

尾巨桉和杉木幼苗氮和磷含量对模拟氮-硫沉降的响应

杜 锟^{1a}, 龚秦文^{1a}, 林勇明^{1a,1b}, 吴承祯^{1a,1b,2,①}, 洪 伟^{1a,1b}, 李 健^{1a,1b}

(1. 福建农林大学: a. 林学院, b. 福建省高校森林生态系统过程与经营重点实验室, 福建 福州 350002;
2. 武夷学院生态与资源工程系, 福建 武夷山 354300)

摘要: 用 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 和 Na_2SO_4 模拟氮-硫沉降, 采用二因素三水平法对氮-硫单一及复合沉降 6 个月后尾巨桉 (*Eucalyptus urophylla* S. T. Blake \times *E. grandis* Hill ex Maiden) 和杉木 [*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.] 幼苗根、茎、叶片和全株中的全氮和全磷含量及叶片 N:P 比的变化进行比较; 在此基础上, 分析了各器官间以及各器官与全株间全氮和全磷含量的相关性。对尾巨桉的研究结果表明: 低和高水平 (50 和 $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 单一氮沉降条件下各器官和全株的全氮含量均显著高于对照、叶片 N:P 比也高于对照, 而各器官和全株的全磷含量总体上与对照无显著差异; 在低和高水平 (15 和 $30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 单一硫沉降及氮-硫复合沉降条件下, 各器官和全株的全氮含量、全株的全磷含量及叶片的 N:P 比大多显著高于对照, 而各器官的全磷含量则与对照无显著差异。对杉木的研究结果表明: 低和高水平单一氮沉降条件下茎、叶和全株的全氮含量均显著高于对照、根的全氮含量则低于对照, 各器官和全株的全磷含量及叶片的 N:P 比与对照无显著差异; 低和高水平单一硫沉降条件下根、叶片和全株的全氮含量及叶片的 N:P 比大多显著高于对照, 而茎的全氮含量和全株的全磷含量则显著低于对照, 各器官的全磷含量与对照无显著差异; 氮-硫复合沉降条件下各器官和全株的全氮含量及叶片的 N:P 比大多显著高于对照, 而各器官和全株的全磷含量则与对照无显著差异。从全株的全氮和全磷含量以及叶片 N:P 比的变幅看, 2 个树种全株的全氮含量对氮-硫复合沉降的响应最强。此外, 氮-硫沉降条件下 2 个树种各器官间的全氮和全磷含量总体无显著相关性, 仅尾巨桉根与叶片的全磷含量呈显著正相关; 而尾巨桉各器官与全株的全氮和全磷含量呈显著或极显著正相关, 杉木叶片与全株的全氮和全磷含量及其茎与全株的全磷含量均呈显著正相关。研究结果显示: 在一定水平的短期氮-硫沉降条件下 2 个树种幼苗的氮和磷含量均增加, 其中氮含量对氮-硫复合沉降的响应效应最强、磷含量对单一氮沉降的响应效应最强; 尾巨桉对氮-硫沉降的响应效应强于杉木, 且其生长限制元素呈现由氮限制转向氮-磷共同限制的趋势。

关键词: 氮-硫沉降; 尾巨桉; 杉木; 氮含量; 磷含量; 相关性分析

中图分类号: Q948.11; X517; S719 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2015)04-0028-10
DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2015.04.04

Responses of nitrogen and phosphorus contents in seedlings of *Eucalyptus urophylla* \times *E. grandis* and *Cunninghamia lanceolata* to simulated nitrogen-sulfur depositions DU Kun^{1a}, GONG Qinwen^{1a}, LIN Yongming^{1a,1b}, WU Chengzhen^{1a,1b,2,①}, HONG Wei^{1a,1b}, LI Jian^{1a,1b} (1. Fujian Agriculture and Forestry University: a. College of Forestry, b. Key Laboratory of Fujian Forest Ecosystem Process and Management of Fujian University, Fuzhou 350002, China; 2. College of Ecology and Resources Engineering, Wuyi University, Wuyishan 354300, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2015, 24(4): 28-37

Abstract: Simulated nitrogen-sulfur depositions by $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ and Na_2SO_4 , changes in total nitrogen and total phosphorus contents in root, stem, leaf and whole plant and N:P ratio in leaf of *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake \times *E. grandis* Hill ex Maiden and *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook. seedlings after nitrogen-sulfur single and complex deposited for six months were compared by two factors-

收稿日期: 2015-02-04

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20123515110011); 福建省科学技术厅重大专项项目(2012NZ01)

作者简介: 杜 锟(1989—), 男, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要从事森林生态学研究。

①通信作者 E-mail: fjwcz@126.com

three levels method. On this basis, the correlations in total nitrogen and total phosphorus contents among organs and between organs and whole plant were analyzed. The research results on *E. urophylla* × *E. grandis* show that under single nitrogen deposition condition with low and high levels (50 and $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), total nitrogen content in organs and whole plant is significantly higher than that of the control, N:P ratio in leaf is also higher than that of the control, while total phosphorus content in organs and whole plant is not generally significantly different to that of the control. Under conditions of single sulfur deposition with low and high levels (15 and $30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) and nitrogen-sulfur complex deposition, total nitrogen content in organs and whole plant, total phosphorus content in whole plant and N:P ratio in leaf are mostly significantly higher than those of the control, while total phosphorus content in organs is not significantly different to that of the control. The research results on *C. lanceolata* show that under single nitrogen deposition condition with low and high levels, total nitrogen content in stem, leaf and whole plant is significantly higher than that of the control, that in root is lower than that of the control, total phosphorus content in organs and whole plant and N:P ratio in leaf are not significantly different to those of the control. Under single sulfur deposition condition with low and high levels, total nitrogen content in root, leaf and whole plant and N:P ratio in leaf are mostly significantly higher than those of the control, while total nitrogen content in stem and total phosphorus content in whole plant are significantly lower than those of the control, and total phosphorus content in organs is not significantly different to that of the control. Under nitrogen-sulfur complex deposition conditions, total nitrogen content in organs and whole plant and N:P ratio in leaf are mostly significantly higher than those of the control, while total phosphorus content in organs and whole plant is not significantly different to that of the control. From the view of change ranges of total nitrogen and total phosphorus contents in whole plant and N:P ratio in leaf, the response of total nitrogen content in whole plant of two tree species to nitrogen-sulfur complex deposition is the strongest. In addition, under nitrogen-sulfur deposition conditions, there is generally no significant correlation in total nitrogen and total phosphorus contents among organs of two tree species, only total phosphorus content in root and leaf of *E. urophylla* × *E. grandis* appears significantly positive correlation. While, total nitrogen and total phosphorus contents in organs and whole plant of *E. urophylla* × *E. grandis* appear significantly or extremely significantly positive correlation, total nitrogen and total phosphorus contents in leaf and whole plant of *C. lanceolata*, and total phosphorus contents in its stem and whole plant all appear significantly positive correlation. It is suggested that under short-term nitrogen-sulfur deposition condition with a certain level, nitrogen and phosphorus contents in seedlings of two tree species all increase, in which, the response effect of nitrogen content to nitrogen-sulfur complex deposition is the strongest, and that of phosphorus content to single nitrogen deposition is the strongest. The response effect of *E. urophylla* × *E. grandis* to nitrogen-sulfur deposition is stronger than that of *C. lanceolata*, and its growth limiting elements appear the trend of changing from nitrogen limit to nitrogen-phosphorus common limit.

