

# 铵、硝营养条件下不同酸碱度 对水稻苗期生长和养分吸收的影响

陆楚盛<sup>1,2</sup> 赖嘉俊<sup>1,2</sup> 唐 偲<sup>1,2</sup> 梁开明<sup>1</sup> 覃元钰<sup>1,2</sup> 钟旭华<sup>1</sup> 潘俊峰<sup>1</sup> 刘彦卓<sup>1</sup>  
胡香玉<sup>1</sup> 胡 锐<sup>1</sup> 李妹娟<sup>1</sup> 王昕钰<sup>1</sup> 尹媛红<sup>1</sup> 叶群欢<sup>1</sup> 沈 宏<sup>2</sup> 傅友强<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>广东省农业科学院水稻研究所/广东省水稻科学技术重点实验室/农业农村部华南优质稻遗传育种实验室  
(部省共建), 510640, 广东广州; <sup>2</sup>华南农业大学资源环境学院, 510642, 广东广州)

**摘 要** 为探究不同氮形态条件下酸碱度对水稻生长发育和养分吸收的影响机制, 以“广恢 751”为试验材料, 采用水培方式, 设置 5 个酸碱度梯度 (pH=3.5、4.5、5.5、6.5 和 7.5), 研究其对铵、硝营养条件下水稻生物积累量、根系形态和养分吸收等的影响。结果表明, 铵态氮条件下, pH=6.5 处理的水稻生物积累量最高, 与 pH=3.5 处理相比, 其地上部和整株生物积累量分别增加了 146.6%和 142.5%; 株高和最大根长显著增加; 总根长、根表面积和根体积分别增加了 612.6%、317.8%和 147.1%; 氮、磷、钾、钙、镁、铜、锌、铁和锰吸收量分别增加了 159.5%、114.3%、181.9%、241.4%、124.4%、74.9%、173.4%、366.2%和 3058.0%。硝态氮条件下, pH=4.5 处理的水稻生物积累量最高, 与 pH=3.5 处理相比, 其地上部、根系和整株生物积累量分别增加了 36.7%、49.6%和 38.6%; 株高和最大根长显著增加; 总根长、根表面积和根体积分别增加了 129.9%、83.0%和 47.5%; 氮、磷、钾、钙、镁、铜、锌、铁和锰吸收量分别增加了 40.0%、27.7%、51.0%、78.5%、71.2%、53.9%、292.1%、1449.5%和 695.1%。综上所述, 铵态氮条件下的最适 pH 为 6.5, 硝态氮条件下的最适 pH 为 4.5。在各自的最佳 pH 条件下, 铵态氮和硝态氮主要通过促进根系生长发育增加养分吸收, 进而提高水稻的生物积累量。

**关键词** 水稻; 铵态氮; 硝态氮; 根系形态; 养分吸收

水稻是我国的主要粮食作物之一, 对保障国家粮食安全与推动经济发展具有重要作用。土壤是人类赖以生存的基础资源, 土壤酸碱度 (pH) 是调控土壤生物、化学及物理过程的关键因素<sup>[1]</sup>。研究<sup>[2]</sup>表明, 土壤 pH 变化可引发养分有效性、重金属活性、微生物群落结构及土壤理化性质等变化, 进而影响水稻生长发育与产量形成。因此, 适宜的土壤 pH 对促进水稻生长发育和提高稻谷产量等具有重要意义。

土壤 pH 变化是人为因素与自然因素共同作用的结果, 其中, 不合理施肥是导致土壤 pH 变化的主要人为因素<sup>[3]</sup>。研究<sup>[4]</sup>显示, 氮肥的不合理施用对土壤酸化的贡献率达 66.5%, 其关键在于形态选择不当。铵态氮 (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N) 与硝态氮 (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N) 是水稻吸收无机氮的 2 种主要形态, 前者属生理酸性盐, 后者属生理碱性盐, 二者施用会显著改变土

壤 pH。研究<sup>[3]</sup>表明, 硫酸铵和氯化铵的致酸能力高于碳酸铵、硝酸铵及硝酸钾, 这是因为作物吸收 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 时会释放等当量 H<sup>+</sup><sup>[5]</sup>, 导致土壤 pH 下降<sup>[6]</sup>; 而作物吸收 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 时则会释放等当量 OH<sup>-</sup>, 使土壤 pH 上升。土壤过酸或过碱均不利于水稻根系的生长发育, 易引发根系活力降低、土壤养分钝化、致病菌滋生及生长受阻等问题<sup>[7-9]</sup>。因此, 调节土壤 pH 以促进水稻健康生长具有重要意义。近年来, 虽在耐酸碱水稻品种培育、土壤酸性调理剂研发及水稻抗酸栽培技术等方面开展了大量研究<sup>[10-12]</sup>, 但从铵、硝营养吸收角度探究不同 pH 对水稻生长影响的研究鲜有报道。

我国土壤 pH 自南向北呈不均匀递增趋势。本研究以华南优质籼稻品种“广恢 751”为材料, 采用水培试验, 设置 5 个 pH 梯度 (3.5、4.5、5.5、6.5 和 7.5), 系统探究了铵态氮与硝态氮营养条

作者简介: 陆楚盛, 主要从事水稻高产高效栽培研究, E-mail: lcs2450345066@163.com; 赖嘉俊为共同第一作者, 主要从事水稻高产优质高效栽培技术研究, E-mail: laijiajun2001@163.com

傅友强为通信作者, 主要从事水稻高产高效栽培理论与应用研究, E-mail: fyq040430@163.com; 沈宏为共同通信作者, 主要从事植物营养理论与应用研究, E-mail: hshen@scau.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (32172109); 广东省自然科学基金面上项目 (2021A1515010566); 广东省水稻科学技术重点实验室 (2023B1212060042)

收稿日期: 2025-01-15; 修回日期: 2025-02-26; 网络出版日期: 2025-03-14

件下，不同 pH 处理对水稻生物量积累、根系形态建成及养分吸收特性的影响，研究结果可为不同土壤酸碱度地区水稻施用合适氮形态肥料提供理论参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地与试验材料

