



## 毛竹幼苗生长的 $\text{NH}_4^+$ 效应研究

张丹 侯利涵 李湘 黄恒宇 袁斯齐 李子叶 邹娜

### Specific Response of *Phyllostachys edulis* Seedling to $\text{NH}_4^+$

Zhang Dan, Hou Lihan, Li Xiang, Huang Hengyu, Yuan Siqi, Li Ziyue, Zou Na

引用本文:

张丹, 侯利涵, 李湘, 黄恒宇, 袁斯齐, 李子叶, 邹娜. 毛竹幼苗生长的 $\text{NH}_4^+$ 效应研究[J]. 西南林业大学学报, 2025, 45(1):18–25. doi: 10.11929/j.swfu.202312036

Zhang Dan, Hou Lihan, Li Xiang, Huang Hengyu, Yuan Siqi, Li Ziyue, Zou Na. Specific Response of *Phyllostachys edulis* Seedling to  $\text{NH}_4^+$ [J]. Journal of Southwest Forestry University(Natural Science), 2025, 45(1):18–25. doi: 10.11929/j.swfu.202312036

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11929/j.swfu.202312036>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 毛竹林不同浸提液对延胡索生长指标和光合特征的影响

Effects of Different Extracts from *Phyllostachys edulis* on the Growth Index and Photosynthesis Characteristics of *Corydalis yanhusuo*  
西南林业大学学报. 2020, 40(3): 59–67 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.201907047>

#### 毛竹重组竹产品的质量及防腐性能研究

The Performance with Product Quality and Decay Resistance of *Phyllostachys edulis* Scrimber  
西南林业大学学报. 2020, 40(1): 166–171 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.201904002>

#### 地下水矿化度对怪柳根系生长及构型的影响

The Influence of Groundwater Salinity on the Growth and Architecture of *Tamarix chinensis* Root System  
西南林业大学学报. 2022, 42(5): 64–70 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.202106037>

#### 毛竹扩张对幕阜山区森林土壤碳氮磷含量及生态化学计量特征的影响

Effects of Moso Bamboo Expansion on Soil Carbon, Nitrogen, Phosphorus and Ecological Stoichiometry Characteristics of Forest in Mufu Mountain Area  
西南林业大学学报. 2024, 44(2): 77–85 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.202303033>

#### 供磷水平对核桃实生苗生长生理特性及酶活性的影响

Effects of Phosphorus Supply on the Growth, Physiological Characteristics and Enzyme Activity of *Juglans regia* Seedlings  
西南林业大学学报. 2021, 41(5): 27–35 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.202004052>

#### 不同遮光率对蒜头果幼苗生长及生物量分配的影响

Response of *Malania oleifera* Seedling Growth and Biomass Allocation to Different Light Intensities  
西南林业大学学报. 2024, 44(2): 36–41 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.202302025>

# 毛竹幼苗生长的 $\text{NH}_4^+$ 效应研究

张丹 侯利涵 李湘 黄恒宇 袁斯齐 李子叶 邹娜

(江西农业大学林学院, 江西乡土树种良种选育和高效利用江西省重点实验室, 江西南昌 330045)

**摘要:** 以毛竹实生幼苗为材料, 在室内控制盆栽条件下, 设置等氮浓度的不同含氮化合物, 并以等物质的量浓度的  $\text{K}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{NaCl}$ 、 $\text{NaNO}_3$  及  $\text{KNO}_3$  和 CK 进行试验, 分析不同处理对毛竹幼苗生长指标和栽培基质 pH 的影响。结果表明: 毛竹幼苗地上部分各生长指标、叶绿素相对含量、根系构型各指标、地上地下部分及总生物量, 都是在含  $\text{NH}_4^+$  化合物处理条件下要显著优于其他化合物处理, 但在不同含  $\text{NH}_4^+$  化合物处理之间, 各生长指标差异不显著; 经含  $\text{NH}_4^+$  化合物处理的毛竹幼苗根冠比显著低于 CK 及  $\text{NaCl}$  处理; 经含  $\text{NH}_4^+$  化合物处理后的毛竹幼苗栽培基质 pH 值, 显著低于 CK 及其他化合物处理。含  $\text{NH}_4^+$  化合物中的  $\text{NH}_4^+$  对毛竹幼苗生长有显著促进作用, 其促进效应可能与改变栽培介质 pH 值有关。因此, 毛竹幼苗育苗栽培过程中应施以硫酸铵或氯化铵为主的铵态氮肥。

**关键词:** 毛竹; 实生苗; 特异性;  $\text{NH}_4^+$ ; 生长响应; 根系构型

中图分类号: S795

文献标志码: A

文章编号: 2095-1914(2025)01-0018-08

引文格式: 张丹, 侯利涵, 李湘, 等. 毛竹幼苗生长的  $\text{NH}_4^+$  效应研究 [J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2025, 45(1): 18-25. Zhang D, Hou L H, Li X, et al. Specific Response of *Phyllostachys edulis* Seedling to  $\text{NH}_4^+$  [J]. Journal of Southwest Forestry University, 2025, 45(1): 18-25. DOI: [10.11929/j.swfu.202312036](https://doi.org/10.11929/j.swfu.202312036)



## Specific Response of *Phyllostachys edulis* Seedling to $\text{NH}_4^+$

Zhang Dan, Hou Lihan, Li Xiang, Huang Hengyu, Yuan Siqu, Li Ziyue, Zou Na

(Jiangxi Provincial Key Laboratory of Improved Variety Breeding and Efficient Utilization of Native Tree Species, College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang Jiangxi 330045, China)

**Abstract:** *Phyllostachys edulis* seedlings were used as experimental materials, under indoor controlled pot conditions, nitrogen compounds with equal nitrogen concentration were set up, and  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{KNO}_3$  and blank treatment(CK) were used as controls, to study the effects of different treatments on *P. edulis* seedling growth index and cultivation matrix pH. The results showd that: growth indexes, relative chlorophyll content, root configuration indexes, above-ground, below-ground and total biomass of *P. edulis* seedlings treated with  $\text{NH}_4^+$  compounds were significantly better than that treated with other compounds, but there were no significant differences between the  $\text{NH}_4^+$  compounds treated seedlings; the root shoot ratios of bamboo seedlings treated with  $\text{NH}_4^+$  compounds were significantly lower than that of CK and the  $\text{NaCl}$  treated seedlings; culture substrate pH values under  $\text{NH}_4^+$  compound teratments were significantly lower than that of CK and the other compound treatments. The  $\text{NH}_4^+$  ion within  $\text{NH}_4^+$  compounds had significant promotion effects on the growth of *P. edulis* seedlings, and its promotion effect might be related to the reduced culture substrate pH value. Therefore, ammonium nitrogen fertilizer such as ammonium sulfate or ammonium chloride should be better applied in the cultivation process of *P. edulis* seedlings.

