

铵硝对比对芒果幼苗不同养分吸收特征的影响

陈蓉¹, 杨杰¹, 陈盖洵², 凡超^{1*}

(1 广东省农业科学院果树研究所 / 农业农村部亚热带果树生物学与遗传资源利用重点实验室 / 广东省果树科学与技术重点实验室, 广东广州 510640; 2 潮州市农业科学技术研究中心, 广东潮州 521011)

摘要:【目的】铵态氮与硝态氮的配比(铵硝比)是影响芒果养分吸收的重要因素, 探究芒果在不同铵硝比下吸收铵态氮、硝态氮、磷、钾、钙、镁能力的差异, 为芒果合理施肥提供依据。【方法】以一年生‘鹰嘴芒’幼苗为试材进行了水培试验。以 Hoagland 营养液为基础, 在保持总氮浓度不变的前提下, 设置 5 个铵硝比处理: 0 : 1 (T1)、3 : 7 (T2)、1 : 1 (T3)、7 : 3 (T4) 和 1 : 0 (T5)。将氮饥饿处理 48 h 的芒果幼苗于处理营养液中培养 0、1、2、3、4、6、8、10、12 和 24 h 后, 采集溶液样本, 测定营养液中铵态氮、硝态氮、总氮、磷、钾、钙和镁含量, 并以 Michaelis-Menten 动力学方程拟合养分吸收特征。试验结束时, 采集植株根系样品, 测量根系生物量, 分析氮素含量。【结果】不同铵硝配比下, 芒果根系吸收 NO_3^- 、 NH_4^+ 和总氮的规律符合 Michaelis-Menten 动力学方程。5 个硝铵比处理下, 根系对 NO_3^- 的最大吸收速率、亲和力和 NO_3^- 进入根系的速率均高于 NH_4^+ , 且在 T4 处理下, 根系对 NO_3^- 的吸收能力和耐贫瘠能力强于 NH_4^+ 。T2、T3 和 T4 处理下, 根系对 NO_3^- 和 NH_4^+ 的吸收速率随着铵硝比的增大而变化, 且 NO_3^- 的吸收速率比 NH_4^+ 变化剧烈; 根系对总氮的最大吸收速率和总氮进入根系的速率随着铵硝比的增大而减小; 根系与总氮的亲和力及根系对总氮的吸收能力和耐贫瘠能力在 T3 处理时达到最大。不同铵硝配比处理的芒果根系对 NO_3^- 和 NH_4^+ 的吸收速率随培养时间延长均为先升后降, 而对 H_2PO_4^- 、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的吸收速率则是持续下降, 且均在 10 h 趋于平稳。T1 处理下, 根系对 K^+ 和 Ca^{2+} 的亲和力及在低浓度 H_2PO_4^- 、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 下的存活能力最强; T2 处理下, 根系对 K^+ 的最大吸收速率和吸收能力达到最大值; T3 处理下, 根系与 H_2PO_4^- 的亲和力及其对 Ca^{2+} 的吸收能力最强; T5 处理下, 根系对 H_2PO_4^- 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的最大吸收速率、根系对 Mg^{2+} 的亲和力、根系对 H_2PO_4^- 和 Mg^{2+} 的吸收能力及 H_2PO_4^- 、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 进入根系的速率均达到最大。【结论】芒果表现出对 NO_3^- 的偏好吸收特性, 以铵硝比为 3 : 7 (T2) 时最有利于芒果对氮的吸收。硝态氮与铵态氮的配合施用能更有效地促进芒果对磷和钾养分的吸收。为了进一步提升芒果对磷、钙和镁重要养分的吸收, 建议在实际生产中, 将磷肥、钙肥和镁肥与适量的铵态氮肥相结合施用。

关键词: 芒果; 铵硝比; 养分; 动力学参数; 吸收能力

Effects of ammonium-nitrate ratios on the nutrient absorption characteristics of mango (*Mangifera indica* L.)

CHEN Rong¹, YANG Jie¹, CHEN Gai-xun², FAN Chao^{1*}

(1 Institute of Fruit Tree Research, Guangdong Academy of Agricultural Sciences / Key Laboratory of South Subtropical Fruit Biology and Genetic Resource Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs / Guangdong Provincial Key Laboratory of Science and Technology Research on Fruit Tree, Guangzhou, Guangdong 510640, China; 2 Chaozhou Agricultural Science and Technology Research Center, Chaozhou, Guangdong 521011, China)

Abstract: 【Objectives】The ammonium-nitrate ratio is an important factor to affect the nutrient absorption of mango (*Mangifera indica* L.). The ammonium nitrogen (AN), nitrate nitrogen (NN), P, K, Ca, and Mg uptake of mango with varied ammonium-nitrate ratios was explored, aiming to screen the most suitable ammonium-nitrate

收稿日期: 2024-09-11 接受日期: 2024-12-02

基金项目: 广东省重点领域研发计划“现代种业”重大专项 (2022B0202070002); 2023 年省级乡村振兴战略专项—种业振兴行动项目 (2023-NBH-00-013)。

联系方式: 陈蓉 E-mail: 997347158@qq.com; * 通信作者 凡超 E-mail: gdfanchao@163.com

ratio and provide a basis for rational fertilization in mango. 【 **Methods** 】 An hydroponic experiment was conducted using mango seedlings of cultivar ‘Golek’ as test materials. Based on the Hoagland nutrition solution, five ammonium-nitrate ratios was setup, i.e. 0 : 1 (T1), 3 : 7 (T2), 1 : 1 (T3), 7 : 3 (T4), and 1 : 0 (T5). The mango seedlings had cultured for 48 h under no nitrogen supply before grown in the treatment nutrient solutions. At 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12, and 24 hours of culture, nutrient solution samples were collected for determination of ammonia, nitrate, total nitrogen (TN), P, K, Ca, and Mg concentrations. Michaelis-Menten kinetics equations were adapted to measure the kinetic parameters of the ion uptake. 【 **Results** 】 The absorption pattern of NO_3^- , NH_4^+ , and TN uptake by mango root followed the Michaelis-Menten kinetics equation under different ammonium-nitrate ratios. The maximum absorption rate, affinity and flow velocity of NO_3^- were higher than those of NH_4^+ under all treatments, while the absorption capacity and poorness-resistance of NO_3^- were higher than those of NH_4^+ under T4 treatment. The flow rate of NO_3^- and NH_4^+ continued change with the prolongation of ammonium-nitrate ratios and NO_3^- changed more easily than NH_4^+ under T2, T3, and T4, whereas the maximum absorption rate and flow rate of TN continued reducing, and the affinity, absorption capacity and poorness-resistance of TN were highest at T3 treatment. The absorption rates of NO_3^- and NH_4^+ by the mango roots treated with different ammonium-nitrate ratios increased first and then decreased with the extension of culture time, while the absorption rates of H_2PO_4^- , K^+ , Ca^{2+} , and Mg^{2+} continued to decrease and tended to stabilize at 10 h. Additionally, the affinity of K^+ and Ca^{2+} as well as the poorness-resistance of H_2PO_4^- , K^+ , Ca^{2+} , and Mg^{2+} were highest at T1; the maximum absorption rate and absorption capacity of K^+ reached the peak at T2; the affinity and absorption capacity of H_2PO_4^- were highest at T3; and the maximum absorption rate of H_2PO_4^- , Ca^{2+} and Mg^{2+} , the affinity of Mg^{2+} , the absorption capacity of H_2PO_4^- and Mg^{2+} , and flow rate of H_2PO_4^- , K^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} reached their maximums at T5. 【 **Conclusions** 】 Mango has a preference for absorbing NO_3^- , however, the combined application of ammonia and nitrate nitrogen is more conducive to the absorption of N and other nutrients by mango. In order to improve the absorption of P, Ca, and Mg, phosphate, calcium, and magnesium fertilizers should be applied in conjunction with an appropriate amount of ammonium nitrogen fertilizer in mango production.

Key words: *Mangifera indica*; ammonium-nitrate ratio; nutrients; kinetic parameter; absorption capacity

芒果 (*Mangifera indica* L.), 又名杧果、檬果, 属于漆树科多年生双子叶常绿果树, 其质地鲜嫩, 营养丰富, 深得消费者的青睐^[1-4]。然而, 在芒果种植过程中, 氮 (N) 素的供应往往受限, 这不仅影响芒果的生长速度和健康状态, 还可能降低果实的产量和品质, 进而影响到种植者的经济收益和芒果市场的供应稳定性^[5-6]。因此, 克服氮素供应的限制对芒果产量、品质及抗性的增强有着重要意义, 可极大促进芒果产业的健康发展。

自 1950 年起, 学者基于经典的米氏酶促反应动力学方程, 发展并建立了一系列数学方程来描述根系对营养离子的吸收过程, 从而揭示了植物根系吸收离子的动力学机制^[7]。在植物的氮素营养中, 硝酸根 (NO_3^-) 和铵根 (NH_4^+) 是两种可被植物直接吸收的无机氮形态, 为植物的生长提供了必需的氮源^[8-9], 但氮元素的过量施用可能导致土壤和水体的污染问题^[10-12]。康晓育等^[13]通过水培试验发现, 硝态氮有利于植物幼苗的生长, 且能明显提高植物各部位氮、

磷 (P)、钾 (K) 的积累量^[14-15]。此外, 当植物仅施用硝态氮时, 其根系对钙 (Ca)、镁 (Mg) 的吸收能力也得到了显著增强, 而铵态氮对根系吸收 Ca、Mg 的影响则呈现相反的趋势^[16-17]。Liu 等^[18]深入研究了不同氮素比例对紫色莴苣的影响, 发现 NO_3^- -N/ NH_4^+ -N 以 3 : 1 混合施用的效果优于单一供应; 而当铵态氮和硝态氮 1 : 1 施用, 会进一步促进植物对 N、P 养分的吸收^[19]。另外, 只有在高浓度 CO_2 条件下, 铵态氮处理的番茄果实 N、K 含量及 N/P 较硝态氮处理有所增长^[20]。目前, 不同氮形态下芒果养分吸收的差异尚不明确。

‘鹰嘴芒’作为芒果嫁接中的优质砧木, 以其强大的离子亲和力、抗病性和广泛的适应性成为研究芒果养分吸收特性的理想材料^[21]。本研究遵循养分吸收动力学的基本原理, 探究‘鹰嘴芒’根系对不同形态氮素 (铵态氮和硝态氮) 的选择性吸收行为, 明确其根系吸收养分的动力学特征, 以期进一步解析芒果根系选择性吸收不同形态氮素的能力, 并为芒果