试验于广东省农业科学院水稻研究所温室内进行。供试材料为水稻品种“广恢 751”。

### 1.2 试验设计

将水稻种子于 25~28 °C 浸种 48 h，期间每 24 h 换水 1 次，之后催芽 48 h，待种子根长至半粒谷长时转移至 1/3 剂量的无氮营养液中培养。待水稻长至两叶一心期，将其移栽至装有不同氮形态营养液的水培盒（长 31 cm，宽 29 cm，高 18 cm，容量 12 L）中进行处理。无氮营养液配方采用国际水稻所的配方<sup>[13]</sup>并略作改进，含 0.32 mmol/L  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 、0.70 mmol/L  $\text{K}_2\text{SO}_4$ 、1.43 mmol/L  $\text{CaCl}_2$ 、1.65 mmol/L  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  和 0.10 mmol/L  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ，微量元素包括 9.10  $\mu\text{mol/L}$   $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、0.52  $\mu\text{mol/L}$   $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、18.50  $\mu\text{mol/L}$   $\text{H}_3\text{BO}_3$ 、0.15  $\mu\text{mol/L}$   $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、0.16  $\mu\text{mol/L}$   $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  和 35.80  $\mu\text{mol/L}$   $\text{EDTA-Fe}$ 。为防止  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  向  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  转化，在各氮素形态处理的营养液中添加 2 mg/L 双胍胺作为硝化抑制剂。

分别制备  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  营养液，总氮浓度均为 0.95 mmol/L，硝态氮以  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  形式加入，铵态氮以  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  形式加入，为排除硝态氮营养液中  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  所含  $\text{Ca}^{2+}$  的影响，在铵态氮营养处理中添加等量的  $\text{CaCl}_2$ 。然后用 0.1 mmol/L  $\text{HCl}$  或  $\text{NaOH}$  调节出 5 个 pH 处理梯度，不同氮形态营养液中 pH 分别为 3.5 (T1)、4.5 (T2)、5.5 (T3)、6.5 (T4) 和 7.5 (T5)。每个处理设置 3 个重复。营养液每 4 d 更换 1 次，每日于 19:00 左右记录 pH，当营养液中 pH 上升或下降时，用 0.1 mmol/L  $\text{HCl}$  或  $\text{NaOH}$  调至处理对应的 pH。由图 1 可知，各处理 pH 基本保持在对应的 pH 附近，确保了试验数据的真实可靠性。处理 14 d 后，分别测定水稻叶绿素相对含量 (SPAD 值)、生物量、总根长、根表面积、平均根直径、根体积，以及氮 (N)、磷 (P)、钾 (K)、钙 (Ca)、镁 (Mg)、铜 (Cu)、锌 (Zn)、铁 (Fe) 和锰 (Mn) 等养分的吸收量。

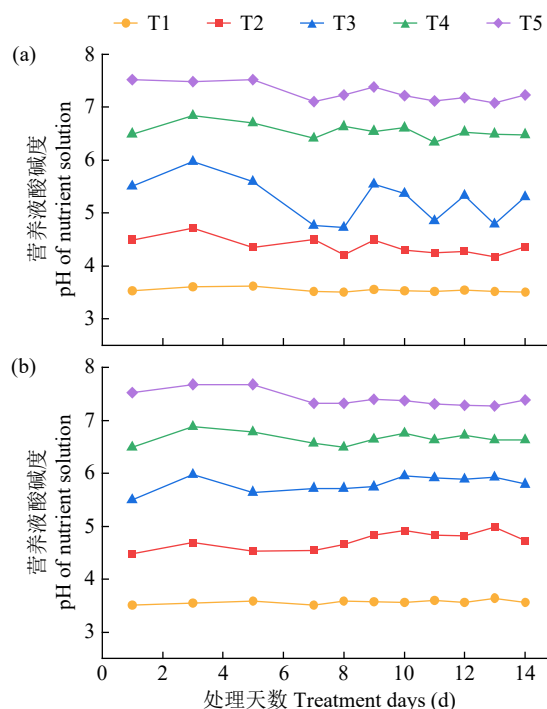


图 1 铵态氮和硝态氮条件下营养液 pH 变化  
Fig.1 The pH change of nutrient solution under ammonium-nitrogen and nitrate-nitrogen conditions

### 1.3 测定项目与方法

1.3.1 株高、最大根长和 SPAD 值 每个重复选取 8 株具有代表性的水稻幼苗，分别测定株高、最大根长和 SPAD 值。用尺子量取茎基部到最长叶尖的距离和茎基部到最长根尖的距离，即为株高和最大根长。用 SPAD-502 Plus 叶绿素仪 (柯尼卡美能达，日本) 测量每株第 1 片完全展开叶，在叶片上、中和下部均匀取 3 个点进行测量，取平均值作为水稻叶片的 SPAD 值。

1.3.2 根系形态 每个重复选取 8 株具有代表性的水稻幼苗，先将根系洗净，然后用剪刀将根系和地上部分离，将每株的根系不重叠地放置于盛有少量水的透明塑料盘内，用 Expression 12000XL 根系扫描仪 (爱普生，日本) 及 LA2400 专业版 WinRhizo 根系分析系统 (Regent，加拿大) 测定总根长、根表面积、平均根直径和根体积等指标。

1.3.3 生物积累量 每个重复选取 8 株具有代表性的水稻幼苗，将水稻根系洗净，将地上部与根部分开，于 105 °C 下杀青 30 min，然后于 75 °C 烘干至恒重，测量各部位干重。

1.3.4 养分含量 将烘干的各部位样品磨成粉末状，一部分用  $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$  法消煮测定 N、P 和 K 含量，采用定氮仪法测定 N 含量，采用钼锑抗比色

法测定 P 含量,采用火焰光度计法测定 K 含量;另一部分用干灰化法处理,用原子吸收光谱法分别测定 Ca、Mg、Cu、Zn、Fe 和 Mn 等养分含量<sup>[14]</sup>。