**Key words:** *Phyllostachys edulis*; seedling; specificity;  $\text{NH}_4^+$ ; growth response; root architecture

收稿日期: 2023-12-03; 修回日期: 2024-08-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(32060254, 32260428)资助; 江西省重点研发计划项目(20203BBGL73227)资助。

第1作者: 张丹(1999—), 女, 硕士研究生。研究方向: 植物栽培生理。Email: [zhangdan\\_2021@163.com](mailto:zhangdan_2021@163.com)。

通信作者: 邹娜(1982—), 女, 博士, 教授, 硕士生导师。研究方向: 园林植物栽培与氮营养生理。  
Email: [nzouyy@126.com](mailto:nzouyy@126.com)。

毛竹 (*Phyllostachys edulis*), 为禾本科 (Poaceae) 刚竹属 (*Phyllostachys*) 散生乔木状竹类植物, 有生长快, 产量高, 用途广, 固碳能力强等优点, 具有重要的经济、生态和文化价值<sup>[1-3]</sup>。虽然毛竹在世界范围分布较广, 但在很多国家包括我国南方山区, 经营管理水平粗放、较少地施肥, 造成毛竹产量小、林地生产力较低等问题, 大部分竹林处于抛荒状态, 严重影响了林农增收致富和竹产业的健康发展; 集约竹林经营中不合理地施肥, 不仅降低植物对氮素吸收和利用的效率, 还加速土壤质量的下降与土壤结构的退化, 肥料的流失还会造成资源浪费和环境污染等一系列生态问题<sup>[4-5]</sup>。氮 (N) 作为高等植物生长所必需的大量营养元素之一, 也是提高竹林生产力的主导养分因子<sup>[6-10]</sup>。因此, 研究氮肥的合理施用, 对氮素利用效率的提高和环境污染问题的减少, 毛竹育苗和造林以及促进竹林高质量可持续发展, 具有十分重要的现实意义。

在自然条件下, 铵态氮 ( $\text{NH}_4^+$ ) 和硝态氮 ( $\text{NO}_3^-$ ) 是高等植物可吸收利用的主要氮素形式, 并且不同物种因其生境的不同, 对不同形态的氮素存在明显偏好<sup>[11]</sup>。喜  $\text{NH}_4^+$  植物如针叶树种、杜鹃科 (*Ericaceae*) 植物和水稻 (*Oryza sativa*) 等, 而另一些植物在以纯  $\text{NO}_3^-$  或以  $\text{NO}_3^-$  占优势的营养环境中生长得较好, 如大麦 (*Hordeum vulgare*)、番茄 (*Solanum lycopersicum*) 和豆类 (*Fabaceae*) 等多数农作物和蔬菜<sup>[12-13]</sup>。宋庆妮等<sup>[14]</sup>、Song 等<sup>[15]</sup> 研究表明, 常绿阔叶林对土壤中  $\text{NH}_4^+$  和  $\text{NO}_3^-$  的吸收量分别占总无机氮吸收量的 55.5% 和 44.5%, 而竹-阔混交林 (竹阔比 9 : 1) 对土壤  $\text{NH}_4^+$  和  $\text{NO}_3^-$  吸收量分别占 93.6% 和 6.4%, 其研究结果暗示毛竹偏向吸收  $\text{NH}_4^+$ , 而树木可能具有不同的 N 营养吸收类型。课题组通过温室控制盆栽试验研究发现, 毛竹的 N 形态偏好与外源氮浓度有关: 在低 N 浓度 (0.1、0.4 mmol/L) 条件下, 毛竹幼苗生长没有明显的 N 形态偏好, 当  $\text{NH}_4^+$  从 2 mmol/L 提高到 40 mmol/L 时, 毛竹幼苗尤其是地上部分的生长得到了促进<sup>[16-18]</sup>。而李国栋等<sup>[19]</sup> 认为毛竹是弱喜硝植物, 当  $\text{NH}_4^+$  的比例超过所提供总氮 (40 mg/L) 的 50% 时, 毛竹幼苗的生长受到抑制, 以  $\text{NH}_4^+$  作为唯一氮源时, 毛竹幼苗最终全部死亡。 $\text{NH}_4^+$  的添加可以对植物体的生长产生直接影响, 而离子之间的互作效

应, 也会影响植物对其他离子的吸收和积累<sup>[20-21]</sup>。此外,  $\text{NH}_4^+$  可引起植物细胞内外溶质 pH 的快速变化, 增强铵同化过程以及重塑根系结构等生理生长变化<sup>[22]</sup>, 且施氮明显影响毛竹林笋体内多种铵同化酶的活性, 氮吸收转运蛋白、铵同化酶等多种基因表达上调<sup>[23]</sup>。

在大部分植物氮形态有关研究中, 化合物处理主要是以  $\text{NH}_4\text{Cl}$  和  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  形式添加<sup>[24]</sup>, 试验处理中的伴随离子通常是不同的。李国栋等<sup>[19]</sup> 试验中以  $\text{NH}_4\text{Cl}$  的形式添加  $\text{NH}_4^+$ , 顾红梅等<sup>[16]</sup> 以  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  的形式添加  $\text{NH}_4^+$ , 而 Yang 等<sup>[23]</sup> 以  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  的形式添加  $\text{NH}_4^+$ 。因此, 推测含  $\text{NH}_4^+$  化合物中影响毛竹幼苗生长的因素可能有  $\text{NH}_4^+$ 、化合物中伴随离子、高浓度氮或  $\text{NH}_4^+$  和伴随离子共同引起的高强度离子胁迫效应。目前, 不同含  $\text{NH}_4^+$  化合物对毛竹幼苗生长影响的对比研究尚未见报道。因此, 本研究在光照、温度、基本营养液等外界环境一致的情况下, 通过在营养液中添加相同浓度的不同种类化合物, 以分析化合物中不同离子对毛竹幼苗各生长指标的影响, 阐明毛竹幼苗生长的  $\text{NH}_4^+$  效应, 期为毛竹育苗和栽培合理使用氮肥提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试材料为毛竹实生苗。毛竹种子采自广西桂林灌阳县洞井乡, 采种后放置 4 °C 冰箱黑暗密封保存。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 种子消毒、播种及移栽方法

