模式下水稻光合特性的研究还鲜有报道, 且缺少不同生态型水稻对稻田增氧模式的响应比较。有鉴于此, 本研究设置增施“氧肥”过氧化钙、微纳气泡水灌溉、表土湿润灌溉等增氧模式, 以长期淹水处理作为对照, 探讨不同增氧模式对不同生态型水稻品种功能叶片光合特性及产量形成的影响, 以期深化前人研究, 丰富水稻栽培理论, 为水稻好氧栽培提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验设计

试验在浙江省杭州市富阳区中国水稻研究所实验基地遮雨网室(N 30°05', E 119°56', 海拔 6.5 m)进行。土壤为青紫泥土, 有机质 27.52 g/kg、全氮 1.92 g/kg、碱解氮 141 mg/kg、速效磷 9.8 mg/kg、速效钾 96.75 mg/kg, pH 值为 6.8。

供试材料为中浙优 1 号(水稻)、IR45765-3B(深水稻)和中早 221(旱稻)。试验采用裂区设计, 主处理为增施过氧化钙(T<sub>1</sub>)、微纳气泡水灌溉(T<sub>2</sub>)、表土湿润灌溉(T<sub>3</sub>)和淹水对照(CK)4 个不同根部氧调控处理, 三个供试品种为副处理。小区面积 2.6 m<sup>2</sup>, 3 次重复。不同根部氧调控处理的具体方法如下: T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub> 和 CK 除搁田期外, 土表均保持 8~10 cm 灌溉水层, 而且 T<sub>1</sub> 处理在移栽期、分蘖盛期、齐穗期和灌浆期按 1:1:1:1 质量比施入过氧化钙, 过氧化钙总用量折合活性氧总量为 16 kg/hm<sup>2</sup>, 所用过氧化钙有效含量为 60%的粉末状过氧化钙; T<sub>2</sub> 处理水稻全生育期使用经微纳气泡发生系统(型号 MBO75-ZS)增氧处理过的灌溉水灌溉; T<sub>3</sub> 处理在水稻移栽-返青期保持 8~10 cm 水层, 待水自然落干后, 一直保持土壤湿润但表土无水层。在 T<sub>1</sub> 处理施用过氧化钙时, 另外 3 个处理同时施用相同钙量的氧化钙。

3 个水稻品种均于 2015 年 5 月 21 日播种, 6 月 11 日移栽, 行株距为 15 cm×22.5 cm, 中浙优 1 号单本栽, IR45765-3B 和中早 221 双本栽。各处理施纯 N 180 kg/hm<sup>2</sup>, 按质量比 5:3:2 分基肥、蘖肥、穗肥三次施用; 磷肥(折合 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 90 kg/hm<sup>2</sup>, 全部作基肥施用; 钾肥(以 K<sub>2</sub>O 计) 150 kg/hm<sup>2</sup> 按 1:1 质量比分基肥、穗肥两次施用; 本研究所用的 N、P、K 肥分别为尿素(N 46%)、钙镁磷肥(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%)和氯化钾(K<sub>2</sub>O 60%)。病虫害防治及杂草清理等田间管理措施与当地高产田相同。

### 1.2 项目测定与方 法

#### 1.2.1 叶片光合特性与叶片 SPAD 值

应用 LI-6400XT 便携式光合测量系统(LI-COR, 美国)测定功能叶片的光合速率<sup>[26]</sup>。分别于拔节期、齐穗期、乳熟期和蜡熟期, 选择晴朗无风天气的上

午 9:00—11:30, 各处理随机选取 6 株, 测定最上部完全展开叶的净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间二氧化碳浓度( $C_i$ )和水分利用率( $WUE=P_n/T_r$ )<sup>[27]</sup>。采用开放气路, 气体流量 500  $\mu\text{mol/s}$ , 叶室温度为 28~30 $^{\circ}\text{C}$ , 光合光子通量密度 1200  $\mu\text{mol/m}^2\cdot\text{s}$ 。于分蘖期和光合特性测定当天, 各处理随机选取 30 株, 利用 SPAD-502 (柯尼卡美能达, 日本) 测定最上部完全展开叶上、中、下 3 个部位的 SPAD, 取平均值。

### 1.2.2 叶面积和地上部干物质质量

分别于拔节期、齐穗期(抽穗后 5 d)、乳熟期(抽穗后 15 d)、蜡熟期(抽穗后 22 d)和完熟期(抽穗后 50 d)田间取样, 每个小区选取 4 穴具有代表性水稻植株带回实验室, 去除地下部后按茎、叶、穗分装, 利用 LI-3000 叶面积仪(LI-COR, 美国)测定叶面积, 在 105 $^{\circ}\text{C}$ 下杀青、80 $^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒重, 然后称量。

### 1.2.3 考种与测产

齐穗期各小区随机调查 20 穴水稻有效穗数, 计算平均穗数。完熟期各小区按平均穗数随机选取 3 穴水稻进行考种, 测定每穗粒数、千粒重、实粒数和结实率。小区实收测产。

## 1.3 数据处理与统计分析

采用 Excel 2010 进行数据处理, 用 SPSS 12.0.1 数据分析软件进行统计分析, 采用 Duncan 新复极差法(LSR)进行处理间显著性检验, 显著水平设定为  $\alpha=0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同增氧模式下水稻叶片 SPAD 的动态变化

SPAD 值可间接反映水稻叶片叶绿素含量。由

图 1 可知, 3 个水稻品种叶片 SPAD 值均表现为随生育进程先上升后下降的趋势, 在齐穗期达到高峰。齐穗期至乳熟期, 中浙优 1 号和 IR45765-3B 叶片 SPAD 值变化较中早 221 平稳。同一测定时期,  $T_1$ 、 $T_2$  处理下, 3 个水稻品种叶片 SPAD 值均高于 CK, 且在齐穗期和乳熟期,  $T_1$  处理与 CK 差异显著。相反,  $T_3$  处理下, 3 个水稻品种叶片 SPAD 值均有所下降, 其中 IR45765-3B 的  $T_3$  处理显著低于 CK。