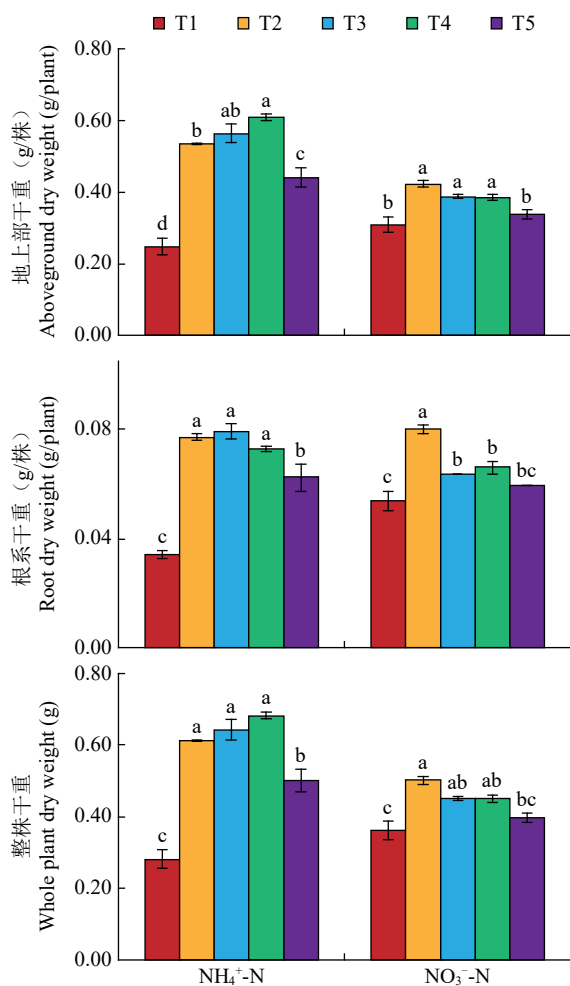
#### 1.4 数据处理

使用 IBM SPSS Statistics 26 进行数据处理和统计分析,采用 Duncan's 新复极差法进行处理间多重比较,使用 Origin 2022 作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 铵态氮和硝态氮条件下不同 pH 处理的水稻生物积累量

如图 2 所示,各处理水稻的生物积累量均随 pH 的升高呈先增后减的变化趋势。在铵态氮条件下,



不同小写字母表示不同 pH 处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。  
Different lowercase letters indicate significant difference among different pH treatments ( $P < 0.05$ ). The same below.

图 2 铵态氮和硝态氮条件下不同 pH 处理对水稻生物积累量的影响

Fig.2 Effects of different pH treatments on rice biological accumulation under ammonium-nitrogen and nitrate-nitrogen conditions

T4 处理的水稻地上部和整株干重最大,与 T1 处理相比分别增加了 146.6%和 142.5%。在硝态氮条件下, T2 处理的水稻地上部、根系和整株干重均最大,与 T1 处理相比分别增加了 36.7%、49.6%和 38.6%。在各自的最佳 pH 条件下,与硝态氮处理相比,铵态氮处理的地上部和整株干重分别增加了 44.5%和 36.0%,但根系干重下降了 9.2%。

### 2.2 铵态氮和硝态氮条件下不同 pH 处理的水稻株高、最大根长和 SPAD 值

如图 3~4 所示,各处理水稻的株高和最大根长均随 pH 的升高呈先增后减的变化趋势。在铵态氮条件下, T4 处理的株高最高,与 T1 处理相比增加了 60.8%; T3 处理的最大根长最长,与 T1 处理相比增加了 128.0%。在硝态氮条件下, T2 处理的水稻株高和最大根长最大,与 T1 处理相比分别增加了 27.4%和 59.4%。除 T5 处理外,其他处理的 SPAD 值均无显著差异。在各自的最佳 pH 条件下,与硝态氮处理相比,铵态氮处理的株高增加了 12.0%,但最大根长下降了 26.5%。

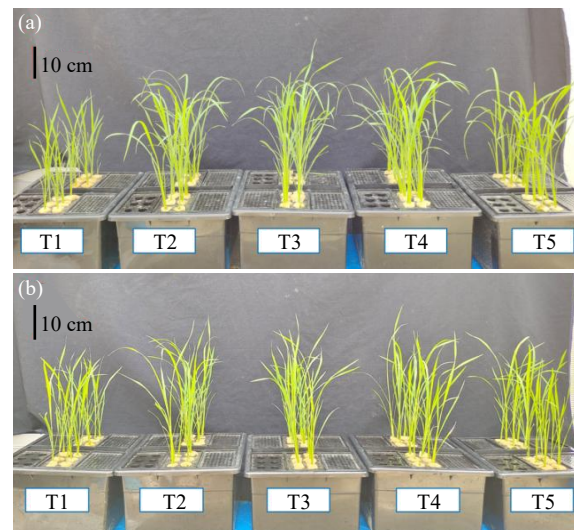


图 3 铵态氮(a)和硝态氮(b)条件下不同 pH 处理的水稻株高  
Fig.3 Rice plant height under different pH treatments under ammonium-nitrogen (a) and nitrate-nitrogen (b) conditions

### 2.3 铵态氮和硝态氮条件下不同 pH 处理的水稻根系形态

如图 5 所示,各处理总根长、根表面积和根体积均随 pH 的升高呈先增后减的变化趋势,平均根直径则呈逐渐下降的变化趋势。在铵态氮条件下, T4 处理的总根长最大,与 T1 处理相比增加了 612.6%; T3 处理的根表面积和根体积最大,与 T1 处理相比分别增加了 350.3%和 270.0%。在硝态氮

