

## 模拟氮沉降对木荷和卷荚相思种子萌发的影响

李成珺<sup>1,2</sup>, 赖慧捷<sup>1,2</sup>, 范辉华<sup>3</sup>, 林智榕<sup>1,2</sup>, 戴渊<sup>1,2</sup>, 刘爱琴\*<sup>1,2</sup>

(1 福建农林大学 林学院, 福建 福州 350002; 2 国家林业局杉木工程技术研究中心, 福建 福州 350002, 3. 福建省林业科学研究院, 福建 福州 350012)

**【摘要】**【目的】研究氮沉降对不同林木种子萌发的影响, 旨在为南方森林的经营管理提供参考。【方法】以木荷和卷荚相思为试验材料, 采用室内试验, 选择 2, 6 和 12 g/L 硝态氮 (KNO<sub>3</sub>)、铵态氮 ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)、混合氮 (NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>) 进行氮沉降模拟试验, 以蒸馏水为对照 (CK), 测定各处理木荷和卷荚相思种子的发芽率、相对发芽率、发芽指数、活力指数和发芽抑制率, 在此基础上采用主成分分析对不同处理对种子萌发影响进行综合评价。【结果】随着 KNO<sub>3</sub>、(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 3 种氮源质量浓度的升高, 木荷和卷荚相思种子的发芽率、发芽指数均呈下降趋势, 表现为“低促高抑”现象, 而发芽抑制率提高。同一氮源下, 不同质量浓度对木荷和卷荚相思种子萌发的促进作用均为 2 g/L>6 g/L>12 g/L; 同一质量浓度下, 当氮源为(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>时, 其最能促进木荷和卷荚相思种子萌发。主成分分析结果显示, 在木荷中主成分 1 以及卷荚相思中主成分 1 和主成分 2 能够反映原始变量 80%以上的信息, 因此选择以上主成分对不同处理进行综合排名, 结果在木荷和卷荚相思种子各处理中综合排名第一的都为 2 g/L(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>处理。【结论】当质量浓度为 2~12 g/L 时, 3 种氮源对 2 种树种种子萌发影响有差异, 但最适宜木荷和卷荚相思种子萌发的处理均为 2 g/L (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>。

**【关键词】**木荷; 卷荚相思; 种子萌发; 氮沉降

## Effects of simulated nitrogen deposition on seed germination of *Schima superba* and *Acacia cincinnata*

LI Chengjun<sup>1,2</sup>, LAI Huijie<sup>1,2</sup>, FAN Huihua<sup>3</sup>, LIN Zhirong<sup>1,2</sup>, DAI Yuan<sup>1,2</sup>, LIU Aiqin\*<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China; <sup>2</sup>State Forestry Administration Engineering Research Center of Chinese Fir, Fuzhou, Fujian 350002, China; <sup>3</sup>Fujian Academy of Forestry Sciences, Fuzhou, Fujian 350012, China)

**Abstract:** [Objective] To study the effects of nitrogen deposition on seed germination of different trees in order to provide reference for forest management in southern China. [Method] *Schima Superba* and *Acacia cincinnata* were used as test materials. In laboratory experiments, 2, 6, 12 g/L nitrate nitrogen (KNO<sub>3</sub>), ammonium nitrogen ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) and mixed nitrogen (NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>) were selected for nitrogen sedimentation simulation test. Distilled water was used as control (CK). The germination rate, relative germination rate, germination index, vitality index and germination inhibition rate of the seeds of *Schima superba* and *Acacia cincinnata* were determined. On this basis, principal component analysis was used to comprehensively evaluate the effects of different treatments on seed germination. [Result] With the increase of nitrate nitrogen (KNO<sub>3</sub>), ammonium nitrogen ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) and mixed nitrogen (NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>), the germination rate and germination index of *Schima superba* and *Acacia cincinnata* seeds showed a downward trend, showing a phenomenon of "low promotion and high inhibition", while the germination inhibition rate was generally improved. Under the same nitrogen source, the promoting effects of different mass concentrations on seed germination of *Schima superba* and *Acacia cincinnata* were 2 g/L>6 g/L>12 g/L. Under the same mass concentration, the seed germination of *Schima superba* and *Acacia cincinnata* was best promoted when nitrogen source was (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. The results of principal component analysis showed that one principal component (germination rate) of *Schima superba* and two principal components (germination rate and germination index) of *Acacia cincinnata* were selected for comprehensive ranking. The comprehensive ranking of seeds of *Schima superba* and *Acacia cincinnata* seeds in each treatment was 2 g/L (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. [Conclusion] When the mass concentration was 2—12 g/L, the effects of three nitrogen sources on seed germination of the two species were different, but the most suitable treatment for seed germination of *Schima superba* and *Acacia cincinnata* was 2 g/L (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

**Key words:** *Schima superba*; *Acacia cincinnata*; seed germination; nitrogen deposition

氮元素作为植物生长过程中不可或缺的元素, 在一定程度上影响植物的生长发育<sup>[1]</sup>。随着社会的快速发展, 工业生产和社会劳动的范围和强度日益增大, 导致大气中的氮素从起初不能被生物直接利用的惰性氮 (N<sub>2</sub>) 转变为具有生物活性的活性氮 (NH<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>)。随着活性氮化合物排放量的增加, 大气氮沉降也随之激增, 这将会导致土壤酸化、养分流失、水体污染、生物多样性减少、改变物种组成甚至影响陆地生态系统的固碳作用<sup>[2]</sup>。中欧及北美地区森林生态系统氮沉降量已超过 25~60 kg/(hm<sup>2</sup>·a), 超过了森林生态系统对氮素的年需求<sup>[3]</sup>。我国作为世界第三大氮沉降集中分布区, 中东部森林生态系统氮沉降量也已超过 20 kg/(hm<sup>2</sup>·a)<sup>[4]</sup>, 并且我国南方地区被认为是未来遭受大气氮沉降的重点区域之一。森林是陆地生态系统的主体, 氮素在土壤中大量沉积会影响整个森林生态系统结构和功能的平衡, 最终导致森林生态系统生物多样性减少以及生产力的下降<sup>[5-7]</sup>。在氮沉降逐年增加临界负荷的全球大背景下, 探讨氮沉降对森林植物生长影响的研究, 寻求相应的防治对策, 就显得尤为重要。植物生长发育过程中最脆弱的环节是种子萌发时期