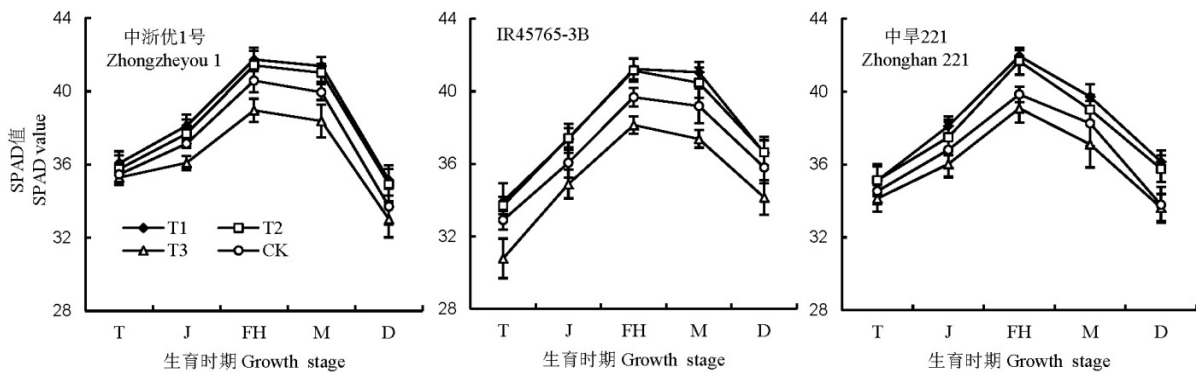
### 2.2 不同增氧模式下水稻叶面积指数

由图 2 可以看出, 不同增氧模式下 3 个水稻品种叶面积指数随生育进程先增加后减少, 均在齐穗期达到高峰。同一测定时期,  $T_1$ 、 $T_2$  处理下, 3 个水稻品种叶面积指数均高于 CK, 增幅达 3.47%~6.93%, 且在齐穗期和乳熟期,  $T_1$  处理与 CK 差异显著。 $T_3$  处理下, 3 个水稻品种叶面积指数均低于或者显著低于 CK, 降幅达 2.67%~6.13%。

### 2.3 不同增氧模式下水稻叶片光合特性

不同增氧模式下, 3 个水稻品种叶片净光合速率随生育进程均表现为先上升, 并在齐穗期达到最高, 随后又逐渐下降的趋势(图 3-A~C)。在齐穗期、乳熟期和蜡熟期,  $T_1$ 、 $T_2$  处理下, 3 个水稻品种叶片净光合速率均显著高于 CK, 其中以中浙优 1 号的  $T_1$  处理最高, 达到 24.5  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ , 较 CK 提高 14.2%。同一测定时期,  $T_3$  处理下, 3 个水稻品种叶片净光合速率均有所下降, 其中 IR45765-3B 的  $T_3$  处理叶片净光合速率显著低于 CK。

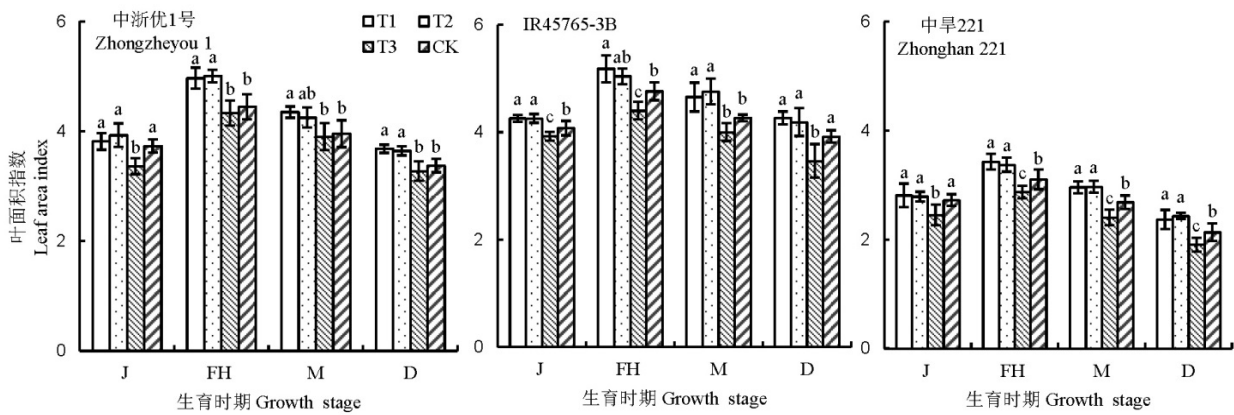
由图 3-D~F 可知, 不同增氧模式下, 中浙优 1 号和中早 221 叶片蒸腾速率均随生育进程逐渐降低, IR45765-3B 随生育进程先上升后下降, 齐穗期达到高峰。同一测定时期,  $T_1$ 、 $T_2$  处理下, 3 个水稻品种叶片蒸腾速率均高于 CK, 且在蜡熟期,  $T_1$  处理



T—分蘖期; J—拔节期; FH—齐穗期; M—乳熟期; D—蜡熟期;  $T_1$ —施用过氧化钙;  $T_2$ —微纳气泡水灌溉;  $T_3$ —表土湿润灌溉; CK—淹水灌溉。下图同。T, Tillering stage; J, Jointing stage; FH, Full heading stage; M, Milky stage; D, Dough stage;  $T_1$ , Calcium peroxide treatment;  $T_2$ , Micro-bubble aerated water irrigation;  $T_3$ , Water-controlled irrigation; CK, Water-logging irrigation. The same as below.

图1 不同增氧模式下水稻叶片SPAD值的动态变化

Fig. 1. Dynamic of rice leaf SPAD values under different aeration treatments.



同一品种同一生育时期柱上相同字母表示在 0.05 水平上差异不显著。

Values for the same stage above the bars followed by the same letter indicate no significant difference at 0.05 level.

图2 不同增氧模式下水稻叶面积指数

Fig. 2. Leaf area index in rice under different aeration treatments.