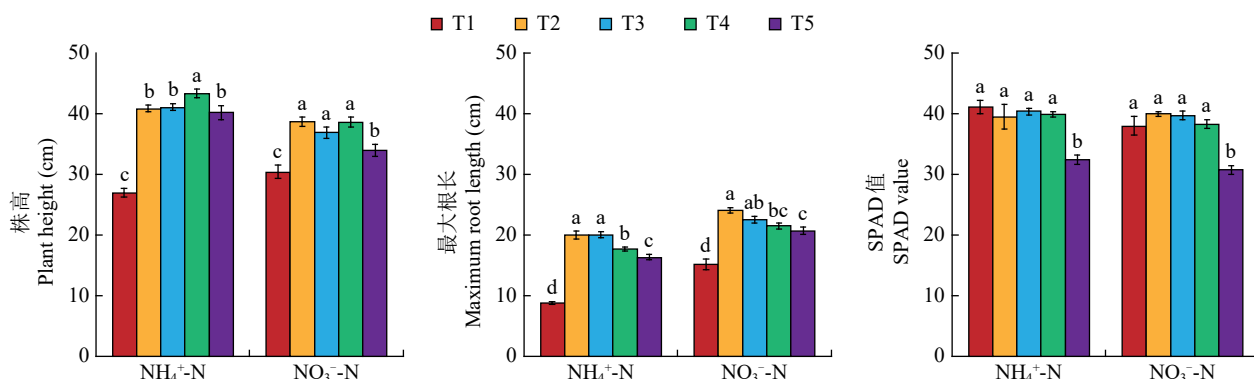


图 4 铵态氮和硝态氮条件下不同 pH 处理对水稻株高、最大根长和 SPAD 值的影响

Fig.4 Effects of different pH treatments on rice plant height, maximum root length, and SPAD value under ammonium-nitrogen and nitrate-nitrogen conditions

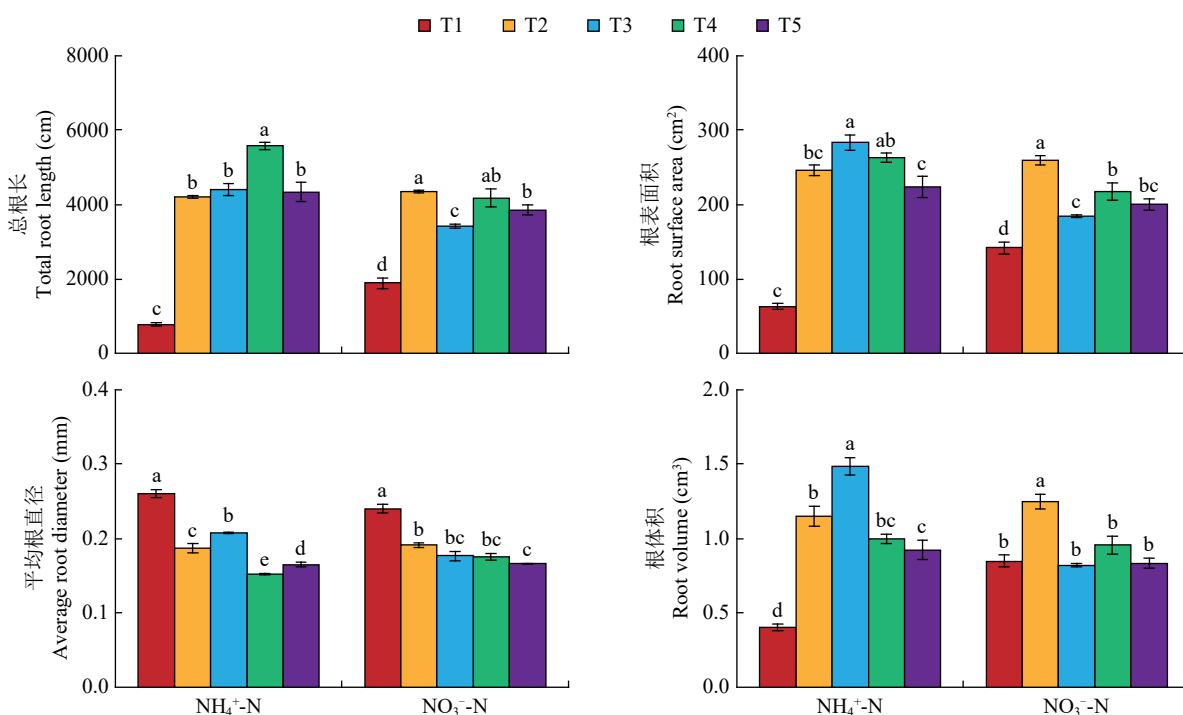


图 5 铵态氮和硝态氮条件下不同 pH 处理对水稻根系形态的影响

Fig.5 Effects of different pH treatments on rice root morphology under ammonium-nitrogen and nitrate-nitrogen conditions

条件下，T2 处理的水稻总根长、根表面积和根体积最大，与 T1 处理相比分别增加了 129.9%、83.0% 和 47.5%。在各自的最佳 pH 条件下，与硝态氮处理相比，铵态氮处理的总根长增加了 28.3%，但平均根直径和根体积分别下降了 20.4%和 20.1%。

#### 2.4 铵态氮和硝态氮条件下不同 pH 处理的水稻营养元素吸收量

为探明铵态氮或硝态氮条件下 pH 对不同类型营养元素的吸收变化，分析 N、P 和 K 等大量营养元素以及中、微量营养元素 (Fe、Mn 和 Cu 等) 对铵态氮或硝态氮条件下 pH 的响应 (图 6)。在铵态氮条件下，养分吸收量随 pH 的升高呈先增后

减的变化趋势，T4 处理的 N、K、Ca、Cu 和 Mn 的吸收量最大，与 T1 处理相比分别增加了 159.5%、181.9%、241.4%、74.9%和 3058.0%，除 T1 处理外，其他 pH 处理的 P、Mg、Zn 和 Fe 吸收量均随 pH 的升高呈逐渐下降的趋势。在硝态氮条件下，T2 处理的水稻 N、P、K、Ca、Mg、Cu、Zn 和 Fe 吸收量最大，与 T1 处理相比分别增加了 40.0%、27.7%、51.0%、78.5%、71.2%、53.9%、292.1%和 1449.5%，但 Mn 吸收量随着 pH 的升高而增加。在各自的最佳 pH 条件下，与硝态氮处理相比，铵态氮处理的 N、P、K、Ca、Cu 和 Mn 吸收量分别增加了 51.3%、52.8%、35.3%、14.2%、12.1%和 165.8%，