栽培生产中氮肥科学管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料及处理

试验于 2023 年 5—7 月在广东省农业科学院果树研究所人工气候培养箱内进行,以一年生的‘鹰嘴芒’实生苗为试验材料。仔细挑选 18 株生长健壮、长势基本一致的幼苗,使用超纯水对其根系反复清洗后,将幼苗移植于培养箱中,在养分浓度为 1/2、pH 6.5 的营养液中缓苗一周,在缓苗期间借助氧气泵持续为其供氧。在缓苗阶段,用 0.5 mol/L 的 H_2SO_4 和 1.0 mol/L 的 NaOH 溶液来调控 pH 值,使其保持在 6.5 ± 0.5 ,直至芒果幼苗萌生出新根。然后,将芒果幼苗根系用超纯水反复冲洗后,转移到黑色水培箱中,于室温下纯水饥饿 48 h,用于之后的离子吸收试验。

1.2 芒果营养液配方

营养液均采用 Hoagland 营养液的微量元素配方,具体成分包括: Fe 5 mg/L、B 0.05 mg/L、Zn 0.05 mg/L、Cu 0.05 mg/L、Mn 0.05 mg/L 以及 Mo 0.01 mg/L。营养液中氮素浓度在总量不变的前提下,设置 5 个 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 质量比,分别为 0:1 (T1)、3:7 (T2)、1:1 (T3)、7:3 (T4)、1:0 (T5)。此外,还设置了 1 个空白对照。营养液配制均使用超纯水和分析纯试剂。

1.3 试验方法

将配制完成的 5 个铵硝比营养液 (pH=6.5) 分别转入 500 mL 锥形瓶中 (装至 500 mL 刻度线处),从黑色水培箱中取出经过饥饿处理的芒果苗移至瓶中,每瓶放置一株,并添加 1 mL 3% 的 H_2O_2 来提供 O_2 。为了抑制铵态氮的硝化作用,同时每瓶还加入了 7 $\mu\text{mol/L}$ 的双氰胺 (硝化抑制剂),于人工气候培养箱 [温度 (25 ± 1) $^\circ\text{C}$ 、光照强度 2500 Lux、相对湿度 75%~85%] 中进行离子吸收试验。

在幼苗离子吸收试验开始后 0、1、2、3、4、6、8、10、12 和 24 h,分别采集 2 mL 营养液样本。每次取样后,立即向瓶中补充 2 mL 超纯水,并搅拌均匀,以维持营养液的总量恒定。试验结束后,从瓶中取出芒果幼苗,剪下其根系,吸干表面水分,称量鲜重并记录数据。营养液样本中 NO_3^- (紫外分光光度法)^[22]、 NH_4^+ (靛酚蓝比色)^[22] 和 H_2PO_4^- (钼酸铵分光光度法)^[22] 采用酶标仪测定 (SPARK, 瑞士), K^+ 、

Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 使用原子吸收分光光度计 (AA-7000, 日本) 测定。根据铵硝混合营养液中铵态氮和硝态氮浓度总和变化量,来计算芒果幼苗总氮吸收量^[23]。

1.4 动力学参数的计算^[23]

根据离子吸收过程中营养液离子浓度随时间变化关系拟合出离子吸收曲线方程,以计算 NO_3^--N 、 NH_4^+-N 、 H_2PO_4^- 、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的吸收动力学参数。

建立离子消耗曲线方程:

$$Y = a + bX + cX^2 \quad (1)$$

式中, Y 表示某一时间的营养液中离子浓度, X 表示时间。

对该方程一阶求导得浓度变化速率方程:

$$Y' = b + 2cX \quad (2)$$

当 X 为 0 时, $Y'=b$, 此时离子浓度变化速率达到最大,根据初始方程的斜率 b 求得最大吸收效率: $V_{\max} = b \times v / \text{根鲜重}$ (v 为营养液原体积), $V_{\max}$ 为根的最大离子吸收速率,表示植物吸收离子的内在潜力, $V_{\max}$ 值越大,植物的离子吸收潜力越强。当 $Y'=1/2b$ 时,代入 (1) 式得 $K_m = c - 3b^2/16a$ (K_m 值为米氏常数,表示 1/2 $V_{\max}$ 时介质中的离子浓度), K_m 表示根对离子的亲和能力,数值越小越容易吸收该离子。当 $Y'=0$,回代到原方程得 $C_{\min} = c - b^2/4a$ ($C_{\min}$ 为吸收速率 0 时的浓度), $C_{\min}$ 表示介质中植物可吸收的最低离子浓度,该值越小,表示植物越能从离子浓度很低的介质中吸收营养,也就是对贫瘠条件适应性越强。

为了解决偶有 K_m 、 $C_{\min}$ 排序不一致的情况,引入两个参数:

$$\alpha = V_{\max} / K_m$$

$$\beta = \sqrt{V_{\max} \cdot K_m}$$

α 值表示离子进入植物体内的速率,该值越高,表示植株养分吸收速度越快; β 值表示植物在低离子浓度下存活的能力,该值越小,耐贫瘠能力越强。

养分吸收速率计算公式为:

$$V = (C_0 - C_t) \times V / m / t$$

其中, C_0 、 C_t 分别表示处理前、后营养液的离子浓度, V 表示营养液的体积, t 为处理时间, m 为根的干重。

1.5 数据处理与分析

试验数据为 3 次重复的平均值 $\pm$ 标准差 (STDEV),

采用 DPS 9.01 软件进行方差分析, 利用 Excel 进行数据整理及绘制图表。

2 结果与分析

2.1 芒果根系吸收氮素的动力学特征

2.1.1 不同铵硝比对芒果幼苗吸收硝态氮动力学特征的影响 不同铵硝比处理下对 NO₃⁻ 的吸收速率随时间变化规律表现一致, 均为先升后降, 吸收速率排序为 T1>T2>T3>T4, 且 T1 处理下芒果幼苗 NO₃⁻ 的吸收速率相较于其他各处理下降的程度最大。由于芒果幼苗试验前经过了饥饿处理, T1、T2 和 T3 处理在 2 h 达到最大吸收速率, 而 T4 则在 3 h 时吸收速率达到最大, 10 h 后吸收速率趋于恒定 (图 1)。

不同氮素条件下 NO₃⁻ 的离子吸收方程均达极显著水平 ($P<0.01$, 表 1)。如表 2 所示, 随着培养液中铵

硝比的增加, 芒果根系对 NO₃⁻ 的最大吸收速率 (V_{max}) 逐渐减少, 在 T1 处理时达到 0.4942 mmol/(g·h), 并显著高于其他各处理, 这也证明了 NO₃⁻ 浓度是影响芒果根系吸收该离子速率的重要因子。1/2 V_{max} 时介质中的离子浓度 (K_m) 和介质中植物可吸收的最低离子浓度 (C_{min}) 均随着硝态氮浓度的降低而降低, 在 T3 和 T4 处理下根系对 NO₃⁻ 的亲力和吸收能力最强。T3 处理 NO₃⁻ 进入根系的速度 (α 值) 显著高于其他各处理, 这也说明根系对 NO₃⁻ 的亲合力越强, 根系吸收速度越快。 β 值反映根系对离子的耐贫瘠能力, 其排序为 T1>T2>T3>T4, 并与最大吸收速率的排序一致, 这说明芒果根系对 NO₃⁻ 的最大吸收速率越大, 其在低浓度下的存活能力越差。

2.1.2 铵硝比对芒果幼苗吸收铵态氮动力学特征的影响 由图 2 可知, 营养液不同铵硝比处理下, 根系对 NH₄⁺ 的吸收速率随时间的变化规律均为先上升后下降。其中, T3 和 T4 对 NH₄⁺ 的吸收曲线十分

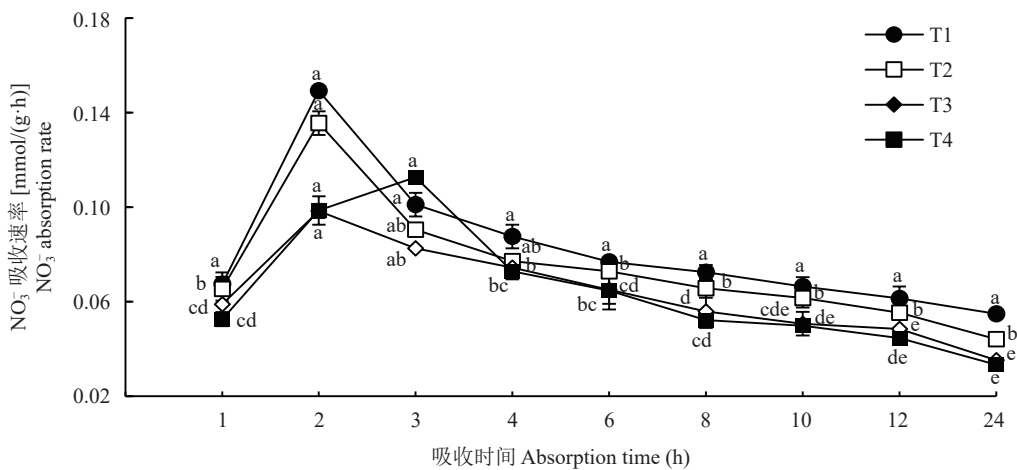


图 1 不同铵硝配比下芒果根系 NO₃⁻ 的吸收速率曲线

Fig. 1 Absorption rate curves of NO₃⁻ in mango roots under different ammonium-nitrate nitrogen ratios

注: T1、T2、T3、T4 分别指 NH₄⁺-N : NO₃⁻-N 为 0 : 1、3 : 7、1 : 1、7 : 3 的处理。不同小写字母表示同一时间处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: T1, T2, T3, T4 refer to NH₄⁺-N : NO₃⁻-N at 0 : 1, 3 : 7, 1 : 1, 7 : 3, respectively. Different lowercase letters denote significant difference among treatments at the same time ($P<0.05$).

表 1 不同铵硝配比下芒果吸收 NO₃⁻ 动力学方程

Table 1 NO₃⁻ uptake kinetic equation of mango under different ammonium-nitrate nitrogen ratios

处理 Treatment	方程 Equation	F值 F value	P值 P value
T1	$y = 0.0159x^2 - 0.1048x + 1.8291$	87.40	<0.0001
T2	$y = 0.0056x^2 - 0.1106x + 1.0094$	25.17	<0.0001
T3	$y = 0.0020x^2 - 0.0612x + 1.0012$	12.82	<0.0001
T4	$y = 0.0052x^2 - 0.1010x + 1.0425$	10.88	<0.0001

注: T1、T2、T3、T4 分别指 NH₄⁺-N : NO₃⁻-N 为 0 : 1、3 : 7、1 : 1、7 : 3 的处理。

Note: T1, T2, T3, T4 refer to NH₄⁺-N : NO₃⁻-N at 0 : 1, 3 : 7, 1 : 1, 7 : 3, respectively.

