

氮沉降模拟对杉木和枫香种子萌发的影响

林智榕^{1,2}, 赖慧捷^{1,2}, 范辉华³, 李成珺^{1,2}, 陈水兰^{1,2}, 刘爱琴^{*1,2}

(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】为探讨氮沉降对主要造林树种种子萌发的影响机制。【方法】利用硝态氮 (KNO_3)、铵态氮 ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$)、混合氮 (NH_4NO_3) 为三种氮源, 通过模拟氮沉降试验, 设置 4 个不同氮沉降梯度 (低氮沉降、中氮沉降、高氮沉降和正常对照), 比较不同氮沉降处理对杉木和枫香种子发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数的影响, 揭示杉木和枫香种子对不同形态氮沉降的响应机制, 为筛选氮沉降适应能力强的造林树种提供科学依据。【结果】越高浓度氮沉降对种子萌发的抑制作用越明显, 低浓度的 NH_4^+ 能够促进枫香种子的萌发, 且枫香种子在 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 NH_4NO_3 氮源的低氮沉降处理下对其发芽势和发芽指数有促进作用。【结论】在不同形态氮源及不同氮沉降处理对杉木和枫香种子的发芽指标有不同程度的影响, 随氮沉降浓度的提高, 氮沉降对两个树种种子发芽的抑制作用增强; 0.2%、0.6% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 0.2%、0.6% NH_4NO_3 处理下枫香对氮沉降的耐受程度大于杉木, 0.2%、0.6%、1.2% KNO_3 , 1.2% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 1.2% NH_4NO_3 处理下杉木对氮沉降的耐受程度大于枫香; 0.2% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 处理有利于枫香种子萌发; 氮沉降浓度越高其对杉木和枫香种子萌发的抑制作用越大。

关键词: 氮沉降; 种子萌发; 杉木; 枫香

Effects of Nitrogen Deposition Simulation on Seed Germination of *Cunninghamia lanceolata* and *Liquidambar formosana*

Lin Zhirong^{1,2}, Lai Huijie^{1,2}, Fan Huihua³, Li Chengjun^{1,2}, Chen Shuilan^{1,2}, Liu Aiqin^{*1,2}

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China; 2. Chinese Fir Engineering Technology Research Center of the State Forestry Administration, Fuzhou, Fujian 350002, China; 3. Fujian Academy of Forestry Sciences, Fuzhou 350012, Fujian)

Abstract: 【Objective】In order to explore the influence mechanism of nitrogen deposition on seed germination of major afforestation tree species. 【Method】using nitrate nitrogen (KNO_3), ammonium nitrogen ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) and mixed nitrogen (NH_4NO_3) as three nitrogen sources, the simulated nitrogen deposition experiment was carried out. , set up 4 different nitrogen deposition gradients (low nitrogen deposition, medium nitrogen deposition, high nitrogen deposition and normal control) to compare the effects of different nitrogen deposition treatments on the germination rate, germination potential, germination index and vigor index of *Cunninghamia lanceolata* and *Liquidambar formosana* seeds. To reveal the response mechanism of *Cunninghamia lanceolata* and *Liquidambar formosana* seeds to different forms of nitrogen deposition, and to provide a scientific basis for screening afforestation tree species with strong nitrogen deposition adaptability. 【Result】The higher the concentration of nitrogen deposition was, the more obvious the inhibitory effect on seed germination was. Low concentration of NH_4^+ could promote the germination of *Liquidambar formosana* seeds, and the germination potential and germination index of *Liquidambar formosana* seeds were promoted under the low nitrogen deposition treatment of $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ and NH_4NO_3 nitrogen sources. 【Conclusion】Different forms of nitrogen sources and different nitrogen deposition treatments had different effects on the germination indexes of Chinese fir and *Liquidambar formosana* seeds. With the increase of nitrogen deposition concentration, the inhibitory effect of nitrogen deposition on seed germination of two tree species was enhanced. Under 0.2%, 0.6% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ and 0.2%, 0.6% NH_4NO_3 treatments, the tolerance of *Liquidambar formosana* to nitrogen deposition was greater than that of Chinese fir. Under 0.2%, 0.6%, 1.2% KNO_3 , 1.2% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ and 1.2% NH_4NO_3 treatments, the tolerance of Chinese fir to nitrogen deposition was greater than that of *Liquidambar formosana*. 0.2% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ treatment was beneficial to the germination of *Liquidambar formosana* seeds. The higher the concentration of nitrogen deposition, the greater the inhibitory effect on the germination of Chinese fir and *Liquidambar formosana* seeds.