将毛竹种子置于 40 °C 的温水内浸种 12 h, 使用 10% 次氯酸钠溶液消毒 20 min。将消毒后的种子播种至以蛭石为基质的容器内, 放置人工气候箱进行种子萌发。毛竹幼苗第 2 片真叶完全展开之后, 选取均一性高的幼苗移栽至以灭菌蛭石为基质的花盆中, 花盆规格为 130 mm × 150 mm。清水缓苗 15 d 之后, 通过根部浇灌营养液的方式对毛竹幼苗进行试验处理。

#### 1.2.2 试验处理

在课题组前期试验研究的基础上<sup>[16-18]</sup>, 本研究在相同氮浓度条件 (8 mmol/L) 下设置 3 种不同含  $\text{NH}_4^+$  的化合物,  $\text{NH}_4^+$  分别以  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 $\text{NH}_4\text{Cl}$  和  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  (4 mmol/L  $\text{NH}_4^+$  + 4 mmol/L

$\text{NO}_3^-$ ) 形式提供, 并分别使用与  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  等浓度的  $\text{K}_2\text{SO}_4$ 、与  $\text{NH}_4\text{Cl}$  等浓度的  $\text{NaCl}$ 、与  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  等浓度的  $\text{KNO}_3$  和  $\text{NaNO}_3$  进行处理, 效应, 并以空白处理 (不含 N 的基本营养液) 作为 CK, 以探究化合物中的  $\text{NH}_4^+$  对毛竹幼苗生长的效应。用于配置不同氮处理的营养液基本组成成分同 Zou 等 [18], 包括 1.5 mmol/L  $\text{K}_2\text{SO}_4$ , 2.5 mmol/L  $\text{CaCl}_2$ , 0.25 mmol/L  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , 0.6 mmol/L  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ , 0.01 mmol/L  $\text{Fe-EDTA}$ , 0.02 mmol/L  $\text{H}_3\text{BO}_3$ , 2  $\mu\text{mol/L}$   $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , 2  $\mu\text{mol/L}$   $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , 2  $\mu\text{mol/L}$   $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , 0.5  $\mu\text{mol/L}$   $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , 0.5  $\mu\text{mol/L}$   $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , 每 7 d 浇 1 次营养液。所有营养液中均加硝化抑制剂双氰胺 ( $\text{C}_2\text{H}_4\text{N}_2$ , 7  $\mu\text{mol/L}$ ) 充分抑制硝化作用, 用 pH 计和 0.1 mol/L  $\text{NaOH}$  或 0.1 mol/L  $\text{HCl}$  调节所有处理的营养液, 使 pH 保持在 4.0 左右。试验设置 3 次重复, 每重复 6 盆, 每盆 2 株毛竹幼苗, 试验处理时间 2022 年 7 月至 9 月, 为期 2 个月。

### 1.2.3 生长条件

人工气候箱设定培养温度 ( $25 \pm 1$ )  $^\circ\text{C}$ , 光照时间 12 h/d, 光照强度为 2000 lx, 相对湿度 65%。

## 1.3 测定方法

### 1.3.1 苗高、叶片数、叶绿素含量

使用刻度为 0.1 cm 的直尺对植株的苗高进行测定, 并统计叶片数, 选取标准为植株上完全展开的叶片。在取样之前, 选取毛竹幼苗顶端第 2、3 片完全展开叶, 使用 SPAD-502 Minolta 手持式叶绿素仪 (美能达, 日本) 对其叶绿素含量 (SPAD) 进行测定, 相关测定方法参考 Zou 等 [18]。

### 1.3.2 根系构型参数测定

将花盆内的幼苗, 整株取出, 将幼苗根部蛭石洗净。截取完整的根部, 使用 LA 1600 + 扫描仪 (爱普生, 中国) 进行扫描, 再用根系构型分析软件 WinRHIZO 2012 对各处理根系的体积、表面积、总长, 平均直径和根尖数定量测定 [17]。

### 1.3.3 根茎叶各部分生物量质量的测定

将毛竹幼苗按照根、茎、叶分成 3 个部分, 装入信封内放置烘箱, 105  $^\circ\text{C}$  条件下 30 min 进行杀青。杀青结束后, 70  $^\circ\text{C}$  烘干至恒定质量, 此时所称质量为干质量 (g) [17]。根、茎、叶之和为总生物质量。

### 1.3.4 根冠比

根据上述测定的根、茎、叶各部位生物质量, 计算出每组处理中幼苗的根冠比。

$$\text{根冠比} = \text{根系干质量} / \text{地上部分 (茎 + 叶) 干质量} \quad (1)$$

### 1.3.5 栽培基质 pH

试验结束时, 栽培基质经过 2 mm 筛后, 用 pH 计测定各处理中基质 pH。

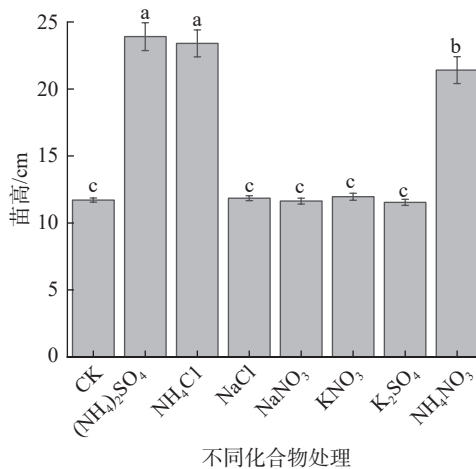
## 1.4 分析方法

所有数据处理采用 Excel 2016 和 SPSS 19.0 进行统计分析, 多重比较采用 Duncan 新复极差分析法, 图表使用 OriginPro 2021 生成, 并采用 Photoshop 对毛竹各项指标的图表排版。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理对毛竹幼苗苗高的影响