与 CK 差异显著。拔节期至蜡熟期, T<sub>3</sub> 处理下, 3 个水稻品种叶片蒸腾速率均显著低于 CK, 其中 IR45765-3B 降幅最大, 达到 37.7%。

由图 3-G-I 可知, 不同增氧模式下, 中浙优 1 号和中旱 221 叶片水分利用率随生育进程的变化趋势与其净光合速率变化趋势一致, 而 IR45765-3B 则随生育进程先下降后上升, 乳熟期达到高峰, 随后又再次下降。同一测定时期, T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub> 处理下, 3 个水稻品种叶片水分利用率与 CK 无显著差异。在拔节期、乳熟期和蜡熟期, T<sub>3</sub> 处理下, 3 个水稻品种叶片水分利用率均显著高于 CK。

不同增氧模式下, 3 个水稻品种叶片气孔导度的变化趋势和处理间差异与净光合速率的变化趋势一致 (图 3-J-L), 且在蜡熟期, T<sub>3</sub> 处理均显著低于 CK。随生育进程推进, 3 个水稻品种胞间二氧化碳浓度的变化趋势与净光合速率的变化趋势相反 (图 3-M-O), 但处理间差异不显著。

品种间比较表明, 淹水条件下同一测定时期, 中旱 221 的净光合速率、蒸腾速率 (齐穗期例外) 和胞间二氧化碳浓度均高于中浙优 1 号和 IR45765-3B。叶片气孔导度在分蘖期和齐穗期以 IR45765-3B 最高, 乳熟期和蜡熟期以中旱 221 最高。水分利用率在分蘖期和齐穗以中浙优 1 号最高; 至乳熟期和蜡熟期, IR45765-3B 最高, 中浙优 1 号次之, 中旱 221 最低。

#### 2.4 不同增氧模式下水稻干物质积累

不同增氧模式下, 水稻主要生育期干物质积累量表现不同。由表 1 可知, 3 个水稻品种干物质质量除 IR45765-3B 拔节期表现为 T<sub>2</sub>>T<sub>1</sub>>CK>T<sub>3</sub>, 其余生育期均为 T<sub>1</sub>>T<sub>2</sub>>CK>T<sub>3</sub>。完熟期, T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub> 处理下,

3 个水稻品种干物质质量较 CK 高 3.41%~16.99%, T<sub>3</sub> 处理下, 较 CK 低 2.79%~9.52%。

通过对播种期—拔节期、拔节期—齐穗期和齐穗期—完熟期 3 个生长阶段干物质积累量及其比例分析发现, 3 个水稻品种除中浙优 1 号在拔节期—齐穗期阶段表现为 T<sub>1</sub>>T<sub>2</sub>>T<sub>3</sub>>CK, 其余生长阶段均为 T<sub>1</sub>>T<sub>2</sub>>CK>T<sub>3</sub>, 且随生育进程推进, 阶段干物质积累量差异逐渐变大。

品种间各生长阶段干物质积累量占总积累量的比例存在差异。播种期—拔节期, 3 个水稻品种的干物质积累量及其比例均较为接近。中浙优 1 号和 IR45765-3B 后两个生长阶段干物质积累较多, 拔节期—齐穗期和齐穗期—完熟期平均分别占 40.11% 和 34.02%; 而中旱 221 前两个生长阶段基本持平, 齐穗期—完熟期干物质积累量较大, 占 42.50%~45.23%; 产生上述原因可能与不同水稻品种生育期长短有关。

#### 2.5 不同增氧模式下水稻产量及其构成因素

由表 2 可知, 3 个水稻品种不同处理间稻谷产量依次表现为 T<sub>1</sub>>T<sub>2</sub>>CK>T<sub>3</sub>, 且 T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub> 处理均显著高于 CK, T<sub>3</sub> 处理显著低于 CK。T<sub>1</sub> 处理下, 中浙优 1 号、IR45765-3B 和中旱 221 稻谷产量分别较 CK 增加 22.38%、18.27%和 18.17%; T<sub>2</sub> 处理下, 3 个品种分别增加 13.89%、10.67%和 8.85%; T<sub>3</sub> 处理下, 分别减少 5.86%、8.19%和 6.16%。淹水条件下, 品种间稻谷产量以 IR45765-3B 表现最高, 中浙优 1 号次之, 中旱 221 最低。

对产量构成因素的分析表明, T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub> 处理下, 3 个水稻品种有效穗数和结实率显著高于 CK; T<sub>3</sub> 处理下, 3 个水稻品种有效穗数和结实率均有所减少,