Key words: nitrogen deposition; seed germination; *Cunninghamia lanceolata*; *Liquidambar formosana*

近年来由于工业的发展、畜牧业集约化经营、农业含氮化肥使用、化石燃料的燃烧及其他人类活动导致大气氮排放大大增加,使全球氮素循环发生变化,从而引起大气氮沉降剧增。东亚、美国和欧洲是全球大气氮沉降的重要区域^[2]。我国已成为继欧洲和美国后的全球3大氮沉降集中区之一^[3,4]。大气氮沉降在一定程度上影响着森林生态系统的生产力和稳定性。适量的氮沉降在短期内有利于植物生长,高浓度氮沉降可能超出植物自身的可承受范围,打乱植物体内的生理进程,在一定程度上抑制了植物的生长^[5]。氮沉降增加初期能够促进针叶树种的生长,而抑制阔叶树种的生长^[6]。因此,揭示林木种子对大气氮沉降的响应机制具有重要现实意义。

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是我国南方人工林面积最大的造林树种,在我国人工林中占重要地位^[7],枫香(*Liquidambar formosana*)是我国南方荒山造林的重要乡土阔叶树种,有“荒山先锋树种”的美誉^[8]。虽然众多学者进行了氮沉降对森林生态系统影响进行了大量研究,取得了一些研究成果,主要聚焦于氮沉降对林木生长、凋落物分解、养分循环、土壤呼吸等方面^[9,10,11,12],但有关氮沉降对森林植物更新及其种子萌发方面的影响研究较少,而且目前的研究多是以单一形态的氮源进行氮沉降模拟^[13,14,15,16,17],而自然界大气中的氮沉降成分复杂,有多种形态的氮源,因此,用单一形态氮源进行氮沉降模拟难以揭示氮沉降对林木的内在影响机制。

有鉴于此,本研究以南方主要的造林树种杉木、枫香为研究对象,利用硝态氮(KNO_3)、铵态氮($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$)、混合氮(NH_4NO_3)为氮源,通过氮沉降的模拟试验,比较不同氮沉降处理对杉木和枫香种子发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数的影响,研究杉木和枫香种子对不同形态氮沉降的响应机制,为全球气候变化背景下人工造林经营提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验的杉木种子来自福建省三明市尤溪国有林场的第三代种子园,枫香种子来自福建省南平市建瓯林业局。

1.2 试验设计

根据福建氮沉降的实际情况以及前人的研究结果,选择三种不同形态的氮:硝态氮(KNO_3)、铵态氮($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$)、混合氮(NH_4NO_3)作为本试验的氮沉降氮源,分别以N1、N2、N3表示。每种形态的氮源处理设置4个浓度梯度,分别为0、0.2%、0.6%、1.2%,以CK、LN、MN、HN表示,共设12个不同处理,每个处理重复4次。

表1 杉木和枫香不同处理下平均发芽率

Tab. 1 Average germination rate of Chinese fir and <i>Liquidambar formosana</i> under different treatments		
处理 treatment	杉木发芽率 Chinese fir germination rate(%)	枫香发芽率 <i>Liquidambar formosana</i> germination rate(%)
CK	55.00±6.63	76.00±10.71
N1LN	48.00±10.46	70.50±3.41
N1MN	38.50±1.00	59.00±11.83
N1HN	32.00±1.63	55.00±10.00
N2LN	47.00±8.25	78.50±6.61
N2MN	38.00±5.89	74.50±5.98
N2HN	14.00±5.66	71.00±11.14
N3LN	44.00±5.42	72.00±10.95
N3MN	38.50±4.12	64.00±16.17
N3HN	19.00±6.83	31.00±14.38

注:表中数据为测定平均值±标准差。Note: The data in the table are mean ± standard deviation.

1.3 试验方法

在福建农林大学采用人工气候箱进行种子萌发试验,将种子放在玻璃培养皿中进行相关的种子萌发试验。将供试种子用浓度为 0.5%的高锰酸钾溶液浸泡 30min 左右进行杀菌和消毒处理[18],用超纯水冲洗至少 6 遍后置于超纯溶液中浸泡 24 小时后,去除漂浮在溶液上层的残渣及种子,然后将溶液倒出并取出沉底的种子置于滤纸上吸干其表面水分。将 50 粒已处理的种子放在已经过高压灭菌消毒并铺有两层滤纸的玻璃培养皿中,分别加入 5ml 不同形态氮处理的溶液,放置在空气相对湿度 95%、温度 25℃的人工气候箱中进行培养。在培养期间每 2d 更换一次滤纸,并根据培养皿中种子的湿润情况加入相同体积且不超过 5ml 的相对应处理液,保持相同湿润程度。每天早上 10:00-12:00 记录并观察种子的最新萌发情况,直到最后连续 3d 都没有再出现新萌发的种子时,停止观察。试验完成后测定全部萌发种子的植株根长、植株芽长,根据相关方法计算出种子的发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数等指标。

发芽率: $G = \text{发芽的种子数} / \text{供试种子总数} \times 100\%$ 。;

发芽势 = 发芽高峰期发芽的种子数 / 供试种子总数 $\times 100\%$;

发芽指数: $GI = \sum Gt / Dt$ 式中: Gt ——不同发芽时间(t)的发芽率; Dt ——为不同的发芽试验天数(d);

[19]

活力指数: $VI = GI \times S$ 式中: S 为平均胚根长长度;

1.4 数据处理与统计方法

采用 SPSS24.0 软件进行统计分析,采用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 和 Duncan's ($P = 0.05$) 法进行多重比较。使用 Microsoft Excel 进行数据处理及图表绘制。

