植物营养与肥料学报 2016, 22(6): 1503–1512
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer
doi: 10.11674/zwyf.15517
http://www.plantnutrifert.org

根部增氧模式对水稻产量与氮素利用的影响

胡志华[1,2]，朱练峰[1]，林育炯[1]，张均华[1]，胡继杰[1]，禹盛苗[1]，曹小闯[1]，金千瑜[1*]
（1 中国水稻研究所，浙江杭州 310006；2 江西省红壤研究所，国家红壤改良工程技术研究中心，江西南昌 330046）

摘要:【**目的**】根部缺氧是影响水稻生长发育与养分吸收的主要非生物因子之一。为了明确不同增氧模式的作用效果，探明水稻产量和氮素利用效率对根部增氧的响应特征，本试验研究了不同根部增氧模式下水稻生长动态、产量和氮素吸收积累与转运特性。【**方法**】以深水水稻品种 IR45765-3B 和水稻品种中浙优 1 号为材料，试验在顶部用透明塑料膜遮雨的水泥栽培池中进行，试验设施用 CaO_2 (CaO_2)、微纳气泡水增氧灌溉 (MBWI) 和干湿交替灌溉 (AWD) 等三个增氧模式处理及淹水对照 (WL)。分别测定了两品种的生长动态、产量和与氮素利用相关的指标。【**结果**】与淹水对照相比较，根部增氧处理均显著促进 IR45765-3B 分蘖的发生，增幅为 10.7%～33.6%，而中浙优 1 号茎蘖数仅在 CaO_2 处理和 AWD 处理部分调查时期显著高于对照；根部增氧处理显著提高了两品种的干物质积累量，并显著提高两品种水稻产量，增氧处理下 IR45765-3B 产量较对照分别增加 26.3% (CaO_2)、21.8% (MBWI) 和 10.7% (AWD)，而中浙优 1 号产量较对照分别增加 51.0% (CaO_2)、52.2% (MBWI) 和 29.68% (AWD)；根部增氧显著增加水稻的氮素吸收与利用，与对照相比较，增氧处理下 IR45765-3B 和中浙优 1 号氮肥偏生产力均显著升高；施用 CaO_2 和 MBWI 处理水稻氮素转运效率和氮素转运贡献降低，但齐穗期后两品种的氮素吸收量显著增加，齐穗期后 IR45765-3B 和中浙优 1 号在 CaO_2 处理下的氮素吸收量较对照分别增加了 73.4% 和 119.2%，MBWI 处理下的氮素吸收量较对照分别增加了 128.7% 和 106.5%。【**结论**】根部增氧显著促进水稻分蘖发生与成穗，增加水稻干物质积累并显著提高产量；在氮素利用方面，增氧处理下水稻植株对氮素的吸收与积累显著增加，且增氧处理显著促进了水稻对氮素的利用效率；三种增氧模式中 CaO_2 和 MBWI 的效果较 AWD 更明显。

关键词: 水稻；施用 CaO_2；微纳气泡水增氧灌溉；干湿交替灌溉；产量；氮素利用
中图分类号: S511.062　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008–505X(2016)06–1503–10

Effect of root aeration methods on rice yield and nitrogen utilization

HU Zhi-hua[1,2], ZHU Lian-feng[1], LIN Yu-jiong[1], ZHANG Jun-hua[1], HU Ji-jie[1], YU Sheng-miao[1], CAO Xiao-chuang[1], JIN Qian-yu[1*]
(*1 State Key Laboratory of Rice Biology, China National Rice Research Institute, Hangzhou 310006, China; 2 Jiangxi Institute of Red Soil/National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Nanchang 331717, China*)

Abstract:【**Objectives**】Rhizosphere anoxia is one of the main abiotic factors that affect the rice growth and nutrient absorption. In order to define consequence of different root aeration methods and their response characteristics on rice yield and nitrogen utilization, an experiment was conducted to study rice growth dynamic, yield and nitrogen utilization status under different root aeration methods.【**Methods**】Two rice cultivars, IR45765-3B(deep water rice) and Zhongzheyou No. 1 (ZZY-1, rice), were used as materials. Rice was planted in cement pools with overlay on the proof to avoid rainfall, and there were four treatments, calcium peroxide (CaO_2), micro-nano bubble water irrigation (MBWI), alternate wetting and drying (AWD) and control (waterlogging, WL). The effects of rhizosphere aeration methods on rice growth, yield and nitrogen utilization were examined .

收稿日期: 2015–12–30　　**接受日期:** 2016–05–09
基金项目: 国家自然科学基金资助项目（30900880, 31270035）；公益性行业（农业）科研专项（201503122-11）；浙江省自然科学基金资助项目（LY13C130006）资助。
作者简介: 胡志华（1990—），男，江西贵溪人，硕士，主要从事植物营养与生态研究。E-mail：hzh218314@yeah.net
* 通信作者 E-mail: jinqy@mali.hz.zj.cn

【**Results**】Compared with the water logging (WL) control, the three root aeration treatments significantly increased the tillering of IR45765-3B by 10.7% – 33.6%, and in case of ZZY-1 the tiller number was increased significantly under the CaO_2 and AWD treatments in some growth periods recorded. The rhizosphere aeration significantly increased the dry matter accumulation and yield, and compared with the WL control, the yields of IR45765-3B were increased by 26.3% (CaO_2), 21.8% (MBWI) and 10.7% (AWD) and the yields of ZZY-1 were increased by 51.0% (CaO_2), 52.2% (MBWI) and 29.68% (AWD), respectively. The root aeration significantly enhanced the nitrogen accumulation and utilization, and compared with the WL, the nitrogen partial factor productivity (NPFP) of IR45765-3B and ZZY-1 was increased significantly under the three aeration treatments. The nitrogen transportation efficiencies (NTE) and the nitrogen transportation contribution rates (NTCR) were decreased under the CaO_2 and MBWI treatments, while the nitrogen accumulation amounts of IR45765-3B and ZZY-1 after the full heading stage under the CaO_2 treatment were increased by 73.4% and 119.2%, and the amounts under the MBWI treatment were increased by 128.7% and 106.5%, respectively. 【**Conclusions**】The root aeration significantly enhanced tiller development and ear formation progress of rice, and the dry matter accumulation and yield were increased significantly. The root aeration significantly enhanced the nitrogen accumulation and nitrogen use efficiency. Comprehensively, the CaO_2 application and micro-nano bubble water irrigation are more effective than the alternate wetting and drying method.