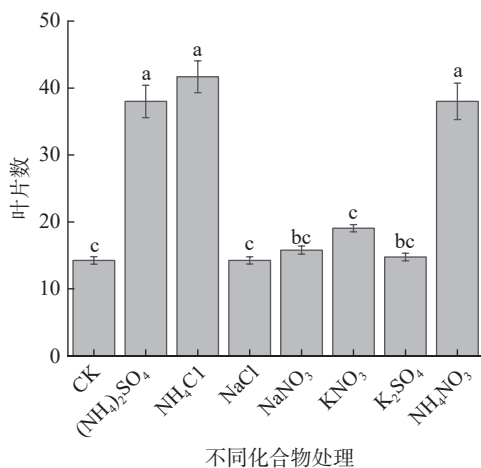
由图 1 可知, 在不同化合物处理下, 毛竹幼苗苗高具有明显差异 ( $P < 0.05$ )。  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  处理的毛竹幼苗苗高比  $\text{K}_2\text{SO}_4$  处理的提高了 106.76%,  $\text{NH}_4\text{Cl}$  处理下的苗高比  $\text{NaCl}$  处理的提高了 97.41%,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  处理的苗高比  $\text{KNO}_3$  和  $\text{NaNO}_3$  处理的提高了 78.76% 和 83.73%。含 8 mmol/L  $\text{NH}_4^+$  的营养液处理下即  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  与  $\text{NH}_4\text{Cl}$  处理之间的毛竹幼苗株高没有显著差异, 但其苗高显著高于  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ 、其他化合物处理、CK ( $P < 0.05$ )。毛竹幼苗苗高在  $\text{KNO}_3$ 、 $\text{NaNO}_3$ 、 $\text{NaCl}$  和  $\text{K}_2\text{SO}_4$  处理之间无明显差异, 并且与 CK 相比, 幼苗株高也无显著性提高。因此,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 $\text{NH}_4\text{Cl}$  和  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  处理中毛竹苗高的显著增加主要是化合物中  $\text{NH}_4^+$  的作用。



不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。  
图 1 不同处理对毛竹幼苗苗高的影响  
Fig. 1 Effect of different treatments on the seedling height of *P. edulis*

## 2.2 不同处理对毛竹幼苗单株叶片数的影响

由图2可知, 毛竹幼苗单株叶片数量在含有  $\text{NH}_4^+$  化合物的营养液中具有最大值, 并且  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 $\text{NH}_4\text{Cl}$  和  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  处理间毛竹幼苗的叶片数没有明显差异, 但显著高于 CK 及其他处理条件下的叶片数 ( $P < 0.05$ )。  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  处理下的毛竹幼苗单株叶片数比  $\text{K}_2\text{SO}_4$  处理的提高了 158%,  $\text{NH}_4\text{Cl}$  处理下的叶片数比  $\text{NaCl}$  处理的提高了 192.85%,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  处理的叶片数比  $\text{KNO}_3$  和  $\text{NaNO}_3$  处理的提高了 98.21% 和 141.15%。此外,  $\text{NaNO}_3$  处理下的叶片数比  $\text{NaCl}$  处理的提高了 10.27%,  $\text{KNO}_3$  处理下的叶片数显著高于 CK ( $P < 0.05$ )。因此,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 $\text{NH}_4\text{Cl}$  和  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  处理中毛竹幼苗叶片数的增加主要是  $\text{NH}_4^+$  的作用, 并且  $\text{NO}_3^-$  对毛竹幼苗叶片数的增加也有促进作用。



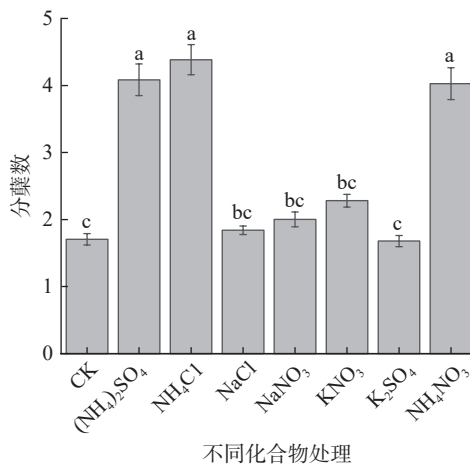
不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图2 不同处理对毛竹幼苗单株叶片数的影响

Fig. 2 Effect of different treatments on the number of leaves per plant of *P. edulis* seedlings

## 2.3 不同处理对毛竹幼苗分蘖数的影响

由图3可知,  $\text{NH}_4^+$  化合物处理的毛竹幼苗分蘖数显著高于其他处理 ( $P < 0.05$ )。其中,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  处理下的毛竹幼苗分蘖数比  $\text{K}_2\text{SO}_4$  处理的提高了 142.37%,  $\text{NH}_4\text{Cl}$  处理下的分蘖数比  $\text{NaCl}$  处理的提高了 138.32%,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  处理的分蘖数比  $\text{KNO}_3$  和  $\text{NaNO}_3$  处理的提高了 76.98% 和 101.56%。此外,  $\text{KNO}_3$  处理下的分蘖数显著高于 CK ( $P < 0.05$ ),  $\text{NaNO}_3$  处理下的分蘖数比  $\text{NaCl}$  处理的提高了 8.33%。因此,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 $\text{NH}_4\text{Cl}$  和  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  处理对毛竹幼苗分蘖数的促进作用主要是  $\text{NH}_4^+$  的效应, 而  $\text{NO}_3^-$  对毛竹幼苗分蘖也有一定的促进作用。



不同化合物处理

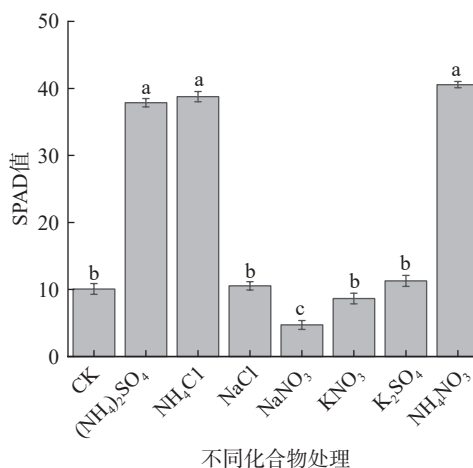
不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图3 不同处理对毛竹幼苗分蘖数的影响

Fig. 3 Effect of different treatments on the tiller number of *P. edulis* seedlings