表 2 不同铵硝配比下芒果吸收 NO₃⁻的动力学参数 (n=3)

Table 2 Kinetic parameters of NO ₃ ⁻ uptake by mango under different ammonium-nitrate nitrogen ratios					
处理 Treatment	V _{max} [mmol/(g·h)]	K _m (mmol/L)	C _{min} (mmol/L)	α	β
T1	0.4942±0.0185 a	3.0314±0.1111 a	3.5937±0.2073 a	0.1627±0.0012 b	1.3239±0.0450 a
T2	0.3164±0.0512 b	3.0277±0.4514 a	3.3621±0.1180 a	0.1035±0.0063 c	0.9831±0.1471 b
T3	0.1365±0.0123 c	0.7159±0.1237 c	0.4372±0.0262 b	0.1935±0.0284 a	0.3120±0.0345 c
T4	0.0848±0.0138 c	1.1433±0.0257 b	0.4014±0.0070 b	0.0744±0.0137 c	0.3105±0.0218 c

注：T1、T2、T3、T4分别指NH₄⁺-N：NO₃⁻-N为0：1、3：7、1：1、7：3的处理。V_{max}—最大吸收速率，K_m—1/2 V_{max}时介质中的离子浓度，C_{min}—介质中植物可吸收的最低离子浓度，α—离子进入植物体内的速度，β—植物在低离子浓度下存活的能力。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 (P<0.05)。

Note: T1, T2, T3, T4 refer to NH₄⁺-N : NO₃⁻-N at 0 : 1, 3 : 7, 1 : 1, 7 : 3, respectively. V_{max}—Maximum uptake rate, K_m—The ion concentration in the medium at 1/2 V_{max}, C_{min}—The lowest concentration of ions that can be absorbed by plants in a medium, α—The rate of which ions enter the plant, β—The ability of plants to survive at low ion concentrations. Different lowercase letters after data in the same column mean significant difference among treatments (P<0.05).

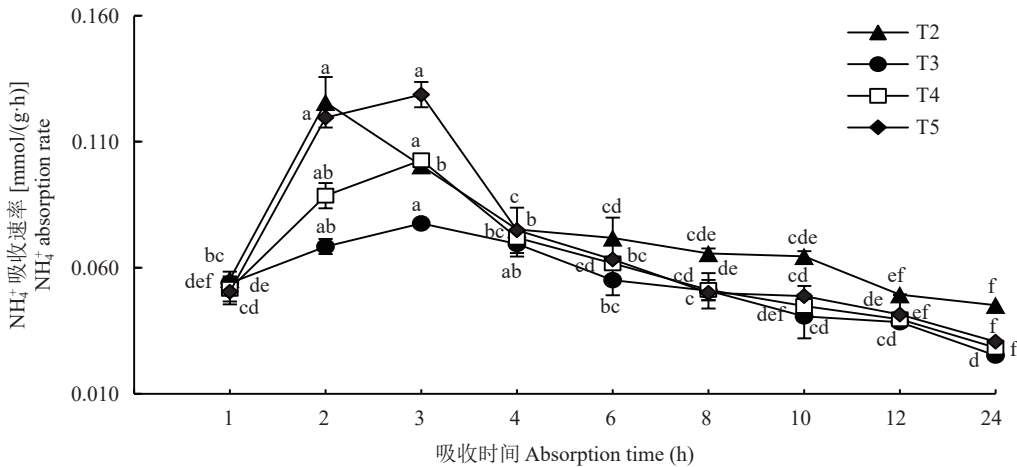


图 2 不同铵硝配比下芒果根系 NH₄⁺的吸收速率曲线

Fig. 2 Absorption rate curves of NH₄⁺ in mango roots under different ammonium-nitrate nitrogen ratios

注：T2、T3、T4、T5 分别指 NH₄⁺-N：NO₃⁻-N 为 3：7、1：1、7：3、1：0 的处理。不同小写字母表示同一时间处理间差异显著 (P<0.05)。

Note: T2, T3, T4, T5 refer to NH₄⁺-N : NO₃⁻-N at 3 : 7, 1 : 1, 7 : 3, 1 : 0, respectively. Different lowercase letters denote significant difference among treatments at the same time (P<0.05).

相似，且与 T5 处理均在 3 h 表现出最大吸收速率，而后下降并在 10 h 后趋于平稳。整体上来看，吸收速率排序为 T2>T5>T3>T4，表明在氮饥饿后供给的铵态氮较低时，会提升芒果幼苗对铵态氮的吸收。

从表 3 看出，不同氮素条件下 NH₄⁺吸收的耗竭方程均呈极显著水平 (P<0.05)。芒果幼苗根系对 NH₄⁺的最大吸收速率随着铵硝比的增大而增大，但 NH₄⁺的亲合力、吸收能力和耐贫瘠能力却随着铵

表 3 不同铵硝配比下芒果的 NH₄⁺吸收动力学方程

Table 3 The kinetic equations of NH ₄ ⁺ uptake of mango under different ammonium-nitrate nitrogen ratios			
处理 Treatment	方程 Equation	F值 F value	P值 P value
T2	y = 0.0049x ² -0.0935x+1.0429	10.50	<0.0001
T3	y = 0.0077x ² -0.1327x+1.0475	15.62	<0.0001
T4	y = 0.0012x ² -0.0692x+1.0006	94.72	<0.0001
T5	y = 0.0058x ² -0.1008x+1.0362	14.43	<0.0001

注：T2、T3、T4、T5分别指NH₄⁺-N：NO₃⁻-N为3：7、1：1、7：3、1：0的处理。

Note: T2, T3, T4, T5 refer to NH₄⁺-N : NO₃⁻-N at 3 : 7, 1 : 1, 7 : 3, 1 : 0, respectively.

表 4 不同铵硝配比下芒果吸收 NH₄⁺的动力学参数 (n=3)

Table 4 Kinetic parameters of NH ₄ ⁺ absorption by mango under different ammonium-nitrate nitrogen ratios					
处理 Treatment	V _{max} [mmol/(g·h)]	K _m (mmol/L)	C _{min} (mmol/L)	α	β
T2	0.0850±0.0192 b	0.6376±0.2871 b	0.0482±0.0097 b	0.1484±0.0594 a	0.2306±0.0768 c
T3	0.1015±0.0209 b	1.0396±0.1553 b	0.0249±0.0375 b	0.0976±0.0138 b	0.3243±0.0527 c
T4	0.1482±0.0489 b	3.026±0.3102 a	3.0221±0.6077 a	0.0445±0.0064 c	0.9436±0.2773 b
T5	0.2914±0.0436 a	3.1828±0.3025 a	3.1782±0.4018 a	0.0810±0.0168 bc	1.4404±0.0664 a

注: T2、T3、T4、T5分别指NH₄⁺-N : NO₃⁻-N为3 : 7、1 : 1、7 : 3、1 : 0的处理。V_{max}—最大吸收速率, K_m—1/2 V_{max}时介质中的离子浓度, C_{min}—介质中植物可吸收的最低离子浓度, α—离子进入植物体内的速度, β—植物在低离子浓度下存活的能力。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 (P<0.05)。

Note: T2, T3, T4, T5 refer to NH₄⁺-N : NO₃⁻-N at 3 : 7, 1 : 1, 7 : 3, 1 : 0, respectively. V_{max}—Maximum uptake rate, K_m—The ion concentration in the medium at 1/2 V_{max}, C_{min}—The lowest concentration of ions that can be absorbed by plants in a medium, α—The rate at which ions enter the plant, β—The ability of plants to survive at low ion concentrations. Different lowercase letters after data in the same column mean significant difference among treatments at 0.05 level.

硝比的增大而减小。T5 处理下芒果根系对 NH₄⁺的最大吸收效率最大, 与 NH₄⁺的亲合力最弱, 对 NH₄⁺的吸收能力和耐贫瘠能力也最差。T2 处理下芒果根系与 NH₄⁺的亲合力和耐贫瘠能力最强; 而 T3 处理对 NH₄⁺的吸收能力最强 (表 4)。

2.1.3 不同铵硝比对芒果幼苗吸收总氮动力学特征的影响 不同铵硝比供应条件下, 芒果根系对 NO₃⁻和 NH₄⁺的吸收差异明显。T2、T3 和 T4 处理下, 随着铵硝比的增大芒果根系对 NO₃⁻的吸收速率比 NH₄⁺变化幅度更大 (表 2 和表 4)。单独供给 NO₃⁻时, 根系对 NO₃⁻的最大吸收速率和 NO₃⁻进入根系的速率分别为 0.4942 mmol/(g·h) 和 0.1627, 均高于单供 NH₄⁺的 T5 处理, 且根系对 NO₃⁻的亲合力和耐贫瘠能力也比单纯供给 NH₄⁺时高, 但介质中芒果幼苗 NH₄⁺最低吸收浓度低于单供 NO₃⁻。T3 和 T4 处理下, 根系对 NO₃⁻的最大吸收速率、亲合力和耐贫瘠能力及 NO₃⁻进入根系的速率均比 NH₄⁺高。

由表 5 还可知, 在混合供应硝态氮和铵态氮的

T2~T4 处理中, 芒果根系对总氮的最大吸收速率、总氮进入根系的速率均随着铵硝比的增大而减小, 根系与总氮的亲合力、根系对总氮的吸收能力和根系对总氮的耐贫瘠能力则在 T3 处理达到最大。T2 处理下, 根系对总氮的最大吸收速率最大, 亲合力最小; 而 T1 处理下, 根系对总氮的吸收能力最弱, 但根系对总氮的吸收速度最快。由此可得, 对芒果施用硝态氮肥时配合少量的铵态氮肥有利于根系对总氮的吸收。

2.2 芒果根系吸收 H₂PO₄⁻和 K⁺的动力学特征

2.2.1 不同铵硝比对芒果幼苗吸收 H₂PO₄⁻动力学特征的影响 随着吸收时间的延长, T1~T5 处理下芒果幼苗对 H₂PO₄⁻的吸收速率呈现出持续下降的趋势, 这种下降在 10 h 后趋于平稳。各处理吸收速率变化幅度的排序为 T5>T3>T2>T4>T1。在 T5 处理下, H₂PO₄⁻的吸收速率在 1~2 h 下降最明显 (图 3)。

如表 6 所示, 芒果吸收 H₂PO₄⁻的二次多项式方程均达显著水平 (P<0.05), 并以此求得动力学参数

表 5 不同铵硝配比下芒果吸收总氮的动力学参数 (n=3)

Table 5 Total nitrogen uptake kinetic parameters by mango under different ammonium-nitrate nitrogen ratios					
处理 Treatment	V _{max} [mmol/(g·h)]	K _m (mmol/L)	C _{min} (mmol/L)	α	β
T1	0.4942±0.0185 a	3.0314±0.1111 b	3.5937±0.2073 a	0.1627±0.0012 a	1.3239±0.0450 a
T2	0.5141±0.1243 a	3.5949±0.2493 a	3.2130±0.2765 b	0.1235±0.0149 b	1.3732±0.0314 a
T3	0.2204±0.0179 b	1.8517±0.0647 d	0.5158±0.0214 c	0.1053±0.0114 b	0.5139±0.0241 c
T4	0.2030±0.0409 b	2.6634±0.2462 c	3.5179±0.7061 a	0.0939±0.0103 c	1.1579±0.1008 b
T5	0.2914±0.0436 b	3.1828±0.3025 b	3.1782±0.4018 b	0.0810±0.0168 c	1.4404±0.0664 a

注: T1、T2、T3、T4、T5分别指NH₄⁺-N : NO₃⁻-N为0 : 1、3 : 7、1 : 1、7 : 3、1 : 0的处理。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 (P<0.05)。

Note: T1, T2, T3, T4, T5 refer to NH₄⁺-N : NO₃⁻-N at 0 : 1, 3 : 7, 1 : 1, 7 : 3, 1 : 0, respectively. Different lowercase letters after data in the same column mean significant difference among treatments at 0.05 level.