Key words: nitrogen-sulfur deposition; *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake × *E. grandis* Hill ex Maiden; *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.; nitrogen content; phosphorus content; correlation analysis

大气酸沉降是指低于 pH 5.6 的大气化学物质通过降水和重力作用等降落到地面的过程,主要分为氮沉降和硫沉降。现今,工业发展和人类活动等导致大气酸沉降量日趋增加,大气酸沉降过量已然成为全球问题,且有日益加剧的趋势^[1],目前中国已成为世界第三大氮、硫沉降区域^[2]。相关研究结果^[3-4]表明:长期及过量的大气酸沉降会对森林生态系统产生深远影响,并可引起土壤酸化,加剧土壤中盐基离子的流失和金属离子的溶出,严重时可导致植物死亡、森林衰退。为防治大气酸沉降过量并降低其危害,有些国家已率先对大气酸沉降进行治理,但经过人工治

理后氮沉降量不会显著减少^[5],而硫沉降量可有效减少^[6]。因此,探究未来高氮、低硫沉降条件下森林生态系统的响应特征对于促进森林生态系统正向演替、保护森林生态资源具有重要意义。目前,国外研究者已经开展了以氮饱和试验 NITREX (nitrogen saturation experiments) 和欧洲森林生态系统试验控制 EXMAN (experimental manipulation of forest ecosystems in Europe) 为代表的相关系统研究^[7],并对酸沉降下森林生态系统中植物的叶片形态^[8]和根系形态^[9]、养分平衡^[10]、土壤呼吸^[11]、土壤微生物和酶活性^[12]以及土壤金属离子^[13]等各方面的响应特征进行了系列研

究报道。而国内的相关研究主要集中在森林生态系统对氮沉降响应等方面^[14-17],关于氮-硫复合沉降的相关研究报道较少^[18-20],尤其缺乏关于氮-硫复合沉降条件下南方生态系统中不同树种植株养分分配格局差异的研究报道^[21]。

尾巨桉 (*Eucalyptus urophylla* S. T. Blake × *E. grandis* Hill ex Maiden) 为杂交速生丰产树种,适应性很强,其种植面积占桉树人工林总面积的40%^[22];杉木 [*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.] 为中国亚热带典型森林生态系统的重要树种,其人工林面积位居全国人工林总面积首位,是中国南方栽种最广泛的用材树种之一^[23],因此,尾巨桉和杉木在亚热带人工森林系统中均占有重要地位。然而,目前国内研究者仅对氮沉降下杉木全株养分、林下土壤和凋落物等的响应特征进行了相关研究。相关研究结果显示:氮沉降能够促进杉木枝条和叶片中N含量提高^[21]、造成杉木林下土壤养分和土壤酶活性发生显著变化^[24],并促进凋落物中N含量显著增长,但凋落物中C:N比却下降^[25]。迄今为止,关于氮-硫沉降下尾巨桉养分变化的相关研究极为少见,对短期氮-硫沉降下尾巨桉和杉木幼苗不同器官养分分配格局差异的相关研究尚未见报道,且对亚热带人工森林生态系统对酸沉降的响应机制的探究也明显不足。

鉴于此,作者结合氮-硫沉降的现状和相关研究结果^[5-6,12,24-30],采用二因素三水平法设计模拟短期(6个月)的不同水平氮-硫沉降条件,对尾巨桉和杉木幼苗根、茎、叶片和全株的全氮和全磷含量变化以及叶片的N:P比变化进行比较,并对根、茎、叶片和全株间全氮和全磷含量的相关性进行分析,以期明确尾巨桉和杉木幼苗体内氮和磷积累对氮-硫沉降的响应特征,为尾巨桉和杉木的栽培、繁育和推广等工作提供理论指导,并为研究大气酸沉降对中国南方亚热带森林生态系统的影响提供参考依据。

1 实验地概况和研究方法

1.1 实验地概况

实验地位于福建农林大学桉树研究中心的温室,地处福建省福州市(东经118°08′~120°31′、北纬25°15′~26°39′)。该区域属亚热带季风气候,年均日照时数1700~1980 h,年均降水量900~2100 mm,年均温20℃~25℃;最冷月为1月至2月,月均温

6℃~10℃;最热月为7月至8月,月均温33℃~37℃;年空气相对湿度约77%,无霜期326 d。

1.2 实验材料

供试尾巨桉和杉木1 a生实生苗均由福建省林业科学研究院提供,选择株高、胸径相对一致的幼苗进行实验。栽培基质为本地黄壤,依据严昶升^[31]的方法测定土壤基本化学性质,其中,土壤pH 4.6,有机碳、全氮、全磷和全钾含量分别为46.06、1.00、0.59和10.70 g·kg⁻¹,有效磷、速效钾和水解氮含量分别为4.32、38.10和21.13 mg·kg⁻¹。在塑料盆(规格29.0 cm×24.5 cm×27.0 cm)内装入15 kg栽培基质,于2012年3月21日植入尾巨桉和杉木幼苗,每盆栽种1株;先对幼苗进行恢复培养,期间每2天喷洒1次1/4 Hoagland营养液,每株100 mL;于2012年5月1日开始进行氮-硫沉降实验。

1.3 研究方法

1.3.1 实验设计及处理方法 依据二因素三水平实验设计原理,设置氮沉降量的3个水平为0、50和100 kg·hm⁻²·a⁻¹,硫沉降量的3个水平为0、15和30 kg·hm⁻²·a⁻¹,组成9个氮-硫沉降处理组,其中,氮和硫沉降量均为0 kg·hm⁻²·a⁻¹的处理组为空白对照组,另外还包括2个单一氮沉降、2个单一硫沉降和4个氮-硫复合沉降处理组;每个处理组10盆,每盆视为1个重复。分别以CO(NH₂)₂和Na₂SO₄为人工氮源和硫源,根据实验设置的氮和硫的沉降量,将适量的CO(NH₂)₂和Na₂SO₄溶于蒸馏水中配成混合液;于每月14日和24日用喷雾器分别将混合液均匀喷洒在供试幼苗的叶片上,每株幼苗每次喷洒2 L混合液,每个处理组共喷洒20 L,空白对照组则喷洒等量蒸馏水。实验期内,由专人负责喷洒、除草和翻土等日常管理工作。

1.3.2 全氮和全磷含量测定 于2012年11月1日(即经氮-硫沉降处理6个月后)采集各处理组所有供试幼苗,将每株幼苗的根、茎和叶片分开并分别洗净,于105℃杀青0.5 h,并于85℃干燥处理48 h至恒质量,粉碎;取适量根、茎和叶片样品,参照文献[32]、采用硫酸-高氯酸法分别进行消煮并采用凯式定氮法测定单株幼苗根、茎和叶片的全氮含量,采用钼锑抗比色法测定单株幼苗根、茎和叶片的全磷含量。每个指标重复测定2次。