## 2.4 不同处理对毛竹幼苗叶绿素含量的影响

由图4可知, 含  $\text{NH}_4^+$  化合物处理的毛竹幼苗叶绿素含量 (SPAD) 显著高于其他处理的幼苗 ( $P < 0.05$ ), 并且  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 $\text{NH}_4\text{Cl}$  和  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  处理间的差异没有显著性。其中,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  处理下的毛竹幼苗叶绿素含量比  $\text{K}_2\text{SO}_4$  处理的提高了 234.8%,  $\text{NH}_4\text{Cl}$  处理下的幼苗叶绿素含量比  $\text{NaCl}$  处理的提高了 269.68%。在含有  $\text{NO}_3^-$  的不同营养液间, 幼苗 SPAD 值排序为  $\text{NH}_4\text{NO}_3 > \text{KNO}_3 \approx \text{CK} > \text{NaNO}_3$ , 说明  $\text{NH}_4^+$  会增加毛竹叶片叶绿素含量, 而  $\text{Na}^+$  则减少叶绿素含量。



不同化合物处理

不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图4 不同处理对毛竹幼苗叶绿素含量的影响

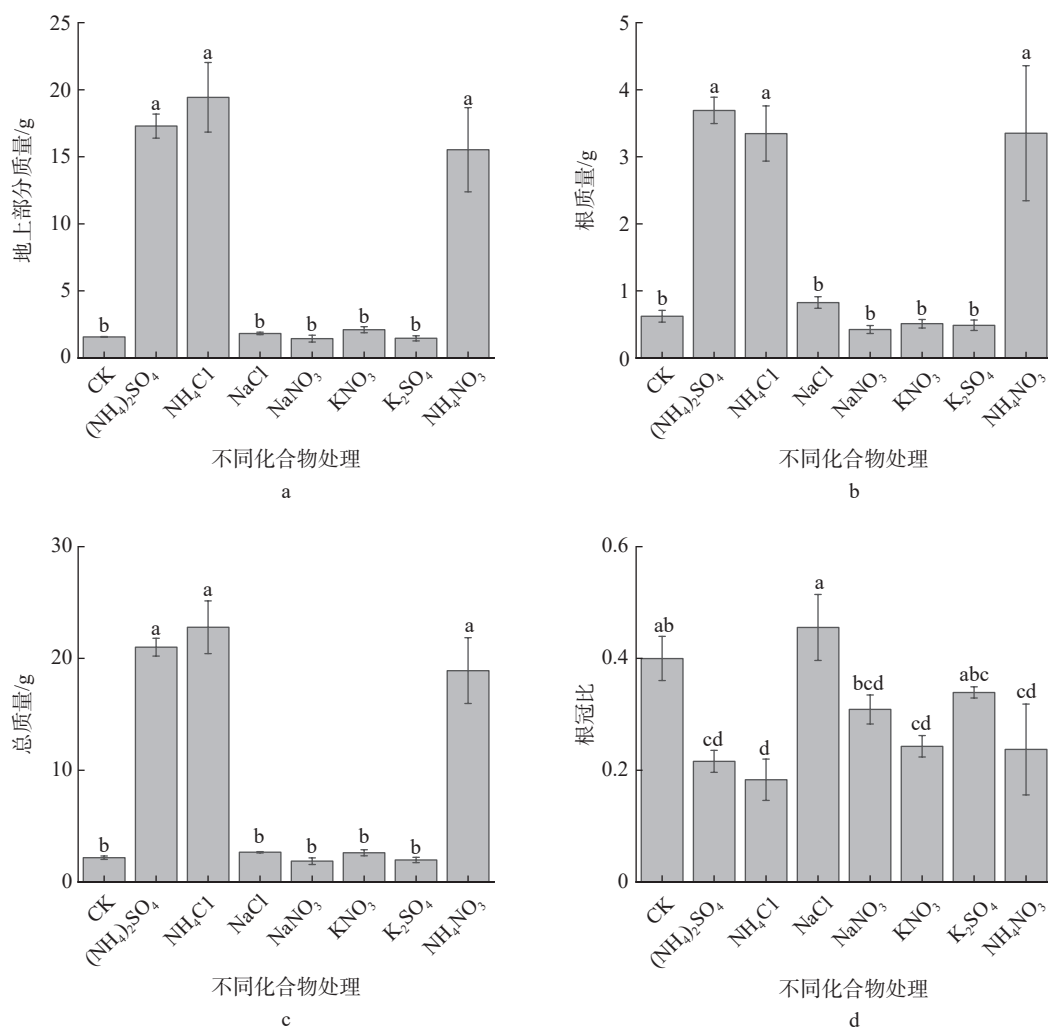
Fig. 4 Effect of different treatments on chlorophyll content of *P. edulis* seedlings

## 2.5 不同处理对毛竹幼苗生物量的影响

由图5可知, 含有  $\text{NH}_4^+$  的化合物处理的毛竹幼苗地上部分、根及总生物量显著高于 CK 及其

他化合物处理的幼苗 ( $P < 0.05$ ), 并且  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 $\text{NH}_4\text{Cl}$  和  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  处理间的毛竹幼苗各部位生物量没有明显差异。与 CK 相比, 无  $\text{NH}_4^+$  化合物处理对毛竹幼苗生物量的影响无显著性差异。因此,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 $\text{NH}_4\text{Cl}$  和  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  对毛竹幼苗生

物量的促进作用主要是各化合物中的  $\text{NH}_4^+$  效应。由图 5d 可知, 除 NaCl 外, 所有处理都使得毛竹的根冠比下降, 并且含  $\text{NH}_4^+$  化合物各处理与 CK 间的差异均达到显著水平 ( $P < 0.05$ ), 但含  $\text{NH}_4^+$  化合物各处理之间毛竹幼苗的根冠比差异不显著。



不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 5 不同处理对毛竹幼苗生物量的影响

Fig. 5 Effect of different treatments on the biomass of *P. edulis* seedlings

## 2.6 不同处理对毛竹根系构型和栽培基质 pH 的影响

毛竹根长、根表面积、根平均直径以及根体积等根系构型各指标在  $\text{NH}_4^+$  处理条件下最好, 并且各指标在  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 $\text{NH}_4\text{Cl}$  和  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  处理间没有明显差异, 但显著高于其他化合物处理的毛竹幼苗根系 ( $P < 0.05$ )。与空白 CK 相比, 无  $\text{NH}_4^+$  化合物处理对毛竹根系构型各指标的影响无显著性差异。因此, 研究结果表明,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 $\text{NH}_4\text{Cl}$  和  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  对毛竹幼苗根系生长的促进作用主要是  $\text{NH}_4^+$  的作用。