Key words: rice; CaO_2 application; micro-nano bubble water irrigation; alternate wetting and drying irrigation; yield; N efficiency

水稻是我国重要的粮食作物，常年种植面积在3330万公顷左右，主要分布于江西、湖南、湖北、安徽、江苏、广西、四川、黑龙江等省[1]。洪涝胁迫是我国最为严重的自然灾害之一，统计资料表明，1950～1990年全国每年平均受涝面积为814万公顷，且洪涝爆发多在我国水稻主产区内。此外，我国南方冷浸田、涝渍地以及潜育化稻田面积巨大，制约这些地区水稻产量的关键非生物胁迫因子是根部缺氧[2–3]。氧参与了植株体内的磷酸化等重要过程，为植株新陈代谢提供了能量来源，缺氧或无氧条件下水稻根系呼吸以无氧呼吸为主，产生的能量仅为氧气供应充足时能量的3%～5%[4]；根部缺氧导致水稻生长和产量潜力受到严重抑制，其中在孕穗期到灌浆期对水稻影响最大[5]。此外，根部氧环境影响水稻的氮素吸收形态与积累量，从而显著影响水稻对氮素的吸收与利用[6–9]，Licausi等[10]发现低氧下硝酸还原酶(NR)活性上升，而亚硝酸还原酶(NiR)活性受到显著抑制[11]；低氧下水稻氨基酸代谢显著受到影响[6]。因而，改善水稻根部氧环境对于促进水稻生长、产量形成和养分利用具有重要意义。

近年来，针对水稻生长中根部氧与水稻生长关系作了一系列的研究与探索。研究发现，根部增氧能够显著增加水稻产量，主要表现为促进水稻生长发育和根系建成，并能显著延缓水稻叶片的后期衰老等[12–14]。根部低氧条件下，水稻根系硝态氮含量、游离氨基酸和可溶性糖含量均增加，且一些与水稻氮代谢相关的关键酶活性均增强[15]；Thomas等研究指出，低氧下硝态氮能够降低低氧对植物的损害，且适当增加硝态氮的比例能够促进水稻生长，增加产量和氮肥利用率[16–18]。赵霞等[19]和赵峰等[20]通过研究根际氧浓度与氮素形态对水稻生长的互作效应发现，铵态氮和硝态氮混用比使用单一态氮素更利于降低低氧对水稻的损害。这些研究成果为生产中改善低氧胁迫危害提供了重要的科学依据。目前水稻生产上运用较多的增氧措施有水旱轮作、中耕耘田、晒田、超微气泡水灌溉、施用过氧化尿素和过氧化钙等[14, 21]。传统的水旱轮作、中耕耘田、晒田主要通过增加土壤透气性来缓解植株低氧胁迫；超微气泡水灌溉主要通过物理变化增加灌溉水中氧浓度来提升根部氧浓度，过氧化尿素则通过其溶于水后的化学变化释放氧气来实现增氧的效果，施用过氧化钙可提高根部氧和钙离子含量，既可以缓解根部缺氧现象，还可以通过钙离子调节根系呼吸代谢来缓解植株的低氧胁迫[22–25]。然而目前对于不同增氧模式下水稻生长发育和氮素利用状况的研究较少，且缺乏对不同增氧模式效果的比较研究。鉴于此，本试验在顶部遮雨水泥池栽条件下，通过控制灌水使水稻在长期积水的环境下生长，并设置不同的增氧

模式处理，研究其对水稻生长、产量及氮素利用的影响，以期为水稻增氧栽培技术体系建成和冷浸田和潜育化稻田的改良提供理论依据与技术参考。

1　材料与方法

1.1　试验设计

试验于 2014 年在中国水稻研究所富阳试验基地网室进行，试验小区土壤为水稻土，其理化性质为：全氮 2.6 g/kg，全磷 0.46 g/kg，全钾 12.54 g/kg，速效氮 23.73 mg/kg，有效磷 11.06 mg/kg，速效钾 101.61 mg/kg，土壤氧化还原电位 (Eh) 168.3 mV，pH 为 6.8。供试品种为 IR45765-3B (深水稻) 和中浙优 1 号 (水稻)。

试验采用裂区设计，主处理包括施用过氧化钙 (以下简称 CaO_2)、微纳气泡水灌溉 (micro-bubble aerated water irrigation, 以下简称 MBWI)、干湿交替灌溉 (alternate wetting and drying, 以下简称 AWD) 和淹水对照 (water logging, 以下简称 WL) 4个不同的根部氧模式处理，副处理为 IR45765-3B 和中浙优 1 号两品种。小区面积 2.6 m^2，3 次重复。不同根部增氧处理的具体方法为：施用过氧化钙处理 (CaO_2)，在水稻全生育期内保持淹水状态，分别在基肥施用时、分蘖盛期、齐穗期和灌浆期等量施用过氧化钙，过氧化钙总用量折合活性氧总量为 16 kg/hm^2，所用 CaO_2 为有效含量 60% 的粉末 CaO_2；微纳气泡水灌溉处理 (MBWI)，在水稻全生育期内保持淹水状态，分别在基肥施用时、分蘖盛期、齐穗期和灌浆期采用经微纳气泡发生器进行增氧处理的水进行灌溉；干湿交替灌溉处理 (AWD)，采用干湿交替的方法管理田间水分，每次灌水深度为 8～ 10 cm，待自然落干至表层土壤出现细小裂缝后复水至相同水深；淹水对照 (WL)，在水稻全生育期保持淹水状态，各处理淹水时水层深度为 8～ 10 cm。

IR45765-3B 和中浙优 1 号均于 5 月 23 日播种，6 月 13 日移栽，移栽规格为 20 cm × 15 cm，每穴单本种植。田间施用 N 180 kg/hm^2、P_2O_5 75 kg/hm^2、K_2O 150 kg/hm^2。氮肥按基肥、蘖肥、穗肥质量比 5∶3∶2 施用；磷肥全作基肥，钾肥按基肥、穗肥质量比 7∶3 施用，本试验所用氮、磷、钾肥料分别为尿素、钙镁磷肥 (有效 P_2O_5 为 12%，有效 CaO 为 30%) 和氯化钾 (含量为 60%)。其余田间农事管理同当地一般高产栽培管理措施。

1.2　测定方法

1.2.1 水稻茎蘖动态调查　各个小区在移栽确定连续的 10 株水稻为定点苗，并于移栽后 1 周开始记录其分蘖数，每周一次，至齐穗期结束。

1.2.2 干物质量测定　分别于分蘖期、分蘖盛期、齐穗期、灌浆期、成熟期每小区调查 10 株的茎蘖数，按平均数取其中代表性植株 3 株，按茎、叶、穗分样，105℃ 杀青 30 min，85℃ 烘至恒重后称量不同部位的干物质量。