1.4 数据处理及分析

单株幼苗根、茎和叶片的全氮和全磷含量的总和

即为全株的全氮和全磷含量;叶片的全氮和全磷含量之比即为叶片的 N:P 比。采用 EXCEL 2010 和 SPSS 19.0 统计分析软件进行数据分析和作图,采用单因素方差分析法(One-way ANOVA)分析各处理组间全氮和全磷含量以及叶片中 N:P 比的差异性,并采用最小显著差数法(LSD 法)进行多重比较。

2 结果和分析

2.1 尾巨桉和杉木幼苗不同器官和全株的全氮含量对氮-硫单一及复合沉降的响应特征

2.1.1 全氮含量的变化特征 不同水平氮-硫单一及复合沉降 6 个月后尾巨桉和杉木幼苗根、茎、叶片和全株全氮含量的变化见表 1。

由表 1 可见:50 和 100 kg·hm⁻²·a⁻¹ 单一氮沉降条件下尾巨桉幼苗根、叶片和全株的全氮含量以及 50 kg·hm⁻²·a⁻¹ 单一氮沉降条件下其茎的全氮含量均显著高于对照($P<0.05$),仅 100 kg·hm⁻²·a⁻¹ 单一氮沉降条件下尾巨桉幼苗茎的全氮含量略低于对照;并且,与 100 kg·hm⁻²·a⁻¹ 单一氮沉降处理组相比,在 50 kg·hm⁻²·a⁻¹ 单一氮沉降条件下尾巨桉幼苗根、叶片和全株的全氮含量均显著提高;与对照相比,在 50 和 100 kg·hm⁻²·a⁻¹ 单一氮沉降条件下尾巨桉幼苗根、茎、叶片和全株的全氮含量平均变幅分别为 137.38%、120.74%、221.47% 和 180.08%。在 50 和 100 kg·hm⁻²·a⁻¹ 单一氮沉降条件下杉木幼苗根的全氮含量分别略低于和显著低于对照,茎的全氮含量分别显著低于和显著高于对照,叶片和全株的全

氮含量均显著高于对照;并且,与 100 kg·hm⁻²·a⁻¹ 单一氮沉降处理组相比,50 kg·hm⁻²·a⁻¹ 单一氮沉降条件下杉木幼苗根的全氮含量显著提高,而其茎、叶片和全株的全氮含量均显著降低;与对照相比,在 50 和 100 kg·hm⁻²·a⁻¹ 单一氮沉降条件下杉木幼苗根、茎、叶片和全株的全氮含量平均变幅分别为 23.58%、32.53%、503.19% 和 45.67%。综合分析结果表明:尾巨桉和杉木幼苗叶片的全氮含量对单一氮沉降的响应最显著;杉木幼苗全株的全氮含量较对照的平均变幅小于尾巨桉,说明杉木幼苗全株的全氮含量对单一氮沉降的响应小于尾巨桉。

在 15 和 30 kg·hm⁻²·a⁻¹ 单一硫沉降条件下,尾巨桉幼苗根、茎、叶片和全株的全氮含量均显著高于对照,并且与 30 kg·hm⁻²·a⁻¹ 单一硫沉降处理组相比,在 15 kg·hm⁻²·a⁻¹ 单一硫沉降条件下尾巨桉幼苗根、茎、叶片和全株的全氮含量显著降低;与对照相比,在 15 和 30 kg·hm⁻²·a⁻¹ 单一硫沉降条件下尾巨桉幼苗根、茎、叶片和全株的全氮含量平均变幅分别为 230.23%、186.09%、107.57% 和 152.74%。在 15 和 30 kg·hm⁻²·a⁻¹ 单一硫沉降条件下,杉木幼苗根的全氮含量均略高于或显著高于对照,茎的全氮含量均显著低于对照;在 15 kg·hm⁻²·a⁻¹ 单一硫沉降条件下叶片和全株的全氮含量显著高于对照,而在 30 kg·hm⁻²·a⁻¹ 单一硫沉降条件下则略低于对照;与对照相比,在 15 和 30 kg·hm⁻²·a⁻¹ 单一硫沉降条件下杉木幼苗根、茎、叶片和全株的全氮含量平均变幅分别为 21.74%、55.30%、566.47% 和 57.93%。综合分析结果表明:尾巨桉幼苗根和杉木幼苗叶片的全氮含

表 1 不同水平氮-硫单一及复合沉降 6 个月对尾巨桉和杉木幼苗根、茎、叶片和全株全氮含量的影响($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 1 Effects of nitrogen-sulphur single and complex depositions with different levels treated for six months on total nitrogen content in root, stem, leaf and whole plant of *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake × *E. grandis* Hill ex Maiden and *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook. seedlings ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

沉降量/kg·hm ⁻² ·a ⁻¹ Deposition amount		尾巨桉不同部位的全氮含量/g·kg ⁻¹ Total nitrogen content in different parts of <i>E. urophylla</i> × <i>E. grandis</i>				杉木不同部位的全氮含量/g·kg ⁻¹ Total nitrogen content in different parts of <i>C. lanceolata</i>			
N	S	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	全株 Whole plant	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	全株 Whole plant
0	0	1.57±0.46a	1.22±0.49a	3.60±0.19a	6.39±0.37a	6.09±0.19bc	4.28±0.35c	1.30±0.11a	11.67±0.49a
0	15	3.04±0.37b	1.99±0.28a	5.21±0.47b	10.24±0.51b	6.86±0.47c	1.85±0.18a	15.73±0.58f	24.44±0.59f
0	30	7.35±0.51d	5.00±0.59d	9.74±0.60d	22.09±0.64f	7.97±0.61d	1.98±0.28a	0.98±0.12a	10.93±0.45a
50	0	4.32±0.48c	4.09±0.56cd	14.04±1.57e	22.45±0.61f	5.84±0.44bc	3.10±0.19b	6.89±0.56c	15.83±0.51b
50	15	8.29±0.16e	4.25±0.43cd	5.16±0.38b	17.70±0.54d	4.98±0.19b	4.27±0.48c	13.94±0.87e	23.19±0.64e
50	30	8.81±0.10e	3.21±0.31bc	17.24±1.46f	29.26±1.37g	7.94±0.50d	4.13±0.37c	6.78±0.34c	18.85±0.39c
100	0	3.15±0.67b	1.14±0.37a	9.11±0.29d	13.40±0.97c	3.47±0.48a	5.88±0.45d	8.82±0.19d	18.17±0.40c
100	15	2.36±0.28ab	1.01±0.18a	9.21±0.17d	12.58±0.19c	6.08±0.49bc	7.06±0.64e	9.19±0.23d	22.33±0.77d
100	30	10.18±1.09f	3.04±0.31b	6.92±0.50c	20.14±0.99e	9.92±0.55e	4.98±0.49c	3.09±0.47b	17.99±0.57c

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示各处理组间差异显著($P<0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference among different treatment groups ($P<0.05$).