由表 1 可知, 含有  $\text{NH}_4^+$  的化合物处理的毛竹幼苗栽培基质 pH (5.1 ~ 6.2) 显著小于 CK 及其它化合物处理下的栽培基质 pH ( $P < 0.05$ )。其中,  $\text{NH}_4\text{Cl}$  营养液处理的 pH 最低, 其次是  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  和  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  处理条件下的。而  $\text{KNO}_3$ 、 $\text{NaNO}_3$  处理下的基质 pH 要比 CK 的略高,  $\text{K}_2\text{SO}_4$  处理下的基质 pH 与 CK 没有明显区别, 而 NaCl 处理下的基质 pH 比 CK 略低。说明根系吸收  $\text{NH}_4^+$  使得栽培基质 pH 降低, 而吸收  $\text{NO}_3^-$  使得栽培基质 pH 升高。

表 1 不同处理对毛竹根系构型和栽培基质 pH 的影响

Table 1 The effect of different treatments on root architecture and culture substrate pH of *P. edulis*

| 处理                              | 根长/cm                         | 根表面积/cm <sup>2</sup>        | 根平均直径/mm                 | 根体积/cm <sup>3</sup>      | 根尖数                           | 基质pH                      |
|---------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| CK                              | 392.06 ± 27.58 <sup>b</sup>   | 35.30 ± 2.67 <sup>b</sup>   | 0.29 ± 0.01 <sup>b</sup> | 0.25 ± 0.02 <sup>b</sup> | 2037.00 ± 171.16 <sup>b</sup> | 6.80 ± 0.04 <sup>ab</sup> |
| NH <sub>4</sub> SO <sub>4</sub> | 1279.88 ± 118.60 <sup>a</sup> | 169.54 ± 18.59 <sup>a</sup> | 0.42 ± 0.02 <sup>a</sup> | 1.81 ± 0.24 <sup>a</sup> | 3459.00 ± 246.31 <sup>a</sup> | 5.80 ± 0.05 <sup>d</sup>  |
| NH <sub>4</sub> Cl              | 1177.39 ± 103.77 <sup>a</sup> | 156.15 ± 19.17 <sup>a</sup> | 0.41 ± 0.02 <sup>a</sup> | 1.70 ± 0.29 <sup>a</sup> | 3871.33 ± 306.39 <sup>a</sup> | 5.10 ± 0.03 <sup>e</sup>  |
| NaCl                            | 357.51 ± 17.34 <sup>b</sup>   | 32.29 ± 1.48 <sup>b</sup>   | 0.29 ± 0.01 <sup>b</sup> | 0.24 ± 0.02 <sup>b</sup> | 1753.33 ± 90.03 <sup>b</sup>  | 6.70 ± 0.05 <sup>b</sup>  |
| NaNO <sub>3</sub>               | 438.04 ± 17.27 <sup>b</sup>   | 33.96 ± 1.44 <sup>b</sup>   | 0.25 ± 0.0 <sup>b</sup>  | 0.21 ± 0.01 <sup>b</sup> | 2368.08 ± 94.01 <sup>b</sup>  | 7.00 ± 0.08 <sup>a</sup>  |
| KNO <sub>3</sub>                | 410.85 ± 34.71 <sup>b</sup>   | 35.89 ± 2.87 <sup>b</sup>   | 0.28 ± 0.01 <sup>b</sup> | 0.25 ± 0.02 <sup>b</sup> | 2018.67 ± 209.89 <sup>b</sup> | 6.90 ± 0.04 <sup>a</sup>  |
| K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>  | 375.73 ± 24.95 <sup>b</sup>   | 29.46 ± 2.26 <sup>b</sup>   | 0.25 ± 0.01 <sup>b</sup> | 0.18 ± 0.02 <sup>b</sup> | 1890.50 ± 117.33 <sup>b</sup> | 6.80 ± 0.08 <sup>ab</sup> |
| NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> | 1123.51 ± 50.13 <sup>a</sup>  | 169.46 ± 10.67 <sup>a</sup> | 0.48 ± 0.02 <sup>a</sup> | 2.06 ± 0.18 <sup>a</sup> | 3707.50 ± 229.59 <sup>a</sup> | 6.20 ± 0.07 <sup>c</sup>  |

注：不同小写字母表示差异显著（ $P < 0.05$ ）。

3 结论与讨论

本研究中，在相同氮（8 mmol/L）浓度下，毛竹幼苗生长（叶片数、分蘖数）、生理（SPAD 值）、地上、地下和总生物量及根系构型（根长、根表面积、根平均直径、根体积和根尖数）等指标，均是在含  $\text{NH}_4^+$  化合物的营养液处理中显著高于 CK 及含  $\text{K}^+$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$  等其他离子的化合物处理，并且  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 $\text{NH}_4\text{Cl}$  和  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  处理间各指标没有明显差异。这些结果支持了毛竹是喜铵植物<sup>[16-18]</sup>，并且进一步证实了促进毛竹生长的是化合物中的  $\text{NH}_4^+$ ，而不是氮、化合物中的伴随离子或高浓度离子效应。毛竹对于铵态氮的偏好可能是其对以  $\text{NH}_4^+$  为主的土壤氮营养生境所形成的长期适应<sup>[14-15]</sup>。

植物 95% 以上的干物质是由光合作用提供的，而叶片则是光合作用的主要器官，其中，叶片中的叶绿体是光合作用的最主要的细胞器<sup>[25]</sup>。因此，叶片中叶绿素含量的高低是反映植物叶片光合能力的一个重要指标。本研究中，毛竹幼苗的绿素含量受铵氮影响最为明显，与硝酸盐供应的植株相比，铵盐可以显著提高幼苗的叶绿素含量，这与 Raab 等<sup>[26]</sup> 对甜菜（*Beta vulgaris*）叶绿素 SPAD 值的研究中的结论相一致。此外，毛竹幼苗在铵处理条件下的叶片数、叶面积、分蘖数也显著增加。因此，可以推测铵通过促进植物生长发育及光合能力的增强，从而增加生物量。此外，铵态氮被植物吸收以后，在植物体内可以直接被吸收利用：一是  $\text{NH}_4^+$  经 GS /GOGAT 途径转变为氨基酸的过程，超过 95% 的  $\text{NH}_4^+$  同化通过该途径进行；二是  $\text{NH}_4^+$  同化途径是直接由谷氨酸脱氢酶（GDH）催化  $\text{NH}_4^+$  和  $\alpha$ -酮戊二酸形成谷