2 结果与分析

2.1 不同氮沉降对杉木和枫香种子发芽率的影响

图 1 可知,以硝态氮 (N_1) 为氮源,不同浓度氮沉降处理下,杉木(A)、枫香(B)种子的发芽率均低于对照,在较高浓度的 MN、HN 处理下均显著低于对照 ($P < 0.05$),而在低浓度 LN 处理下略低于对照。以铵态氮 (N_2) 为氮源,不同浓度氮沉降处理下,除枫香(B)种子 LN 处理下发芽率略高于对照外,其余杉木(A)、枫香(B)种子的发芽率均低于对照,其中杉木(A)种子在较高浓度 MN、HN 处理下均显著低于对照 ($P < 0.05$),而枫香(B)种子在其浓度下却均表现为略低于对照。以混合氮 (N_3) 为氮源,不同浓度氮沉降处理下,杉木(A)、枫香(B)种子的发芽率均低于对照,在杉木(A)种子的所有处理与枫香(B)种子 HN 处理下均显著低于对照 ($P < 0.05$),而在枫香(B)种子 LN、MN 处理下略低于对照。在不同氮源的 LN 处理下,除枫香(B)种子的铵态氮 (N_2) 处理略高于对照外,其余杉木(A)、枫香(B)种子的发芽率均低于对照。在不同氮源的 MN 处理下,杉木(A)种子的三种氮源处理均显著低于对照 ($P < 0.05$),枫香(B)种子略低于对照,但差异不显著。在不同氮源的 HN 处理下的杉木(A)和枫香(B)种子发芽率,除枫香(B)种子的铵态氮 (N_2) 处理下略低于对照外,其余处理均显著低于对照 ($P < 0.05$)。杉木(A)、枫香(B)种子发芽率在不同氮源处理下随氮沉降浓度的增大,除枫香(B)种子 N_2 氮源呈先上升后下降趋势外,其余均呈减小趋势,其中杉木(A)种子在 N_2 氮源的 HN 处理下的发芽率最低,为 14%,枫香(B)种子在 N_3 氮源的 HN 处理下的发芽率最低,为 31%,在 N_2 氮源的 LN 处理下高于对照 2.5%。