1.2.3 植株氮素含量测定　将各时期的烘干样粉碎过 0.178 mm 筛，用 H_2SO_4–H_2O_2 法 420℃ 消化 2 h，采用半微量凯氏定氮法测定[26]。

1.2.4 测产与考种　成熟期调查有效穗数，每小区按其平均数取代表性植株 9 穴，风干后测其单株产量，结合小区种植密度计算水稻产量；考种主要考查每穗粒数、结实率、千粒重等指标。

1.3　相关评价指标计算

氮素利用效率 (nitrogen utilization efficiency, NUE) = 籽粒产量 /总氮累积量；

氮素运转效率 (N transportation efficiency, NTE) = 单株抽穗后茎叶氮表观输出量 (抽穗期茎叶氮总量与成熟期茎叶氮总量之差)/抽穗期茎叶氮积累总量 × 100%;

氮素转运贡献率 (N transportation contribution rate, NTCR) = 单株抽穗后茎叶氮的表观输出量/成熟期籽粒氮素积累量 × 100%;

氮素收获指数 (N harvest index, NHI) = 籽粒氮素累积量 (Ng)/总氮累积量 (Nt)；

氮素偏生产力 (N partial factor productivity, NPFP) = 产量/施氮量。

1.4　数据处理

数据采用 SAS 9.2 数据分析软件进行统计分析，显著性检验采用 Ducan 法比较，并用 Excel 绘图工具进行绘图。

2　结果与分析

2.1　不同增氧模式对水稻产量的影响

根部增氧显著影响水稻产量与产量构成 (表 1)。不同处理下两品种产量表现一致，均表现为 CaO_2 和 MBWI 处理产量相当并显著高于 AWD 处理，而对照 WL 处理产量最低，且显著低于增氧处理。与对照相比，三种根部增氧模式下 IR45765-3B 和中浙优

1 号产量分别增加了 26.3% (CaO_2)、21.8% (MBWI)、10.7% (AWD) 和 51.0% (CaO_2)、52.2% (MBWI)、29.68% (AWD)。不同增氧模式对 IR45765-3B 和中浙优 1 号的产量构成因子的影响不完全相同。与淹水对照相比，三种增氧模式均显著增加了 IR45765-3B 的有效穗数，并提高其结实率，其中 MBWI 处理结实率显著高于对照，但显著降低了每穗粒数，而对千粒重影响不大。对中浙优 1 号来说，增氧处理主要是显著提高了水稻有效穗和每穗粒数，而对结实率和千粒重影响不显著。

表 1 不同增氧模式下水稻产量和产量构成因子

Table 1 Grain yield and yield components of rice under different root aeration methods

品种 Cultivar	处理 Treatment	单株有效穗 Effective panicles per plant	每穗粒数 Grains/panicle	结实率 Seed setting (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Yield (kg/hm^2)
IR45765-3B	CaO_2	7.15 ± 0.28 a	169 ± 4.0 b	86.85 ± 0.73 ab	27.09 ± 0.21 a	9307.9 ± 152.4 a
	MBWI	7.15 ± 0.07 a	162 ± 2.4 b	89.59 ± 1.12 a	26.86 ± 0.40 a	8971.4 ± 190.5 a
	AWD	6.75 ± 0.25 a	167 ± 4.7 b	84.26 ± 0.88 b	26.24 ± 0.61 a	8158.7 ± 288.9 b
	WL	5.10 ± 0.26 b	196 ± 4.0 a	84.66 ± 1.20 b	26.71 ± 0.13 a	7368.3 ± 136.5 c
中浙优 1 号 ZZY-1	CaO_2	6.90 ± 0.42 a	170 ± 5.3 a	95.16 ± 0.83 a	25.24 ± 0.46 a	8707.9 ± 282.5 a
	MBWI	6.75 ± 0.10 a	178 ± 4.9 a	95.15 ± 1.23 a	24.01 ± 0.40 a	8774.6 ± 114.3 a
	AWD	6.00 ± 0.46 b	174 ± 5.6 a	92.51 ± 1.61 a	24.19 ± 0.72 a	7476.2 ± 361.9 b
	WL	4.80 ± 0.23 c	160 ± 1.2 b	95.14 ± 0.46 a	24.92 ± 0.38 a	5765.1 ± 130.2 c

注（Note）：MBWI—微纳气泡水灌溉 Micro-nano bubble water irrigation; AWD—干湿交替灌溉 Alternate wetting and drying; WL—长期积水 Water logging; 数据后不同字母表示同一品种不同处理间在 0.05 水平差异显著 Values followed by different letters are significantly different among treatments for the same cultivar at the 0.05 level.

2.2 根部增氧对水稻茎蘖动态与干物质积累的影响

根部增氧显著影响水稻的分蘖发生 (图 1)，但不同品种对其响应情况差异显著。三种增氧处理下，IR45765-3B 分蘖从第 3 周开始均显著高于淹水处理。三个增氧模式间则表现在 3～7 周内 CaO_2 处理分蘖显著高于 MBWI 和 AWD 处理，MBWI 和 AWD 间差异不显著，移栽 7 周后单从分蘖数看，三种增氧处理间无显著差异，三种增氧处理的最高茎蘖数分别较对照增加 33.6% (CaO_2)、18.6% (MBWI) 和 10.7% (AWD)；中浙优 1 号分蘖对于不同增氧处理的响应不同，其中 CaO_2 处理水稻每株茎蘖数从移栽后第 2 周开始便一直显著高于对照，AWD 处理只在第 3、4 周和第 7 周以后显著高于淹水处理，而 MBWI 处理在前期对促进水稻分蘖形成作用较小，但有利于水稻分蘖盛期后分蘖成穗。