[8], 此时更容易受到大气氮沉降的影响。迄今为止, 有关氮沉降对植物的影响研究集中在氮沉降对土壤养分<sup>[9]</sup>、植物光合特性<sup>[10]</sup>、凋落物分解<sup>[11]</sup>等方面, 而有关氮沉降对森林生态系统种子萌发的影响的研究还较少<sup>[12-13]</sup>。

木荷(*Schima superba* Gardn. et Champ.)又名荷木, 山茶科木荷属, 在酸性土壤中生长迅速, 受迫后萌芽能力较强, 对极端环境适应力较强<sup>[14]</sup>。卷荚相思(*Acacia cincinnata* F.Muell.), 豆科金合欢属, 具有适应性强、根瘤固氮等特性<sup>[15]</sup>。二者皆是南方地区良好的用材、绿化及生态防护树种, 且皆可在酸性土壤中良好生长, 推测他们对氮沉降均具有一定的适应能力。目前有关氮沉降对以上 2 种植物种子的影响还未见报道。因此, 本试验选取木荷、卷荚相思 2 种南方主要乡土树种作为研究对象, 分析不同氮沉降处理对其种子萌发的影响, 以揭示不同树种对氮沉降增加的响应差异, 为氮沉降量增加的背景下南方森林动态及其经营管理提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

卷荚相思种子来自福建省漳浦中西国有林场卷荚相思种子园, 木荷种子来源于华安西陂国有林场木荷种子园。2 种种子均于 2020 年 9 月购入, 并冷藏保存。

### 1.2 试验设计

针对传统氮沉降研究主要通过单一形态的氮进行模拟添加、自然界中大气氮沉降成分复杂的现实, 本研究选择硝态氮( $\text{KNO}_3$ )、铵态氮( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ )、混合氮( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) 3 种氮源进行氮沉降模拟, 根据前人的研究结果<sup>[16]</sup>及福建省氮沉降<sup>[17]</sup>的实际情况, 每种氮源质量浓度分别设置 2, 6, 12 g/L 3 个水平, 以蒸馏水为对照(CK), 每个树种下共 10 个处理, 每个处理重复 4 次。

### 1.3 试验方法

采用人工气候箱(EH-2900)进行种子萌发试验, 2020 年 10 月将供试的木荷和卷荚相思种子用 5 g/L 高锰酸钾溶液进行消毒和杀菌处理<sup>[18]</sup>, 将沸水倒入装有种子的容器中, 待自然冷却后将种子捞出置于超纯水中浸泡 24 h, 取出沉底种子用滤纸吸干表面水分。取 50 粒种子, 整齐地摆放在直径 12 cm 并铺有两层滤纸的玻璃培养皿中, 加入 5 mL 不同质量浓度的氮源, 对照中加入等量的蒸馏水, 然后放置在 25℃、光周期为 12 h/12 h、空气相对湿度为 95% 的人工气候箱中进行培养。在培养期间每 2 d 更换 1 次滤纸, 其中每个处理种子保持相同湿润程度。每天仔细观察并记录种子萌发的情况, 直到最后连续 3 d 没有出现新萌发的种子时, 停止观察, 其中木荷和卷荚相思种子发芽结束时间分别为 32 和 15 d。试验完成后测定萌发种子的胚根长度, 并计算以下发芽指标:

发芽率(GP)=发芽种子数/供试种子总数×100%。

相对发芽率(RGP)=处理组发芽数 / 对照组发芽数×100%;

发芽指数<sup>[19]</sup>(GI) =  $\sum G_t/D_t$ ;

活力指数(VI) = GI×S;

发芽抑制率=(对照组发芽率-处理组发芽率)/对照组发芽率×100%

式中: $G_t$ 为第  $t$  天的发芽种子数,  $D_t$ 为发芽时间,  $S$ 为平均胚根长度;

### 1.4 数据分析方法

运用 Microsoft Excel 2010、Origin 2018, 结合 SPSS 22.0 软件(SPSS Inc., Chicago, USA) Duncan 多重比较检验各组处理之间的差异显著性 ( $P < 0.05$ ), 进行数据处理和图表绘制。选用种子的发芽率、相对发芽率、发芽指数、活力指数和发芽抑制率 5 种指标进行主成分分析<sup>[20]</sup>, 分析不同处理的综合得分。