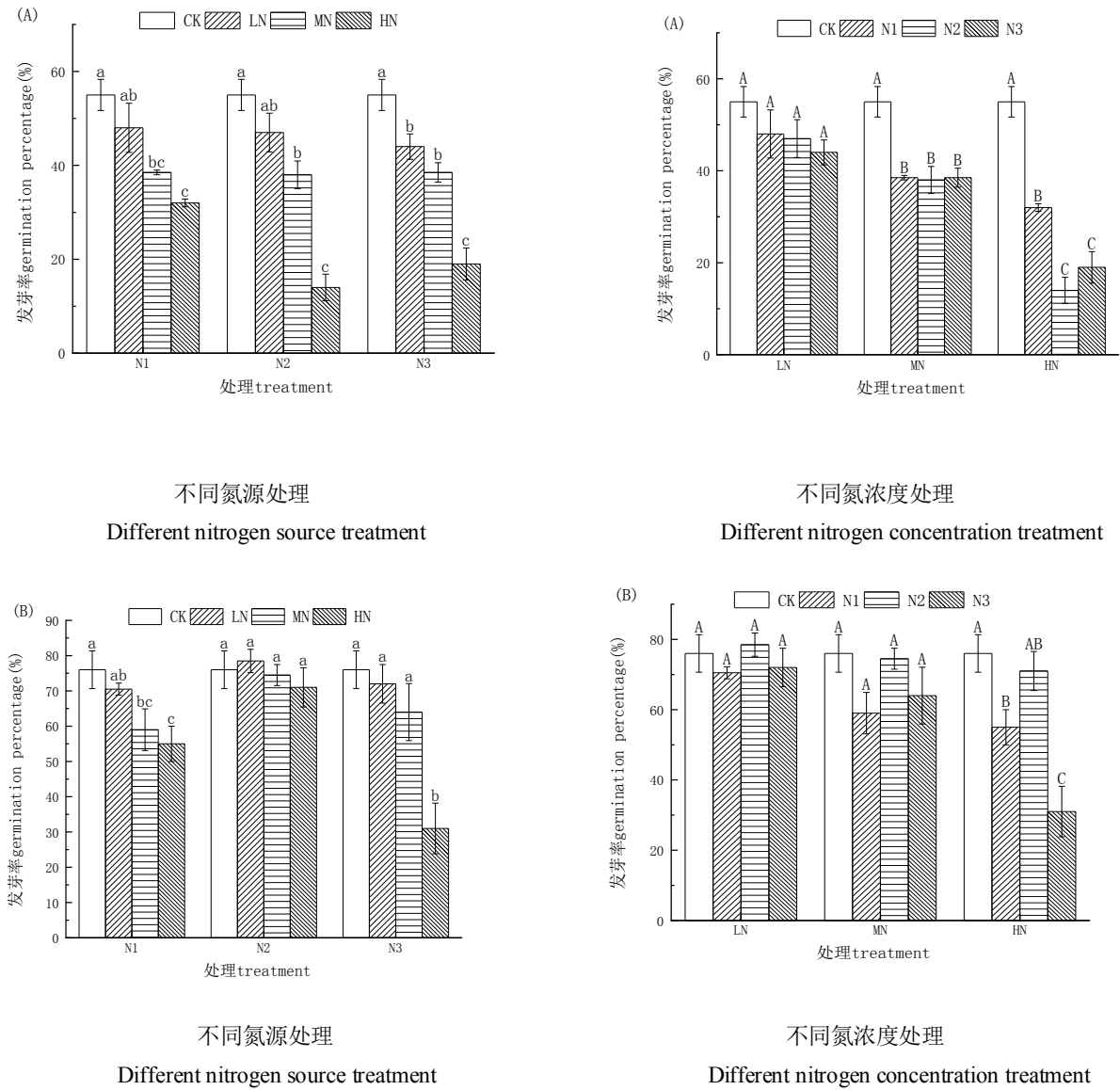


图 1 不同类型氮沉降对杉木(A)和枫香(B)种子发芽率的影响

Fig.1 The effects of different types of nitrogen deposition on the germination rate of *Cunninghamia lanceolata* (A) and *Liquidambar formosana* (B) seeds

注: 小写字母代表同一氮源不同浓度的差异性(p<0.05), 大写字母代表同一浓度不同氮源的差异性(p<0.05) (下同)

Note: Lowercase letters represent the difference of different concentrations of the same nitrogen source (p<0.05), uppercase letters represent the difference of different nitrogen sources at the same concentration (p<0.05) (the same below)

2.2 不同氮沉降对杉木和枫香种子发芽势的影响

由图 2 可知,以硝态氮(N1)为氮源,不同浓度氮沉降处理下,杉木(A)、枫香(B)种子的发芽势均显著低于对照($P<0.05$)。以铵态氮(N2)为氮源,不同浓度氮沉降处理下,除枫香(B)种子的发芽势在LN处理下略高于对照外,其余杉木(A)、枫香(B)种子的发芽势均显著低于对照($P<0.05$)。以混合氮(N3)为氮源,不同浓度氮沉降处理下,除枫香(B)种子的发芽势在低浓度LN处理下略高于对照外,其余杉木(A)、枫香(B)种子的发芽势均显著低于对照($P<0.05$)。在不同氮源的LN处理下,杉木(A)种子的发芽势在N1,N2氮源处理显著小于对照($P<0.05$),在N3氮源处理下略低于对照,枫香(B)种子的发芽势在N2,N3氮源处理下略高于对照,在N1氮源处理下略低于对照。在不同氮源的MN处理下,杉木(A)、枫香(B)种子的发芽势均显著低于对照($P<0.05$)。在不同氮源的HN处理下,杉木(A)、枫香(B)种子的发芽势均显著低于对照($P<0.05$)。杉木(A)、枫香(B)种子的发芽势在不同氮源处理下随氮浓度的增大,除枫香(B)种子的N2,N3氮源处理呈先上升后下降的趋势外,其余均呈现下降趋势。杉木(A)种子在N2,N3氮源的HN处理下的发芽势最低,均为0.5%,枫香(B)种子在N1,N3氮源的HN处理的发芽势为0,在N2,N3氮源下的LN处理分别高于对照2.5%和5%。