根部增氧显著增加了水稻的干物质积累 (图 2)。增氧处理下，IR45765-3B 干物质积累量从分蘖期到

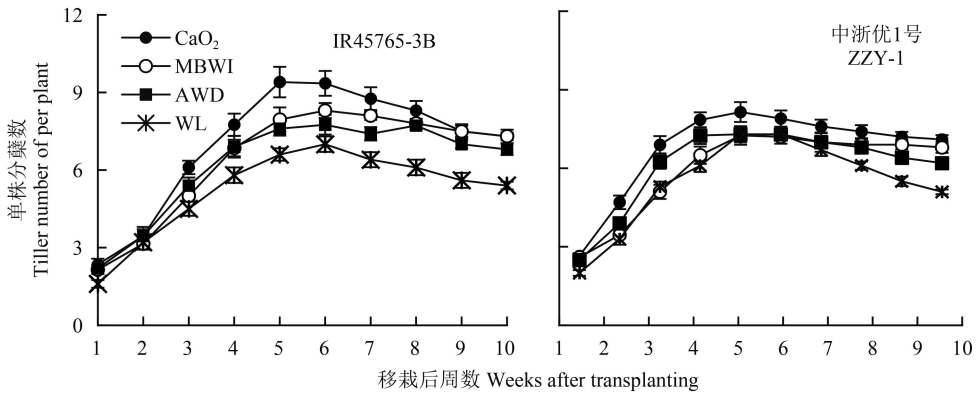

图 1 不同增氧处理下水稻的分蘖动态

Fig. 1 Dynamics of rice tiller under different root aeration methods

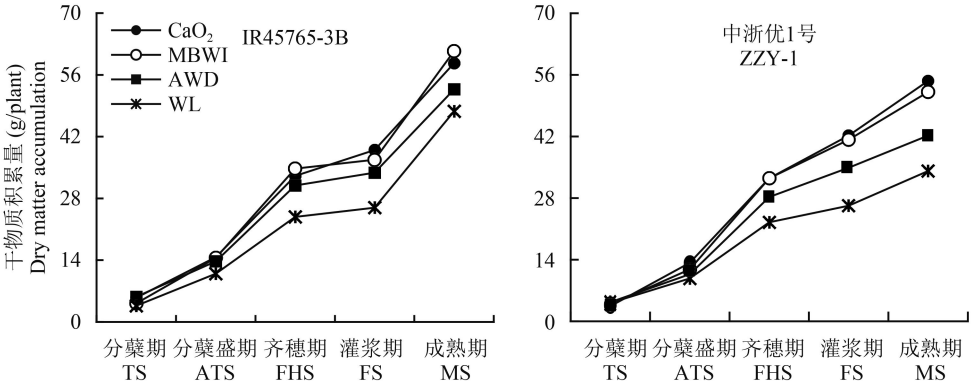

图 2　不同根部增氧模式水稻各生育期干物质积累量

Fig. 2　Dry matter accumulation of rice under different root aeration methods at different growth stages

[注（Note）：TS—Tillering stage; ATS—Active tillering stage; FHS—Full heading stage; FS—Filling stage; MS—Mature stage.]

成熟期均显著高于淹水处理，而不同增氧处理间水稻干物质积累在灌浆期和成熟期差异显著，主要表现为 CaO_2 和 MBWI 处理的干物质量显著高于 AWD 处理；增氧处理下，中浙优 1 号干物质积累量在分蘖期与对照无显著差异，分蘖盛期到成熟期，增氧处理显著提高了干物质积累量；从齐穗期到成熟期，三种增氧处理间干物质积累量差异显著，主要表现为 CaO_2 和 MBWI 处理的干物质积累增幅显著高于 AWD 处理。

2.3　不同增氧模式下水稻氮素吸收与积累特征

根部增氧显著影响水稻根系对氮素的吸收 (图 3)。与淹水处理相比较，三种增氧处理显著增加了 IR45765-3B 各个时期植株的总氮积累量，不同增氧处理间水稻植株氮积累的差异仅在成熟期达显著水平，表现为 MBWI > CaO_2 > AWD。增氧处理从分蘖盛期到成熟期显著增加了中浙优 1 号植株的总氮积累量，三种增氧处理间水稻植株总氮积累量差异主要表现在齐穗期到成熟期植株氮素积累量的增加上，其中 IR45765-3B 齐穗期到成熟期的植株氮素积累增加量在三种增氧处理下较淹水对照 WL 处理分别增加 73.4% (CaO_2)、128.7% (MBWI) 和 28.2% (AWD)，中浙优 1 号则为 119.2% (CaO_2)、106.5% (MBWI) 和 6.5% (AWD)。这表明 CaO_2 和 MBWI 处理在促进水稻氮素吸收与积累，尤其是齐穗期到成熟期间的氮素吸收较 AWD 处理具有明显的优势。

水稻茎、叶、穗等器官氮素积累的动态表明，根部增氧处理显著影响水稻不同器官各个生育期的氮素积累 (图 4)。三种增氧处理下两品种水稻茎中的氮素积累量均显著增加，但不同品种的氮素积累方式有所不同，三种增氧处理间 IR45765-3B 品种茎中氮素积累量差异不显著，但在分蘖盛期和齐穗期，MBWI 和 AWD 处理下茎中氮素积累量显著高于 CaO_2 处理，在成熟期则表现为 CaO_2 和 MBWI 处理

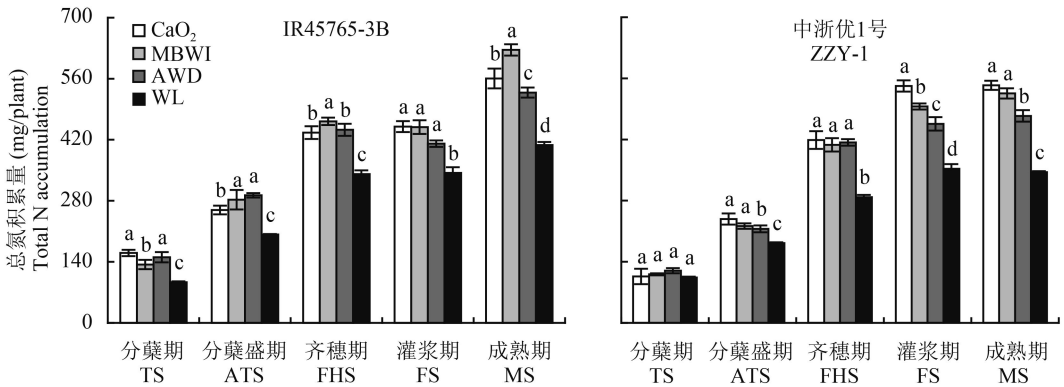

图 3　不同增氧模式水稻各生育期总氮积累量

Fig. 3　The total N accumulation of rice under different root aeration methods at main growth stages

[注（Note）：TS—Tillering stage; ATS—Active tillering stage; FHS—Full heading stage; FS—Filling stage; MS—Mature stage. 方柱上不同字母表示同一生育期不同处理间在0.05水平显著 Different letters above the bars indicate significantly different among treatments for the same growth stage.]