量对单一硫沉降的响应最显著;杉木幼苗全株的全氮含量较对照的变幅小于尾巨桉,说明杉木幼苗全株的全氮含量对单一硫沉降的响应小于尾巨桉。

由表1还可以看出:在供试的4个氮-硫复合沉降条件下,仅 $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 氮- $15\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 硫复合沉降条件下尾巨桉幼苗根和茎的全氮含量与对照差异不显著,其他氮-硫复合沉降处理组的尾巨桉幼苗根、茎、叶片和全株的全氮含量总体上显著高于对照;与对照相比,4个氮-硫复合沉降处理组的尾巨桉幼苗根、茎、叶片和全株全氮含量的变幅分别为370.90%、144.09%、167.51%和211.17%。在供试的4个氮-硫复合沉降条件下,杉木幼苗叶片和全株的全氮含量均显著高于对照;在 $50\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 氮- $30\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 硫以及 $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 氮- $30\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 硫复合沉降条件下杉木幼苗根的全氮含量以及 $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 氮- $15\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 硫复合沉降条件下杉木幼苗茎的全氮含量也均显著高于对照;与对照相比,4个氮-硫复合沉降处理组的

杉木幼苗根、茎、叶片和全株的全氮含量平均变幅分别为27.94%、21.32%、533.60%和76.42%。综合分析结果表明:尾巨桉幼苗根以及杉木幼苗叶片的全氮含量对氮-硫复合沉降的响应最显著;杉木幼苗全株的全氮含量较对照的变幅小于尾巨桉,说明杉木幼苗全株的全氮含量对氮-硫复合沉降的响应小于尾巨桉。

2.1.2 全氮含量的相关性分析 经氮-硫单一及复合沉降处理6个月后尾巨桉和杉木幼苗不同器官和全株间全氮含量的相关系数见表2。结果显示:尾巨桉和杉木幼苗各器官间全氮含量的相关性均不显著,其中,尾巨桉各器官间的全氮含量均呈正相关,而杉木各器官间的全氮含量则呈负相关;尾巨桉幼苗根、茎和叶片与全株的全氮含量分别呈显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)正相关,相关系数分别为0.77、0.72和0.81;杉木幼苗根和茎与全株的全氮含量分别呈不显著的负相关和正相关,仅叶片与全株的全氮含量呈极显著正相关,相关系数为0.91。

表2 氮-硫单一及复合沉降6个月后尾巨桉和杉木幼苗根、茎、叶片和全株全氮含量的相关性分析结果¹⁾

Table 2 Analysis result of correlation of total nitrogen content among root, stem, leaf and whole plant of *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake \times *E. grandis* Hill ex Maiden and *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook. seedlings after single and complex depositions of nitrogen-sulphur treated for six months¹⁾

指标 Index	尾巨桉不同部位全氮含量的相关系数 Correlation coefficient of total nitrogen content in different parts of <i>E. urophylla</i> \times <i>E. grandis</i>				杉木不同部位全氮含量的相关系数 Correlation coefficient of total nitrogen content in different parts of <i>C. lanceolata</i>			
	TNr	TNs	TNI	TNwp	TNr	TNs	TNI	TNwp
TNr	1.00				1.00			
TNs	0.60	1.00			-0.28	1.00		
TNI	0.28	0.59	1.00		-0.44	-0.10	1.00	
TNwp	0.77*	0.72*	0.81**	1.00	-0.18	0.24	0.91**	1.00

¹⁾ TNr: 根的全氮含量 Total nitrogen content in root; TNs: 茎的全氮含量 Total nitrogen content in stem; TNI: 叶片的全氮含量 Total nitrogen content in leaf; TNwp: 全株的全氮含量 Total nitrogen content in whole plant. *: $P<0.05$; **: $P<0.01$.

2.2 尾巨桉和杉木幼苗不同器官和全株的全磷含量对氮-硫单一及复合沉降的响应特征

2.2.1 全磷含量的变化特征 不同水平氮-硫单一及复合沉降6个月后尾巨桉和杉木幼苗根、茎、叶片和全株全磷含量的变化见表3。

由表3可以看出:在 $50\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 单一氮沉降条件下,尾巨桉幼苗根、茎、叶片和全株的全磷含量或高于或低于对照但均与对照无显著差异,仅 $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 单一氮沉降条件下其全株的全磷含量显著高于对照($P<0.05$);与 $50\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 单一氮沉降处理组相比,在 $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 单一氮沉

降条件下尾巨桉幼苗根和茎的全磷含量仅略有提高,而叶片和全株的全磷含量则显著提高。在 50 和 $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 单一氮沉降条件下,杉木幼苗根、茎、叶片和全株的全磷含量均与对照无显著差异;与 $50\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 单一氮沉降处理组相比,在 $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 单一氮沉降条件下杉木根、茎和叶片的全磷含量略有提高,仅全株的全磷含量显著提高。与对照相比,在 50 和 $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 单一氮沉降条件下尾巨桉和杉木幼苗全株的全磷含量平均变幅分别为30.00%和10.27%,表明杉木幼苗全株的全磷含量对单一氮沉降的响应小于尾巨桉。

表3 不同水平氮-硫单一及复合沉降6个月对尾巨桉和杉木幼苗根、茎、叶片和全株全磷含量的影响($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 3 Effects of nitrogen-sulphur single and complex depositions with different levels treated for six months on total phosphorus content in root, stem, leaf and whole plant of *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake \times *E. grandis* Hill ex Maiden and *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook. seedlings ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

沉降量/kg \cdot hm ⁻² \cdot a ⁻¹ Deposition amount		尾巨桉不同部位的全磷含量/g \cdot kg ⁻¹ Total phosphorus content in different parts of <i>E. urophylla</i> \times <i>E. grandis</i>				杉木不同部位的全磷含量/g \cdot kg ⁻¹ Total phosphorus content in different parts of <i>C. lanceolata</i>			
N	S	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	全株 Whole plant	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	全株 Whole plant
0	0	0.49 \pm 0.12a	0.49 \pm 0.19a	1.32 \pm 0.21abcd	2.30 \pm 0.20ab	0.87 \pm 0.13a	1.35 \pm 0.24a	1.43 \pm 0.10a	3.65 \pm 0.40bcd
0	15	0.39 \pm 0.17a	0.59 \pm 0.21a	0.85 \pm 0.11a	1.83 \pm 0.18a	1.00 \pm 0.18a	1.05 \pm 0.13a	1.56 \pm 0.16a	3.61 \pm 0.23bcd
0	30	0.81 \pm 0.09a	0.67 \pm 0.23a	1.60 \pm 0.08cd	3.08 \pm 0.16c	0.76 \pm 0.26a	0.95 \pm 0.18a	1.32 \pm 0.14a	3.03 \pm 0.19a
50	0	0.51 \pm 0.20a	0.20 \pm 0.09a	0.93 \pm 0.20ab	1.64 \pm 0.17a	0.68 \pm 0.12a	1.21 \pm 0.30a	1.23 \pm 0.25a	3.12 \pm 0.17ab
50	15	0.47 \pm 0.06a	0.37 \pm 0.08a	1.02 \pm 0.14abc	1.86 \pm 0.10a	1.00 \pm 0.31a	1.00 \pm 0.27a	1.35 \pm 0.31a	3.35 \pm 0.28abc
50	30	0.62 \pm 0.21a	0.53 \pm 0.14a	1.42 \pm 0.10bcd	2.57 \pm 0.22bc	0.68 \pm 0.16a	1.32 \pm 0.14a	1.38 \pm 0.19a	3.38 \pm 0.18abc
100	0	0.69 \pm 0.05a	0.67 \pm 0.30a	1.65 \pm 0.29d	3.01 \pm 0.27c	1.06 \pm 0.23a	1.41 \pm 0.11a	1.40 \pm 0.28a	3.87 \pm 0.24cd
100	15	0.92 \pm 0.23a	0.61 \pm 0.18a	1.56 \pm 0.13cd	3.09 \pm 0.19c	0.94 \pm 0.18a	1.65 \pm 0.37a	1.49 \pm 0.34a	4.08 \pm 0.35d
100	30	0.79 \pm 0.08a	0.53 \pm 0.27a	1.67 \pm 0.24d	2.99 \pm 0.17c	0.78 \pm 0.07a	1.36 \pm 0.28a	1.37 \pm 0.07a	3.51 \pm 0.21bc