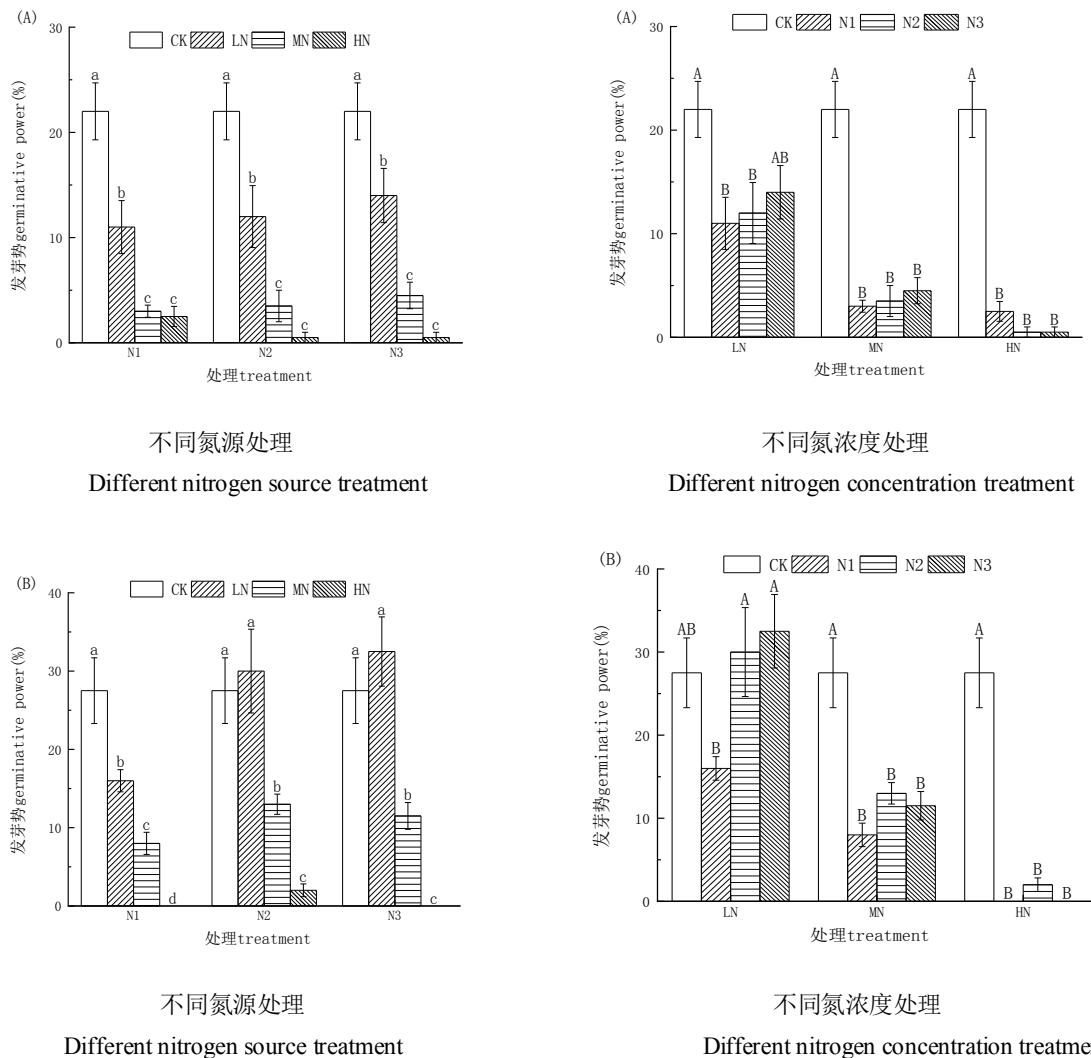


图 2 不同类型氮沉降对杉木(A)和枫香(B)种子发芽势的影响

Fig.2 The effects of different types of nitrogen deposition on the germination vigor of *Cunninghamia lanceolata* (A) and *Liquidambar formosana* (B) seeds

2.3 不同氮沉降对杉木和枫香种子发芽指数的影响

由图3可知,以硝态氮(N1)为氮源,不同浓度氮沉降处理下,杉木(A)、枫香(B)种子的发芽指数在LN处理下略低于对照,在MN,HN处理下显著低于对照(P<0.05)。以铵态氮(N2)为氮源,不同浓度氮沉降处理下,杉木(A)种子在低浓度LN处理下的发芽指数略低于对照而枫香(B)种子在低浓度LN处理下略高于对照,其余处理的杉木(A)、枫香(B)种子发芽指数均显著低于对照(P<0.05)。以混合氮(N3)为氮源,不同浓度氮沉降处理下,枫香(B)种子在低浓度LN处理下的发芽指数略高于对照,在中浓度MN处理下略低于对照,其余处理的杉木(A)、枫香(B)种子的发芽指数均显著低于对照(P<0.05)。在不同氮源LN的处理下,除枫香(B)种子在N2,N3氮源处理下的发芽指数略高于对照外,其余杉木(A)、枫香(B)种子的发芽指数均略低于对照。在不同氮源MN的处理下,除枫香(B)种子在N2氮源处理下的发芽指数略低于对照外,其余杉木(A)、枫香(B)种子的发芽指数均显著低于对照(P<0.05)。在不同氮源HN的处理下,杉木(A)、枫香(B)种子的发芽指数均显著低于对照(P<0.05)。杉木(A)、枫香(B)种子的发芽指数在不同氮源处理下随氮浓度的增大,除枫香(B)种子在N2,N3氮源处理下呈先上升后下降趋势外,其余均呈下降趋势。杉木(A)种子在N2氮源的HN处理下的发芽指数最低,为5.87%,枫香(B)种子在N3氮源的HN处理下的发芽指数最低,为11.45%,在N2,N3氮源的LN处理分别高于对照4.84%和0.47%。