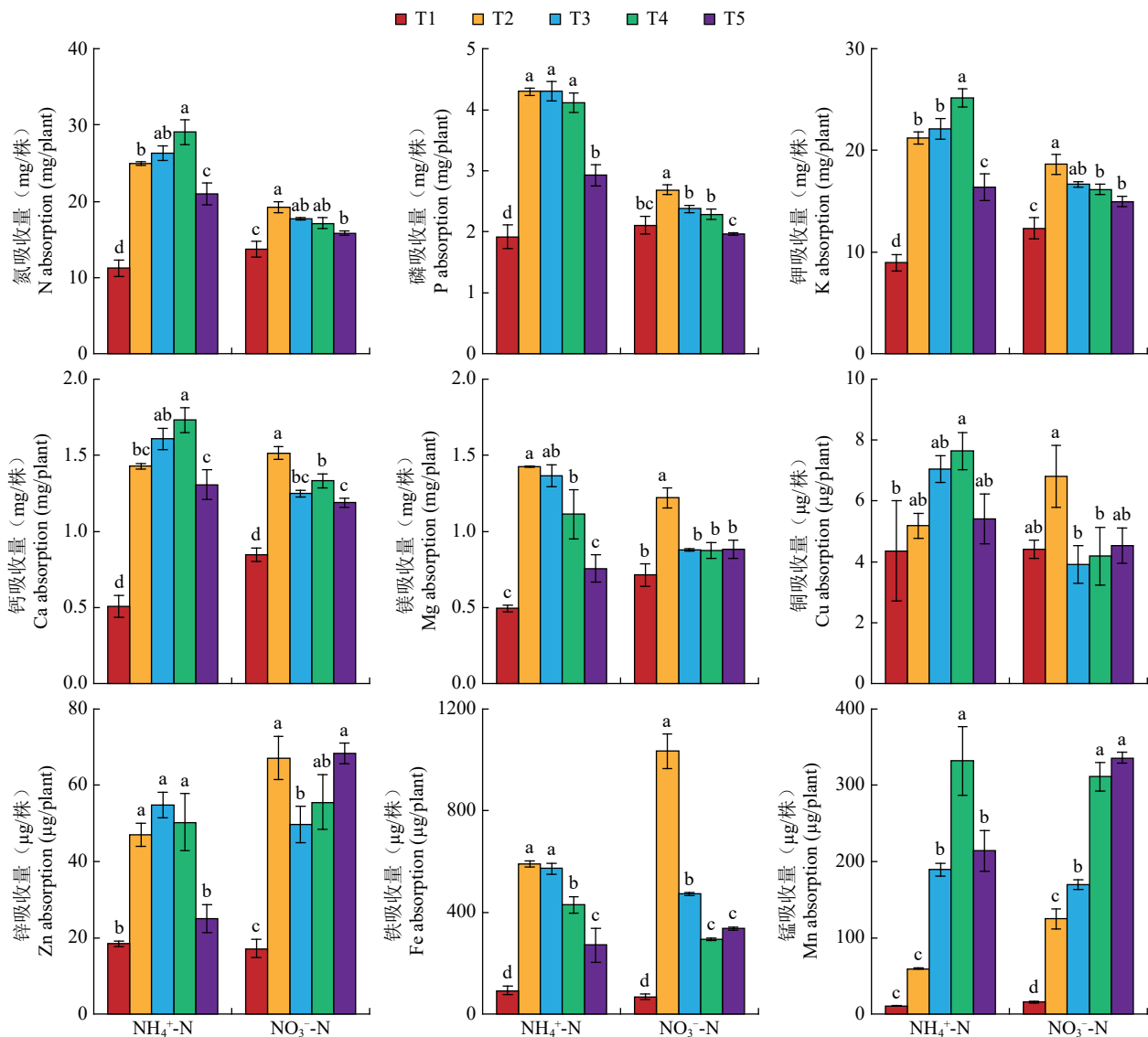


图 6 铵态氮和硝态氮条件下不同 pH 处理对水稻养分元素吸收量的影响

Fig.6 Effects of different pH treatments on nutrient uptake in rice under ammonium-nitrogen and nitrate-nitrogen conditions

但 Mg、Zn 和 Fe 吸收量分别下降了 8.9%、25.2% 和 58.5%。

### 2.5 水稻干重与各指标的相关性分析

由图 7 可知，整株干重与地上部干重、根系干重、株高、总根长、根表面积和根体积等形态特征指标呈极显著正相关，与 N、P、K、Ca、Mg 和 Cu 等养分吸收量呈极显著正相关。