¹⁾ 同列中不同小写字母表示各处理组间差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference among different treatment groups ($P < 0.05$).

在 15 和 30 kg \cdot hm⁻² \cdot a⁻¹ 单一硫沉降条件下,尾巨桉幼苗根、茎、叶片和全株的全磷含量与对照无显著差异;与 15 kg \cdot hm⁻² \cdot a⁻¹ 单一硫沉降处理组相比,在 30 kg \cdot hm⁻² \cdot a⁻¹ 单一硫沉降条件下尾巨桉幼苗根和茎的全磷含量无显著差异,而尾巨桉幼苗叶片和全株的全磷含量显著提高。在 15 和 30 kg \cdot hm⁻² \cdot a⁻¹ 单一硫沉降条件下,仅 30 kg \cdot hm⁻² \cdot a⁻¹ 单一硫沉降条件下杉木幼苗全株的全磷含量显著低于对照,其他处理组杉木幼苗根、茎、叶片和全株的全磷含量总体上与对照无显著差异;与 15 kg \cdot hm⁻² \cdot a⁻¹ 单一硫沉降处理组相比,在 30 kg \cdot hm⁻² \cdot a⁻¹ 单一硫沉降条件下杉木幼苗根、茎和叶片的全磷含量略降低,而杉木幼苗全株的全磷含量则显著降低。与对照相比,在 15 和 30 kg \cdot hm⁻² \cdot a⁻¹ 单一硫沉降条件下尾巨桉和杉木幼苗全株的全磷含量平均变幅分别为 27.37% 和 9.18%,表明杉木幼苗全株的全磷含量对单一硫沉降的响应小于尾巨桉。

由表3还可以看出:仅在 100 kg \cdot hm⁻² \cdot a⁻¹ 氮-15 kg \cdot hm⁻² \cdot a⁻¹ 硫及 100 kg \cdot hm⁻² \cdot a⁻¹ 氮-30 kg \cdot hm⁻² \cdot a⁻¹ 硫复合沉降条件下尾巨桉幼苗全株的全磷含量显著高于对照,而其他氮-硫复合沉降处理组的尾巨桉幼苗根、茎、叶片和全株的全磷含量总体上与对照无显著差异。在供试的 4 个氮-硫复合沉降条件下,杉木幼苗根、茎、叶片和全株的全磷含量与对照均无显著差异。与对照相比,在 4 个氮-硫复合沉降条件下尾巨桉和杉木幼苗全株的全磷含量平均变幅分别为 26.36% 和 7.67%,表明杉木幼苗全株的全磷含量对氮-硫复合沉降的响应小于尾巨桉。

2.2.2 全磷含量的相关性分析 经氮-硫单一及复合沉降处理 6 个月后尾巨桉和杉木幼苗不同器官和全株间全磷含量的相关系数见表 4。结果显示:尾巨桉幼苗根与叶片的全磷含量呈显著正相关 ($P < 0.05$),相关系数为 0.85;其茎与根和叶片的全磷含量呈不显著正相关;其根、茎和叶片与全株的全磷含量分别呈极显著 ($P < 0.01$)、显著和极显著正相关,相关系数分别为 0.90、0.76 和 0.97。杉木幼苗各器官间的全磷含量以及根与全株的全磷含量均呈不显著正相关;其茎与全株的全磷含量呈显著正相关,相关系数为 0.77;其叶片与全株的全磷含量呈极显著正相关,相关系数为 0.78。

2.3 尾巨桉和杉木幼苗叶片中 N:P 比对氮-硫单一及复合沉降的响应特征

不同水平氮-硫单一及复合沉降 6 个月后尾巨桉和杉木幼苗叶片的 N:P 比的变化见表 5。由表 5 可见:仅 50 kg \cdot hm⁻² \cdot a⁻¹ 单一氮沉降条件下尾巨桉叶片的 N:P 比显著高于对照 ($P < 0.05$),而在不同水平单一氮沉降条件下尾巨桉和杉木幼苗叶片的 N:P 比均高于对照但差异不显著。与对照相比,单一氮沉降条件下尾巨桉和杉木幼苗叶片 N:P 比的平均变幅分别为 225.81% 和 52.66%,表明杉木幼苗叶片的 N:P 比对单一氮沉降的响应小于尾巨桉。

在不同水平单一硫沉降条件下,尾巨桉幼苗叶片的 N:P 比均显著高于对照;在 15 kg \cdot hm⁻² \cdot a⁻¹ 单一硫沉降条件下杉木幼苗叶片的 N:P 比也显著高于对照,而在 30 kg \cdot hm⁻² \cdot a⁻¹ 单一硫沉降条件下杉木幼苗叶片的 N:P 比则略高于对照。与对照相比,单一

表4 氮-硫单一及复合沉降6个月后尾巨桉和杉木幼苗根、茎、叶片和全株全磷含量的相关性分析结果¹⁾

Table 4 Analysis result of correlation of total phosphorus content among root, stem, leaf and whole plant of *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake × *E. grandis* Hill ex Maiden and *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook. seedlings after nitrogen-sulphur single and complex depositions treated for six months¹⁾

指标 Index	尾巨桉不同部位全磷含量的相关系数 Correlation coefficient of total phosphorus content in different parts of <i>E. urophylla</i> × <i>E. grandis</i>				杉木不同部位全磷含量的相关系数 Correlation coefficient of total phosphorus content in different parts of <i>C. lanceolata</i>			
	TPr	TPs	TPl	TPwp	TPr	TPs	TPl	TPwp
TPr	1.00				1.00			
TPs	0.51	1.00			0.05	1.00		
TPl	0.85**	0.65	1.00		0.62	0.26	1.00	
TPwp	0.90**	0.76*	0.97**	1.00	0.64	0.77*	0.78*	1.00

¹⁾ TPr: 根的全磷含量 Total phosphorus content in root; TPs: 茎的全磷含量 Total phosphorus content in stem; TPl: 叶片的全磷含量 Total phosphorus content in leaf; TPwp: 全株的全磷含量 Total phosphorus content in whole plant. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