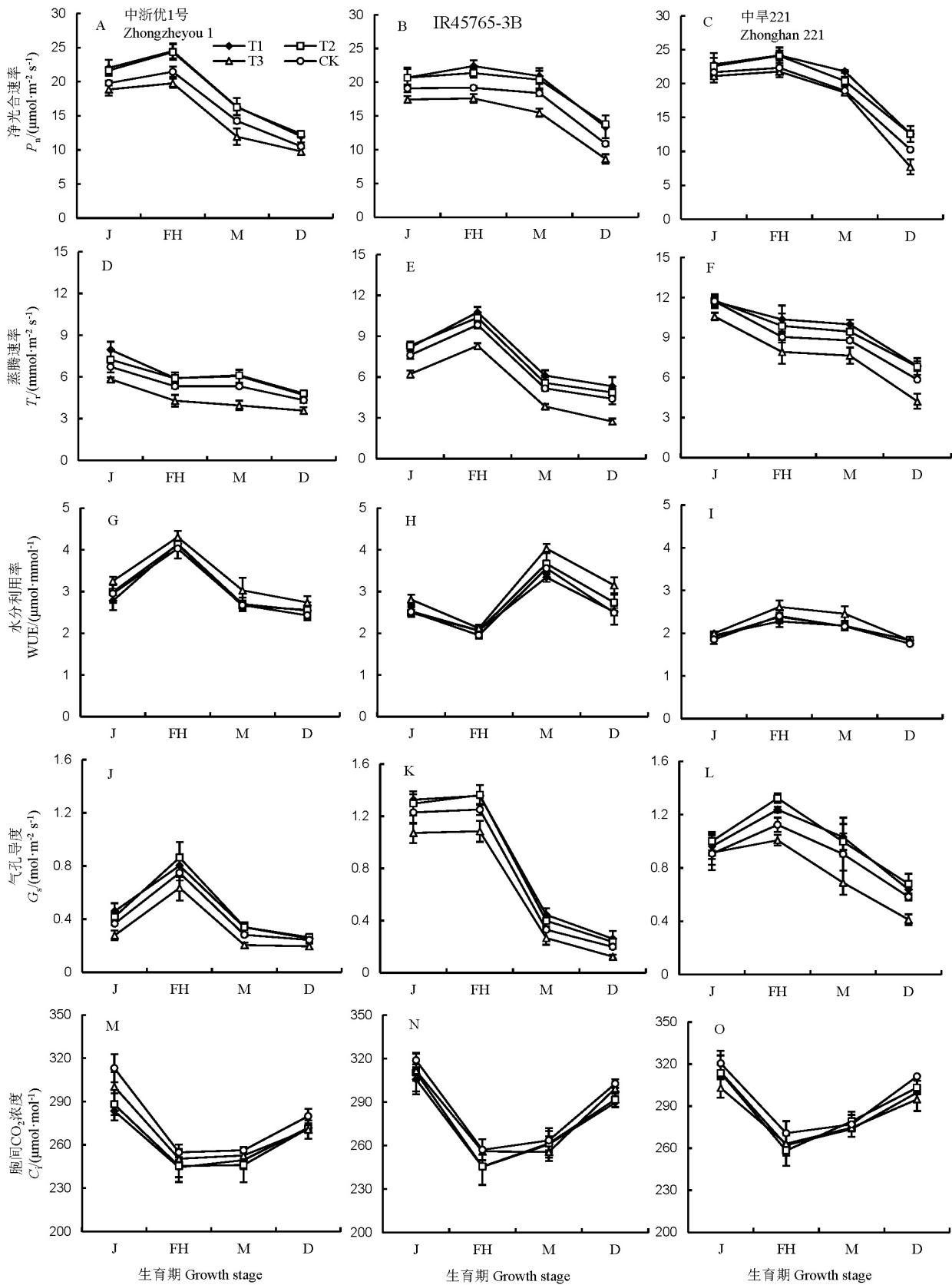


图3 不同增氧模式下水稻叶片光合特性

Fig. 3. Leaf photosynthetic characteristics in rice under different aeration methods.

表1 不同增氧模式下水稻植株干物质积累量

Table 1. Dry matter accumulation of rice plants under different aeration treatment.

品种 Variety	处理 Treatment	干物质质量 Dry matter accumulation in plant/(t·hm <sup>-2</sup> )			干物质积累量(比例) Dry matter accumulation/(t·hm <sup>-2</sup> ) (its ratio to total/%)		
		拔节期 J	齐穗期 FH	完熟期 FR	播种期—拔节期 From S to J	拔节期—齐穗期 From J to FH	齐穗期—完熟期 From FH to FR
中浙优 1 号 Zhongzheyou 1	T <sub>1</sub>	3.75 a	9.45 a	15.19 a	3.75 a 24.69	5.70 a 37.52	5.74 a 37.79
	T <sub>2</sub>	3.68 ab	9.31 a	14.29 b	3.68 ab 25.75	5.63 a 39.39	4.98 b 34.86
	T <sub>3</sub>	3.47 b	8.72 b	12.62 c	3.47 b 27.49	5.25 b 41.59	3.90 c 30.92
	CK	3.62 ab	8.77 b	12.98 c	3.62 ab 27.88	5.15 b 39.66	4.21 c 32.46
IR45765-3B	T <sub>1</sub>	3.73 a	10.04 a	15.84 a	3.73 a 23.55	6.31 a 39.84	5.80 a 36.62
	T <sub>2</sub>	3.79 a	9.86 a	14.80 b	3.79 a 25.61	6.07 b 41.01	4.94 b 33.38
	T <sub>3</sub>	3.45 b	8.79 c	13.27 d	3.45 b 26.01	5.34 d 40.26	4.48 c 33.74
	CK	3.63 a	9.44 b	13.96 c	3.63 a 26.00	5.81 c 41.62	4.52 c 32.38
中早 221 Zhonghan 221	T <sub>1</sub>	3.67 a	7.32 a	13.37 a	3.67 a 27.46	3.65 a 27.31	6.05 a 45.23
	T <sub>2</sub>	3.43 ab	7.06 ab	12.37 b	3.43 ab 27.72	3.63 a 29.34	5.31 b 42.95
	T <sub>3</sub>	3.18 b	6.13 c	10.83 c	3.18 b 29.37	2.95 b 27.25	4.70 c 43.38
	CK	3.42 ab	6.88 b	11.97 b	3.42 ab 28.58	3.46 a 28.92	5.09 b 42.50

同一列同一生育期, 相同字母表示在 0.05 水平上差异不显著。下同。

S, Sowing date; FR, Full ripe stage. Values for the same stage within a column followed by the same letter indicate no significant difference at 0.05 level. The same as below.

表2 不同增氧模式下水稻产量及其构成

Table 2. Yield and its components of rice under different aeration treatment.

品种 Variety	处理 Treatment	单位有效穗数 Effective panicle number per/m <sup>2</sup>	每穗粒数 Grain number per panicle	千粒重 1000-grain weight/g	结实率 Seed-setting rate/%	产量 Yield/(t·hm <sup>-2</sup> )
中浙优 1 号 Zhongzheyou 1	T <sub>1</sub>	175.0 a	199.7 ab	27.69 a	90.5 a	7.93 a
	T <sub>2</sub>	171.3 a	197.4 b	27.73 a	89.9 a	7.38 b
	T <sub>3</sub>	155.3 b	200.7 ab	27.79 a	83.9 c	6.10 d
	CK	161.2 b	203.7 a	27.69 a	86.6 b	6.48 c
IR45765-3B	T <sub>1</sub>	221.8 a	164.6 a	27.84 a	87.4 a	8.09 a
	T <sub>2</sub>	215.8 a	162.6 a	27.80 a	86.4 a	7.57 b
	T <sub>3</sub>	201.9 b	163.7 a	27.67 a	81.2 c	6.28 d
	CK	207.0 b	165.7 a	27.78 a	83.5 b	6.84 c
中早 221 Zhonghan 221	T <sub>1</sub>	225.6 a	165.0 a	21.81 a	91.8 a	7.48 a
	T <sub>2</sub>	222.6 ab	165.9 a	21.65 a	91.1 a	6.89 b
	T <sub>3</sub>	213.3 b	169.1 a	21.83 a	88.0 b	5.94 d
	CK	215.8 b	167.0 a	21.94 a	88.5 b	6.33 c