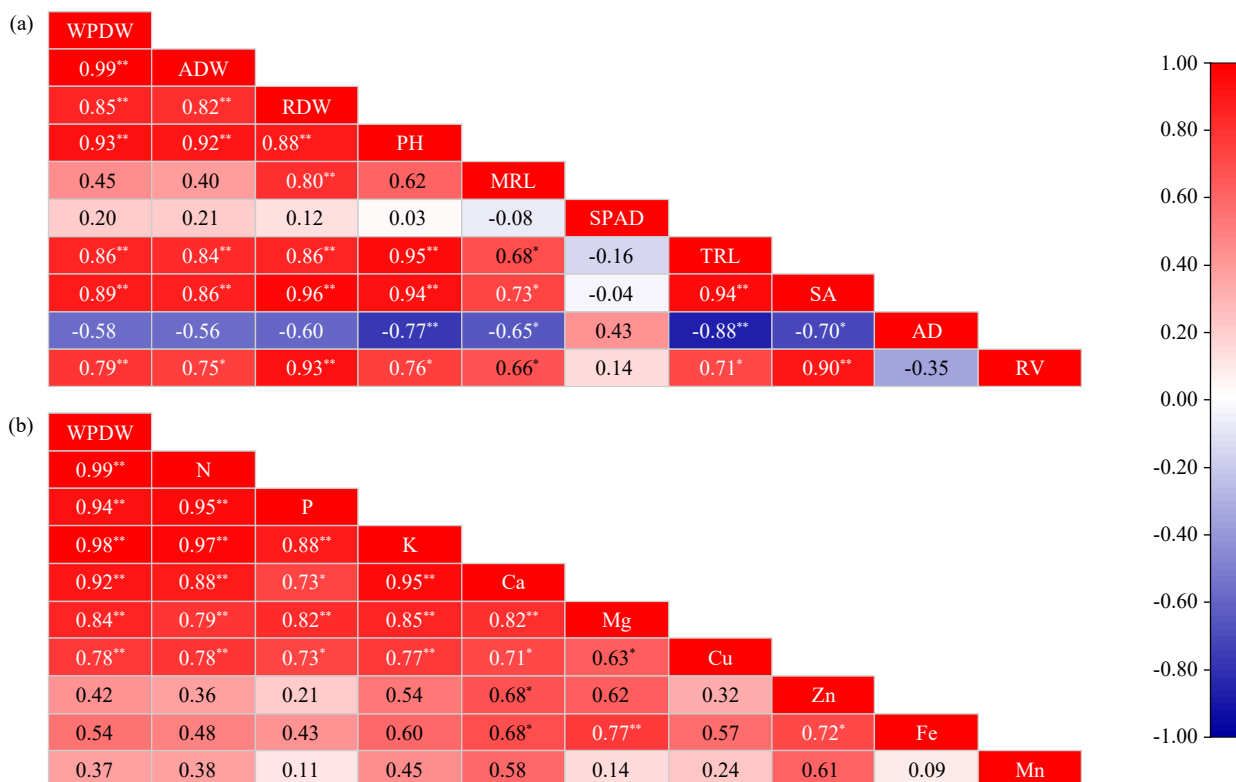
## 3 讨论

### 3.1 添加铵、硝营养对植物应对 pH 的影响

N 是植物体内蛋白质、核酸、叶绿素等多种重要生物分子的组成成分，参与植物的生长发育及各项生命活动，其有效性及其形态对植物的生长发育与生理特征具有重要影响<sup>[15]</sup>。植物可吸收利用的无

机氮源主要有 2 类，即铵态氮与硝态氮。目前，越来越多的研究<sup>[16-19]</sup>表明，水稻在实际生产中一直处于铵、硝态氮的混合营养中，这主要归因于水稻根系自身的泌氧功能，以及先进的栽培管理技术（干湿交替和好氧栽培等），这些因素可将根际或土壤中的铵态氮氧化为硝态氮。研究<sup>[20]</sup>显示，水稻根系吸收的硝态氮量可占其总氮吸收量的 30% 以上。段英华等<sup>[21]</sup>发现，不同基因型水稻品种均具备吸收利用硝态氮的能力。鉴于此，开展铵态氮或硝态氮条件下最佳 pH 的研究，对于优化水稻氮素吸收和促进其生长发育均具有重要意义。

本研究中，于最佳 pH 条件下，铵态氮处理的水稻地上部干重、株高、总根长以及 N、P、K、Ca、Cu 和 Mn 的吸收量均高于硝态氮处理；而根



WPDW: 整株干重; ADW: 地上部干重; RDW: 根系干重; PH: 株高; MRL: 最大根长; TRL: 总根长; SA: 根表面积; AD: 平均根直径; RV: 根体积; 各元素化学符号表示其吸收量。“\*”表示相关性达显著水平 ( $P < 0.05$ ), “\*\*”表示相关性达极显著水平 ( $P < 0.01$ )。WPDW: whole plant dry weight; ADW: aboveground dry weight; RDW: root dry weight; PH: plant height; MRL: maximum root length; TRL: total root length; SA: root surface area; AD: average root diameter; RV: root volume; the chemical symbol of each element indicates its absorption. “\*” indicates significant correlation ( $P < 0.05$ ); “\*\*” indicates extremely significant correlation ( $P < 0.01$ ).

图 7 生物积累与形态特征 (a) 和营养元素吸收量 (b) 的相关性分析

Fig.7 Correlation analysis between biomass accumulation and morphological characteristics (a) and nutrient element absorption (b)

系干重、最大根长、根直径、根体积以及 Mg、Zn 和 Fe 的吸收量则低于硝态氮处理, 表明铵态氮主要发挥营养功能, 硝态氮则具有激素调控功能<sup>[22]</sup>。已有研究<sup>[23]</sup>表明, 铵态氮与硝态氮促进作物生长发育的最适 pH 存在明显差异, 介质 pH 高于或低于最适值均会抑制作物生长。孙园园等<sup>[24]</sup>研究发现, 单一铵态氮处理后 1 d 内介质 pH 持续下降, 单一硝态氮处理后 1 d 内介质 pH 持续上升, 而铵硝混配营养 (50:50) 处理后 1 d 内介质 pH 先升后降, 表明不同氮源对介质 pH 的响应存在明显差异。黄亚楠等<sup>[25]</sup>研究指出, 大豆和菜豆吸收铵态氮会导致根际环境酸化, 进而限制植株生长。司江英等<sup>[26]</sup>也发现, 植物吸收  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{NH}_4^+$  的最适 pH 分别为 4.5~6.0 和 6.7~7.0, 即中性 pH 有利于根系吸收  $\text{NH}_4^+$ , 而低 pH 有利于吸收  $\text{NO}_3^-$ 。本研究结果也表明, 铵态氮条件下的最适 pH 为 6.5, 硝态氮条件下的最适 pH 为 4.5。虽然本试验以苗期水稻为研究对象, 但在不同气候条件下, 不同水稻品种在各生育期或全生育期, 于不同氮形态条件下的最适 pH