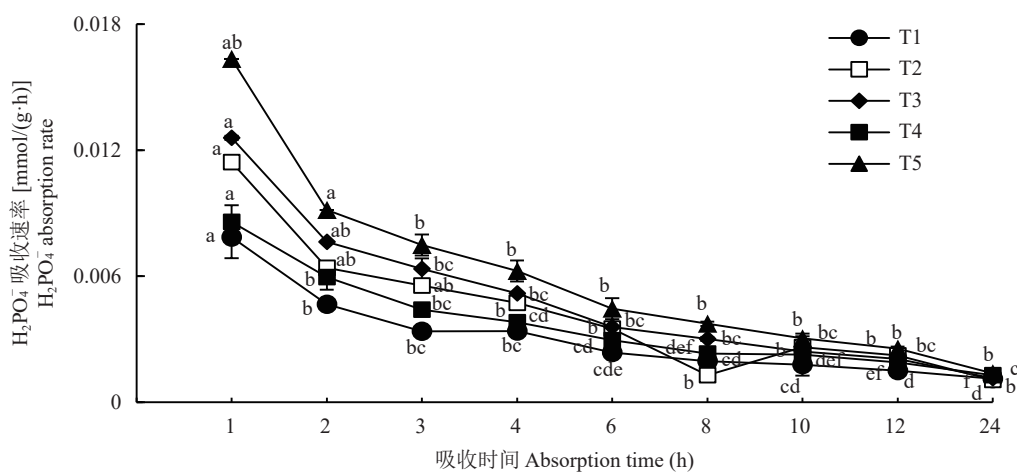


图 3 不同铵硝配比下芒果根系对 H_2PO_4^- 的吸收速率曲线

Fig. 3 Absorption rate curves of H_2PO_4^- in the roots of mango under different ammonium-nitrate nitrogen ratios

注: T1、T2、T3、T4、T5 分别指 $\text{NH}_4^+\text{-N}:\text{NO}_3^-\text{-N}$ 为 0:1、3:7、1:1、7:3、1:0 的处理。图中不同小写字母表示同一时间处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: T1, T2, T3, T4, T5 refer to $\text{NH}_4^+\text{-N}:\text{NO}_3^-\text{-N}$ at 0:1, 3:7, 1:1, 7:3, 1:0, respectively. Different lowercase letters in the fig. denote significant difference among treatments at the same time ($P<0.05$).

表 6 不同铵硝配比下芒果吸收 H_2PO_4^- 的动力学方程

Table 6 H_2PO_4^- uptake kinetic equations of mango as affected by ammonium-nitrate nitrogen ratio

处理 Treatment	方程 Equation	F值 F value	P值 P value
T1	$y = 0.0002x^2 - 0.0579x + 0.9826$	171.30	<0.0001
T2	$y = 0.0049x^2 - 0.0935x + 1.0429$	10.50	0.0142
T3	$y = 0.0077x^2 - 0.1327x + 1.0475$	15.62	0.0055
T4	$y = 0.0012x^2 - 0.0692x + 1.0006$	94.72	<0.0001
T5	$y = 0.0058x^2 - 0.1008x + 1.0362$	14.43	0.0067

注: T1、T2、T3、T4、T5 分别指 $\text{NH}_4^+\text{-N}:\text{NO}_3^-\text{-N}$ 为 0:1、3:7、1:1、7:3、1:0 的处理。
Note: T1, T2, T3, T4, T5 refer to $\text{NH}_4^+\text{-N}:\text{NO}_3^-\text{-N}$ at 0:1, 3:7, 1:1, 7:3, 1:0, respectively.

(表 7)。可知, 芒果幼苗在不同氮素条件下对 H_2PO_4^- 对 H_2PO_4^- 的亲合力介于 0.841~0.983 mmol/L, 根系的
的最大吸收速率介于 0.021~0.049 mmol/(g·h), 根系对介质中 H_2PO_4^- 的最低吸收浓度介于 0.728~0.969

表 7 不同铵硝配比下芒果吸收 H_2PO_4^- 的动力学参数 ($n=3$)

Table 7 Parameters of H_2PO_4^- absorption kinetic of mango as affected by ammonium-nitrate nitrogen ratios

处理 Treatment	$V_{\max}$ [mmol/(g·h)]	K_m (mmol/L)	$C_{\min}$ (mmol/L)	α	β
T1	0.0211±0.0039 c	0.9834±0.0832 a	0.9692±0.0749 a	0.0214±0.0025 c	0.1440±0.0189 b
T2	0.0390±0.0034 b	0.8946±0.1055 a	0.7868±0.1262 ab	0.0439±0.0060 b	0.1863±0.0136 a
T3	0.0278±0.0056 c	0.8412±0.0543 a	0.7497±0.0793 ab	0.0334±0.0084 bc	0.1522±0.0118 b
T4	0.0265±0.0020 c	0.8589±0.1490 a	0.7822±0.1947 ab	0.0314±0.0056 bc	0.1504±0.0160 b
T5	0.0493±0.0070 a	0.8514±0.1095 a	0.7282±0.1020 b	0.0588±0.0123 a	0.2040±0.0168 a

注: T1、T2、T3、T4、T5 分别指 $\text{NH}_4^+\text{-N}:\text{NO}_3^-\text{-N}$ 为 0:1、3:7、1:1、7:3、1:0 的处理。 $V_{\max}$ —最大吸收速率, K_m —1/2 $V_{\max}$ 时介质中的离子浓度, $C_{\min}$ —介质中植物可吸收的最低离子浓度, α —离子进入植物体内的速度, β —植物在低离子浓度下存活的能力。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: T1, T2, T3, T4, T5 refer to $\text{NH}_4^+\text{-N}:\text{NO}_3^-\text{-N}$ at 0:1, 3:7, 1:1, 7:3, 1:0, respectively. $V_{\max}$ —Maximum uptake rate, K_m —The ion concentration in the medium at 1/2 $V_{\max}$, $C_{\min}$ —The lowest concentration of ions that can be absorbed by plants in a medium, α —The rate at which ions enter the plant, β —The ability of plants to survive at low ion concentrations. Different lowercase letters after data in the same column mean significant difference among treatments at 0.05 level.

mmol/L, H_2PO_4^- 进入根系的速率介于 0.021~0.059, 根系对 H_2PO_4^- 的耐瘠能力介于 0.144~0.204。T5 处理下, 根系对 H_2PO_4^- 的最大吸收速率和 H_2PO_4^- 进入根系的速率显著高于其他各处理, 且对 H_2PO_4^- 的吸收能力最强。而 T3 处理下, 芒果根系与 H_2PO_4^- 的亲合力则最强。5 个处理下 H_2PO_4^- 进入根系的速率高低顺序为 $\text{T5} > \text{T2} > \text{T3} > \text{T4} > \text{T1}$, 与根系对 H_2PO_4^- 的最大吸收速率高低顺序相同, 说明根系对 H_2PO_4^- 的吸收速度越快, 吸收速率也越大。T2 和 T5 处理表现出的耐贫瘠能力显著高于其他各处理。

2.2.2 不同铵硝比对芒果幼苗吸收 K^+ 动力学特征的影响 根据图 4 得出, 各处理对 K^+ 的吸收速率随着时间的推移呈明显的下降趋势。在经过饥饿处理后, 所有处理在 1 h 内对 K^+ 的吸收速率达到峰值, 在 10 h 后逐渐稳定。在不同铵硝比处理下, 各处理对 K^+ 的吸收速率排序为 $\text{T5} > \text{T2} > \text{T3} > \text{T4} > \text{T1}$ 。

芒果吸收 K^+ 的二次多项方程除全硝态氮处理 (T1) 外均达极显著水平 (表 8)。

随着吸收时间的延长, 吸收液中 K^+ 的浓度逐渐降低, 拟合后根据得到的离子耗竭方程, 求得动力学参数 (表 9)。由表 9 可知, 5 个铵硝比下对 K^+ 的最大吸收速率介于 0.1049~0.2705 mmol/(g·h), 均高于根系对 H_2PO_4^- 的最大吸收速率。T2 处理下对 K^+ 的最大吸收效率最大, 为 0.2705 mmol/(g·h), T1 的最大吸收速率最小, T2 是 T1 的 2.58 倍。5 个处理下芒果根系对 K^+ 的亲合力介于 4.59~6.15 mmol/L, T1 处理时亲合力最强。根系对介质中 K^+ 的最低吸收浓度在 T2 处理下最低, 则该配比下根系吸收 K^+ 的能力最强。 K^+ 进入根系的速率介于 0.022~0.072, 且 T5 处理下的速率显著高于 T1。不同处理耐贫瘠能力高低顺序为 $\text{T5} > \text{T2} > \text{T3} > \text{T4} > \text{T1}$, T1 处理下 β 值最小, 这代表该处理在 K^+ 浓度很低的环境下具有存活的能力。

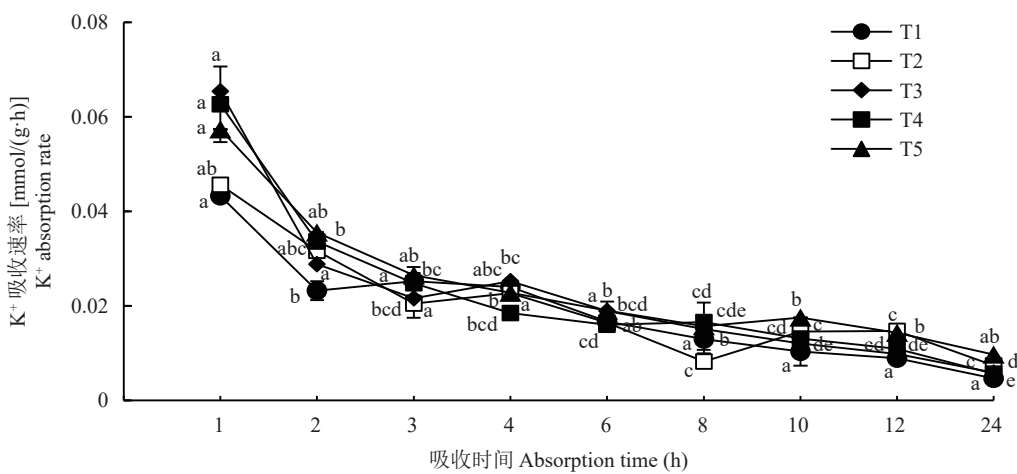


图 4 不同铵硝配比下芒果根系对 K^+ 的吸收速率曲线

Fig. 4 Absorption rate curves of K^+ in the roots of mango under different ammonium-nitrate nitrogen ratios

注: T1、T2、T3、T4、T5 分别指 $\text{NH}_4^+ \text{--} \text{N} : \text{NO}_3^- \text{--} \text{N}$ 为 0 : 1、3 : 7、1 : 1、7 : 3、1 : 0 的处理。图中不同小写字母表示同一时间处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: T1, T2, T3, T4, T5 refer to $\text{NH}_4^+ \text{--} \text{N} : \text{NO}_3^- \text{--} \text{N}$ at 0 : 1, 3 : 7, 1 : 1, 7 : 3, 1 : 0, respectively. Different lowercase letters in the fig. denote significant difference among treatments at the same time ($P < 0.05$).