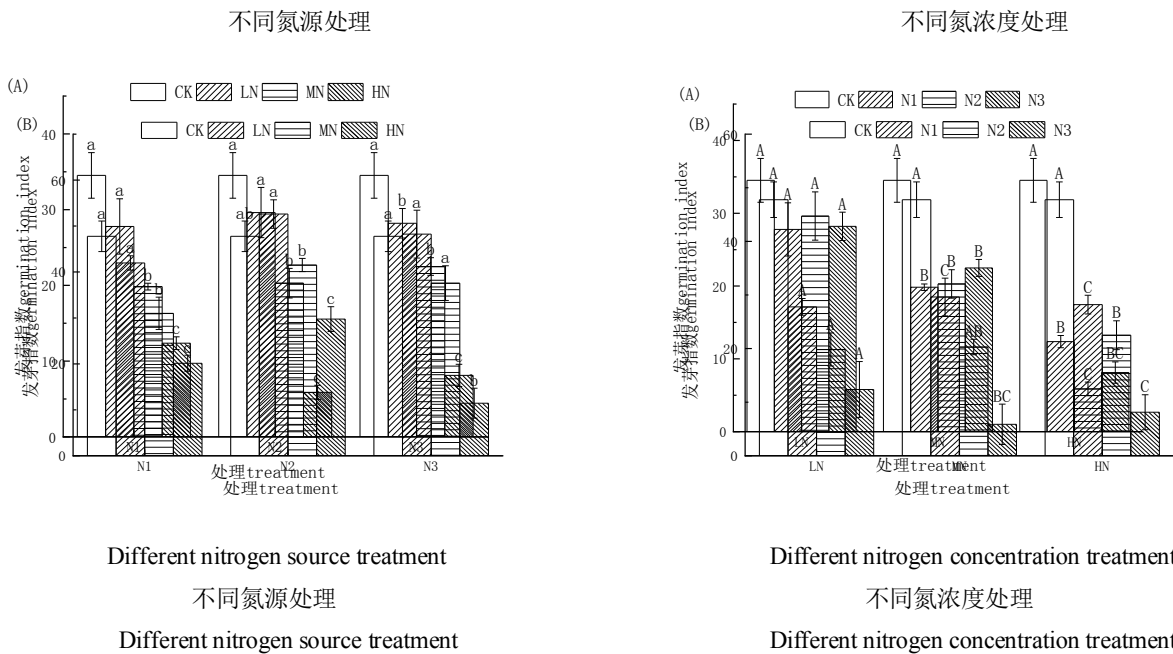


图3 不同类型氮沉降对杉木(A)和枫香(B)种子发芽指数的影响

Figure 3 The effects of different types of nitrogen deposition on the germination index of *Cunninghamia lanceolata* (A) and *Liquidambar formosana* (B) seeds

2.4 不同氮沉降对杉木和枫香种子活力指数的影响

由图4可知,以硝态氮(N1)、铵态氮(N2)、混合氮(N3)为氮源,不同浓度氮沉降处理下,杉木(A)、枫香(B)种子的活力指数均显著低于对照(P<0.05)。在不同氮源的LN处理下,除枫香(B)种子在N2氮源处理下的活力指数略低于对照外,其余杉木(A)、枫香(B)种子的发芽指数均显著低于对照(P<0.05)。在不同氮源的MN,HN处理下,杉木(A)、枫香(B)种子的发芽指数均显著低于对照(P<0.05)。杉木(A)、枫香(B)种子活力指数在不同氮源处理下随氮浓度的增大,均呈现下降趋势,且均在N3氮源HN处理下的活力指数最低,分别为0.24%和0.69%。