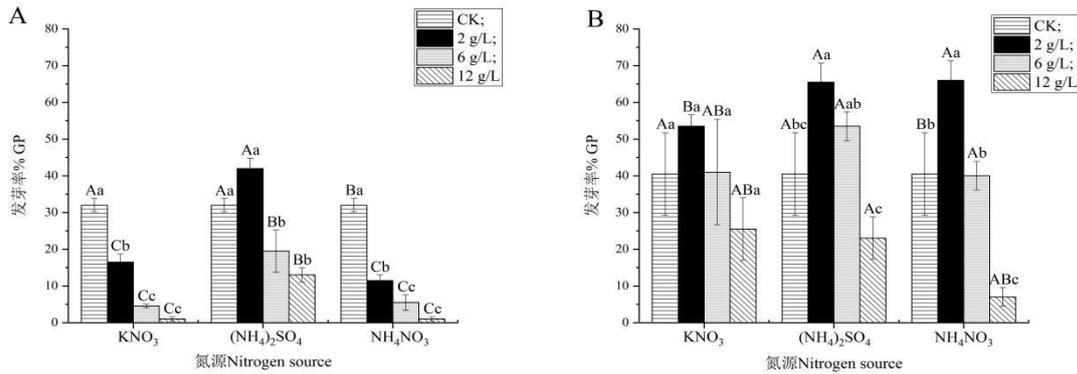
## 2 结果与分析

### 2.1 模拟氮沉降对木荷和卷荚相思种子发芽率的影响

由图 1 可见, 不同类型氮源对木荷和卷荚相思种子发芽率的影响显著。在相同氮源同一质量浓度处理下, 卷荚相思种子的发芽率均明显大于木荷种子。

在木荷中, 当氮源质量浓度为 2~12 g/L 时, 随着质量浓度的增加, 3 种氮源处理种子的发芽率均显著降低。3 种氮源中, 当氮源质量浓度相同时,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  处理种子的发芽率显著高于其他氮源。经过 32 d 的处理, 9 个氮源处理中, 只有 2 g/L  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  处理种子的发芽率较 CK (32.00%) 提高了 10%, 其他氮源处理的发芽率均显著低于 CK ( $P < 0.05$ ), 说明 2 g/L  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  可以有效促进木荷种子的萌发(图 1-A)。

本研究观察发现, 在卷荚相思中, 除了 12 g/L  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  处理种子第 5 天才开始发芽外, 其余处理种子 3 d 后均已发芽。在 15 d 萌发结束后, CK 的发芽率为 40.50%, 2 g/L  $\text{KNO}_3$ 、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 $\text{NH}_4\text{NO}_3$  处理的发芽率较 CK 分别提高了 13%, 25%, 25.5%; 12 g/L  $\text{KNO}_3$ 、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 $\text{NH}_4\text{NO}_3$  处理的发芽率明显低于 CK。当氮源质量浓度为 2~12 g/L 时, 随着质量浓度的增加, 3 种氮源处理种子的发芽率均降低, 其中当氮源质量浓度为 2 g/L 时, 种子发芽率均最高, 且 2 g/L  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  和  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  处理种子的发芽率显著高于 2 g/L  $\text{KNO}_3$  处理。说明 2 g/L  $\text{KNO}_3$ 、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 $\text{NH}_4\text{NO}_3$  可以有效促进卷荚相思种子的萌发(图 1-B)。



图柱上标不同小写字母表示同一氮源不同质量浓度间的差异显著(P<0.05), 标不同大写字母表示同一质量浓度下不同氮源间的差异显著(P<0.05). 下图同

Different lowercase letters on the upper column indicate significant differences between different mass concentrations of the same nitrogen source (P < 0.05), while different uppercase letters indicate significant differences between different nitrogen sources at the same mass concentration (P < 0.05).

The same below

图 1 3 种氮源对木荷 (A) 和卷荚相思 (B) 种子发芽率的影响

Fig.1 Effects of three nitrogen sources on germination rate of Schima superba (A) and Acacia cincinnata (B) seeds

### 2.2 模拟氮沉降对木荷和卷荚相思种子相对发芽率的影响

由图 2 可见, 不同类型氮源对木荷和卷荚相思种子相对发芽率有明显影响。在相同氮源同一质量浓度处理下, 除 12 g/L (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 处理外, 其余处理木荷种子的相对发芽率均明显大于卷荚相思种子。

在木荷中, 当氮源质量浓度为 2~12 g/L 时, 随着质量浓度的增加, KNO<sub>3</sub> 和 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 处理种子的相对发芽率均明显降低; 而 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 处理种子的相对发芽率先升高后降低, 其中 2 g/L KNO<sub>3</sub>、NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 以及 2~6 g/L (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 处理种子的相对发芽率均高于 CK, 但差异未达显著水平 (图 2-A)。

在卷荚相思中, 当氮源质量浓度为 2~12 g/L 时, 随着质量浓度的增加, KNO<sub>3</sub> 处理种子的相对发芽率均明显降低, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 处理种子的相对发芽率总体升高, NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 处理种子的相对发芽率先降低后升高。当氮源质量浓度相同时, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 处理种子的相对发芽率明显高于其他 2 种氮源。说明 2~12 g/L (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 均可以有效促进卷荚相思种子的萌发 (图 2-B)。

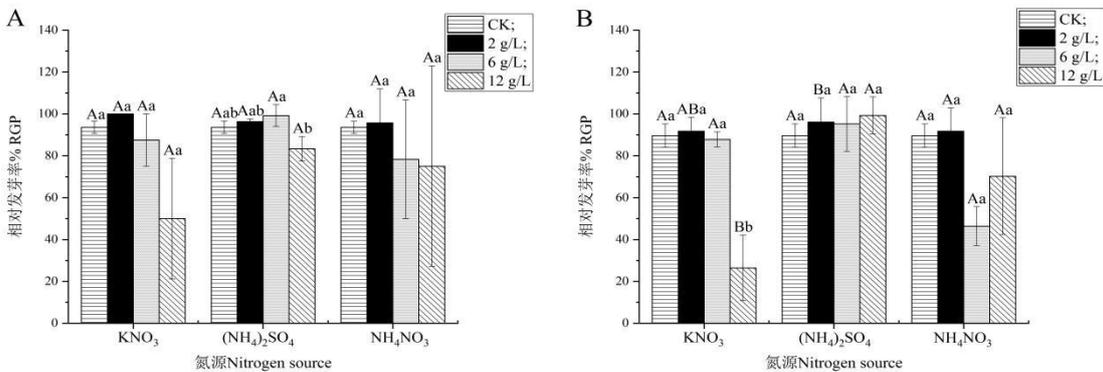


图 2 3 种氮源对木荷 (A) 和卷荚相思 (B) 种子相对发芽率的影响

Fig.2 Effects of three nitrogen sources on the relative germination rate of Schima superba (A) and Acacia cincinnata (B) seeds