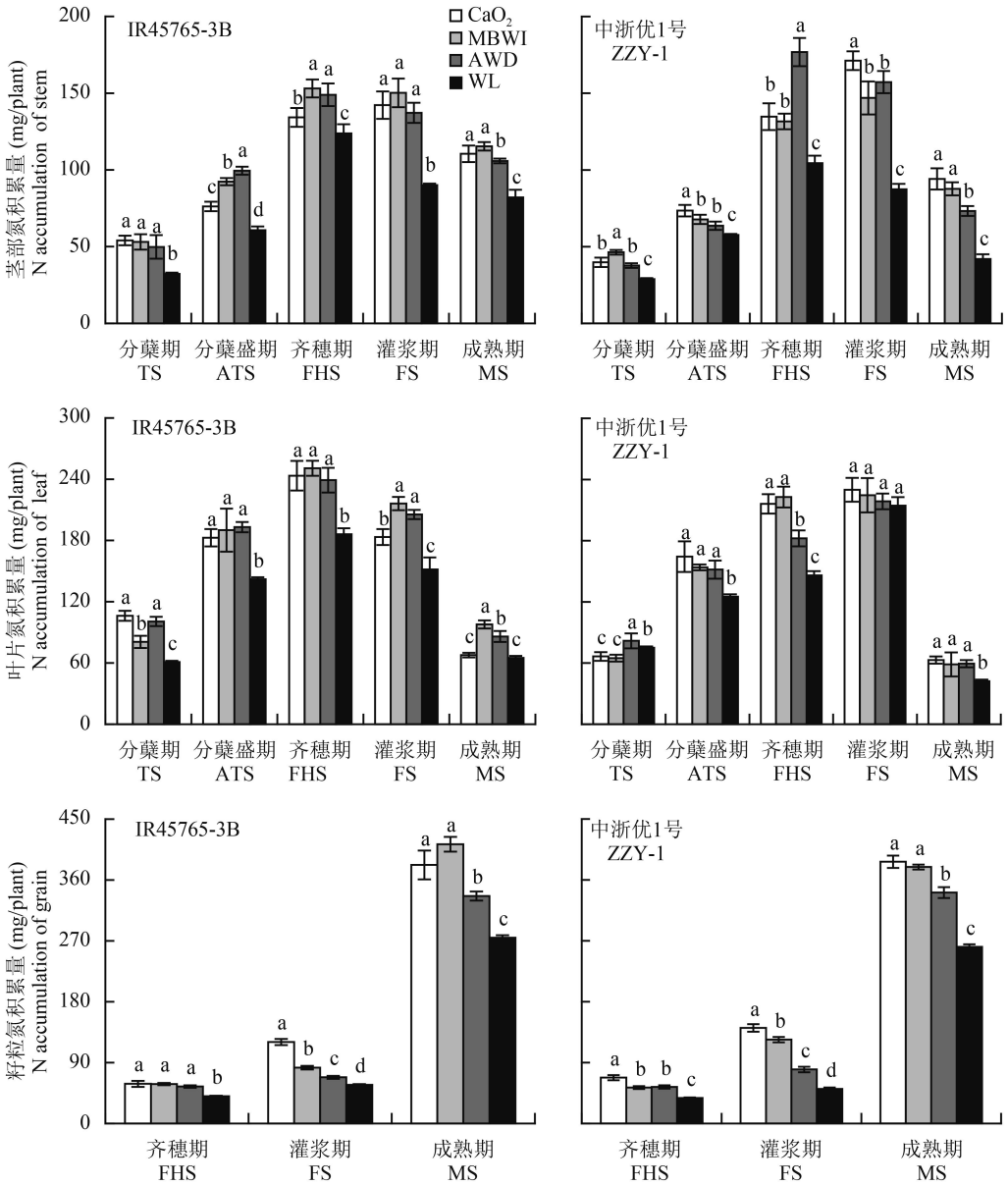

图 4 不同根部增氧模式水稻各时期茎、叶和籽粒中氮素积累量

Fig. 4 N accumulation in stems, leaves and grains under root aeration methods at different growth stages of rice

[注（Note）：TS—Tillering stage; ATS—Active tillering stage; FHS—Full heading stage; FS—Filling stage; MS—Mature stage. 方柱上不同字母表示同一生育期不同处理间在0.05水平显著 Different letters above the bars indicate significantly different among treatments for the same growth stage.]

显著高于 AWD 处理。各生育期内中浙优 1 号茎中氮素积累量在不同增氧处理间均存在显著差异，在分蘖期表现为 MBWI 处理显著高于 CaO_2 和 AWD 处理，在分蘖盛期和灌浆期 CaO_2 处理显著高于 MBWI 和 AWD 处理，在齐穗期表现为 AWD 处理显著高于 CaO_2 和 MBWI 处理，而在成熟期则表现为 CaO_2 和 MBWI 处理显著高于 AWD 处理。根部增氧显著影响水稻叶中的氮素积累，除成熟期 CaO_2 处理下 IR45765-3B 叶中氮素积累量与对照 WL 处理差异不显著外，三种增氧处理下 IR45765-3B 叶中氮素积累量均显著高于淹水对照 WL 处理，不同增氧处理间叶中氮素积累量在分蘖期、灌浆期和成熟期差异显著；三种增氧处理均显著增加中浙优 1 号分蘖盛期、齐穗期和成熟期叶中的氮素积累量，分蘖期仅 MBWI 处理显著增加了叶片氮积累，而增氧处理对灌浆期叶片氮素积累量影响不显著。此外，根部增氧处理还显著增加两品种水稻齐穗期到成熟期穗中氮素积累量 (图 4)，且两品种表现较为一致，均表现为在灌浆期和成熟期 CaO_2 和 MBWI 处理均显著高于 AWD 处理。

2.4　根部增氧模式对水稻氮素利用的影响

三种根部增氧处理下不仅水稻氮素吸收与积累存在显著差异，在水稻氮素利用方面也存在显著差异 (表 2)。根部增氧处理对两品种水稻氮收获指数的影响不同，IR45765-3B 的氮收获指数仅在 CaO_2 处理显著高于对照 WL 处理；而中浙优 1 号的氮收获指数则在 MBWI 和 CaO_2 处理显著高于淹水对照 WL 处理。根部增氧处理在一定程度上降低了两品种水稻的氮素转运效率，其中 IR45765-3B 的氮素转运效率在 MBWI 处理下降幅达显著水平，而中浙优 1 号的氮素转运效率在 CaO_2 和 MBWI 处理显著低于淹水对照 WL 处理。增氧处理下两品种水稻氮转运贡献率表现较为一致，均在 CaO_2 和 MBWI 处理显著低于 ADW 和淹水对照，这表明 CaO_2 和 MBWI 处理能够促进水稻齐穗后的氮素吸收与转运。根部增氧下水稻氮素利用效率有所下降，其中 IR45765-3B 的氮素利用效率在 MBWI 和 AWD 处理下降幅度显著，而中浙优 1 号氮素利用效率在 CaO_2 和 AWD 处理下显著低于淹水对照 WL 处理。三种增氧处理均显著提高了两品种水稻的氮肥偏生产力，其中 IR45765-3B 品种在 CaO_2、MBWI 和 AWD 处理分别较对照增加 26.3%、21.7% 和 10.7%，而中浙优 1 号在增氧处理下较对照增幅分别为 51.0%、52.2% 和 29.5%。