可能与本研究结果相近, 这与  $\text{NH}_4^+$  和  $\text{NO}_3^-$  的理化性质及植物根系的吸收利用机制有关<sup>[27]</sup>。当作物根系吸收  $\text{NH}_4^+$ -N 时, 会释放等当量的  $\text{H}^+$ <sup>[5]</sup>, 导致根际周围 pH 降低<sup>[6]</sup>。因此, 在实际施用铵态氮肥时, 需提高介质 pH 以缓解酸化; 而作物根系吸收  $\text{NO}_3^-$ -N 时, 会释放等当量的  $\text{OH}^-$ , 导致根际周围 pH 升高, 故实际施用硝态氮肥时需降低介质 pH 以中和碱化。此外, T1 处理时, 铵态氮培养下的水稻各项指标几乎为所有处理中最差。这是因为当介质  $\text{pH} < 4.0$  时, 根系会受到损害, 表现为根系变短、变厚以及根数量减少; 严重时会导致根尖死亡, 地上部生长迟缓; 根系严重受损后, 生长受阻乃至死亡<sup>[28]</sup>。因此, 研究<sup>[29-30]</sup>认为, 对于水稻等喜铵态氮肥的作物可考虑适量施用硝态氮肥。

### 3.2 pH 对水稻生长及养分吸收的影响

研究<sup>[31]</sup>表明, 土壤 pH 影响水稻生长发育的根本原因在于根系养分吸收受阻。植物对养分的吸收能力主要取决于根系, 而根系形态特征如根表面积和根体积等在其中起决定性作用<sup>[32]</sup>。因此, 水稻根

系形态的变化程度可作为衡量水稻生长及养分吸收对 pH 响应的重要指标。本研究结果显示,在不同氮形态培养条件下,处于最适 pH 处理的水稻,其根系形态表现更优,总根长、根表面积及根体积均高于其他 pH 处理,且有助于增加对 N、P、K、Ca、Mg、Cu、Zn、Fe 和 Mn 等营养元素的吸收利用,进而促进株高增长和生物积累量增加。相关性分析也表明,生物积累量与根系形态、养分吸收等指标呈极显著正相关,说明最适 pH 处理能够改善水稻根系形态结构,扩大根系吸收养分的范围,增强对有益营养元素的吸收利用,最终促进水稻生物积累量的提升。研究<sup>[1]</sup>表明,植物根系形态会随介质 pH 的变化而改变,在最适 pH 条件下根系活力和养分吸收量才能达到最大值。介质过酸或过碱均不利于植物生长发育,当介质过酸时易引发介质酸化,破坏根系生长点,阻碍水分和养分的吸收,减缓光合产物向根系的运输,从而抑制植物生长;当介质过碱时易导致介质中的营养元素,如 P、Cu、Fe、Zn 和 Mn 等发生沉淀,降低根系对这些营养元素的吸收利用效率,进而抑制植物生长<sup>[33]</sup>。

#### 4 结论

本试验条件下,铵态氮条件下的最适 pH 为 6.5,硝态氮条件下的最适 pH 为 4.5。pH 对水稻的生长发育有显著影响,适宜的 pH 有利于水稻根系的形成,进而促进水稻的生长发育和营养吸收。铵态氮和硝态氮均可调节土壤 pH,一定程度上可改善土壤微环境,促进水稻的生长发育。

#### 参考文献

- [1] 唐琨,朱伟文,周文新,等.土壤pH对植物生长发育影响的研究进展.作物研究,2013,27(2):207-212.
- [2] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands. *Science*, 2010, 327(5968): 1008-1010.
- [3] 杨昌富,王好圆,覃双结,等.氮肥形态及用量对坡耕地土壤 pH 的影响机理.植物营养与肥料学报,2023,29(6):1168-1180.
- [4] 周海燕,徐明岗,蔡泽江,等.湖南祁阳县土壤酸化主要驱动因素贡献解析.中国农业科学,2019,52(8):1400-1412.
- [5] Wang H, Zhang H, Zhao Y, et al. Soil acidification of Alfisols influenced by nitrate and ammonium nitrogen level in tea plantation. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2018, 11(4): 168-172.
- [6] 曾清如,沈杰,周细红,等.施用尿素对温室内 NO<sub>2</sub> 和 NH<sub>3</sub> 气体积累的影响.农业环境科学学报,2004,23(5):857-860.
- [7] Hou Z W, Zhou B, Yang J M, et al. Effects of soil pH on growth and dry matter accumulation of tobacco plants. *Agricultural Science & Technology*, 2017, 18(8): 1443-1447.
- [8] 赵雅曼,陈顺钰,张韵,等.酸、Cd 胁迫对宽叶雀稗种子萌发、幼苗生长及亚细胞结构的影响.农业环境科学学报,2019,38(1):60-69.
- [9] 李家辉.土壤酸度对不同烤烟品种生长发育及土壤性状的影响.郑州:河南农业大学,2023.
- [10] 杨翼飞,李青萍,朱世平,等.6份枳种质耐酸碱胁迫能力的比较.中国南方果树,2017,46(2):1-6.
- [11] 张瀚曰,胡斌,包维楷,等.攀枝花地区芒果园土壤 pH 现状及变化趋势.应用与环境生物学报,2020,26(1):63-73.
- [12] 胡现荣,范存敏,吴萍萍,等.石灰用量对酸化稻田土壤酸度和水稻产量的影响.安徽农业科学,2023,51(8):22-25.
- [13] Fu Y Q, Zhong X H, Lu C S, et al. Growth, nutrient uptake and transcriptome profiling of rice seedlings in response to mixed provision of ammonium- and nitrate-nitrogen. *Journal of Plant Physiology*, 2023, 284: 153976.
- [14] 杨剑虹,王成林,代亭林.土壤农化分析与环境监测.北京:中国大地出版社,2008.
- [15] 张秦泽,郝广,李洪远.外源输入氮的有效性及其对植物生长与生理影响的研究进展.生态学杂志,2024,43(3):878-887.
- [16] Dai H Y, Wu B B, Chen B L, et al. Diel fluctuation of extracellular reactive oxygen species production in the rhizosphere of rice. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(12): 9075-9082.
- [17] 褚光,陈松,徐春梅,等.我国水稻栽培技术的研究进展及展望.中国稻米,2019,25(5):5-7.
- [18] Majumder S, Powell M A, Biswas P K, et al. The role of agronomic factors (rice cultivation practices and soil amendments) on Arsenic fractionation: a strategy to minimize Arsenic uptake by rice, with some observations related to cadmium. *Catena*, 2021, 206: 105556.
- [19] 胡锐,胡香玉,傅友强,等.氮肥运筹对水稻根系生长发育的影响及其与氮肥吸收利用的关系.作物杂志,2023(5):179-186.
- [20] Kirk G J D. Plant-mediated processes to acquire nutrients: nitrogen uptake by rice plants. *Plant and Soil*, 2001, 232(1/2): 129-134.
- [21] 段英华,张亚丽,沈其荣,等.增硝营养对不同基因型水稻苗期氮素吸收同化的影响.植物营养与肥料学报,2005,11(2):160-165.
- [22] Hachiya T, Sakakibara H. Interactions between nitrate and ammonium in their uptake, allocation, assimilation, and signaling in plants. *Journal of Experimental Botany*, 2017, 68(10): 2501-2512.
- [23] 陈亚华,沈振国,刘友良.低温、高 pH 胁迫对水稻幼苗根系质膜、液泡膜 ATP 酶活性的影响.植物生理学报,2000,26(5):407-412.
- [24] 孙园园,孙永健,秦俭,等.适度水分胁迫下增硝对不同基因型水稻苗期生长及生理特性的影响.干旱地区农业研究,2013,31(4):144-151.
- [25] 黄亚楠,王登良,苏彦华.低 pH 影响大豆和菜豆对氮素形态的响应.土壤,2021,53(5):929-936.
- [26] 司江英,汪晓丽,陈冬梅,等.不同 pH 和氮素形态对作物幼苗生长的影响.扬州大学学报(农业与生命科学版),2007,28(3):68-71.
- [27] 马道承,庞艳萍,田湘,等.植物不同氮素形态配比施肥及其分子机制研究进展.西部林业科学,2022,51(5):164-170.
- [28] 陈平.介质 pH 与不同氮素形态对作物幼苗氮素吸收的影响.扬州:扬州大学,2005.
- [29] 徐聪,张辉,唐忠厚,等.减量氮肥配施有机肥及硝化抑制剂对土壤 pH 值、甘薯产量及构成的影响.江苏师范大学学报(自