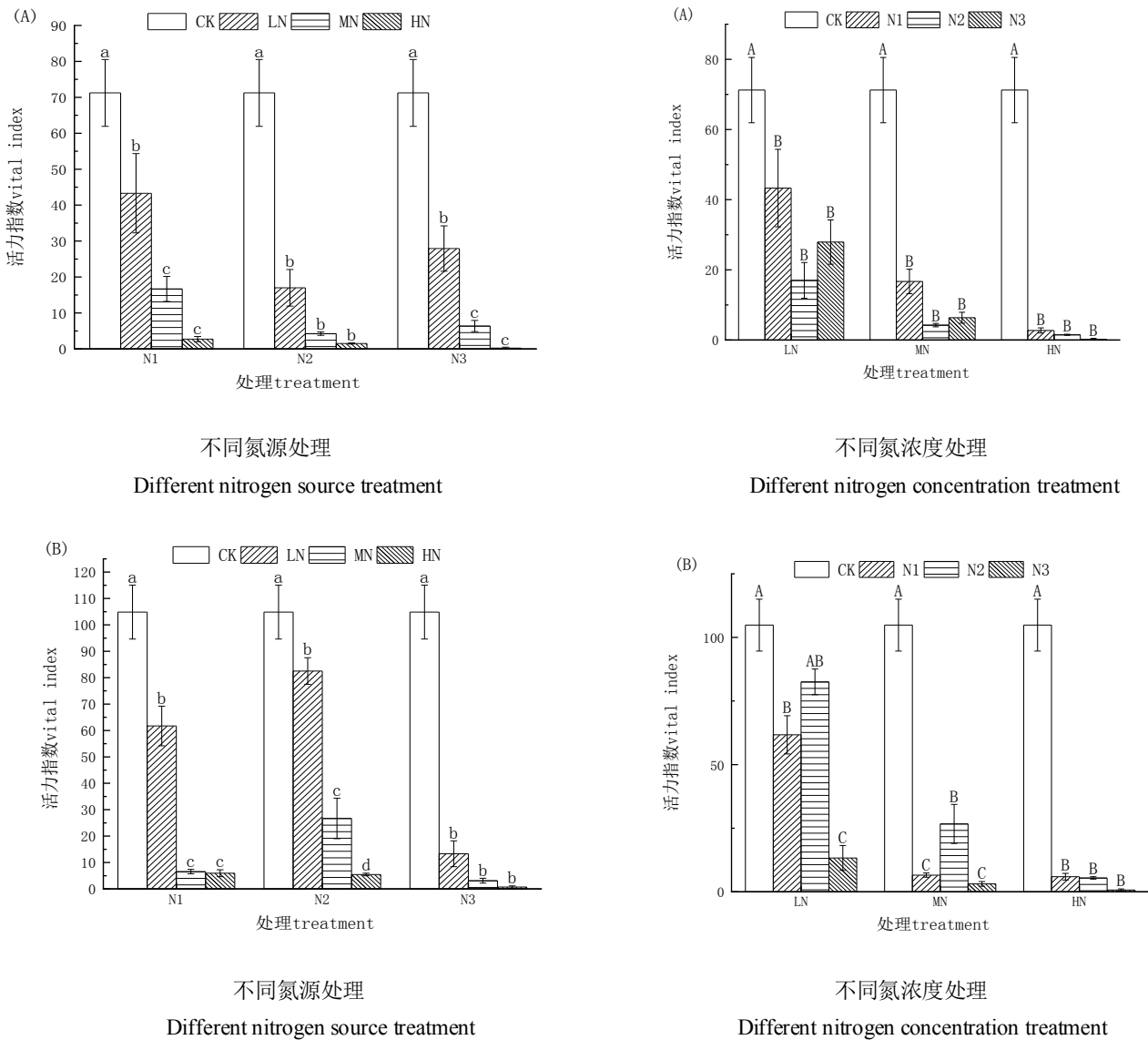


图4 不同类型氮沉降对杉木(A)和枫香(B)种子活力指数的影响

Figure 4 The effects of different types of nitrogen deposition on the seed vigor index of *Cunninghamia lanceolata* (A) and *Liquidambar formosana* (B)

3 讨论

氮素是促进种子萌发的一个重要营养素之一^[20]。研究发现,通过一定浓度范围下的氮添加能够有效促进种子的萌发^[13,14],但如果添加过高浓度的外源氮可能会对植物种子的萌发有抑制作用^[9,12]。本研究表明,除0.2% (NH₄)₂SO₄处理能够提高枫香种子发芽率外,其余处理均对杉木和枫香种子的萌发率有抑制作用。这与王雅聪^[10]的研究结果相似,低浓度(0~0.16%)的氮添加(硝酸铵)可提高碱茅的发芽率、发芽指数而高浓度的氮沉降会使碱茅发芽率、发芽指数与活力指数显著降低,付园园^[21]也得出类似结论,低浓度硝酸

铵对亚麻种子的发芽率、发芽势、萌发指数均有促进作用,而随着硝酸铵浓度的升高,其抑制作用逐渐增强。这表明低浓度的 NH_4^+ 能够促进枫香种子的萌发,且枫香种子在 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 NH_4NO_3 氮源的低氮沉降处理下对其发芽势和发芽指数有促进作用,进一步说明较低浓度的 NH_4^+ 能提高枫香种子的活力促使其萌发。

植物吸收带电荷的氮形态通常会释放出相同电荷的有机或无机离子来平衡细胞内的电荷^[22],硝态氮和铵态氮中的 NO_3^- 和 NH_4^+ 对种子萌发有不同的影响,因为它们带有相反离子电荷^[23]。本研究中,枫香种子的发芽率在混合氮中的发芽率受到抑制,这与 Huiyuan Cheng^[16] 等的研究结果不同,他们发现混合氮肥对小麥种子萌发的促进作用大于单一氮素形态,导致其差异的主要原因可能是因为在 Huiyuan Cheng 等的研究中混合氮肥为有机氮与无机氮混合而本研究混合氮的氮形态均为无机氮。

研究表明,在不同氮源及不同水平的氮沉降对种子的发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数有不同程度的抑制作用,且随着氮沉降水平的提高其抑制作用增强,这表明越高浓度氮沉降对种子萌发的抑制作用越明显,付园园^[21]和王雅聪^[10]也发现随氮沉降水平的提高各项发芽指标均逐渐降低,郑霞^[13]也发现含氮量越高的尿素溶液对鳢肠种子萌发的抑制作用越大。研究发现,过量氮沉降会抑制种子的萌发,种子萌发的基本要求是水分吸收^[24],增加氮浓度会减弱或抑制种子对水的吸收^[25],从而抑制种子的发芽率和发芽势。研究表明,高氮沉降会极大抑制种子的发芽势,枫香种子在 KNO_3 和 NH_4NO_3 高氮沉降下发芽势为 0,其原因可能是因为高浓度的氮素大大的减缓了种子对水分的吸收^[25],导致种子萌发的时间延长,甚至使种子失活,胡正华^[9]等发现过量氮沉降延迟大豆种子的萌发时间,裴昊斐^[12]也发现氮沉降会延缓种子萌发的速度。