表 2　不同根部增氧模式下水稻氮素利用特征

Table 2　Characteristics of nitrogen utilization under different root aeration methods

品种 Cultivar	处理 Treatment	氮收获指数 NHI	氮转运效率 (%) NTE	氮转运贡献率 (%) NTCR	氮素利用效率 (g/g) NUE	氮肥偏生产力 (g/g) NPFP
IR45765-3B	CaO_2	0.66 ± 0.01 a	53.34 ± 0.71 a	52.09 ± 0.40 b	52.64 ± 2.02 a	54.61 ± 0.83 a
	MBWI	0.63 ± 0.01 b	47.21 ± 0.16 b	46.17 ± 0.54 c	45.14 ± 0.46 c	52.63 ± 1.32 a
	ADW	0.61 ± 0.01 b	53.07 ± 0.38 a	64.74 ± 1.37 a	48.64 ± 0.25 b	47.86 ± 1.71 b
	WL	0.62 ± 0.02 b	54.97 ± 0.51 a	65.36 ± 0.96 a	55.02 ± 0.57 a	43.23 ± 0.57 c
中浙优 1 号 ZZY-1	CaO_2	0.67 ± 0.03 a	53.02 ± 3.95 b	48.78 ± 1.35 c	50.75 ± 0.27 b	51.08 ± 2.09 a
	MBWI	0.69 ± 0.02 a	56.72 ± 0.40 b	50.21 ± 3.67 c	53.15 ± 2.25 a	51.48 ± 0.55 a
	ADW	0.57 ± 0.01 b	65.84 ± 0.38 a	90.53 ± 2.17 a	49.65 ± 0.34 b	43.85 ± 2.66 b
	WL	0.57 ± 0.01 b	66.44 ± 0.51 a	63.73 ± 1.61 b	52.62 ± 0.57 a	33.82 ± 0.57 c

注（Note）：MBWI—微纳气泡水灌溉 Micro-nano bubble water irrigation; AWD—干湿交替灌溉 Alternate wetting and drying; WL—长期积水 Water logging; NHI—N harvest index; NTE—N transportation efficiency; NTCR—N transportation contribution rate; NUE—Nitrogen utilization efficiency; NPFP—N partial factor productivity. 数据后不同字母表示同一品种不同处理间在 0.05 水平差异显著 Values followed by different letters are significantly different among treatments for the same cultivar at the 0.05 level.

3　讨论

3.1　根部增氧对水稻生长与产量的影响

水稻生长过程中根系需要消耗大量的氧气以维持根系正常的代谢活动，而水稻属于半沼泽性作物，其生长过程中需要大量的水分，而且氧气在水中扩散速率只相当于在空气中的 1/10000[27]，这使得水稻根系常处于缺氧状态下，不利于水稻生长和产量形成，为改善水稻生产中根系缺氧现象，前人做了许多研究与探索发现，改善水稻根部氧状况可显著促进水稻根系形成、生长和产量形成[12−15]。此外，余喜初等[28]研究也表明，施用过氧化钙对于潜育化稻田的改良和水稻增产具有显著作用。本研究也发现三种根部增氧处理均能显著增加水稻产量，且主要表现在有效穗的增加上，这主要由于根部增氧促进了水稻根系的生长，提高了水稻对养分的吸收，促进了早发分蘖 (图 1)，提高了低位分蘖的数量，进而提高了有效穗数量和产量[29]。这与胡志华等[30]发现不同生态类型水稻产量构成对根部氧浓度的响应规律不完全一致，其主要原因可能是本试验在大田模拟环境下展开，难以做到准确调控根部氧含量，且影响因素也较水培条件下复杂。在水稻生长方面两品种水稻分蘖形成及干物质积累对根部增氧模式的响应存在巨大的差异，这可能由不同基因型所引起。此外，三种增氧处理间水稻生长、干物质积累和产量也均存在显著的差异，这可能是由于不同增氧处理的增氧机制和氧释放规律差异导致。而大田环境下不同增氧处理的根部氧环境变化规律目前尚不清楚，需进一步研究。

3.2 不同根部增氧模式下水稻的氮素吸收与利用

氮是水稻生长所必需的大量元素，是核酸、蛋白质等的重要构成成分，参与了植株的物质代谢和能量代谢[31]，是影响水稻生长和产量的重要因子。根系主动运输是水稻获取氮素的主要方式，直接受根系活力、呼吸强度等影响，而根系活力和呼吸强度直接受根部氧环境的影响，此外，根部氮素形态转化及根系吸收形态均受到根部氧环境的影响[32]。因此，根部增氧直接或间接影响了水稻的氮素吸收与利用。本试验发现三种增氧模式下水稻各时期对氮素的吸收与累积均较淹水对照有显著提高，这与前人所得结果较为一致[12, 15, 33]。而在氮素利用方面根部增氧对水稻的氮素收获指数有一定的促进作用，IR45765-3B 品种仅在 CaO_2 处理显著高于淹水对照，中浙优 1 号则在 CaO_2 和 MBWI 处理均显著高于对照；增氧处理不利于水稻氮素利用效率的提高，且 IR45765-3B 品种的 MBWI、AWD 处理和中浙优 1 号 CaO_2、AWD 处理均显著低于对照；不同增氧处理对水稻氮素转运效率和氮素转运贡献率影响较为一致，除 IR45765-3B 的 NTE 外，两品种 NTE 和 NTCR 在 CaO_2 和 MBWI 处理均显著低于 AWD 处理与对照，这说明 CaO_2 和 MBWI 处理显著增强了水稻齐穗期以后的氮素吸收及其在籽粒中的积累，并对水稻后期衰老起到一定延缓作用，朱练峰等[12]也发现类似的现象；此外，增氧处理显著提高水稻的氮肥偏生产力，显著促进了水稻的氮肥利用。