### 2.3 模拟氮沉降对木荷和卷荚相思种子发芽指数的影响

由图 3 可见, 不同类型氮源对木荷和卷荚相思种子发芽指数有明显影响。在相同氮源同一质量浓度处理下, 卷荚相思种子的发芽指数均明显大于木荷种子。

在木荷中, 当氮源质量浓度为 2~12 g/L 时, 随着质量浓度的增加, 3 种氮源处理种子的发芽指数均显著降低且逐渐趋近于 0。3 种氮源中, 当氮源质量浓度相同时, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 处理种子的发芽指数明显高于其他 2 种氮源。所有处理中, 只有 2 g/L (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 处理种子的发芽指数大于 CK, 其他处理的发芽指数均显著低于 CK (P < 0.05), 说明在相同的发芽时间下 2 g/L (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 促进木荷种子萌发的效果更佳 (图 3-A)。

在卷荚相思中, 当氮源质量浓度为 2~12 g/L 时, 随着质量浓度的增加, 3 种氮源处理种子的发芽指数均降低, 其中当氮源质量浓度为 2 g/L 时, 3 种氮源处理下种子的发芽指数均最高, 且明显高于 CK, 当氮源质量浓度为 12 g/L 时, 3 种氮源处理下种子发芽指数较 CK 分别下降 10%, 19%, 24%, 说明当 3 种氮源质量浓度为 2 g/L 时可以有效促进卷荚相思种子的萌发, 但当质量浓度为 12 g/L 时却表现出明显的抑制

作用（图 3-B）。

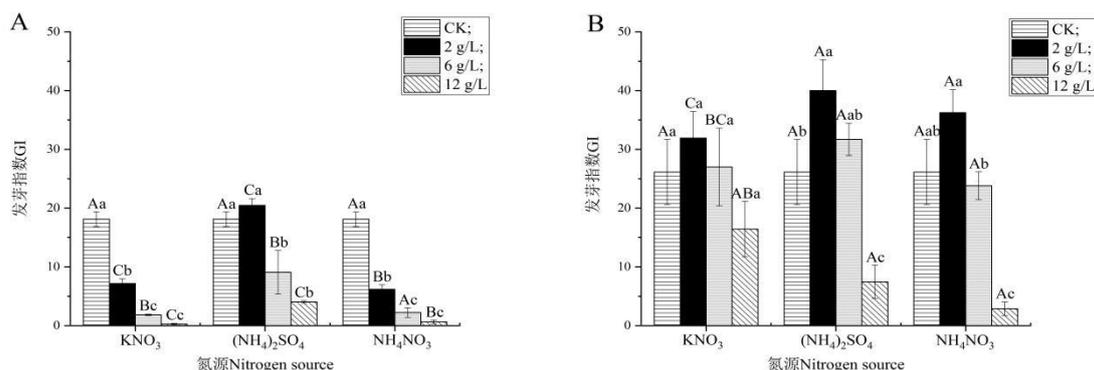


图 3 3 种氮源对木荷 (A) 和卷荚相思 (B) 种子发芽指数的影响

Fig.3 Effects of three nitrogen sources on seed germination index of *Schima superba* (A) and *Acacia cincinnata* (B) seeds

### 2.4 模拟氮沉降对木荷和卷荚相思种子活力指数的影响

由图 4 可见，3 种氮源不同质量浓度处理对木荷和卷荚相思种子活力指数有明显影响。在相同氮源同一质量浓度处理下，木荷种子的活力指数整体高于卷荚相思。

在木荷中，当氮源质量浓度为 2~12 g/L 时，随着质量浓度的增加，3 种氮源处理种子的活力指数均呈下降趋势，且均显著低于 CK ( $P < 0.05$ )，其中当氮源质量浓度为 2 g/L 时，3 种氮源处理种子活力指数均最高，且 2 g/L  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  处理种子的活力指数明显高于 2 g/L  $\text{KNO}_3$  和 2 g/L  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  处理；当氮源质量浓度为 12 g/L 时，3 种氮源处理种子的活力指数均显著降低且逐渐趋近于 0，说明此时木荷种子种子近乎失去活力（图 4-A）。

在卷荚相思中，当氮源质量浓度为 2~12 g/L 时，随着质量浓度的增加，3 种氮源处理种子活力指数均呈先下降后升高的趋势，其中只有 12 g/L  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  和  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  处理种子的活力指数高于 CK，说明 12 g/L  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  和  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  可以促使卷荚相思种子胚根的生长（图 4-B）。