氨酸（Glu），而植物吸收硝态氮后需要经过复杂的转化，变成  $\text{NH}_4^+$  后才能被同化利用<sup>[27-28]</sup>。从植物吸收转化氮素耗能的情况来看，还原 1 mol  $\text{NO}_3^-$  需要消耗 32 mol 电子，还原 1 mol  $\text{NH}_4^+$  大约消耗 15 mol 电子，因此直接吸收利用铵态氮可以减少能量消耗<sup>[27,29-30]</sup>，所节约的能量可用于植物的生长，从而供  $\text{NH}_4^+$  的植株要比供  $\text{NO}_3^-$  的植株能够获得更高的生物产量。

根系作为植物进行氮素营养吸收及同化的主要器官，与植物地上部分的生长发育密切相关，并且其形态及功能对氮素的吸收与利用具有很重要的影响。同时，植物根系形态及构型的变化、生物量在地上及地下的分配等又会受氮素调控，对外界养分的有效性表现出较高的可塑性<sup>[26,31-32]</sup>。本研究结果表明， $\text{NH}_4^+$  对毛竹根系构型各指标（如根长、根系表面积、根尖数、根系直径和根系体积）生长有显著的促进效应，显著高于单一使用  $\text{NO}_3^-$  或  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  的幼苗根系。Meier 等<sup>[33]</sup> 研究发现不同氮形态，通过影响生长素的极性运输从而决定植物根系分支发育程序中的机制，即局部供铵刺激了根部维管系统中地上部生长素的积累，并促进了侧根的出现，从而建立了高度分枝的根系。本研究中含  $\text{NH}_4^+$  处理使得毛竹幼苗的根冠比与 CK 相比下降较为显著，并且对根冠比的影响较其他元素处理的效果也更强，而根系生物量却在  $\text{NH}_4^+$  处理条件下最高，因此推测该处理条件下的根冠比下降是可能由于  $\text{NH}_4^+$  处理引起的地上部分生长和生物量的积累大于根系造成的。

施肥尤其是氮肥可改变植物生长介质的 pH 值<sup>[34-35]</sup>。虽然各处理营养液的 pH 调至 4.0 左右，但由于所采用的基质（蛭石）的偏碱性，幼苗生长过程中栽培基质的 pH 值都较高（5.1 ~ 7.0）。不

同氮素形态的供应不可避免地引起栽培基质 pH 的差异,硝酸盐导致碱化,而铵盐则引起酸化。含  $\text{NH}_4^+$  营养液处理过程中,基质的 pH (5.0~6.0) 呈显著下降趋势,与毛竹自然生境中的 pH 最接近,可能会提高微溶性营养元素的可用性和吸收,例如磷 (P) 和铁 (Fe),从而间接促进植物生长,相关内容尚待进一步深入系统研究。 $\text{K}^+$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$  作为植物生长发育所必需的营养元素,而  $\text{Na}^+$  作为植物营养中新的必需元素,被证明是大多数 C4 植物、CAM 植物和盐生植物生长所必需的微量元素<sup>[36]</sup>。与 CK 相比,除了  $\text{KNO}_3$  对毛竹叶片数和分蘖数有一定的促进作用外,其它化合物及离子 ( $\text{NaCl}$ 、 $\text{NaNO}_3$ 、 $\text{K}_2\text{SO}_4$ ) 对毛竹造成的生长差异很小甚至是不存在的。究其原因,一方面可能是所采用的基质(蛭石)中含有部分上述营养元素,并且所浇灌的基本营养液中也包含了部分  $\text{K}^+$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$  等离子,因此植物并不是生长在缺乏这些元素的环境中,添加这些元素并没有表现出明显的促进效应;另一方面,植物对营养元素的响应一般是浓度依赖的,当生长环境中的养分离子浓度达到阈值<sup>[36-38]</sup>时,此时再升高浓度的增产效果有限甚至会起到抑制作用。

在盆栽条件下,设置相同氮浓度的  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 $\text{NH}_4\text{Cl}$  和  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ,以及  $\text{NaCl}$ 、 $\text{NaNO}_3$ 、 $\text{KNO}_3$  和  $\text{K}_2\text{SO}_4$  和空白 CK 组处理,通过对毛竹幼苗苗高、叶片数、分蘖数、叶绿素含量和生物量及根系构型等指标的观测,研究结果进一步证实了毛竹是“喜铵”植物,并且含  $\text{NH}_4^+$  化合物对毛竹幼苗生长的促进作用主要是  $\text{NH}_4^+$  的效应。在  $\text{NH}_4^+$  处理中,毛竹幼苗生长旺盛,根系发达,植株高度、分蘖数和叶片数及生物量积累显著增加。此外,  $\text{NH}_4^+$  处理条件下的栽培基质 pH 呈下降趋势,表明铵也有可能是通过调节栽培基质 pH 进而改变环境中其他离子的有效性间接促进毛竹幼苗生长。因此,在毛竹幼苗育苗过程中氮肥施用应以  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  或  $\text{NH}_4\text{Cl}$  为主的铵氮,集约经营竹林对铵态氮肥的生长响应尚需进一步研究。

#### 【参 考 文 献】

- [1] 国家林业和草原局编制. 中国森林资源报告 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2019.
- [2] 冯鹏飞, 李玉敏. 2021 年中国竹资源报告 [J]. 世界竹