表 8 不同铵硝配比下芒果 K^+ 的吸收动力学方程

Table 8 The K^+ uptake kinetic equations of mango as affected by ammonium-nitrate nitrogen ratios			
处理 Treatment	方程 Equation	F 值 F value	P 值 P value
T1	$y = 0.0002x^2 - 0.0579x + 0.9826$	6.96	0.0335
T2	$y = 0.0049x^2 - 0.0935x + 1.0429$	22.98	0.0020
T3	$y = 0.0077x^2 - 0.1327x + 1.0475$	13.55	0.0079
T4	$y = 0.0012x^2 - 0.0692x + 1.0006$	13.23	0.0083
T5	$y = 0.0058x^2 - 0.1008x + 1.0362$	85.98	<0.0001

注: T1、T2、T3、T4、T5 分别指 $\text{NH}_4^+ \text{--} \text{N} : \text{NO}_3^- \text{--} \text{N}$ 为 0 : 1、3 : 7、1 : 1、7 : 3、1 : 0 的处理。

Note: T1, T2, T3, T4, T5 refer to $\text{NH}_4^+ \text{--} \text{N} : \text{NO}_3^- \text{--} \text{N}$ at 0 : 1, 3 : 7, 1 : 1, 7 : 3, 1 : 0, respectively.

表 9 不同铵硝配比下芒果的 K⁺吸收动力学参数 (n=3)

Table 9 Parameters of K⁺ absorption kinetic in mango as affected by ammonium-nitrate nitrogen ratio

处理 Treatment	V _{max} [mmol/(g·h)]	K _m (mmol/L)	C _{min} (mmol/L)	α	β
T1	0.1049±0.0607 a	4.5926±1.3422 a	4.4650±0.2288 a	0.0219±0.0029 b	0.6936±0.0783 a
T2	0.2705±0.0214 a	5.0663±1.2739 a	4.0994±0.6271 a	0.0508±0.0015 ab	1.1608±0.0113 a
T3	0.1484±0.0098 a	6.1508±2.4079 a	6.2878±0.9766 a	0.0305±0.0046 ab	0.9367±0.0103 a
T4	0.1565±0.0164 a	5.5094±0.8964 a	5.3156±1.0687 a	0.0331±0.0009 ab	0.9265±0.0181 a
T5	0.2594±0.0193 a	5.5812±0.0676 a	5.2514±1.2629 a	0.0717±0.0025 a	1.1817±0.0626 a

注: T1、T2、T3、T4、T5分别指NH₄⁺-N:NO₃⁻-N为0:1、3:7、1:1、7:3、1:0的处理。V_{max}—最大吸收速率, K_m—1/2 V_{max}时介质中的离子浓度, C_{min}—介质中植物可吸收的最低离子浓度, α—离子进入植物体内的速度, β—植物在低离子浓度下存活的能力。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 (P<0.05)。

Note: T1, T2, T3, T4, T5 refer to NH₄⁺-N:NO₃⁻-N at 0:1, 3:7, 1:1, 7:3, 1:0, respectively. V_{max}—Maximum uptake rate, K_m—The ion concentration in the medium at 1/2 V_{max}, C_{min}—The lowest concentration of ions that can be absorbed by plants in a medium, α—The rate at which ions enter the plant, β—The ability of plants to survive at low ion concentrations. Different lowercase letters after data in the same column mean significant difference among treatments at 0.05 level.

2.3 芒果根系吸收 Ca²⁺和 Mg²⁺的动力学特征

2.3.1 不同铵硝比对芒果幼苗吸收 Ca²⁺动力学特征的影响 芒果根系对 Ca²⁺的吸收速率随着吸收时间的推移呈现出明显的下降趋势, 且均在 10 h 后趋于平稳。在吸收的 1~3 h 期间, 各处理的吸收速率都持续下降, 且不同吸收时间之间呈显著差异。各处理下对 Ca²⁺的吸收速率表现为: T5>T2>T3>T4>T1 (图 5)。

从表 10 看出, 不同氮素条件下仅 T1、T4 和 T5 处理的 Ca²⁺吸收方程达显著水平 (P<0.05), 并由此得出各铵硝比下的 Ca²⁺吸收动力学参数 (表 11)。5 个不同铵硝处理下根系对 Ca²⁺的最大吸收速率介于

0.064~0.208 mmol/(g·h), Ca²⁺进入根系的速率介于 0.018~0.052, 其大小排序与对 Ca²⁺的最大吸收速率一致, T5 处理下对 Ca²⁺的最大吸收速率和 Ca²⁺进入根系的速率均显著大于其他各处理。根系对 Ca²⁺的亲合力和对 Ca²⁺的耐贫瘠能力分别介于 3.54~4.20 mmol/L 和 0.47~0.91, T1 处理根系对 Ca²⁺的亲合力和对 Ca²⁺的耐贫瘠均最强。根系对介质中 Ca²⁺的最低吸收浓度介于 3.57~4.29 mmol/L, T3 处理下根系对 Ca²⁺的吸收能力最强。

2.3.2 不同铵硝比对芒果幼苗吸收 Mg²⁺动力学特征的影响 从图 6 可得, 随着幼苗吸收时间的延长, 其根系对 Mg²⁺的吸收速率呈现出持续下降的趋

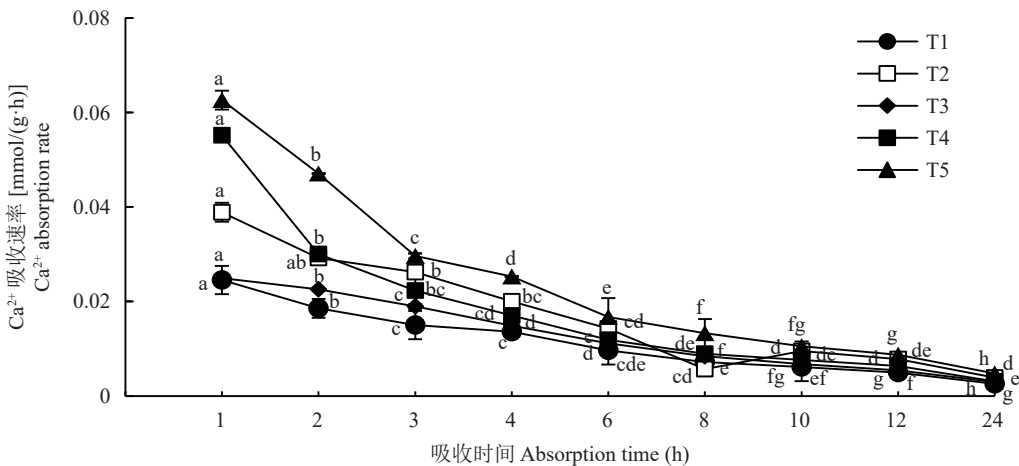


图 5 不同铵硝配比下芒果根系的 Ca²⁺吸收速率曲线

Fig. 5 Absorption rate curves of Ca²⁺ in the roots of mango under different ammonium-nitrate nitrogen ratios

注: T1、T2、T3、T4、T5 分别指 NH₄⁺-N:NO₃⁻-N 为 0:1、3:7、1:1、7:3、1:0 的处理。图中不同小写字母表示同一时间处理间差异显著 (P<0.05)。

Note: T1, T2, T3, T4, T5 refer to NH₄⁺-N:NO₃⁻-N at 0:1, 3:7, 1:1, 7:3, 1:0, respectively. Different lowercase letters denote significant difference among treatments at the same time (P<0.05).

表 10 不同铵硝比对芒果的 Ca^{2+} 吸收动力学方程

Table 10 The kinetic equations of Ca^{2+} uptake by mango as affected by ammonium-nitrate nitrogen ratios			
处理 Treatment	方程 Equation	F值 F value	P值 P value
T1	$y = 0.0297x^2 - 0.4685x + 5.3108$	5.81	0.0468
T2	$y = 0.0298x^2 - 0.467x + 5.2921$	5.37	0.0535
T3	$y = 0.0297x^2 - 0.4577x + 5.3072$	5.13	0.0579
T4	$y = 0.0319x^2 - 0.4634x + 5.0412$	6.66	0.0364
T5	$y = 0.0274x^2 - 0.4114x + 5.0958$	6.69	0.0361

注: T1、T2、T3、T4、T5 分别指 $\text{NH}_4^+ - \text{N} : \text{NO}_3^- - \text{N}$ 为 0 : 1、3 : 7、1 : 1、7 : 3、1 : 0 的处理。
Note: T1, T2, T3, T4, T5 refer to $\text{NH}_4^+ - \text{N} : \text{NO}_3^- - \text{N}$ at 0 : 1, 3 : 7, 1 : 1, 7 : 3, 1 : 0, respectively.

表 11 不同铵硝配比下芒果吸收 Ca^{2+} 的动力学参数 ($n=3$)

Table 11 Parameters of Ca^{2+} absorption kinetic in mango as affected by ammonium-nitrate nitrogen ratios					
处理 Treatment	$V_{\max}$ [mmol/(g·h)]	K_m (mmol/L)	$C_{\min}$ (mmol/L)	α	β
T1	0.0635±0.0007 b	3.5449±0.8762 a	3.6968±1.0597 a	0.0184±0.0053 b	0.4704±0.1007 c
T2	0.1039±0.0039 b	4.0164±0.8816 a	4.2863±1.4312 a	0.0279±0.0137 b	0.6293±0.0455 b
T3	0.0932±0.0022 b	3.6083±0.1972 a	3.5703±0.1670 a	0.0257±0.0047 b	0.5783±0.0837 bc
T4	0.0988±0.0118 b	4.1971±0.6244 a	4.2425±0.9687 a	0.0239±0.0047 b	0.6417±0.0535 b
T5	0.2077±0.0058 a	4.1303±0.0313 a	3.6925±0.1147 a	0.0515±0.0125 a	0.9101±0.1177 a

注: T1、T2、T3、T4、T5 分别指 $\text{NH}_4^+ - \text{N} : \text{NO}_3^- - \text{N}$ 为 0 : 1、3 : 7、1 : 1、7 : 3、1 : 0 的处理。 $V_{\max}$ —最大吸收速率, K_m — $1/2 V_{\max}$ 时介质中的离子浓度, $C_{\min}$ —介质中植物可吸收的最低离子浓度, α —离子进入植物体内的速度, β —植物在低离子浓度下存活的能力。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: T1, T2, T3, T4, T5 refer to $\text{NH}_4^+ - \text{N} : \text{NO}_3^- - \text{N}$ at 0 : 1, 3 : 7, 1 : 1, 7 : 3, 1 : 0, respectively. $V_{\max}$ —Maximum uptake rate, K_m —The ion concentration in the medium at $1/2 V_{\max}$, $C_{\min}$ —The lowest concentration of ions that can be absorbed by plants in a medium, α —The rate at which ions enter the plant, β —The ability of plants to survive at low ion concentrations. Different lowercase letters after data in the same column mean significant difference among treatments at 0.05 level.