且中浙优 1 号和 IR45765-3B 结实率显著低于 CK。除 T<sub>2</sub> 处理下中浙优 1 号的每穗粒数显著降低外, 增氧模式处理对水稻每穗粒数和千粒重无显著影响。

### 3 讨论

#### 3.1 不同增氧模式及水稻品种间差异

本研究通过增施过氧化钙、微纳气泡水灌溉和

表土湿润灌溉等 3 种栽培措施提高稻田溶解氧浓度。前人研究表明, 这 3 种增氧措施的增氧机理和增氧效果不同, 其中过氧化钙作为一种改善潜育化稻田土壤理化性状的良好碱性肥料, 施肥后在水中能够缓慢释放氧气, 并维持稻田较高的溶解氧浓度长达半月之久<sup>[15]</sup>; 微纳气泡水处理后灌溉水溶氧量显著上升, 并能保持 4~5 d<sup>[16]</sup>; 表土湿润灌溉通过减少田间灌水量以增强土壤通透性, 使土壤耕层处于富

氧状态,但易造成水稻干旱胁迫<sup>[28]</sup>。此外,不同生态型水稻品种生长习性也存在差异,Colmer<sup>[29]</sup>研究表明,水稻、旱稻和深水稻均具有较高的耐淹性,品种间根系孔隙度无显著差异,但深水稻对水分变化更为敏感,在淹水环境中,深水稻根系基部泌氧能力强于水稻和旱稻,内部氧气扩散速率也高于后两者;但在缺水条件下,深水稻根系干物质质量下降更为显著,而旱稻变化较小。

### 3.2 不同增氧模式下水稻叶片光合特性差异

目前,我国高产水稻光能利用率仅为1.3%~2.0%<sup>[30]</sup>,因此,提高水稻光合生产力和光能利用率是提高水稻产量的主要途径之一。水稻的光合速率除受自身遗传特性主导外,环境因素也会对水稻光能利用率和生产力产生影响。本研究表明,增加稻田溶氧量(T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>)能够提高3个水稻品种主要生育期叶片净光合速率、气孔导度和蒸腾速率,这可能是由于稻田溶氧量上升改善了水稻根部生长环境,根系活力的提高有助于水稻对土壤养分的吸收,更好地满足地上部对矿质营养的需求,保持叶片高光合生产能力<sup>[31,32]</sup>。付景等<sup>[33]</sup>研究也表明,超级稻较强的叶片光合能力与其较好的根系生理性状密切相关。

水稻属泽生植物,对水分需求量较大,当水分供应不足或发生缺水胁迫时会影响叶片生理机能,进而影响光合速率。徐俊增等<sup>[34]</sup>研究发现,随土壤水分降低,水稻功能叶片光响应曲线下降。本研究表明,表土湿润灌溉(T<sub>3</sub>)处理下,3个水稻品种功能叶片的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率和胞间二氧化碳浓度均低于淹水对照。与好气灌溉、间歇灌溉不同,本研究中表土湿润灌溉并未考虑水稻不同生育时期需水特性,从分蘖期到成熟期均只保持土壤湿润,土壤含水量大大低于田间持水量;虽然因为增加土表与空气的接触面积而提高了土壤通气性,但由于无法满足水稻的水分需求,尤其是需水量最大的孕穗开花期,使得水稻易遭受缺水胁迫,从而影响水稻生长。陈星等<sup>[28]</sup>研究也表明表土湿润灌溉下水稻氮素吸收量与利用率下降显著,不利于水稻生长。分析发现,气孔限制是造成表土湿润灌溉处理下叶片净光合速率下降的主要原因。而且,由于水分胁迫对气孔导度的限制超过了对光合速率的限制,而蒸腾作用的大小主要依赖气孔导度,导致表土湿润灌溉处理下,3个水稻品种叶片水分利用效率均高于淹水对照,这与陆红飞等<sup>[35]</sup>研究结果相一致。此外,不同品种间叶片光合特性存在差异,这可能与不同生态型水稻品种其生育期长短和

生理特性有关,但尚需进一步验证。

### 3.3 不同增氧模式下水稻干物质积累量差异

水稻干物质的生产特性是光合产物在植株体内积累、分配、运输与转化的结果<sup>[36,37]</sup>。林贤青等<sup>[38]</sup>研究表明,好气灌溉有利于水稻全生育期的群体干物质积累,促进水稻增产。本研究表明,增施过氧化钙和微纳气泡水灌溉处理下,3个水稻品种在拔节期、齐穗期和完熟期植株干物质质量均高于淹水对照,且到生育中后期阶段(拔节期—完熟期)干物质积累量差异进一步扩大。这主要由于增施过氧化钙和微纳气泡水灌溉处理下,3个水稻品种全生育期叶片SPAD值和叶面积指数均提高,延缓了叶片后期衰老,光合时间和光合面积持续期较长,利于光合物质积累,这与朱练峰等<sup>[16,17]</sup>的研究结果一致。可见,在前期适宜的物质积累条件下,促进中后期光合物质的生产能力,提高拔节后物质生产量是挖掘水稻产量潜力的物质基础。

与淹水对照相比,表土湿润灌溉处理下,3个水稻品种干物质质量均有所下降,这可能是由于水稻受水分亏缺影响,根系生长受阻,养分吸收和分蘖减少,不利于叶绿素合成,导致叶面积指数和叶片SPAD值下降。另外,表土湿润灌溉处理下,3个水稻品种播种期—拔节期阶段干物质积累量所占比例高于其他处理,表明缺水后水稻物质生产结构发生改变,植株加速衰老,后期光合生产力下降,不利于干物质积累。

### 3.4 不同增氧模式下水稻产量及其构成差异

水稻产量是各产量构成因素共同作用的结果,而产量高低又取决于光合物质生产能力、光合同化产物的运转和分配。马均等<sup>[39]</sup>研究表明,重穗型水稻抽穗后物质积累的优势明显,且茎鞘物质向穗部的转运量、转运率和转化率也远高于中、轻穗型品种。李杰等<sup>[36]</sup>研究认为在确保抽穗期干物质积累量适宜的前提下,水稻产量与拔节至成熟期干物质积累量呈极显著正相关。本研究结果表明,增施过氧化钙和微纳气泡水灌溉增氧处理下,在植株干物质积累量充足的基础上,水稻产量均高于或显著高于淹水对照,与前人研究结果一致。