3.3 不同增氧模式效果比较

传统的增氧模式主要通过增加土壤的通透性来提高根部的氧气含量，如水旱轮作、中耕耘田、晒田等。与之相比较新型增氧方案充分协调了“水–肥–气”的平衡，可更好的改良土壤氧环境，并实现了研究技术与生产力的有机转化，如超微气泡水灌溉、施用过氧化尿素和过氧化钙等[12–14]。由于现有技术的限制，过氧化尿素在 30℃ 以上易分解，不利于运输和保存，因此，本试验设置了干湿交替、微纳气泡水灌溉和施用过氧化钙等生产中运用较为普遍，且方便操作的增氧模式，故而未设置施用过氧化尿素处理。本试验通过比较发现，施加 CaO_2 和微纳气泡 水灌溉对促进水稻生长、产量增长和氮肥利用的效果较干湿交替处理优势明显，这种现象可能是因为施加 CaO_2 和微纳气泡水灌溉能够更好地提高根部氧浓度及其持续时间，也可能是干湿交替环境下土壤氮肥损失较大所引起。稻田氮素损失的主要途径有氨挥发和硝化–反硝化作用，蔡贵信等[34-35]研究发现硝化–反硝化的损失占氮素损失总量的百分之几到百分之三十多，且这两个途径均受土壤氧环境的影响，其中土壤中水分对氨挥发起到决定性作用，且土壤的硝化一反硝化作用受水分和氧化还原电位的影响。Reddy 等[36]通过有氧–厌氧交替循环试验发现，提高交替频率能够使土壤的氧化还原电位降低到足以诱导土壤中的反硝化作用，从而增大了氮素的损失。Patrick 等[37]发现对水稻进行淹没–干旱交替处理氮素损失提高 15%～ 20%。这些成果在一定范围内很好地解释了本试验施加 CaO_2 和微纳气泡水灌溉增氧模式较干湿交替对水稻产量和氮肥利用有明显优势以及干湿交替处理下水稻齐穗期后对氮素吸收较少等现象。然而目前关于根部增氧对土壤中氮肥转化、吸收以及流失等影响研究较少，需进一步研究，进而完善水稻根部氧营养体系。此外，从资源的多元利用角度分析，施用 CaO_2 可通过增加根部氧和钙离子浓度来调节根系呼吸代谢，缓解植株根部低氧胁迫[23–25]，且 CaO_2 分解可产生 CaO 缓解土壤酸化，对潜育化稻田的改良具有重要意义[28]，是一种高效的增氧与土壤改良措施，较微纳气泡水灌溉单一改善根部低氧胁迫具有明显优势。

4 结论

根部增氧显著改善水稻根部氧环境，缓解水稻需水需氧的特异性矛盾，促进水稻根系的生长、发育及形态与功能建成。增氧处理显著促进水稻分蘖发生与有效穗的形成，且两品种水稻干物质积累量和产量均显著增加。增氧处理下水稻对氮素的吸收与利用均得到显著的改善，在提高产量的前提下，降低了肥料的损耗，有利于水稻高产与可持续发展。三种增氧处理中，施用 CaO_2 和微纳气泡水灌溉对于促进水稻增产与氮素利用的效果较干湿交替灌溉处理明显。

参 考 文 献：

[1] 国家统计局. 中国统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2014. National Bureau of Statistics. China Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2014.

[2] Wiengweera A, Greenway H, Thomson C J. The use of agar nutrient solution to simulate lack of convection in waterlogged soils [J]. Annals of Botany, 1997, 80(2): 115–123.

[3] 梅少华, 梅金先, 陈兴国, 等. 洪涝灾害对水稻生产的影响评估及抗灾对策研究 [J]. 作物杂志, 2011, (2): 89–93.

Mei S H, Mei J X, Chen X G, *et al*. Flood impact assessment of rice production and disaster countermeasures [J]. Crops, 2011, (2): 89–93.

[4] Tai Z L, Zeiger E. Plant physiology (4th edn) [M]. Sunderland, MA. USA: Sinauer Associates, 2016.

[5] 李玉昌, 李阳生, 李绍清. 淹涝胁迫对水稻生长发育危害与耐淹性机理研究的进展 [J]. 中国水稻科学, 1998, 12(S1): 70–76.
Li Y C, Li Y S, Li S Q. Progress in research on injury to rice growth and development under submergence stress and mechanism of submergence tolerance [J]. Chinese Journal of Rice Science, 1998, 12(S1): 70–76.

[6] Oliveira H C, Sodek L. Effect of oxygen deficiency on nitrogen assimilation and amino acid metabolism of soybean root segments [J]. Amino Acids, 2013, 44(2): 743–755.

[7] Oliveira H C, Freschi L, Sodek L. Nitrogen metabolism and translocation in soybean plants subjected to root oxygen deficiency [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2013, 66: 141–149.

[8] Stoimenova M, Igamberdiev A U, Gupta K J, *et al*.Nitrite-driven anaerobic ATP synthesis in barley and rice root mitochondria [J]. Planta, 2007, 226(2): 465–474.

[9] Kronzucker H J, Siddiqi M Y, Glass A D, *et al*. Nitrate-ammonium synergism in rice. A subcellular flux analysis [J]. Plant Physiology, 1999, 119(3): 1041–1046.

[10] Licausi F. Regulation of the molecular response to oxygen limitations in plants [J]. New Phytologist, 2011, 190(3): 550–555.

[11] Shi K, Ding X T, Dong D K, *et al*. Putrescine enhancement of tolerance to root-zone hypoxia in *Cucumis sativus*: a role for increased nitrate reduction [J]. Functional Plant Biology, 2008, 35(4): 337–345.

[12] 朱练峰, 刘学, 禹盛苗, 等. 增氧灌溉对水稻生理特性和后期衰老的影响 [J]. 中国水稻科学, 2010, 24(3): 257–263.
Zhu L F, Liu X, Yu S M, *et al*. Effects of aerated irrigation on physiological characteristics and senescence at late growth sage of rice [J]. Chinese Journal of Rice Science, 2010, 24(3): 257–263.

[13] 赵锋, 王丹英, 徐春梅, 等. 根际增氧模式的水稻形态, 生理及产量响应特征 [J]. 作物学报, 2010, 36(2): 1–10.
Zhao F, Wang D Y, Xu C M, *et al*. Response of morphological, physiological and yield characteristics of rice (*Oryza sativa L.*) to different oxygen-increasing patterns in rhizosphere [J]. Acta Agronomica Sinca, 2010, 36(2):1–10.

[14] 刘学, 朱练峰, 陈琛, 等. 超微气泡增氧灌溉对水稻生育特性及产量的影响 [J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(5): 89–91.
Liu X, Zhu L F, Chen S, *et al*. Effects of ultramicro bubble aerated irrigation on growth characters and yield of rice [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28(5): 89–91.

[15] 徐春梅, 王丹英, 陈松, 等. 增氧对水稻根系生长与氮代谢的影响 [J]. 中国水稻科学, 2012, 26(3): 320–324.
Xu C M, Wang D Y, Chen S, *et al*. Effect of aeration on root growth and nitrogen metabolism in rice [J]. Chinese Journal of Rice Science, 2012, 26(3): 320–324

[16] Thomas A L, Sodek L. Development of the nodulated soybean plant after flooding of the root system with different sources of nitrogen [J]. Brazilian Journal of Plant Physiology, 2005, 17(3): 291–297.