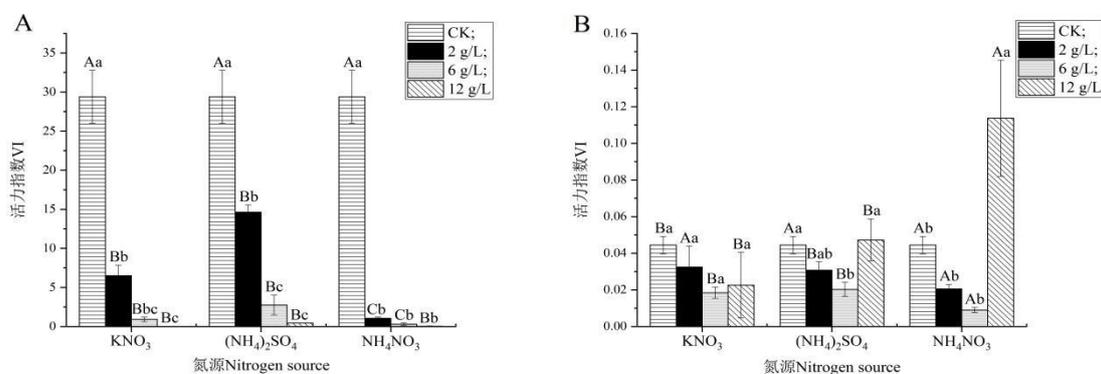


图 4 3 种氮源对木荷 (A) 和卷荚相思 (B) 种子活力指数的影响

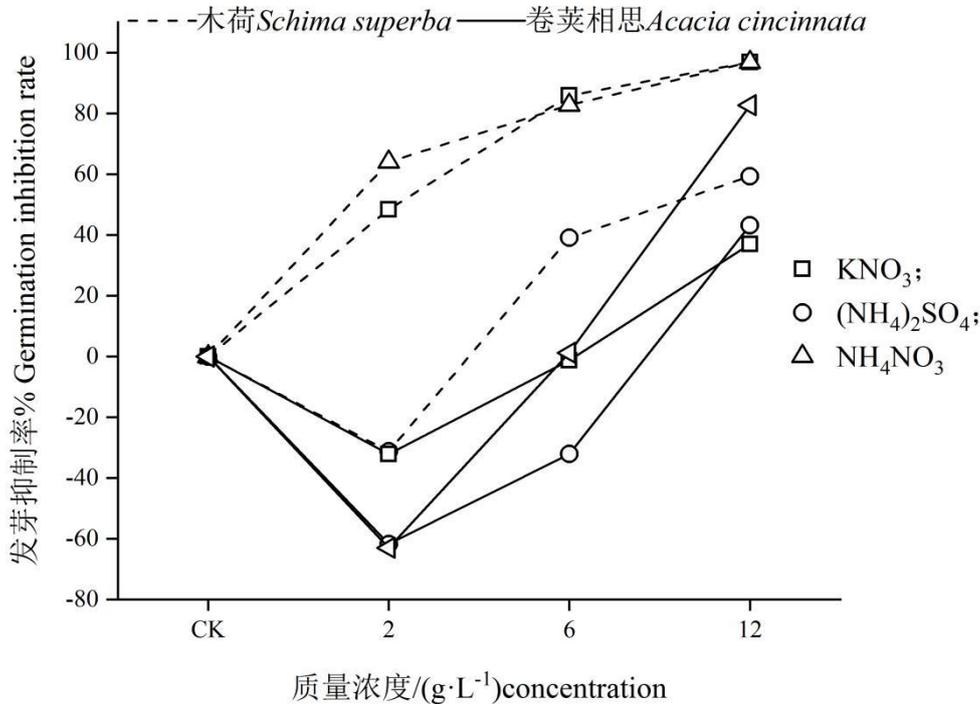
Fig.4 Effects of three nitrogen sources on seed vigor index of *Schima superba* (A) and *Acacia cincinnata* (B) seeds

### 2.5 模拟氮沉降对木荷和卷荚相思种子发芽抑制率的影响

由图 5 可见，当氮源质量浓度为 2~12 g/L 时，3 种氮源处理木荷和卷荚相思种子的发芽抑制率表现为 12 g/L > 6 g/L > 2 g/L，但木荷种子发芽抑制率总体大于卷荚相思种子。

由图 5 还可知，在木荷中，当氮源质量浓度为 2~12 g/L 时，3 种氮源处理种子的发芽抑制率均随着质量浓度的升高而增加，其中 2 g/L  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  处理的发芽抑制率最低，为 31.25%；而 12 g/L  $\text{KNO}_3$  和  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  处理的发芽抑制率均最高，为 96%。说明 2 g/L  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  促进种子萌发的效果明显，而 12 g/L  $\text{KNO}_3$  和  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  抑制效果最明显。

由图 5 还可知，在卷荚相思中，当氮源质量浓度为 2~12 g/L 时，3 种氮源处理种子的发芽抑制率均随着质量浓度的升高而增加，其中 2 g/L NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 处理的发芽抑制率最低，为 62.96%；12 g/L NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 处理的发芽抑制率最高，为 82.72%。说明 2 g/L NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 能明显促进卷荚相思种子的萌发，12 g/L NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 处理抑



制效果最明显。

图 5 3 种氮源对木荷、卷荚相思种子发芽抑制率的影响

Fig.5 Effects of three nitrogen sources on germination inhibition rate of *Schima superba* and *Acacia cincinnata* seeds

2. 6 模拟氮沉降对木荷和卷荚相思种子萌发影响的适应性分析

利用主成分分析对 2 个树种下不同质量浓度和氮源组合的 10 个处理进行分析，确定初始因子载荷，结果（表 1）显示，对于木荷种子，可以提取 1 个主成分，其累积贡献率为 82.562%；对于卷荚相思种子，可以提取 2 个主成分，其方差贡献率分别为 73.007%和 21.420%，累积贡献率为 94.427%，表明在木荷中主成分 1 以及卷荚相思中主成分 1 和主成分 2 能够反映原始变量 80%以上的信息，因此选择以上主成分来代替原始 5 个指标反映 2 种种子的萌发能力。

利用所得信息对不同氮源处理木荷、卷荚相思种子萌发能力进行综合评价，以每个主成分所对应特征值的方差贡献率为权重，然后根据主成分得分和对应的权重相乘求和，构建综合评价函数，得其表达式分别为： $Y_S=0.82562Y_1$ ， $Y_A=0.73007Y_1+0.21420Y_2$ ，其中  $Y_S$ 、 $Y_A$  为不同氮源处理木荷、卷荚相思种子萌发能力的综合得分。

由表 2 可知，在木荷种子的 10 个处理中，2 g/L(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 处理的综合得分最高，其次为 CK 和 6 g/L(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 处理，12 g/L KNO<sub>3</sub> 处理最低。在卷荚相思种子的 10 个处理中，2 g/L (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 处理的综合得分最高，其次为 2 g/L NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 和 6 g/L (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 处理，12 g/LNH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 处理最低。