表5 不同水平氮-硫单一及复合沉降6个月对尾巨桉和杉木幼苗叶片N:P比的影响($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 5 Effects of nitrogen-sulphur single and complex depositions with different levels treated for six months on N:P ratio in leaf of *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake × *E. grandis* Hill ex Maiden and *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook. seedlings ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

沉降量/kg · hm ⁻² · a ⁻¹ Deposition amount		不同种类叶片的N:P比 N:P ratio in leaf of different species	
N	S	尾巨桉 <i>E. urophylla</i> × <i>E. grandis</i>	杉木 <i>C. lanceolata</i>
0	0	2.79 ± 0.61 a	3.20 ± 0.49 a
0	15	5.62 ± 1.23 bc	6.77 ± 1.28 b
0	30	7.18 ± 1.98 c	3.61 ± 0.65 a
50	0	13.73 ± 1.36 e	5.08 ± 0.73 ab
50	15	9.52 ± 1.08 d	6.90 ± 0.89 b
50	30	11.40 ± 0.99 d	5.57 ± 1.51 ab
100	0	4.45 ± 1.12 abc	4.69 ± 0.46 ab
100	15	4.08 ± 0.79 ab	5.47 ± 1.01 ab
100	30	6.72 ± 1.09 bc	5.11 ± 0.67 ab

¹⁾ 同列中不同小写字母表示各处理组间差异显著($P < 0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference among different treatment groups ($P < 0.05$).

硫沉降条件下尾巨桉和杉木幼苗叶片的N:P比平均变幅分别为129.39%和62.19%,表明杉木幼苗叶片的N:P比对单一硫沉降的响应小于尾巨桉。

由表5还可以看出:在供试的4个氮-硫复合沉降条件下,尾巨桉和杉木幼苗叶片的N:P比均高于对照。除100 kg · hm⁻² · a⁻¹氮-15 kg · hm⁻² · a⁻¹硫复合沉降条件下叶片的N:P比与对照无显著差异外,其他氮-硫复合沉降处理组尾巨桉幼苗叶片的N:P比与对照均差异显著;除50 kg · hm⁻² · a⁻¹氮-15 kg · hm⁻² · a⁻¹硫复合沉降条件下叶片的N:P比显著高于对照外,其他氮-硫复合沉降处理组杉木幼苗叶片的N:P比与对照均无显著差异。与对照相比,在供试的4个氮-硫复合沉降条件下尾巨桉和杉木幼苗叶片的N:P比的平均变幅分别为221.95%和

80.08%,表明杉木幼苗叶片的N:P比对氮-硫复合沉降的响应小于尾巨桉。

3 讨论和结论

3.1 氮-硫单一及复合沉降条件下尾巨桉和杉木幼苗全氮含量的响应分析

本研究结果表明:适量的单一氮沉降能够促进尾巨桉和杉木幼苗全株全氮含量的提高,这与前人的研究结论相似^[29,33],其原因为通过氮沉降适量的氮元素进入土壤,并促进土壤微生物活动、提高土壤酶活性,利于植物根系生长,进而引起土壤中植物可吸收和可利用的氮元素增加,最终使植物体吸收和固定的氮元素量增多^[24-25]。当环境中的氮沉降量超过植株氮需求量,尾巨桉幼苗根和全株的全氮含量增加量减少,杉木根中全氮含量甚至降低,这可能与过量的氮引起土壤中NO₃⁻增多、造成土壤中可利用氮的总量减少,以及土壤酸化引起的土壤微生物和土壤酶活性降低和植物根系受损有关^[4,15]。本研究中,适量的硫沉降促进尾巨桉和杉木幼苗全株全氮含量增加,印证了“低强度酸雨可促进土壤微生物活性、提高土壤肥力,最终促进植物对养分的吸收和利用^[34]”的观点。然而,当硫沉降水平高于杉木的适应范围时,杉木幼苗叶片和全株的全氮含量低于对照,推测这可能是因为高强度硫沉降引起土壤盐基离子溶出加剧、造成土壤离子平衡失衡,进而对土壤氮的矿化过程产生不利影响,最终导致植株对氮的吸收和固着作用减弱。研究表明,氮-硫复合沉降可促进尾巨桉和杉木幼苗全株全氮含量增加,并且,其促进作用大于单一氮沉降和单一硫沉降,表明氮-硫复合沉降对土壤微生物和

土壤酶活性以及植物的影响均大于单一氮沉降和单一硫沉降,更利于植物对氮元素的吸收和利用。

从不同器官全氮含量的比较结果看,尾巨桉幼苗叶片的全氮含量对单一氮沉降的响应最显著,其根的全氮含量对单一硫沉降和氮-硫复合沉降的响应最显著,而杉木幼苗则均以叶片的全氮含量对氮-硫单一及复合沉降的响应最为显著。这是因为叶片是植株进行光合作用的重要器官,根是植物与外界养分联系的主要器官,而茎是植株养料和水分运输的主要器官,植株吸收的氮优先供给叶片和根系,以维持叶片的光合作用和根系生长,进而保证植株正常生长。

相关性分析结果表明:氮-硫沉降条件下尾巨桉和杉木幼苗根、茎和叶片间的全氮含量无显著相关性,这可能与器官功能差异导致的全株氮元素分配格局改变或沉降处理时间较短有关。尾巨桉幼苗根、茎和叶片与全株的全氮含量呈显著或极显著正相关,其中,叶片与全株全氮含量的相关系数最大;而杉木幼苗叶片与全株的全氮含量也呈极显著正相关,表明氮-硫沉降条件下这2种乔木幼苗叶片的全氮含量变化对其全株的全氮含量具有直接和显著的影响,这很可能与叶片是模拟氮-硫沉降的主要接受器官有关。

从全株全氮含量较对照的平均变幅看,尾巨桉幼苗对氮-硫复合沉降的响应最强,对单一氮沉降的响应居中,对单一硫沉降的响应最弱;杉木幼苗对氮-硫复合沉降的响应最强,对单一硫沉降的响应居中,对单一氮沉降的响应最弱。并且,杉木幼苗全株全氮含量对氮-硫复合沉降的响应弱于尾巨桉,杉木各器官与全株全氮含量的相关性也弱于尾巨桉。

3.2 氮-硫单一及复合沉降条件下尾巨桉和杉木幼苗全磷含量的响应分析

本研究结果表明:在氮-硫复合沉降条件下尾巨桉幼苗的全磷含量大多升高,说明氮-硫复合沉降能够促进尾巨桉幼苗对磷的吸收和利用,这与其全氮含量对氮-硫复合沉降的响应趋势类似;适量的氮可促进植物根系生长^[35],并且吸收适量的氮和硫,有利于植物体内蛋白质的合成以及细胞的生长和增殖,进而促进植物对磷的吸收和利用^[36]。单一硫沉降条件下杉木幼苗全株的全磷含量低于对照,原因在于超过杉木耐受水平的硫沉降进入土壤后,杉木根际 PO_4^{3-} 的配位吸附增大,致使土壤中有效磷浓度下降,导致能被杉木幼苗直接吸收的有效磷水平降低,最终造成幼苗体内的磷含量降低。研究表明:氮-硫复合沉降对