翟虎渠等<sup>[40]</sup>研究指出水稻抽穗后仍能保持较高的光合效率并满足籽粒灌浆需求是提高水稻产量的关键环节。已有研究表明好气灌溉条件下水稻分蘖早发,前期分蘖、大分蘖比例和分蘖成穗率提高<sup>[24]</sup>。增氧处理还延长水稻灌浆时间,提高灌浆速率,弱勢粒均得到充分灌浆,这也是结实率提高的主要原因<sup>[41]</sup>。本研究通过对产量构成因素分析发现,

不同增氧模式对水稻有效穗数和结实率影响较大(表2)。增施过氧化钙和微纳气泡水灌溉增氧处理下, 3个水稻品种有效穗数增加, 生育后期叶片仍能保持高光合效率, 物质生产能力仍可维持在较高水平, 这也使得结实率显著高于对照, 与赵锋等<sup>[15]</sup>研究结果一致。表土湿润灌溉处理下, 3水稻品种有效穗数、每穗粒数和千粒重较淹水对照差异较小。中浙优1号和IR45765-3B结实率下降显著, 中旱221下降程度较小, 这可能与旱稻品种本身较强的抗水分胁迫能力有关。

### 参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2014.  
National Bureau of Statistics. China Statistical Yearbook. Beijing: China Statistics Press, 2014.
- [2] 陈永华, 严钦泉, 肖国樱. 水稻耐淹涝的研究进展. 中国农学通报, 2005, 21(12): 151-153.  
Chen Y H, Yan Q Q, Xiao G Y. Progresses in research of submergence tolerance in rice. *Chin Agric Sci Bull*, 2005, 21(12): 151-153. (in Chinese with English abstract)
- [3] Perata P, Armstrong W, Voeselek L A C J. Plants and flooding stress. *New Phytol*, 2011, 190(2): 269-273.
- [4] 刘占军, 艾超, 徐新朋, 张倩, 吕家珑, 周卫. 低产水稻土改良与管理研究策略. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 509-516.  
Liu Z J, Ai C, Xu X P, Zhang Q, Lv J L, Zhou W. Research strategy of reclamation and management for low-yield rice paddy soils. *Plant Nutr Fert Sci*, 2015, 21(2): 509-516. (in Chinese with English abstract)
- [5] Hole D J, Cobb B G, Hole P S, Drew M C. Enhancement of anaerobic respiration in root tips of zea mays following low-oxygen (hypoxic) acclimation. *Plant Physiol*, 1992, 99(1): 213-218.
- [6] Joshi R, Shukla A, Mani S C, Kumar P. Hypoxia induced non-apoptotic cellular changes during aerenchyma formation in rice (*Oryza sativa* L.) roots. *Physiol Mol Biol Plants*, 2010, 16(1): 99-106.
- [7] 徐春梅, 陈丽萍, 王丹英, 陈松, 章秀福, 石庆华. 低氧胁迫对水稻幼苗根系功能和氮代谢相关酶活性的影响. 中国农业科学, 2016, 49(8): 1625-1634.  
Xu C M, Chen L P, Wang D Y, Chen S, Zhang X F, Shi Q H. Effects of low oxygen stress on the root function and enzyme activities related to nitrogen metabolism in roots of rice seedlings. *Sci Agric Sin*, 2016, 49(8): 1625-1634. (in Chinese with English abstract)
- [8] Patel D P, Das A, Munda G C, Ghosh P K, Bordoloi J S, Kumar M. Evaluation of yield and physiological attributes of high-yielding rice varieties under aerobic and flood-irrigated management practices in mid-hills ecosystem. *Agric Water Mgt*, 2010, 97(9): 1269-1276.
- [9] 梅少华, 梅金先, 陈兴国, 张世春, 程应德, 詹文忠, 廖继雨, 吕银松. 洪涝灾害对水稻生产的影响评估及抗灾对策研究. 作物杂志, 2011(2): 89-93.  
Mei S H, Mei J X, Chen X G, Zhang S C, Cheng Y D, Zhan W Z, Liao J Y, Lv Y S. Flood impact assessment of rice production and disaster countermeasures. *Crops*, 2011(2): 89-93. (in Chinese with English abstract)
- [10] 宁金花, 陆魁东, 霍治国, 解娜, 黄晚华. 拔节期淹涝胁迫对水稻形态和产量构成因素的影响. 生态学杂志, 2014, 33(7): 1818-1825.  
Ning J H, Lu K D, Huo Z G, Xie N, Huang W H. Effects of waterlogging stress on rice morphology and yield component at the jointing stage. *Chin J Ecol*, 2014, 33(7): 1818-1825. (in Chinese with English abstract)
- [11] 徐富贤, 张林, 熊洪, 周兴兵, 朱永川, 刘茂, 蒋鹏, 郭晓艺. 杂交水稻中后期洪涝淹没与产量损失的关系. 作物学报, 2016, 42(9): 1381-1390.  
Xu F X, Zhang L, Xiong H, Zhou X B, Zhu Y C, Liu M, Jiang P, Guo X Y. Relationship between yield loss and flooding during middle and later growth periods in hybrid rice. *Acta Agron Sin*, 2016, 42(9): 1381-1390. (in Chinese with English abstract)
- [12] Aroca R, Porcel R, Ruiz-Lozano J M. Regulation of root water uptake under abiotic stress conditions. *J Exp Bot*, 2012, 63(1): 43-57.
- [13] 章秀福, 王丹英, 屈衍艳, 李华. 垄畦栽培水稻的植株形态与生理特性研究. 作物学报, 2005, 31(6): 742-748.  
Zhang X F, Wang D Y, Qu Y Y, Li H. Morphological and physiological characteristics of raised bed-cultivated rice. *Acta Agron Sin*, 2005, 31(6): 742-748. (in Chinese with English abstract)
- [14] 潘圣刚, 曹凑贵, 蔡明历, 汪金平, 王若涵, 原保忠, 翟晶. 不同灌溉模式下氮肥水平对水稻氮素利用效率、产量及其品质的影响. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(2): 283-289.  
Pan S G, Cao C G, Cai M L, Wang J P, Wang R H, Yuan B Z, Zhai J. Effects of nitrogen application on nitrogen use efficiency, grain yields and qualities of rice under different water regimes. *Plant Nutr Fert Sci*, 2009, 15(2): 283-289. (in Chinese with English abstract)
- [15] 赵锋, 王丹英, 徐春梅, 张卫建, 李凤博, 毛海军, 章秀福. 根际增氧模式的水稻形态、生理及产量响应特征. 作物学报, 2010, 36(2): 303-312.  
Zhao F, Wang D Y, Xu C M, Zhang W J, Li F B, Mao H J, Zhang X F. Response of morphological, physiological and yield characteristics of rice (*Oryza sativa* L.) to different oxygen-increasing patterns in rhizosphere. *Acta Agron Sin*, 2010, 36(2): 303-312. (in Chinese with English abstract)
- [16] 朱练峰, 刘学, 禹盛苗, 欧阳由男, 金千瑜. 增氧灌溉