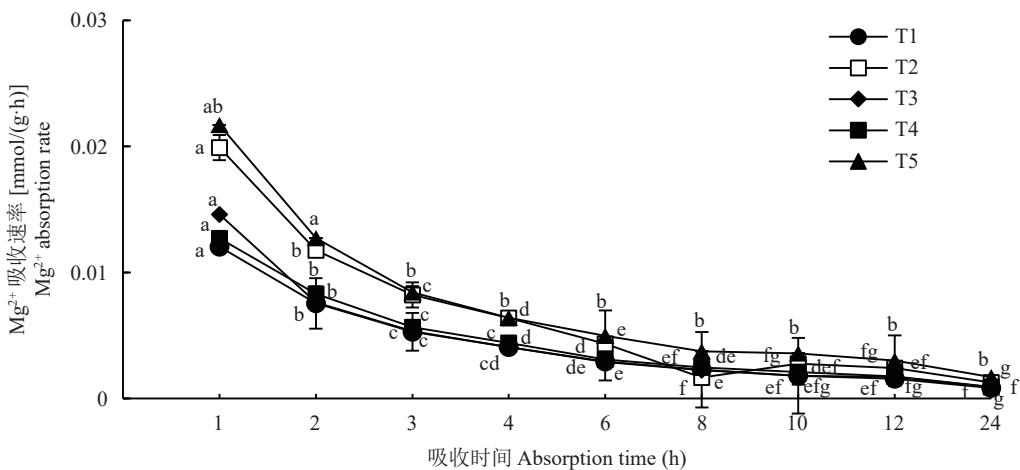


图 6 不同铵硝配比下芒果根系对 Mg^{2+} 的吸收速率曲线

Fig. 6 Absorption rate curves of Mg^{2+} in the roots of mango under different ammonium-nitrate nitrogen ratio

注: T1、T2、T3、T4、T5 分别指 $\text{NH}_4^+ - \text{N} : \text{NO}_3^- - \text{N}$ 为 0 : 1、3 : 7、1 : 1、7 : 3、1 : 0 的处理。图中不同小写字母表示同一时间处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: T1, T2, T3, T4, T5 refer to $\text{NH}_4^+ - \text{N} : \text{NO}_3^- - \text{N}$ at 0 : 1, 3 : 7, 1 : 1, 7 : 3, 1 : 0, respectively. Different lowercase letters denote significant difference among treatments at the same time ($P<0.05$).

势。其中, T2 与 T5 处理及 T1、T3 和 T4 处理整体吸收速率趋势较一致, 均在最初的 1~3 h 内迅速下降, 在 10 h 后趋于平稳。整体而言, 对 Mg^{2+} 的吸收速率表现为: $\text{T5} > \text{T2} > \text{T3} > \text{T4} > \text{T1}$ 。

Mg²⁺离子吸收方程均达到极显著水平(表 12),但在不同氮素条件下对 Mg²⁺的最大吸收速率均低于对 Ca²⁺的最大吸收速率。根系对 Mg²⁺的最大吸收速率介于 0.029~0.102 mmol/(g·h), Mg²⁺进入根系的速率介于 0.019~0.120。T5 处理下,根系对 Mg²⁺的最大吸收速率和 Mg²⁺进入根系的速率均最大,且对 Mg²⁺的亲力和吸收能力也最强。根系吸收 Mg²⁺的 K_m 值表现为 T2>T1>T3>T4>T5,不同处理下根系对介质中 Mg²⁺的最低吸收浓度的高低顺序与根系吸收 Mg²⁺的 K_m 值高低顺序一致,表明芒果根对 Mg²⁺的亲力和越强,对该离子的吸收能力也越强。不同铵硝比下 β 值表现为 T2>T5>T3>T4>T1,即 T1 处理下芒果幼苗对 Mg²⁺的耐贫瘠能力最强(表 13)。

3 讨论

3.1 不同氮素条件下芒果幼苗氮素吸收差异

植物从土壤中吸收氮素形态主要是铵态氮和硝态氮^[24]。大多数情况下,通过观察植物在吸收某一氮

源时的生长情况及对氮的吸收和利用量,可以判断出该植物对特定氮形态的吸收偏好^[25]。此外,吸收动力学参数如米氏常数(K_m)、最大吸收速率(V_{max})和吸收能力(C_{min})等也是辨别植物吸收喜好的重要参考指标^[25]。现有研究表明,对于偏好硝态氮的植物,例如刺梨^[24]、香蕉^[23]、荔枝^[26]、烤烟^[27]等,在单一氮形态或同时供应硝态氮和铵态氮的条件下,植物根系对 NO₃⁻的最大吸收效率和 NO₃⁻进入根系的速率(α 值)普遍高于对 NH₄⁺的吸收。而一些喜铵植物如枇杷^[28]、杉木^[29]、硅藻^[30]等,对 NH₄⁺的最大吸收效率和 NH₄⁺进入根系的速率高于 NO₃⁻。在不同铵硝配比条件下,芒果根系对铵态氮、硝态氮及总氮的吸收遵循 Michaelis-Menten 动力学方程。研究结果显示,除了 T2 处理之外,在单独供应 NO₃⁻、NH₄⁺或混合供应铵氮和硝氮的条件下,芒果根系吸收 NO₃⁻的动力学参数普遍高于 NH₄⁺,这一结果可能证实了芒果更倾向于吸收硝态氮的偏好特点^[25]。

在本研究中,我们发现当铵态氮(NH₄⁺)和硝态氮(NO₃⁻)混合供应时,芒果根系对硝态氮(NO₃⁻)和

表 12 不同铵硝配比下芒果 Mg²⁺的吸收动力学方程

Table 12 The Mg²⁺ absorption kinetic equations of mango as affected by ammonium-nitrate nitrogen ratios

处理 Treatment	方程 Equation	F值 F value	P值 P value
T1	y = 0.0084x ² -0.1299x+2.0137	15.66	0.0055
T2	y = 0.0079x ² -0.1215x+1.9965	19.06	0.0033
T3	y = 0.0053x ² -0.0907x+1.9707	59.00	0.0001
T4	y = 0.0068x ² -0.1093x+1.9889	22.99	0.0020
T5	y = 0.0039x ² -0.0837x+1.9624	57.84	0.0001

注: T1、T2、T3、T4、T5 分别指 NH₄⁺-N : NO₃⁻-N 为 0 : 1、3 : 7、1 : 1、7 : 3、1 : 0 的处理。

Note: T1, T2, T3, T4, T5 refer to NH₄⁺-N : NO₃⁻-N at 0 : 1, 3 : 7, 1 : 1, 7 : 3, 1 : 0, respectively.

表 13 不同铵硝配比下芒果 Mg²⁺的吸收动力学参数 (n=3)

Table 13 Parameters of Mg²⁺ absorption kinetic in mango by ammonium-nitrate nitrogen ratios

处理 Treatment	V _{max} [mmol/(g·h)]	K _m (mmol/L)	C _{min} (mmol/L)	α	β
T1	0.0288±0.0062 c	1.5095±0.3847 ab	1.5361±0.3789 a	0.0193±0.0023 b	0.2082±0.0482 b
T2	0.0816±0.0041 ab	1.8334±0.8632 a	1.6426±0.3109 a	0.0532±0.0091 b	0.3628±0.0791 a
T3	0.0572±0.0120 bc	1.1420±0.0184 ab	0.7590±0.0327 ab	0.0500±0.0102 b	0.2547±0.0271 b
T4	0.0532±0.0076 bc	0.9740±0.1038 b	0.5733±0.1079 ab	0.0551±0.0096 b	0.2271±0.0215 b
T5	0.1016±0.0211 a	0.8450±0.0351 b	0.2985±0.0281 b	0.1201±0.0237 a	0.2920±0.0343 ab

注: T1、T2、T3、T4、T5 分别指 NH₄⁺-N : NO₃⁻-N 为 0 : 1、3 : 7、1 : 1、7 : 3、1 : 0 的处理。V_{max}—最大吸收速率, K_m—1/2 V_{max}时介质中的离子浓度, C_{min}—介质中植物可吸收的最低离子浓度, α—离子进入植物体内的速度, β—植物在低离子浓度下存活的能力。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 (P<0.05)。

Note: T1, T2, T3, T4, T5 refer to NH₄⁺-N : NO₃⁻-N at 0 : 1, 3 : 7, 1 : 1, 7 : 3, 1 : 0, respectively. V_{max}—Maximum uptake rate, K_m—The ion concentration in the medium at 1/2 V_{max}, C_{min}—The lowest concentration of ions that can be absorbed by plants in a medium, α—The rate at which ions enter the plant, β—The ability of plants to survive at low ion concentrations. Different lowercase letters after data in the same column mean significant difference among treatments at 0.05 level.