尾巨桉和杉木幼苗全株全磷含量的作用均小于单一氮或硫沉降,说明氮-硫复合沉降可能对这2个树种幼苗的磷吸收存在拮抗作用,氮-硫复合沉降对土壤铝离子等的溶出作用更大,引起土壤中稳定态磷含量增大、可利用态磷含量减少,加之氮-硫复合沉降对尾巨桉和杉木幼苗全株的氮吸收具有较大的促进作用,导致过量的 NO_3^- 在植株体内累积,影响其对磷的吸收,最终导致植株体内的全磷含量下降。

相关性分析结果表明:尾巨桉幼苗根与叶片的全磷含量存在极显著相关性,说明叶片的磷含量与根对磷的吸收显著相关。尾巨桉各器官与全株的全磷含量呈显著或极显著正相关,杉木茎和叶片与全株的全磷含量也呈显著正相关,这一特性与2个树种各器官与全株的全氮含量的相关性相似,说明氮-硫沉降条件下2个树种全株对磷与氮的分配和利用存在一定的相似性。杉木根与全株的全磷含量无显著相关性,而其茎与全株的全磷含量显著相关,造成这一现象的原因尚待进一步研究。

依据全株的全磷含量较对照的平均变幅,可以认为尾巨桉和杉木幼苗对单一氮沉降的响应均最强,对单一硫沉降的响应居中,对氮-硫复合沉降的响应最弱。并且,杉木幼苗全株的全磷含量对氮-硫复合沉降的响应弱于尾巨桉,杉木各器官与全株的全磷含量的相关性也弱于尾巨桉。

3.3 尾巨桉和杉木幼苗的全氮和全磷含量对氮-硫单一及复合沉降响应效应的比较

研究表明:尾巨桉和杉木幼苗的全磷含量对氮-硫沉降的响应效应均低于全氮含量,一方面是由于氮-硫沉降条件下人工氮源可以直接提供充足氮,促进植株对氮的吸收和利用;另一方面,供试土壤为黄壤,磷含量较低,而空气中的氮-硫沉降不能直接为幼苗生长提供磷,加之氮-硫沉降条件下土壤酸化极易造成磷的流失,致使植物从土壤中吸收的磷总量降低,最终导致植株的全磷含量对氮-硫沉降的响应效应小于全氮含量。因此,在室外培育尾巨桉和杉木幼苗时应适当增施磷肥,并预防过量氮或硫进入植物体内对磷的吸收产生影响,提高植株对磷的吸收和固着,以促进植株的正常生长。

3.4 氮-硫单一及复合沉降条件下尾巨桉和杉木幼苗N:P比的响应分析

植物叶片的N:P比可作为判断限制植物生长的营养元素的重要指标。Güsewell^[37]认为,N:P比低于

10 时植物生长主要受氮吸收量限制;N:P 比高于 10、低于 20 时植物生长受氮、磷吸收量的共同限制;N:P 比高于 20 时植物生长主要受磷吸收量限制。在供试氮-硫复合沉降条件下,尾巨桉和杉木幼苗叶片的 N:P 比大多低于 10,仅在 $50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 氮- $30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 硫复合沉降条件下尾巨桉幼苗叶片的 N:P 比高于 10,说明尾巨桉幼苗生长由主要受氮吸收量限制转变为受氮、磷吸收量的共同限制,因为在该沉降条件下,植株体内氮量充足,可满足全部器官的生长需要,使得氮素对植株生长的限制作用相对减弱,而磷素对植株生长的限制作用相对增强。

依据幼苗叶片 N:P 比较对照的平均变幅,可以认为尾巨桉幼苗叶片的 N:P 比对单一氮沉降的响应效应最强,对氮-硫复合沉降的响应效应居中,对单一硫沉降的响应效应最弱;而杉木幼苗叶片的 N:P 比对氮-硫复合沉降的响应效应最强,对单一硫沉降的响应效应居中,对单一氮沉降的响应效应最弱。并且,相对而言,杉木幼苗叶片的 N:P 比对氮-硫复合沉降的响应效应弱于尾巨桉。

3.5 小结

综合分析后认为尾巨桉幼苗的全氮和全磷含量对氮-硫沉降的响应效应强于杉木,这可能是由于尾巨桉和杉木具有不同的植物属性,二者的叶片结构明显不同,导致二者对氮-硫沉降的响应存在区别。高俊等^[38]认为,未来中国南方的硫酸型酸雨可能向硫酸-硝酸型酸雨转变,因而,尾巨桉和杉木幼苗在一定程度上不会遭受短期酸雨的严重危害;但是,长期的硫酸-硝酸型酸雨对土壤酸化作用显著,且强酸雨条件下植物地上部分将遭受较严重的损伤,从而导致植物的光合作用、养分吸收和运输功能等受到破坏。因此,应对高水平氮-硫沉降下植物的生长发育情况进行长期、广泛和深入的观测研究。

参考文献:

- [1] 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: 889-892.
- [2] GALLOWAY J N, COWLING E B. Reactive nitrogen and the world: 200 years of change[J]. *Ambio*, 2002, 31: 64-71.
- [3] 刘可慧, 彭少麟, 莫江明, 等. 酸沉降对森林植物影响过程和机理[J]. *生态环境*, 2005, 14(6): 953-960.
- [4] 李德军, 莫江明, 方运霆, 等. 氮沉降对森林植物的影响[J]. *生态学报*, 2003, 23(9): 1891-1900.
- [5] REINDS G J, POSCH M, De VRIES W. Modelling the long-term soil response to atmospheric deposition at intensively monitored forest plots in Europe[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157: 1258-1269.
- [6] VESTRENG V, MYHRE G, FAGERLI H, et al. Twenty-five years of continuous sulphur dioxide emission reduction in Europe[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007, 7: 3663-3681.
- [7] WRIGHT R F, RASMUSSEN L. Introduction to the NITREX and EXMAN projects[J]. *Forest Ecology and Management*, 1998, 101: 1-7.
- [8] De VRIES W, REINDS G J, Van DOBBEN H, et al. Intensive monitoring of forest ecosystems in Europe: technical report 2002 [R]. Heerenveen: Forest Intensive Monitoring Coordination Institute, 2002.
- [9] LAMBERS H, STULEN I, Van Der WERT A. Carbon use in root respiration as affected by elevated atmospheric CO₂ [J]. *Plant and Soil*, 1996, 187: 251-263.
- [10] IZUTA T, YAMAOKA T, NAKAJI T, et al. Growth, net photosynthesis and leaf nutrient status of *Fagus crenata* seedlings grown in brown forest soil acidified with H₂SO₄ or HNO₃ solution[J]. *Trees*, 2004, 18: 677-685.
- [11] ALLISON S D, CZIMCZIK C I, TRESEDER K K. Microbial activity and soil respiration under nitrogen addition in Alaskan boreal forest[J]. *Global Change Biology*, 2008, 14: 1156-1168.
- [12] ZAK D R, HOLMES W E, TOMLINSON M J, et al. Microbial cycling of C and N in northern hardwood forests receiving chronic atmospheric NO₃⁻ deposition[J]. *Ecosystems*, 2006, 9: 242-253.
- [13] Van Der SALM C, WESTERVELD J W, VERSTRATEN J M. Release rate of Al from inorganic and organic compounds in a sandy podzol during laboratory experiments[J]. *Geoderma*, 2000, 96: 173-198.
- [14] 刘滔, 尹光彩, 刘菊秀, 等. 酸沉降对南亚热带森林土壤主要元素的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2013, 19(2): 255-261.
- [15] 袁颖红, 樊后保, 刘文飞, 等. 模拟 N 沉降对杉木人工林 (*Cunninghamia lanceolata*) 土壤酶活性及微生物群落功能多样性的影响[J]. *土壤*, 2013, 45(1): 120-128.
- [16] 姚芳芳, 冯丽丽, 杨颂宇, 等. 亚热带常见树种幼苗对酸雨的生理响应及敏感性综合评判[J]. *长江流域资源与环境*, 2013, 22(2): 232-238.
- [17] 郭平, 王云琦, 王玉杰, 等. 酸雨背景下缙云山典型林分凋落物量和营养元素含量及其释放特征[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(9): 2339-2346.
- [18] 黄婷, 包和林, 吴承祯, 等. 氮-硫沉降对邓恩桉及杉木人工林凋落物 C 和 N 残留率的影响[J]. *植物资源与环境学报*, 2013, 22(4): 11-19.
- [19] 林岩, 段雷, 杨永森, 等. 模拟氮沉降对高硫沉降地区森林土壤酸化的贡献[J]. *环境科学*, 2007, 28(3): 640-646.
- [20] 吴承祯, 洪伟, 陈灿, 等. 氮、硫沉降下邓恩桉人工林土壤与植株养分特征关系研究[J]. *武夷学院学报*, 2014, 32(2):