- 对水稻生理特性和后期衰老的影响. *中国水稻科学*, 2010, 24(3): 257-263.
- Zhu L F, Liu X, Yu S M, Ouyang Y N, Jin Q Y. Effects of aerated irrigation on physiological characteristics and senescence at late growth stage of rice. *Chin J Rice Sci*, 2010, 24(3): 257-263. (in Chinese with English abstract)
- [17] 朱练峰, 张均华, 禹盛苗, 胡志华, 金千瑜. 磁化水灌溉促进水稻生长发育提高产量和品质. *农业工程学报*, 2014, 30(19): 107-114.
- Zhu L F, Zhang J H, Yu S M, Hu Z H, Jin Q Y. Magnetized water irrigation enhanced rice growth and development, improved yield and quality. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2014, 30(19): 107-114. (in Chinese with English abstract)
- [18] 徐春梅, 王丹英, 陈松, 陈丽萍, 章秀福. 增氧对水稻根系生长与氮代谢的影响. *中国水稻科学*, 2012, 26(3): 320-324.
- Xu C M, Wang D Y, Chen S, Chen L P, Zhang X F. Effect of aeration on root growth and nitrogen metabolism in rice. *Chin J Rice Sci*, 2012, 26(3): 320-324. (in Chinese with English abstract)
- [19] 徐春梅, 谢涛, 王丹英, 陈松, 计成林, 章秀福, 石庆华. 根际氧浓度对水稻分蘖期养分吸收和根系形态的影响. *中国水稻科学*, 2015, 29(6): 619-627.
- Xu C M, Xie T, Wang D Y, Chen S, Ji C L, Zhang X F, Shi Q H. Effects of rhizosphere oxygen concentration on nutrient uptake and root morphology of rice at tillering stage. *Chin J Rice Sci*, 2015, 29(6): 619-627. (in Chinese with English abstract)
- [20] 刘法谋. 根际氧水平对不同类型水稻形态与生理特性的影响. 北京: 中国农业科学院, 2011.
- Liu F M. Effect of rhizosphere dissolved oxygen levels on morphological and physiological characteristics in different types of rice (*Oryza sativa* L.). Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011.
- [21] 周振翔, 李志康, 戴琪星, 孔祥胜, 王志琴, 顾俊飞. 水稻光合生理限制因素及改善途径研究. *中国稻米*, 2015, 21(4): 25-32.
- Zhou Z X, Li Z K, Dai Q X, Kong X S, Wang Z Q, Gu J F. Physiological limitations and possible improve approaches of rice photosynthesis. *China Rice*, 2015, 21(4): 25-32. (in Chinese with English abstract)
- [22] 邹桂花, 梅捍卫, 余新桥, 刘鸿艳, 刘国兰, 李名寿, 罗利军. 不同灌水量对水、旱稻营养生长和光合特性及其产量的影响. *作物学报*, 2006, 32(8): 1179-1183.
- Zou G H, Mei H W, Yu X Q, Liu H Y, Liu G L, Li M S, Luo L J. Effects of different water supply treatment on vegetative growth, photosynthetic characteristics and grain yield in paddy and upland rice. *Acta Agron Sin*, 2006, 32(8): 1179-1183. (in Chinese with English abstract)
- [23] 王唯逍, 刘小军, 田永超, 姚霞, 曹卫星, 朱艳. 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, Yao X, Cao W X, Zhu Y. 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)
- [24] 林贤青, 朱德峰, 李春寿, 阮关海, 张玉屏, 陈惠哲. 水稻不同灌溉方式下的高产生理特性. *中国水稻科学*, 2005, 19(4): 328-332.
- Lin X Q, Zhu D F, Li C S, Ruan G H, Zhang Y P, Chen H Z. Physiological characteristics of high yielding rice under different irrigation methods. *Chin J Rice Sci*, 2005, 19(4): 328-332. (in Chinese with English abstract)
- [25] 郑华斌, 刘建霞, 姚林, 贺慧, 黄璜. 垄作梯式生态稻作对水稻光合生理特性及产量的影响. *应用生态学报*, 2014, 25(9): 2598-2604.
- Zheng H B, Liu J X, Yao L, He H, Huang H. Effect of ridge & terraced ecological rice farming on rice photosynthetic characteristics and yield. *Chin J Appl Ecol*, 2014, 25(9): 2598-2604. (in Chinese with English abstract)
- [26] Li Y, Gao Y X, Xu X M, Shen Q R, Guo S W. Light-saturated photosynthetic rate in high-nitrogen rice (*Oryza sativa* L.) leaves is related to chloroplastic CO<sub>2</sub> concentration. *J Exp Bot*, 2009, 60(8): 2351-2360.
- [27] 徐晨, 凌风楼, 徐克章, 武志海, 刘晓龙, 安久海, 赵兰坡. 盐胁迫对不同水稻品种光合特性和生理生化特性的影响. *中国水稻科学*, 2013, 27(3): 280-286.
- Xu C, Ling F L, Xu K Z, Wu Z H, Liu X L, An J H, Zhao L P. Effect of salt stress on photosynthetic characteristics and physiological and biochemical traits of different rice varieties. *Chin J Rice Sci*, 2013, 27(3): 280-286. (in Chinese with English abstract)
- [28] 陈星, 李亚娟, 刘丽, 方素萍, 方萍, 林咸永. 灌溉模式和供氮水平对水稻氮素利用效率的影响. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(2): 283-290.
- Chen X, Li Y J, Liu L, Fang S P, Fang P, Lin X Y. Effects of water management patterns and nitrogen fertilizer levels on nitrogen use efficiency of rice. *Plant Nutr Fert Sci*, 2012, 18(2): 283-290. (in Chinese with English abstract)
- [29] Colmer T D. Aerenchyma and an inducible barrier to radial oxygen loss facilitate root aeration in upland, paddy and deep-water rice (*Oryza sativa* L.). *Ann Bot*, 2003, 91: 301-309.
- [30] Zhang Y B, Tang Q Y, Zou Y B, Li D Q, Qin J Q, Yang S H, Chen L J, Xia B, Peng S B. Yield potential and radiation use efficiency of "super" hybrid rice grown under subtropical conditions. *Field Crops Res*, 2009, 114(1): 91-98.
- [31] 王丹英, 韩勃, 章秀福, 邵国胜, 徐春梅, 符冠富. 水