表 1 不同氮源处理木荷、卷荚相思种子萌发的主成分分析的特征值及方差

Table 1 The eigenvalues and variances of principal component analysis for seed germination of *Schima superba* and *Acacia cincinnata* treated with different nitrogen sources

品种 Cultivars	主成分 Principal ingredient	特征值 Eigenvalue	方差百分率/% Percentage of variance	累计百分率/% Cumulative percentage
木荷	1	4.128	82.562	82.562
卷荚相思	1	3.650	73.007	73.007
	2	1.071	21.420	94.426

表 2 不同氮源处理木荷、卷荚相思种子萌发的主成分得分和综合得分

Table 2 Principal component scores and comprehensive scores of seed germination of *Schima superba* and *Acacia cincinnata* treated with different nitrogen sources

品种	处理	主成分 1 得分 (Y <sub>1</sub> )	主成分 2 得分 (Y <sub>2</sub> )	综合得分(Y)	排序
Cultivars	Treatment	The principal component Y <sub>1</sub> scores	The principal component Y <sub>2</sub> scores	Composite scores	Sequence
木荷 <i>Schima superba</i>	CK	3.23	—	2.67	2
	2 g/L KNO <sub>3</sub>	0.5	—	0.41	4
	6 g/L KNO <sub>3</sub>	-1.25	—	-1.03	7
	12 g/L KNO <sub>3</sub>	-2.49	—	-2.06	10
	2 g/L (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	3.51	—	2.90	1
	6 g/L (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.66	—	0.54	3
	12 g/L (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	-0.61	—	-0.50	6
	2 g/L NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	-0.26	—	-0.21	5
	6 g/L NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	-1.39	—	-1.15	8
	12 g/L NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	-1.90	—	-1.57	9
卷荚相思 <i>Acacia cincinnata</i>	CK	0.01	0.49	0.11	6
	2 g/L KNO <sub>3</sub>	1.13	0.37	0.90	4
	6 g/L KNO <sub>3</sub>	0.38	-0.05	0.27	5
	12 g/L KNO <sub>3</sub>	-1.55	-2.08	-1.57	9
	2 g/L (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2.19	0.51	1.71	1
	6 g/L (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1.31	0.27	1.01	3
	12 g/L (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	-1.68	0.87	-1.04	8
	2 g/L NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	2.15	0.19	1.61	2
	6 g/L NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	-0.08	-1.63	-0.4	7
	12 g/L NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	-3.88	1.07	-2.6	10

由表 2 还可知, 在同种氮源不同质量浓度处理的木荷和卷荚相思种子中, 以低质量浓度时综合得分最高, 高质量浓度时得分最低; 在同一质量浓度处理下, 木荷种子以(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 处理的综合得分最高, KNO<sub>3</sub> 处理次之, 卷荚相思种子与之相似, 以(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 处理的得分最高, NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 处理次之。与对照相比, 木荷种子适应胁迫环境的表现与卷荚相思种子不同, 卷荚相思比木荷对氮沉降的耐受度更强, 木荷对氮沉降更加敏感。

### 3 讨论

种子的发芽率、相对发芽率、发芽指数和活力指数都是用来评价种子发芽整齐度、速度和幼苗健壮程度等的指标<sup>[21]</sup>。种子的发芽率可以用来衡量种子质量的好坏, 显示种子胚的活性高低, 发芽率越高, 种子胚活性越强<sup>[22]</sup>。发芽指数可以更好地反映出种子受环境影响后, 其在失去活力之前是否已经发生质量劣变, 发芽指数越高, 种子的活力越高, 受环境影响越小。活力指数是种子发芽速率和生长量的综合反映, 是评价种子萌发质量的指标, 该指标越高, 说明种子发芽速率越快, 生长量变化越大<sup>[23]</sup>。

在氮沉降初期不同植物种子会对氮沉降呈现出不同的响应<sup>[1]</sup>。本研究中, 木荷和卷荚相思对于氮的敏感度和耐受度存在差异。当氮源质量浓度为 2~12 g/L 时, 随着质量浓度的升高, 3 种氮源处理木荷和卷荚相思种子的发芽率、发芽指数均下降, 而发芽抑制率升高。从综合得分来看, 当质量浓度为 2 g/L 时, 3 种氮源对木荷种子萌发的促进作用表现为(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>>KNO<sub>3</sub>>NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>, 对卷荚相思种子萌发的促进作用依次为(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>>NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>>KNO<sub>3</sub>; 当质量浓度为 6 g/L 时, 3 种氮源对木荷种子萌发的促进作用依次为(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>>KNO<sub>3</sub>>NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>, 对卷荚相思种子的促进作用依次为(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>>KNO<sub>3</sub>>NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>; 质量浓度为 12 g/L 时, 3 种氮源对木荷种子萌发的促进作用依次表现为(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>>NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>>KNO<sub>3</sub>, 对卷荚相思种子的促进作用依次为(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>>KNO<sub>3</sub>>NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>。从综合得分来看, 当氮源相同时, 其不同质量浓度对木荷和卷荚相思种子萌发的促进作用均为 2 g/L>6 g/L>12 g/L。综上所述, 最适宜木荷和卷荚相思种子萌发的处理均为 2 g/L (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>。

本研究中, 随着质量浓度的增加, 3 种氮源处理木荷、卷荚相思种子发芽抑制率明显升高, 这与王雅聪等<sup>[24]</sup>氮沉降对碱茅种子萌发的影响结果相似, 李贾<sup>[25]</sup>发现, 氮沉降也能够增加种子干重以及种皮厚度,