- 藤通讯, 2023, 21(2): 100-103.
- [3] 萧江华. 我国竹业发展现状与对策 [J]. 竹子研究汇刊, 2000, 19(1): 1-5, 8.
- [4] Bijay-Singh, Yadvinder-Singh, Sekhon G S. Fertilizer-N use efficiency and nitrate pollution of groundwater in developing countries [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 1995, 20(3/4): 167-184.
- [5] Stevens C J. Nitrogen in the environment [J]. Science, 2019, 363(6427): 578-580.
- [6] 顾小平, 吴晓丽, 汪阳东. 毛竹林氮素营养诊断的研究 [J]. 浙江林业科技, 2004, 24(2): 1-4.
- [7] 宋纯鹏, 王学路, 等. 植物生理学 [M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [8] 毛超, 漆良华, 刘琦蕊, 等. 毛竹林各器官对 N 素的吸收和利用率 [J]. 林业科学, 2016, 52(5): 64-70.
- [9] Britto D T, Kronzucker H J. Constancy of nitrogen turnover kinetics in the plant cell: insights into the integration of subcellular N fluxes [J]. Planta, 2001, 213(2): 175-181.
- [10] 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 [J]. 西部林业科学, 2022, 51(5): 164-170.
- [11] Britto D T, Kronzucker H J. Ecological significance and complexity of N-source preference in plants [J]. Annals of Botany, 2013, 112(6): 957-963.
- [12] Kronzucker H J, Siddiqi M Y, Glass A D M. Conifer root discrimination against soil nitrate and the ecology of forest succession [J]. Nature, 1997, 385: 59-61.
- [13] 崔晓阳, 宋金凤. 原始森林土壤  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  生境特征与某些针叶树种的适应性 [J]. 生态学报, 2005, 25(11): 3082-3092.
- [14] 宋庆妮, 杨清培, 王兵, 等. 水分变化对毛竹林与常绿阔叶林土壤 N 素矿化的潜在影响 [J]. 生态学杂志, 2013, 32(12): 3297-3304.
- [15] Song X Z, Gu H H, Wang M, et al. Management practices regulate the response of Moso bamboo foliar stoichiometry to nitrogen deposition [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 24107.
- [16] 顾红梅, 邓光华, 黄玲, 等. 毛竹幼苗对不同氮含量及形态的营养响应 [J]. 竹子学报, 2016, 35(3): 44-49, 54.
- [17] Zou N, Shi W M, Hou L H, et al. Superior growth, N uptake and  $\text{NH}_4^+$  tolerance in the giant bamboo *Phyllostachys edulis* over the broad-leaved tree *Castanopsis fargesii* at elevated  $\text{NH}_4^+$  may underlie community succession and favor the expansion of bamboo [J]. Tree Physiology, 2020, 40(11): 1606-1622.

- [18] Zou N, Huang L, Chen H J, et al. Nitrogen form plays an important role in the growth of moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) seedlings [J]. *PeerJ*, 2020, 8: e9938.
- [19] 李国栋, 胡晓伟, 牟梦晓, 等. 不同氮素形态及配比对毛竹实生苗生长及养分吸收的影响 [J]. 福建农林大学学报 (自然科学版), 2014, 43(2): 151–155.
- [20] Babalar M, Sokri S M, Lesani H, et al. Effects of nitrate: ammonium ratios on vegetative growth and mineral element composition in leaves of apple [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2015, 38(14): 2247–2258.
- [21] Coletto I, Marín-Peña A J, Urbano-Gómez J A, et al. Interaction of ammonium nutrition with essential mineral cations [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2023, 74(19): 6131–6144.
- [22] Wang L X, Macko S A. Constrained preferences in nitrogen uptake across plant species and environments [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2011, 34(3): 525–534.
- [23] Yang K B, Zhu C L, Zhang J B, et al. Nitrogen fertilization in bamboo forest accelerates the shoot growth and alters the lignification process in shoots [J]. *Industrial Crops and Products*, 2022, 187: 115368.
- [24] Ferreira Barreto R, Rodrigues Cruz F J, Aparecido Gaion L, et al. Accompanying ions of ammonium sources and nitrate: ammonium ratios in tomato plants [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2018, 181(3): 382–387.
- [25] 牟晓玲. 对不同植物叶绿素 a 和叶绿素 b 含量比的测定 [J]. 甘肃农业科技, 2004(11): 55–56.
- [26] Raab T K, Terry N. Nitrogen source regulation of growth and photosynthesis in beta vulgaris L [J]. *Plant Physiology*, 1994, 105(4): 1159–1166.
- [27] Chow F. Nitrate assimilation: the role of in vitro nitrate reductase assay as nutritional predictor [M]. Brazil: Mohammad Mahdi Najafpour, 2012.
- [28] Masclaux-Daubresse C, Reisdorf-Cren M, Pageau K, et al. Glutamine synthetase-glutamate synthase pathway and glutamate dehydrogenase play distinct roles in the sink-source nitrogen cycle in tobacco [J]. *Plant Physiology*, 2006, 140(2): 444–456.
- [29] 邢瑶, 马兴华. 氮素形态对植物生长影响的研究进展 [J]. 中国农业科技导报, 2015, 17(2): 109–117.
- [30] 曹翠玲, 李生秀. 氮素形态对作物生理特性及生长的影响 [J]. *华中农业大学学报*, 2004, 23(5): 581–586.
- [31] Lynch J. Root architecture and plant productivity [J]. *Plant Physiology*, 1995, 109(1): 7–13.
- [32] Marschner H, Kirkby E A, Cakmak I. Effect of mineral nutritional status on shoot-root partitioning of photoassimilates and cycling of mineral nutrients [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1996, 47(9): 1255–1263.
- [33] Meier M, Liu Y, Lay-Pruitt K S, et al. Auxin-mediated root branching is determined by the form of available nitrogen [J]. *Nature Plants*, 2020, 6: 1136–1145.
- [34] 吴鑫雨, 李海叶, 刘振洋, 等. 间作不同行小麦氮素累积分配特征及其对氮肥施用的响应 [J]. 西南林业大学学报 (自然科学), 2022, 42(5): 47–55.
- [35] 彭春雪, 耿贵, 於丽华, 等. 不同浓度钠对甜菜生长及生理特性的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(2): 459–465.
- [36] 吴磊, 何易蔓, 余雯静, 等. 氮磷钾配方施肥对丹桂苗木叶片内源激素含量的影响 [J]. 西南林业大学学报 (自然科学), 2024, 44(3): 61–70.
- [37] 韦兴兰, 井卉竹, 茶晓飞, 等. 白枪杆幼苗氮、磷、钾含量及化学计量特征对遮阴的响应 [J]. 云南农业大学学报 (自然科学), 2024, 39(2): 130–136.
- [38] 王珂, 尹昀洲, 张明辉, 等. 林龄对红松人工林叶片凋落物-土壤 C、N、P 生态化学计量特征的影响 [J]. 西部林业科学, 2023, 52(2): 55–61, 74.

(责任编辑 冯 雪)