- 稻根际含氧量对根系生长的影响. 作物学报, 2008, 34(5): 803-808.
- Wang D Y, Han B, Zhang X F, Shao G S, Xu C M, Fu G F. Influence of rhizosphere oxygen concentration on rice root growth. *Acta Agron Sin*, 2008, 34(5): 803-808. (in Chinese with English abstract)
- [32] 赵霞, 徐春梅, 王丹英, 陈松, 陶龙兴, 章秀福. 根际溶氧量对分蘖期水稻生长特性及其氮素代谢的影响. 中国农业科学, 2015, 48(18): 3733-3742.
- Zhao X, Xu C M, Wang D Y, Chen S, Tao L X, Zhang X F. Effect of rhizosphere oxygen on the growth characteristics of rice and its nitrogen metabolism at tillering Stage. *Sci Agric Sin*, 2015, 48(18): 3733-3742. (in Chinese with English abstract)
- [33] 付景, 陈露, 黄钻华, 王志琴, 杨建昌. 超级稻叶片光合特性和根系生理性状与产量的关系. 作物学报, 2012, 38(7): 1264-1276.
- Fu J, Chen L, Huang Z H, Wang Z Q, Yang J C. Relationship of leaf photosynthetic characteristics and root physiological traits with grain yield in super rice. *Acta Agron Sin*, 2012, 38(7): 1264-1276. (in Chinese with English abstract)
- [34] 徐俊增, 彭世彰, 魏征, 侯会静. 不同供氮水平及水分调控条件下水稻光合作用光响应特征. 农业工程学报, 2012, 28(2): 72-76.
- Xu J Z, Peng S Z, Wei Z, Hou H J. Characteristics of rice leaf photosynthetic light response curve with different water and nitrogen regulation. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2012, 28(2): 72-76. (in Chinese with English abstract)
- [35] 陆红飞, 郭相平, 甄博, 王振昌, 周新国, 李小朴. 旱涝交替胁迫条件下粳稻叶片光合特性. 农业工程学报, 2016, 32(8): 105-112.
- Lu H F, Guo X P, Zhen B, Wang Z C, Zhou X G, Li X P. Photosynthetic characteristics of Japonica rice leaves under alternative stress of drought and waterlogging. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2016, 32(8): 105-112. (in Chinese with English abstract)
- [36] 李杰, 张洪程, 常勇, 龚金龙, 郭振华, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 高辉. 不同种植方式水稻高产栽培条件下的光合物质生产特征研究. 作物学报, 2011, 37(7): 1235-1248.
- Li J, Zhang H C, Chang Y, Gong J L, Guo Z H, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y, Gao H. Characteristics of photosynthesis and matter production of rice with different planting methods under high-yielding cultivation condition. *Acta Agron Sin*, 2011, 37(7): 1235-1248. (in Chinese with English abstract)
- [37] 邓飞, 王丽, 刘利, 刘代银, 任万军, 杨文钰. 不同生态条件下栽培方式对水稻干物质生产和产量的影响. 作物学报, 2012, 38(10): 1930-1942.
- Deng F, Wang L, Liu L, Liu D Y, Ren W J, Yang W Y. Effects of cultivation methods on dry matter production and yield of rice under different ecological conditions. *Acta Agron Sin*, 2012, 38(10): 1930-1942. (in Chinese with English abstract)
- [38] 林贤青, 周伟军, 朱德峰, 张玉屏. 稻田水分管理方式对水稻光合速率和水分利用率的影响. 中国水稻科学, 2004, 18(4): 333-338.
- Lin X Q, Zhou W J, Zhu D F, Zhang Y P. Effect of water management on photosynthetic rate and water use efficiency of leaves in paddy rice. *Chin J Rice Sci*, 2004, 18(4): 333-338. (in Chinese with English abstract)
- [39] 马均, 朱庆森, 马文波, 田彦华, 杨建昌, 周开达. 重穗型水稻光合作用、物质积累与运转的研究. 中国农业科学, 2003, 36(4): 375-381.
- Ma J, Zhu Q S, Ma W B, Tian Y H, Yang J C, Zhou K D. Studies on the photosynthetic characteristics and accumulation and transformation of assimilation product in heavy panicle type of rice. *Sci Agric Sin*, 2003, 36(4): 375-381. (in Chinese with English abstract)
- [40] 翟虎渠, 曹树青, 万建民, 陆巍, 张荣铎, 李良璧, 匡廷云, 闵绍楷, 朱德峰, 程式华. 超高产杂交稻灌浆期光合功能与产量的关系. 中国科学: C辑, 2002, 32(3): 211-217.
- Zhai H Q, Cao S Q, Wan J M, Lu W, Zhang R X, Li L B, Kuang T Y, Min S K, Zhu D F, Cheng S H. The relationship between photosynthetic function and grain yield at filling stage of super-high-yield hybrid rice. *Sci China (Ser C)*, 2002, 32(3): 211-217. (in Chinese)
- [41] 赵锋, 张卫建, 章秀福, 王丹英, 徐春梅. 稻田增氧模式对水稻籽粒灌浆的影响. 中国水稻科学, 2011, 25(6): 605-612.
- Zhao F, Zhang W J, Zhang X F, Wang D Y, Xu C M. Effects of oxygen-increasing patterns in paddy fields on rice grain-filling. *Chin J Rice Sci*, 2011, 25(6): 605-612. (in Chinese with English abstract)