- 然科学版), 2021, 39(2): 26-30.
- [30] 李平, 聂浩, 郎漫, 等. 不同氮肥配施生物炭对镉污染土壤青菜镉吸收的影响. 环境科学, 2023, 44(8): 4489-4496.
- [31] 易亚科, 周志波, 陈光辉. 土壤酸碱度对水稻生长及稻米镉含量的影响. 农业环境科学学报, 2017, 36(3): 428-436.
- [32] Lynch J P S U. Root architecture and plant productivity. *Plant Physiology*, 1995, 109(1): 7-13.
- [33] 潘瑞炽. 植物生理学. 北京: 高等教育出版社, 2012.

## Effects of Different pH on Rice Seedling Growth and Nutrient Uptake under Ammonium and Nitrate Nutrition

Lu Chusheng<sup>1,2</sup>, Lai Jiajun<sup>1,2</sup>, Tang Cai<sup>1,2</sup>, Liang Kaiming<sup>1</sup>, Qin Yuanyu<sup>1,2</sup>,  
Zhong Xuhua<sup>1</sup>, Pan Junfeng<sup>1</sup>, Liu Yanzhuo<sup>1</sup>, Hu Xiangyu<sup>1</sup>, Hu Rui<sup>1</sup>, Li Meijuan<sup>1</sup>,  
Wang Xinyu<sup>1</sup>, Yin Yuanhong<sup>1</sup>, Ye Qunhuan<sup>1</sup>, Shen Hong<sup>2</sup>, Fu Youqiang<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Rice Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences / Guangdong Key Laboratory of Science and Technology in Rice / Key Laboratory of Genetics and Breeding of High Quality Rice in Southern China (Co-Construction by Ministry and Province), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou 510640, Guangdong, China; <sup>2</sup>The College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, Guangdong, China)

**Abstract** In order to investigate the influence mechanism of pH level on the growth and development of rice and nutrient uptake under different nitrogen forms, rice cultivar Guanghui 751 was grown with five pH treatments (pH 3.5, 4.5, 5.5, 6.5, and 7.5) to study the effects on the biomass accumulation, root morphology, and nutrient uptake of rice under ammonium-nitrogen and nitrate-nitrogen conditions hydroponically. The results showed that under ammonium-nitrogen conditions, the highest rice biomass accumulation was found at pH 6.5 treatment; compared with the pH 3.5 treatment, the shoot and whole-plant biomass accumulation increased by 146.6% and 142.5%, respectively. Plant height and maximum root length increased significantly; total root length, root surface area, and root volume increased by 612.6%, 317.8%, and 147.1%, respectively. The uptake of nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), calcium (Ca), magnesium (Mg), copper (Cu), zinc (Zn), iron (Fe), and manganese (Mn) increased by 159.5%, 114.3%, 181.9%, 241.4%, 124.4%, 74.9%, 173.4%, 366.2%, and 3058.0%, respectively. Under nitrate-nitrogen conditions, the highest rice biomass accumulation was found at pH=4.5 treatment; compared with the pH=3.5 treatment, the shoot, root, and whole-plant biomass accumulation increased by 36.7%, 49.6%, and 38.6%, respectively. Plant height and maximum root length increased significantly; total root length, root surface area, and root volume increased by 129.9%, 83.0%, and 47.5%, respectively. The uptake of N, P, K, Ca, Mg, Cu, Zn, Fe, and Mn increased by 40.0%, 27.7%, 51.0%, 78.5%, 71.2%, 53.9%, 292.1%, 1449.5%, and 695.1%, respectively. In conclusion, the optimum pH values for rice under ammonium-nitrogen and nitrate-nitrogen conditions were 6.5 and 4.5, respectively. Under their respective optimum pH conditions, ammonium-nitrogen and nitrate-nitrogen primarily increased rice biomass accumulation by promoting root growth and development and increasing nutrient uptake.

**Key words** Rice; Ammonium-nitrogen; Nitrate-nitrogen; Root morphology; Nutrient uptake