- 1-7.
- [21] 张艳荷,吕广林,包和林,等. 模拟氮、硫复合沉降对杉木幼龄林植株 C 和 N 含量的影响[J]. 福建农林大学学报:自然科学版, 2009, 38(5): 50-56.
- [22] 韦大器,时 群,李 桐,等. 尾巨桉愈伤组织诱导与植株再生研究[J]. 桉树科技, 2008, 25(1): 19-22.
- [23] 国家林业局. 中国森林资源报告:第七次全国森林资源清查[M]. 北京:中国林业出版社, 2008.
- [24] 沈芳芳,袁颖红,樊后保,等. 氮沉降对杉木人工林土壤有机碳矿化和土壤酶活性的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(2): 517-527.
- [25] 樊后保,刘文飞,徐 雷,等. 氮沉降下杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林凋落叶分解过程中 C、N 元素动态变化[J]. 生态学报, 2008, 28(6): 2545-2553.
- [26] 遆超普,颜晓元. 基于氮排放数据的中国大陆大气氮素湿沉降量估算[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(8): 1606-1611.
- [27] 赵 阳,张 驰,赵竝绯,等. 氮磷添加对亚热带常绿阔叶林土壤氮素矿化的影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32(7): 1690-1697.
- [28] 李明月,王 健,王振兴,等. 模拟氮沉降条件下木荷幼苗光合特性、生物量与 C、N、P 分配格局[J]. 生态学报, 2013, 33(5): 1569-1572.
- [29] 羊留冬,王根绪,杨 阳,等. 峨眉冷杉幼苗叶片功能特征及其 N、P 化学计量比对模拟大气氮沉降的响应[J]. 生态学杂志, 2012, 31(1): 44-50.
- [30] 崔 键,周 静,杨 浩. 农田生态系统大气氮、硫湿沉降通量的观测研究[J]. 生态环境学报, 2009, 18(6): 2243-2248.
- [31] 严昶升. 土壤肥力研究方法[M]. 北京:农业出版社, 1998: 17-41.
- [32] 中国林业科学院林业研究所森林土壤研究室. LY/T 1271—1999 森林植物与森林枯枝落叶层全氮、磷、钾、钠、钙、镁的测定[S]. 北京:中国标准出版社, 1999: 296-297.
- [33] 樊后保,廖迎春,刘文飞,等. 模拟氮沉降对杉木幼苗养分平衡的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(12): 3277-3284.
- [34] WALDROP M P, ZAK D R, SINSABAUGH R L. Microbial community response to nitrogen deposition in northern forest ecosystems[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36: 1443-1451.
- [35] 庞 丽,张 一,周志春,等. 模拟氮沉降对低磷胁迫下马尾松不同家系根系分泌和磷效率的影响[J]. 植物生态学报, 2014, 38(1): 27-35.
- [36] 张继澍. 植物生理学[M]. 北京:高等教育出版社, 2006: 68-71.
- [37] GÜSEWELL S. N : P ratios in terrestrial plants; variation and functional significance[J]. New Phytologist, 2004, 164: 243-266.
- [38] 高 俊,郑有飞,陈书涛. 2007—2008 年南京江北工业区大气降水化学特征[J]. 大气科学学报, 2012, 35(6): 697-701.

(责任编辑:佟金凤)

《生物质化学工程》2016 年征订启事

《生物质化学工程》是由国家林业局主管、中国林业科学院林产化学工业研究所主办,面向国内外公开发行的全国生物质化工行业的技术类刊物。被美国《化学文摘》(CA)和《乌利希国际期刊指南》收录,是 RCCSE 中国核心学术期刊(A)、中国农业核心期刊,也是中国期刊全文数据库、中文科技期刊数据库、万方数据——数字化期刊群和 CEPS 中文电子期刊服务的全文收录期刊,并为“中国学术期刊综合评价数据库”统计源期刊和《CAJ-CD 规范》执行优秀期刊。

报道范围:可再生的木质和非木质生物质资源的化学加工与利用,包括生物质能源、生物质化学品、生物质新材料、生物质天然活性成分和制浆造纸等。报道内容:松脂化学、生物质能源化学、生物质炭材料、生物基功能高分子材料、胶黏剂化学、森林植物资源提取物化学利用、环境保护工程、木材制

浆造纸为主的林纸一体化和林产化学工程设备研究设计等。主要栏目:研究报告、综述评论、行业热点、国内外信息等。读者对象:在生物质化学工业、林产化学工业、林业、农业、森工、能源、轻工、化工、环保、医药、食品、土产、商检、外贸等行业从事科研、教学、生产、经营、设计等工作的相关人士。

双月刊, A4 开本, 56 页, 单月月底出版; CN 32-1768/S, ISSN 1673-5854; 国内外公开发行; 国内邮发代号 28-205, 每期定价 10.00 元, 全年定价 60.00 元; 国外发行代号 BM 2743, 全年定价 60 美元。编辑部地址:江苏省南京市锁金五村 16 号林化所内(邮编:210042); 电话(兼传真):025-85482492; E-mail: bce@vip.163.com; 网址: http://www.bce.ac.cn.

欢迎投稿和订阅! 欢迎来电来函联系广告业务!