4 结论

在不同氮源及不同浓度氮沉降处理中对杉木和枫香种子的发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数均有不同程度的影响。随氮沉降浓度的提高,氮沉降对两个树种种子发芽特性的抑制作用越强。其萌发特性对不同类型氮沉降的响应存在一定差异,在不同氮源及不同浓度氮沉降中,0.2%、0.6% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 0.2%、0.6% NH_4NO_3 处理下枫香对氮沉降的耐受程度大于杉木,0.2%、0.6%、1.2% KNO_3 , 1.2% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 1.2% NH_4NO_3 处理下杉木对氮沉降的耐受程度大于枫香。0.2% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 有助于枫香种子萌发。

参考文献

- [1]Yi Cheng et al. Nitrogen deposition affects both net and gross soil nitrogen transformations in forest ecosystems: A review[J]. Environmental Pollution, 2018, 244 : 608-616.
- [2]JiaYanlong et al. Global inorganic nitrogen dry deposition inferred from ground- and space-based measurements.[J]. Scientific reports, 2016, 6(1) : 19810.
- [3]Xuejun Liu et al. Nitrogen deposition and its ecological impact in China: An overview[J]. Environmental Pollution, 2011, 159(10) : 2251-2264.
- [4]顾峰雪,黄玫,张远东,闫慧敏,李洁,郭瑞,钟秀丽. 1961—2010 年中国区域氮沉降时空格局模拟研究[J]. 生态学报,2016,36(12):3591-3600.
- [5]鲁显楷,莫江明,李德军,张炜,方运霆. 鼎湖山主要林下层植物光合生理特性对模拟氮沉降的响应[J]. 北京林业大学学报, 2007(06):1-9.
- [6]方运霆,莫江明,周国逸,薛璟花. 鼎湖山主要森林类型植物胸径生长对氮沉降增加的初期响应[J]. 热带亚热带植物学报, 2005(03):198-204.
- [7]陈代喜,陈琴,蒙跃环,黄开勇,黄海仲,刘凡胜,韦家国,莫亮荣. 杉木大径材高效培育技术探讨[J].南方农业学报, 2015,46(02):293-298.
- [8]刘就,刘和平,陈考科,邓石婷. 枫香种子性状研究进展[J]. 福建林业科技, 2007,(02):190-192+201.
- [9]胡正华,索福喜,刘巧辉,吴芳芳,陈书涛. 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(06):2397-2400.
- [10]王雅聪,王菲,王聪聪,杨叶研,马杰宇,田蓉,夏方山. 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.

- [11]Matoor Mohsin Gilani. 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.
- [12]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]. 中国林业科学研究院, 2019.
- [13]郑霞, 张雷, 赵亚庆, 邵世光. 不同含氮量的尿素溶液对鳢肠种子萌发的影响[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(04): 731-733.
- [14]何淑玲, 马令法, 杨敬军, 常毓巍. 不同浓度尿素对唐古特红景天种子萌发的影响[J]. 北方园艺, 2013(03): 173-175.
- [15]陈永密, 陈亮明, 张巧琴. 尿素浸种对翅荚木种子活力的影响[J]. 种子, 1995(02): 50-51.
- [16]Huiyuan Cheng, Bingde Wu, Shu Wang, Mei Wei & Congyan Wang (2021) Nitrogen application and osmotic stress antagonistically affect wheat seed germination and seedling growth, *International Journal of Phytoremediation*, 23:12, 1289-1300.
- [17]Zhang T, Liu M, Huang X, et al. Direct effects of nitrogen addition on seed germination of eight semi-arid grassland species. *Ecol Evol*. 2020;00:1-8.
- [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]. 海南师范大学, 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(03): 52-57.
- [20]Vitousek, P. M., Porder, S., Houlton, B. Z., & Chadwick, O. A. (2010). Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions. *Ecological Applications*, 20(1), 5-15.
- [21]付园园, 沙伟. 不同供氮水平对亚麻种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 种子, 2005(09): 1-3.
- [22]Mérigout, P., Gaudon, V., Quilleré, I., Briand, X., & Daniel-Vedele, F. (2008). Urea Use Efficiency of Hydroponically Grown Maize and Wheat. *Journal of Plant Nutrition*, 31(3), 427-443.
- [23]CURREY, P. M., JOHNSON, D., SHEPPARD, L. J., LEITH, I. D., TOBERMAN, H., Van Der WAL, R., ... ARTZ, R. R. E. (2009). Turnover of labile and recalcitrant soil carbon differ in response to nitrate and ammonium deposition in an ombrotrophic peatland. *Global Change Biology*, 16(8), 2307-2321.
- [24]Xu-dong Huang, Dong Wang, Pei-pei Han, Wen-chuan Wang, Qing-jie Li, Xiao-li Zhang, Ming-wei Ma, Bao-jian Li, Shi-jie Han, Spatial Patterns in Baseflow Mean Response Time across a Watershed in the Loess Plateau: Linkage with Land-Use Types, *Forest Science*, Volume 66, Issue 3, June 2020, Pages 382-391.
- [25]Wen, D., Xu, H., Xie, L. et al. A loose endosperm structure of wheat seed produced under low nitrogen level promotes early germination by accelerating water uptake. *Sci Rep* 7, 3116 (2017).