总氮的吸收速率会随着铵态氮浓度的增加而显著下降。这一结果与张超一等^[23]的研究结论一致, 即铵态氮主要通过影响芒果根系吸收载体的结合位点数量来调节硝态氮的吸收。具体而言, 随着铵态氮浓度的升高, 其对硝态氮吸收载体结合位点的竞争性抑制作用增强, 进而导致硝态氮吸收速率显著降低。进一步来看, 随着 NH_4^+ 浓度的增加, 可用于吸收 NO_3^- 的有效载体数量减少, 这导致了 NO_3^- 吸收速率的下降。然而, 这种变化对于根细胞中运输活性位点的功能以及被吸收的 NO_3^- 亲和性所产生的影响相对较小^[31], 表明芒果幼苗对 NO_3^- 的吸收具有一定的调节能力。铵态氮影响硝态氮的吸收可能通过两种主要机制, 一是通过调节植物跨细胞膜的氮素吸收过程, 改变膜上氮素转运蛋白的活性和数量^[28]; 另外当铵态氮的浓度上升时, 通过抑制硝态氮同化过程中关键硝酸还原酶 (NRA) 的活性, 导致硝态氮在植物体内的积累增加, 进而导致植物体内氮素代谢失衡^[23]。但目前关于这些影响的具体作用机制尚无定论, 仍需深入探讨。

在单一氮源供应条件下, 芒果表现出对硝态氮的偏好性。然而, 在铵态氮和硝态氮同时供应的情况下, 芒果对总氮的吸收能力显著增强。特别是在仅供应铵态氮时, 芒果幼苗根系对总氮的吸收效率更高。这一现象表明, 铵态氮在促进芒果幼苗根系氮素吸收方面具有独特的优势。在 T2 处理下, 芒果根系对总氮的最大吸收速率达到峰值, 同时氮素的利用效率也达到了最优水平。这一结果强调了在混合氮源供应条件下, NO_3^- 和 NH_4^+ 的离子浓度之间的相互作用对植物总氮吸收的积极影响^[24]。这种相互作用可能通过优化根系的吸收动力学, 提高氮素的可利用性, 从而改善了总氮的吸收环境。

3.2 不同氮素形态对芒果幼苗钾、磷吸收的影响

氮和磷是植物生长所必需的营养元素, 它们在植物体内的吸收与利用过程中相互影响, 存在密切的相互作用^[32]。当植物以铵态氮作为氮源时, 铵离子的摄入不仅能促进植物对其他阴离子的吸收, 还能刺激植物根系释放有机酸^[33-34], 这有助于改善植物对磷的吸收。在 T5 处理条件下, 芒果对磷素的吸收表现出显著的动力学优势, 其 H_2PO_4^- 最大吸收速率、吸收能力和进入根细胞的速率均达到最大值, 且显示出较强的亲和力。这表明在该处理下, 芒果幼苗对磷的吸收得到了优化, 根系对磷的获取和利用效率最高。而在 T3 处理条件下, 根系对 H_2PO_4^- 的亲

力最强。这可能与植物在吸收 NH_4^+ 和 NO_3^- 后改变了电荷平衡有关, 并且这种电荷平衡的变化可能会影响根系对磷的吸收特性, 从而增强了对 H_2PO_4^- 的吸附和转运^[34-35]。

在特定条件下, 铵态氮能够增强荔枝根系对 K^+ 的亲和力, 从而提高其吸收量^[36]。在本研究中, T2 处理条件下芒果吸收 K^+ 的能力显著增强, 达到了最大吸收速率和吸收能力的峰值, 并且表现出了较高的亲和力。这表明, 铵态氮: 硝态氮=3: 7 时芒果根系对 K^+ 的获取和利用效率最高。相比之下, 在 T5 处理下, 虽然 K^+ 进入根系的速率达到最大, 且具有较高的最大吸收速率。这一现象与之前研究发现的 NH_4^+ 和 K^+ 的水合半径相似性, 可能会影响 K^+ 的吸收这一结论^[37] 不完全一致, 这可能暗示在不同植物种类或不同生长条件下, 铵态氮对 K^+ 吸收的影响机制可能存在差异。此外, 本研究还发现, 在不同的铵硝比条件下, 芒果根系对 K^+ 的最大吸收速率普遍高于对 H_2PO_4^- 的最大吸收速率。其吸收速率的显著性差异可能指示了芒果在养分优先级上的生物学特性。芒果对钾素的吸收情况与磷素的吸收呈现相似性, 这可能与钾素在植物生长发育过程中的多重关键功能有关, 这些作用使芒果在自然选择过程中形成了优先吸收钾素的机制^[2]。

3.3 不同氮素形态对芒果幼苗钙、镁吸收的影响

本研究中, 芒果幼苗对 Ca^{2+} 吸收的二次多项式方程均未达到极显著水平 ($P>0.01$)。在 T1 处理下, 芒果对 Ca^{2+} 的亲和力以及在低 Ca^{2+} 浓度条件下吸收 Ca^{2+} 的能力最强, 这可能与 NO_3^- 有助于提升植物对阳离子吸收的机制有关^[32]。然而, 就 Ca^{2+} 的最大吸收速率和进入根系的速率而言, T5 处理条件下的数值最高。这可能与芒果生长发育过程中对钙素的较大需求有关^[38], 同时, 也可能与植物体内不同阳离子之间的拮抗作用存在关联^[39], 这种拮抗作用影响了 Ca^{2+} 的吸收和转运。另外, 在 T3 处理下, 芒果根系对 Ca^{2+} 的吸收能力表现最突出。这表明, 如果将钙肥与铵态氮和硝态氮肥结合使用, 可能会有效促进芒果对钙素的吸收, 从而提高芒果的养分利用效率和果实品质。

Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 都是植物生长所必需的中量元素, 在植物的生理过程中扮演着重要角色^[40]。在本研究中, 我们观察到 Mg^{2+} 的最大吸收速率、亲和力、吸收能力和进入根系的速率在 T5 处理下均达到最大值。这与 T5 处理下 Ca^{2+} 的吸收特性相比, 显示出较大差

异,特别是在亲和力和吸收能力方面。这种差异可能源于 Ca^{2+} 在一定浓度范围内对 Mg^{2+} 存在一定的拮抗作用^[35],这限制了植物对 Mg^{2+} 的有效吸收。在 T1 处理下,芒果对 Mg^{2+} 的耐贫瘠能力最强,这与 Ca^{2+} 的吸收情况一致。这表明,在低 Mg^{2+} 浓度条件下芒果根系仍能有效吸收 Mg^{2+} ,也显示出对贫瘠条件下的适应性。由于芒果对镁素的需求量很大,且镁肥能够促进植株对氮素的代谢^[41],因此,在农业生产上,建议将镁肥与铵态氮肥配合施用。这种配合施用的方式能够促进植物对这种元素的吸收,提高植物的营养效率,为芒果补充营养。

植物在不同生长阶段对氮素形态的需求和吸收能力存在差异。在幼苗阶段,植物通常更偏好吸收 NH_4^+ ,这是由于 NH_4^+ 可以跳过额外的还原步骤,直接被植物根系吸收,并迅速合成氨基酸和其他含氮生物分子^[42-43]。而其对 NO_3^- 的吸收和还原能力相对较弱则与根系尚未发育完全相关^[44]。相比之下,成年植物根系发达,通常对 NO_3^- 和 NH_4^+ 的吸收能力更为均衡,能够有效地将 NO_3^- 还原成 NH_4^+ ,并进一步同化。这种能够高效地利用 NO_3^- 作为氮源的能力与其体内含有较高的硝酸还原酶活性有关^[45]。不过,由于试验条件和人力限制,本试验仅探究了芒果幼苗对铵态氮和硝态氮的吸收差异,成年芒果树的氮素吸收偏好性还需进一步研究。此外,本研究的结论源于芒果幼苗的水培试验,但实际种植芒果大多是用土培。以前的研究显示,在香蕉的试验中,无论是水培还是土培,得出的最适宜生长的铵硝配比是一致的^[23];而邓科^[46]对甘蔗幼苗的研究中发现,水培和土培试验所得结果存在显著差异,这可能是由于水培条件下各个变量更易于被精准控制。因此,为了确保本研究结论能够在实际生产栽培中得到有效应用,后期仍需通过土培试验来进一步验证和调整相关结果。

4 结论

硝态氮单独供应或铵硝混合供应条件下,芒果幼苗根系对 NO_3^- 的最大吸收速率、亲和力和 NO_3^- 进入根系的速率均高于 NH_4^+ ,揭示了芒果在氮素形态选择上对硝态氮的偏好。特别是当铵硝配比为 3:7 时,芒果幼苗根系对总氮的最大吸收速率最大,显示出最高的氮素利用效率。此外,硝态氮和铵态氮配合施用更能促进芒果幼苗对磷和钾养分的吸收,而单施铵态氮则有利于对磷、钙和镁养分的吸收。

参考文献:

- [1] 周思思,王露露,胡芳丽,等.基于转录组测序芒果抗细菌性角斑病 SNP/In Del 分析[J]. *西北农业学报*, 2024, 33(1): 148-155.
Zhou S S, Wang L L, Hu F L, *et al.* SNP/In Del analysis of mango bacterial black spot disease based on transcriptome sequencing[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2024, 33(1): 148-155.
- [2] Alebidi A, Abdel-Sattar M, Mostafa L Y, *et al.* Synergistic effects of applying potassium nitrate spray with putrescine on productivity and fruit quality of mango trees cv Ewais[J]. *Agronomy*, 2023, 13: 2717.
- [3] Hu Z W, Wei J, Zhang W M, *et al.* Attenuation of prochloraz phytotoxicity to postharvest mango fruit by melatonin is associated with the regulation of detoxification capacity[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2024, 208: 112671.
- [4] Almutairi K F, Górnik K, Awad R M, *et al.* Influence of selenium, titanium, and silicon nanoparticles on the growth, yield, and fruit quality of mango under drought conditions[J]. *Horticulturae*, 2023, 9: 1231.
- [5] 陈业渊,党志国,林电,等.中国杧果科学研究70年[J]. *热带作物学报*, 2020, 41(10): 2034-2044.
Chen Y Y, Dang Z G, Lin D, *et al.* Mango scientific research in China in the past 70 years[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2020, 41(10): 2034-2044.
- [6] 何翠翠,冯焕德,魏志远,等.海南省芒果主产区果园施肥状况与评价[J]. *中国土壤与肥料*, 2019, (3): 122-129.
He C C, Feng H D, Wei Z Y, *et al.* Evaluation of current fertilization status in Hainan Island mango orchard[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019, (3): 122-129.
- [7] Claassen N, Barber S A. A method for characterizing the relation between nutrient concentration and flux into roots of intact plants[J]. *Plant Physiology*, 1974, 54: 564-568.
- [8] Lepetit M, Brouquisse R. Control of the rhizobium-legume symbiosis by the plant nitrogen demand is tightly integrated at the whole plant level and requires interorgan systemic signaling[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1114840.
- [9] Choi S J, Lee Z, Jeong E, *et al.* Signaling pathways underlying nitrogen transport and metabolism in plants[J]. *BMB Reports*, 2023, 56(2): 56-64.
- [10] Shiade S R G, Fathi A, Kardoni F, *et al.* Nitrogen contribution in plants: Recent agronomic approaches to improve nitrogen use efficiency[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2024, 47(2): 314-331.
- [11] Yao B, Ata-Ul-Karim S T, Li Y L, *et al.* Plant nitrogen status at phenological stages can well estimate wheat yield and its components[J]. *Field Crops Research*, 2023, 297: 108950.
- [12] Aluko O O, Kant S, Adedire O M, *et al.* Unlocking the potentials of nitrate transporters at improving plant nitrogen use efficiency[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1074839.
- [13] 康晓育,孙协平,常聪,等.氮素形态对不同苹果砧木幼苗生长的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(6): 133-138.
Kang X Y, Sun X P, Chang C, *et al.* Effects of nitrogen forms on growth of different *Malus* rootstock seedlings[J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2013, 41(6): 133-138.
- [14] 陈序根,徐卫红,王崇力,等.脲酶硝化双抑制剂缓释肥提高番茄产