在低水平和中等水平氮处理下红松种子的粗蛋白含量、粗脂肪含量和全氮含量都均较高，但是在高水平氮处理下却有所下降，说明适当浓度的氮可能会促进植物种子的萌发，而过量氮则会抑制其萌发。另外，本研究的结果显示，添加不同形态氮对种子发芽有促进作用，而且单一形态氮的促进作用高于混合氮，这与 Matoor<sup>[26]</sup>、Malagoli 等<sup>[27]</sup>、刘春娜等<sup>[28]</sup>、常笑超等<sup>[29]</sup>的研究结论相似。植物会选择性利用土壤中的不同形态氮，而一般适应酸性土壤生长的植物主要利用的是铵态氮<sup>[30]</sup>，但木荷和卷荚相思是通过何种策略应对以铵态氮为主的氮沉降，尚需更深入和系统研究。加强此类研究，可为南方乡土树种对氮沉降增加的响应差异以及森林培育中提高木荷和卷荚相思对极端环境的适应性提供参考。

#### 4 结论

3 种氮源对木荷和卷荚相思种子的发芽率、相对发芽率、发芽指数、活力指数和发芽抑制率均有明显影响。当质量浓度为 2~12 g/L 时，随着 3 种氮源质量浓度的升高，木荷和卷荚相思种子发芽率、发芽指数均下降，表现为“低促高抑”，而发芽抑制率升高。同一氮源下，不同质量浓度对木荷和卷荚相思种子萌发的促进作用均为 2 g/L>6 g/L>12 g/L；同一质量浓度下，与其他 2 种氮源相比，(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 处理时能明显促进木荷和卷荚相思种子萌发，因此，最适宜木荷和卷荚相思种子萌发的处理均为 2 g/L(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>。本研究对木荷和卷荚相思的适配氮源和浓度进行了分析比较，为氮沉降日益剧增的背景下培育优良木荷和卷荚相思种源提供了参考，但本研究所设浓度并不能具体反映促进木荷和卷荚相思种子萌发的阈值，后续还需要更为深入和系统的研究。

#### 参考文献

- [1] 马翔,李辉,郭霄,等.不同氮沉降对耐冬山茶和茶梅生长及生理特性的影响[J].青岛农业大学学报(自然科学版),2021,38(4):262-272.
- Ma X,Li H,Guo X,et al.Effects of different nitrogen deposition on growth and physiological characteristics of *Camellia japonica*(NaiDong) and *Camellia sasanqua* [J].Journal of Qingdao Agricultural University (Natural Science),2021,38(4):262-272.
- [2] 朱汉斌,周飞.中科院华南植物园揭示氮沉降和降雨量增加对树木生长影响 [N].中国科学报,2021-11-25(4).
- Zhu H B,Zhou F.The south china botanical garden of the chinese academy of sciences revealed the effects of nitrogen deposition and increased rainfall on tree growth[N].Chinese Journal of Science,2021-11-25(4).
- [3] Bobbink R,Hicks K,Galloway J,et al.Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity:a synthesis [J].Ecological Applications,2010,20(1):30-59.
- [4] 姚继周.水杉人工林细根生产和周转及对氮沉降的响应 [D].南京:南京林业大学,2016.
- Yao J Z.Fine root production and turnover and the response to nitrogen deposition in *Metasequoia glyptostroboides* plantation [D].Nanjing:Nanjing Forestry University,2016.
- [5] Liu X J. Nitrogen deposition and its ecological impact in China:an overview[J].Environmental Pollution,2011,159(10): 2251-2264.
- [6] Galloway J N,Townsend A R,Erisman J W,et al. Transformation of the nitrogen cycle:recent trends,questions,and potential solutions [J].Science,2008,320(5878):889-892.
- [7] Gruber N,Galloway J N.An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle.[J].Nature,2008,451(7176):293-296.
- [8] 刘乐.两种风箱果种子萌发和幼苗生长对盐碱胁迫的耐受性研究 [D].哈尔滨:东北林业大学,2021.
- Liu (L/Y).The tolerance of seed germination and seedling growth of *Physocarpus amurensis* and *P.opulifolius* to salt-alkali stress [D].Harbin:Northeast Forestry University,2021.
- [9] 黄路婷,刘济明,李佳,等.氮添加对米槠林下土壤养分及酶活性的影响[J].中南林业科技大学学报,2021,41(06):122-130.
- Huang L T,Liu J M,Li J,et al.Effects of nitrogen addition on soil nutrients and enzyme activities under *Cinnamomum migao* forest [J].Journal of Central South University of Forestry and Technology,2021,41(06):122-130.
- [10] 王宣瓔,张翼,何怀江,等.吉林舒兰地区蒙古栎幼苗光合荧光特征对模拟氮沉降的响应[J/OL].应用与环境生物学报,1-11[2023-04-26].
- Wang X Y,Zhang Y,He H J,et al.Response of photosynthetic and fluorescence characteristics of *Quercus mongolica* seedlings to simulated nitrogen deposition in Shulan, Jilin Province [J/OL].Chinese Journal of Applied and Environmental Biology,1-11[2023-04-26].
- [11] 张雨鉴,宋娅丽,王克勤,等.模拟氮沉降对滇中高山栎林凋落物碳氮磷释放和生态化学计量特征的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2022,50(11):70-80+92.
- Zhang Y J,Song Y L,Wang K Q,et al.Effects of simulated nitrogen deposition on C, N and P release from litter and ecological stoichiometry in *Quercus aquifolioides* forest in central Yunnan [J].Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition),2022,50(11):70-80+92.
- [12] 胡正华,索福喜,刘巧辉,等.模拟氮沉降对大豆萌发和幼苗生长的影响 [J].生态环境,2008,17(6):2397-2400.
- Hu Z H,Suo F X,Liu Q H,et al.Effects of simulated nitrogen deposition on seed germination and seedling growth of soybean [J].Ecology and Environment,2008,17(6):2397-2400.
- [13] 裴昊斐.模拟氮沉降对香椿种子萌发和幼苗生长特性的影响[D].北京:中国林业科学研究院,2019.
- Pei H F.Effects of simulated nitrogen deposition on seed germination and seedling growth characteristics of *Toona sinensis* [D].Beijing:Chinese Academy of Forestry,2019.