[17] Horchani F, Aschi-Smiti S, Brouquisse R. Involvement of nitrate reduction in the tolerance of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plants to prolonged root hypoxia [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2010, 32(6): 1113–1123.

[18] Wang X Z, Zhu J G, Gao R, *et al*. Nitrogen cycling and losses under rice-wheat rotations with coated urea and urea in the Taihu Lake region [J]. Pedosphere, 2007, 17(1): 62–69.

[19] 赵霞, 徐春梅, 王丹英, 等. 持续低氧环境下铵硝混合营养对水稻苗期生长及氮素代谢的影响 [J]. 中国稻米, 2013, 19(5): 13–17.
Zhao X, Xu C M, Wang D Y, *et al*. Effect of ammonium nitrate mixed nutrition in continuous low oxygen environment on rice seedling growth and nitrogen metabolism [J]. China Rice, 2013, 19(5): 13–17.

[20] 赵锋, 徐春梅, 张卫建, 等. 根际溶氧量与氮素形态对水稻根系特征及氮素积累的影响 [J]. 中国水稻科学, 2011, 25(2): 195–200.
Zhao F, Xu C M, Zhang W J, *et al*. Effects of rhizosphere dissolved oxygen and nitrogen form on root characteristics and nitrogen accumulation of rice [J]. Chinese Journal of Rice Science, 2011, 25(2): 195–200.

[21] Ye Y, Liang X, Chen Y, *et al*. Alternate wetting and drying irrigation and controlled-release nitrogen fertilizer in late-season rice. Effects on dry matter accumulation, yield, water and nitrogen use [J]. Field Crops Research, 2013, 144: 212–224.

[22] 生利霞, 冯立国, 束怀瑞. 低氧胁迫下钙对樱桃砧木根系抗氧化系统及线粒体功能的影响 [J]. 中国农业科学, 2008, 41(11): 3913–3919.
Sheng L X, Feng L G, Shu H R. Effect of calcium on the functions of antioxidant systems and mitochondria in cherry rootstock roots under hypoxia stress [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(11): 3913–3919.

[23] 王长义, 郭世荣, 程玉静, 等. 外源钙对根部低氧胁迫下黄瓜植株钾, 钙, 镁离子含量和 ATPase 活性的影响 [J]. 园艺学报, 2010, 37(5): 731–740.
Wang C Y, Guo S R, Chen Y J, *et al*. Effects of exogenous calcium on K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+} content and ATPase activity in cucumber seedlings under root-zone hypoxic stress[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2010, 37(5): 731–740.

[24] 胡晓辉, 李娟, 郭世荣, 等. 钙对根部低氧胁迫下黄瓜幼苗根系呼吸代谢的影响 [J]. 园艺学报, 2006, 33(5): 1113–1116.
Hu X H, Li J, Guo S R, *et al*. Effects of Ca^{2+} on respiratory metabolism in roots of cucumber seedlings under root-zone hypoxia stress[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2006, 33(5): 1113–1116.

[25] 张恩让, 任媛媛, 胡华群, 等. 钙对淹水胁迫下辣椒幼苗根系生长和呼吸代谢的影响 [J]. 园艺学报, 2009, 36(12): 1749–1754.
Zhang E R, Ren Y Y, Hu H X, *et al*. Effects of calcium on growth and respiratory metabolism of hot pepper seedling roots under flood stress[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2009, 36(12): 1749–1754.

[26] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
Lu R K. Soil agricultural chemical analysis method [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999.

[27] Nishiuchi S, Yamauchi T, Takahashi H, *et al*. Mechanisms for coping with submergence and waterlogging in rice [J]. Rice, 2012, 5(1): 2.

[28] 余喜初, 李大明, 黄庆海, 等. 过氧化钙及硅钙肥改良潜育化稻田土

壤的效果研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 138–146.
Yu X C. Li D M, Huang Q H, *et al*. Amelioration effects of application of calcium peroxide and silicon calcium fertilizer in gleyed paddy fields [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(1): 138–146.

[29] 詹可, 邹应斌. 水稻分蘖特性及成穗规律研究进展 [J]. 作物研究, 2007, 21(5): 588–592.
Zhan K, Zou Y B. Research progress on the tiller characters and ear-forming of rice[J]. Crop Research, 2007, 21(5): 588–592.

[30] 胡志华, 朱练峰, 林育炯, 等. 根际氧浓度对水稻产量及其氮素利用的影响 [J]. 中国水稻科学, 2015, 29(4): 382–389.
Hu Z H, Zhu L F, Lin Y J, *et al*. Effect of root aeration methods on rice yield and its nitrogen utilization [J]. Chinese Journal of Rice Science, 2015, 29(4): 382–389.

[31] Vance C P, Uhde S C, Allan D L. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource [J]. New Phytologist, 2003, 157(3): 423–447.

[32] 赵霞. 根际溶氧量对水稻生长及氮利用的影响 [D]. 北京: 中国农业科学院硕士学位论文, 2014.
Zhao X. Effect of rhizosphere dissolved oxygen content on growth and nitrogen utilization of rice[D]. Beijing: MS Thesis of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014.

[33] 赵锋, 张卫建, 章秀福, 等. 连续增氧对不同基因型水稻分蘖期生长和氮代谢酶活性的影响 [J]. 作物学报, 2012, 38(2): 344–351.
Zhao F, Zhang W J, Zhang X F, *et al.* Effect of continuous aeration on growth and activity of enzymes related to nitrogen metabolism of different rice genotypes at tillering stage [J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(2): 344–351.

[34] 蔡贵信, 朱兆良, 朱宗武, 等. 水稻田中碳铵和尿素的氮素损失的研究 [J]. 土壤, 1985, 17(5): 225–229.
Cai G X, Zhu Z L, Zhu Z W, *et al*. Research of the ammonium and urea nitrogen loss in paddy field [J]. Soils, 1985, 17(5): 225–229.

[35] Simpson J, Freney J. Interacting processes in gaseous nitrogen loss from urea applied to flooded rice fields [A]. Pushparajah E, Hussin A, Bachik A T. Proc Int Sympon Urea Technology and Utilization[C] Kuala Lumpur: Malaysian Society of Soil Science, 1988.

[36] Reddy K R, Jr Patrick W H. Effect of alternate aerobic and anaerobic conditions on redox potential, organic matter decomposition and nitrogen loss in a flooded soil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1975, 7(2): 87–94.

[37] Patrick W H, Wyatt R. Soil nitrogen loss as a result of alternate submergence and drying [J]. Soil Science Society of America Journal, 1964, 28(5): 647–653.