- 量及NPK养分吸收[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(21): 168–176.
- Chen X G, Xu W H, Wang C L, *et al.* Slow-release fertilizer containing urease inhibitor and nitrification inhibitor improving nitrogen release characteristic and uptake and utilization of nitrogen, phosphorus and potassium in tomato[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(21): 168–176.
- [15] 张莉, 马国珠, 王婧, 等. 不同氮素形态对茅苍术生长和氮磷钾吸收的影响[J]. *北方园艺*, 2022, (15): 106–112.
- Zhang L, Ma G Z, Wang J, *et al.* Effects of different nitrogen forms on growth and absorption of nitrogen, phosphorus and potassium of *Atractylodes lancea*[J]. *Northern Horticulture*, 2022, (15): 106–112.
- [16] 马超. 外源氮素形态对黄瓜生长、氮素吸收及代谢的调控[D]. 兰州: 甘肃农业大学博士学位论文, 2020.
- Ma C. Study on regulation of exogenous nitrogen forms on the growth, nitrogen uptake and metabolism of cucumber[D]. Lanzhou: PhD Dissertation of Gansu Agricultural University, 2020.
- [17] 陈鹏, 张茂星, 张明超, 等. 不同氮素营养形态对香蕉生长及其根系质子泵活性的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2015, 38(1): 101–106.
- Chen P, Zhang M X, Zhang M C, *et al.* Influence of nitrate/ammonium ratio on the growth and root plasma membrane H^+ -ATPase activity of banana[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2015, 38(1): 101–106.
- [18] Liu B, Mao P, Yang Q, *et al.* Appropriate nitrogen form ratio and UV-A supplementation increased quality and production in purple lettuce (*Lactuca sativa* L.)[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, 24: 16791.
- [19] 杨婷, 钟全林, 李宝银, 等. 短期铵态氮与硝态氮配施对刨花楠幼苗生长及叶片性状的影响[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(1): 25–32.
- Yang T, Zhong Q L, Li B Y, *et al.* Effects of short-term combined application of ammonium nitrogen and nitrate nitrogen on the growth and leaf traits of *Machilus pauhoi* seedlings[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(1): 25–32.
- [20] Wei G Y, Zhang M Y, Cui B J, *et al.* Ammonium nitrogen combined with partial root-zone drying enhanced fruit quality of tomato under elevated atmospheric CO_2 [J]. *Scientia Horticulturae*, 2024, 323: 112514.
- [21] 黄海, 段军娜, 刘荣, 等. 芒果不同砧穗组合早期嫁接亲和性综合评价[J]. *南方农业学报*, 2022, 53(5): 1216–1226.
- Huang H, Duan J N, Liu R, *et al.* Comprehensive evaluation of grafting compatibility of different stock-scion combinations in mango[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2022, 53(5): 1216–1226.
- [22] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法(第四版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- Editorial Board of Methods for Monitoring and Analysis of Water and Wastewater of the State Environmental Protection Administration of China. Methods for Monitoring and Analysis of Water and Wastewater (4th edition)[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [23] 张超一, 樊小林. 铵态氮及硝态氮对比对香蕉幼苗氮素吸收动力学特征的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(14): 2777–2784.
- Zhang C Y, Fan X L. Dynamic kinetic characteristics of different ratios of ammonium and nitrate absorbed by banana seedlings[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(14): 2777–2784.
- [24] 王梦柳, 樊卫国. 刺梨实生苗对硝态氮、铵态氮的吸收与利用差异分析[J]. *果树学报*, 2017, 34(6): 682–691.
- Wang M L, Fan W G. Differences in absorption and utilization of nitrate nitrogen and ammonium nitrogen in the seedling of *Rosa roxburghii*[J]. *Journal of Fruit Science*, 2017, 34(6): 682–691.
- [25] Cheng C, Yu J, Wang L, *et al.* Effects of the cultivation substrate pH and ammonium-to-nitrate nitrogen ratio on the C: N: P stoichiometry in leaves of *Cunninghamia lanceolata* and *Schima superba*[J]. *Forests*, 2024, 15: 958.
- [26] 朱陆伟, 周昌敏, 白翠华, 等. 荔枝在不同温度和氮素形态下的氮、磷吸收动力学特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(5): 869–878.
- Zhu L W, Zhou C M, Bai C H, *et al.* Kinetics of nitrogen and phosphorus uptake by litchi under different temperatures and nitrogen forms[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(5): 869–878.
- [27] 李玉静, 冯雨晴, 赵园园, 等. 氮素形态对烤烟和白肋烟吸收动力学及转录组的影响[J]. *中国烟草学报*, 2023, 29(6): 52–63.
- Li Y J, Feng Y Q, Zhao Y Y, *et al.* Effects of nitrogen forms on absorption kinetics and transcriptome of flue-cured tobacco and burley tobacco[J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2023, 29(6): 52–63.
- [28] 马检, 樊卫国. 不同配比的硝态氮和铵态氮对枇杷实生苗氮素吸收动力学及生长的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(6): 1152–1162.
- Ma J, Fan W G. Effects of different ratios of nitrate and ammonium on the dynamic kinetic and growth for *Eriobotrya japonica* Lindl. seedlings[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(6): 1152–1162.
- [29] 姜琦, 郭润泉, 宋涛涛, 等. 增温与氮添加对不同季节杉木幼苗细根不同形态氮吸收动力学的影响[J]. *生态学报*, 2020, 40(9): 2996–3005.
- Jiang Q, Guo R Q, Song T T, *et al.* Effects of warming and nitrogen addition on nitrogen uptake kinetics of fine roots of *Cunninghamia lanceolata* seedlings in different seasons[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(9): 2996–3005.
- [30] 石峰, 魏晓雪, 冯剑丰, 等. 不同无机氮条件下一种硅藻的氮吸收动力学及模型预测分析[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(9): 1833–1841.
- Shi F, Wei X X, Feng J F, *et al.* Nitrogen uptake kinetics of a diatom and model prediction analysis in different inorganic nitrogen conditions[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(9): 1833–1841.
- [31] 李林, 陈安强, 陈清飞, 等. 种植方式对高原湖区集约化农田浅层地下水中氮浓度及其 NO_3^- 来源的影响[J]. *环境科学研究*, 2024, 37(11): 2557–2568.
- Li L, Chen A Q, Chen Q F, *et al.* Impact of planting methods on nitrogen concentration and NO_3^- sources in shallow groundwater in intensive croplands around plateau lakes[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2024, 37(11): 2557–2568.
- [32] Vance C P, Uhde-stone C, Allan D L. Phosphorus acquisition and use: Critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource[J]. *New Phytologist*, 2003, 157: 423–447.
- [33] 樊卫国, 葛慧敏, 吴素芳, 等. 氮素形态及对比对铁核桃苗生长及营养吸收的影响[J]. *林业科学*, 2013, 49(5): 77–84.
- Fan W G, Ge H M, Wu S F, *et al.* Effect of nitrogen forms and the

- ratios on growth and nutrient absorption of *juglans sigillata* seedling [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2013, 49(5): 77–84.
- [34] Chen J T, Li J H, Li W F, *et al.* The optimal ammonium-nitrate ratio for various crops: A meta-analysis[J]. *Field Crops Research*, 2024, 307: 109240.
- [35] 史瑞和. 植物营养原理[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1989.
- Shi R H. Principles of plant nutrition[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1989.
- [36] 朱陆伟, 周昌敏, 白翠华, 等. 荔枝在不同温度和氮素营养条件下的钾、钙和镁吸收动力学特征[J]. 果树学报, 2021, 38(4): 538–548.
- Zhu L W, Zhou C M, Bai C H, *et al.* Dynamic characteristics of K, Ca and Mg uptake by litchi as affected by temperature and nitrogen form[J]. *Journal of Fruit Science*, 2021, 38(4): 538–548.
- [37] 王晓丽, 姜存仓, 郝艳淑, 等. 钠和其他离子对钾离子替代作用的研究进展[J]. *中国土壤与肥料*, 2012, (1): 1–6, 13.
- Wang X L, Jiang C C, Hao Y S, *et al.* Review on the replacement of potassium by sodium or other ions[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2012, (1): 1–6, 13.
- [38] 李华东, 白亭玉, 郑妍, 等. 土壤施钙对芒果果实钾、钙、镁含量及品质的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2014, (6): 76–80.
- Li H D, Bai T Y, Zheng Y, *et al.* Effects of different lime nitrate application rates on potassium, calcium and magnesium content and quality in mango[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2014, (6): 76–80.
- [39] 姚智, 王艺蓉, 李华东, 等. 叶面增施液钙对芒果钾、钙、镁含量及品质的影响[J]. 福建农业学报, 2017, 32(4): 359–364.
- Yao Z, Wang Y R, Li H D, *et al.* Effect of foliage calcium spray on potassium, calcium, magnesium contents and fruit quality of mango plants[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*. 2017, 32(4): 359–364.
- [40] Hu M, Yang Y, Fan M Y, *et al.* Inter- and intra-population variation of foliage calcium and magnesium in two Chinese pine species[J]. *Plants*, 2023, 12: 562.
- [41] 臧小平, 王甲水, 周兆禧, 等. 土壤施镁对芒果产量与品质的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2017, (3): 89–92.
- Zang X P, Wang J S, Zhou Z X, *et al.* Effects of soil application of magnesium on the yield and quality of mango in Hainan Province[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017, (3): 89–92.
- [42] 李宝珍, 范晓荣, 徐国华. 植物吸收利用铵态氮和硝态氮的分子调控[J]. 植物生理学通讯, 2009, 45(1): 80–88.
- Li B Z, Fan X R, Xu G H. Molecular regulation for uptake and utilization of ammonium and nitrate in plant[J]. *Plant Physiology Journal*, 2009, 45(1): 80–88.
- [43] Liu M Y, Tang D, Shi Y, *et al.* Short-term inhibition of glutamine synthetase leads to reprogramming of amino acid and lipid metabolism in roots and leaves of tea plant (*Camellia sinensis* L.)[J]. *BMC Plant Biology*, 2019, 19: 425.
- [44] Adavi S B, Sathee L. Elevated CO₂ differentially regulates root nitrate transporter kinetics in a genotype and nitrate dose-dependent manner[J]. *Plant Science*, 2021, 305: 110807.
- [45] Liu C, He Z, Chen Y, *et al.* Effects of nitrogen deposition on the rhizosphere nitrogen-fixing bacterial community structure and assembly mechanisms in *Camellia oleifera* plantations[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2024, 15: 1414724.
- [46] 邓科. 硝铵营养调控对甘蔗生长及硝态氮吸收利用的影响[D]. 重庆: 西南大学硕士学位论文, 2023.
- Deng K. Effects of ammonium-nitrate nutrition regulation on the growth and nitrate nitrogen uptake and utilization of sugarcane[D]. Chongqing: MS Thesis of Southwest University, 2023.