- [14] 何春华.木荷繁殖技术研究进展 [J].绿色科技,2021,23(19):167-169.  
He C H.Research progress of *Schima superba* propagation technology [J].Journal of Green Science and Technology,2021,23(19):167-169.
- [15] 汤道平.卷荚相思生长过程的初步研究[J].绿色科技,2015(5):63-65.  
Tang D P.A preliminary study on the growth process of *Acacia* [J].Journal of Green Science and Technology,2015(5):63-65.
- [16] 游爱华.模拟氮沉降对珍稀树种枯枝分解的影响 [D].福州:福建农林大学,2009.  
You A H.Effects of simulated nitrogen deposition on dead branches decomposition of rare tree species [D].Fuzhou:Fujian Agriculture and Forestry University,2009.
- [17] 王 强.模拟大气氮沉降对闽北森林土壤理化性质及森林碳动态的影响 [D].福州:福建农林大学,2006.  
Wang Q.Effects of stimulated atmospheric nitrogen deposition on physical-chemical properties on soils and dynamics of carbon in Minbei forest [D].Fuzhou:Fujian Agriculture and Forestry University,2006.
- [18] 王 瑾.海南岛海岸乡土树种红厚壳、草海桐的育苗和在海防林下混交种植的研究 [D].海口:海南师范大学,2015.  
Wang J.Breeding and mixed planting of local tree species *Calophyllum inophyllum* and *Scaevola sericea* in coastal shelterbelt on Hainan Island [D].Haikou:Hainan Normal University,2015.
- [19] 王志强,杨 哲,杨凡,等.盐碱胁迫对酸枣种子萌发的影响 [J].塔里木大学学报,2016,28(3):52-57.  
Wang Z Q,Yang Z,Yang F,et al.Effect of saline-alkali stress on sour jujube seed germination [J].Journal of Tarim University,2016,28(3):52-57.
- [20] 蒋灵芝,赵童.基于主成分分析的桂林漓江水质特征研究[J].广西水利水电,2023,211(01):138-141.  
Jiang L Z,Zhao T.Study of water quality characteristics of Lijiang River in Guilin City based on principle component analysis [J].Guangxi Water Resources and Hydropower,2023,211(01):138-141.
- [21] 李秀霞.新疆大果沙枣的抗盐性研究 [D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2005.  
Li X X.The study on characteristics of salt-resistance of *Elaeagnus mooraroftii* in Xinjiang [D].Urumqi:Xinjiang Agricultural University,2005.
- [22] 秦 娟,罗光香,李 亭,等.2种线椒的种子萌发和幼苗生长对NaCl的耐受性分析 [J].种子,2016,35(9):24-28,31.  
Qin J,Luo G X,Li T,et al.Analysis of the resistance to NaCl stress during seed germination and seedling growth of 2 line peppers [J].Seed,2016,35(9):24-28,31.
- [23] 蔡天革,胡智馨,杜春明,等.不同质量浓度硼肥对荞麦种子萌发及幼苗生长的影响 [J].沈阳大学学报(自然科学版),2021,33(3):213-219.  
Cai T G,Hu Z X,Du C M,et al.Effects of different concentrations of boron fertilizer on seed germination and seedling growth of buckwheat [J].Journal of Shenyang University (Natural Science),2021,33(3):213-219.
- [24] 王雅聪,王 菲,王聪聪,等.氮引发对碱茅种子萌发特性的影响 [J].草业科学,2019,36(12):3093-3099.  
Wang Y C,Wang F,Wang C C,et al.Effect of nitrogen priming on the seed germination characteristics of *Puccinellia distans* [J].Pratacultural Science,2019,36(12):3093-3099.
- [25] 李 贾.氮沉降对蒙古栎和红松种子扩散和幼苗更新的影响 [D].南昌:江西师范大学,2018.  
Li J.Effects of nitrogen deposition on seed dispersal and seedling regeneration of *Quercus mongolica* and *Pinus koraiensis* [D].Nanchang:Jiangxi Normal University,2018.
- [26] Mator M G. 模拟酸沉降和氮沉降对南方主要树种种子萌发, 幼苗形态及生理特征的影响[D].福建农林大学,2020.  
Mator M G.Effects of simulated acid and nitrogen deposition on seed germination, seedling morphology and physiological characteristics of main tree species in south China [D].Fujian Agriculture and Forestry University,2020.
- [27] Malagoli M, Canal A D, Quaggiotti S, et al. Differences in nitrate and ammonium uptake between Scots pine and European larch[J]. Plant and Soil, 2000, 221(1): 1-3.
- [28] 刘春娜,崔晓阳,郭亚芬,等.铵态氮与硝态氮对比对落叶松幼苗生长的影响[J].东北林业大学学报,2011,39(1):28-30.  
Liu C N,Cui X Y,Guo Y F,et al.Effects of different ratios of  $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$  on growth of *Larix gmelini* seedlings [J].Northeast Forestry University,2011,39(1):28-30.
- [29] 常笑超,刘 勇,李进宇,等.不同形态氮素对比对雄性毛白杨苗木生长的影响[J].北京林业大学学报,2018,40(9):63-71.  
Chang X C,Liu Y,Li J Y,et al.Effects of different nitrogen forms and ratios on growth of male *Populus tomentosa* seedlings [J].Beijing Forestry University,2018,40(9):63-71.
- [30] 张世虎,张 悦,马晓玉,等.大气氮沉降影响草地植物物种多样性机制研究综述 [J].生态学报,2022,42(4):1252-1261.  
Zhang S H,Zhang Y,Ma X Y,et al.Mechanisms underlying loss of plant biodiversity by atmospheric nitrogen deposition in grasslands [J].Acta Ecologica Sinica,2022,42(4):1252-1261.