不同氮添加量和添加方式对南亚热带4个主要树种幼苗生长的影响

刘双娥^{1,2} 李义勇^{1,2} 方 熊^{1,2} 黄文娟¹ 龙凤玲^{1,2} 刘菊秀^{1*}

¹中国科学院华南植物园, 广州 510650; ²中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 为阐明南亚热带4个主要树种——海南红豆(*Ormosia pinnata*)、马占相思(*Acacia mangium*)、木荷(*Schima superba*)和马尾松(*Pinus massoniana*)幼苗生长对不同氮添加量和添加方式的响应差异, 进行了幼苗模拟氮添加实验。实验设置3个氮添加水平(对照: 背景大气氮沉降量 $5.6 \text{ g N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 中氮: $15.6 \text{ g N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 高氮: $20.6 \text{ g N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$), 每个水平分两种添加方式(幼苗冠层施氮和土壤表层施氮), 共6个处理: (1)土壤对照(S-CK); (2)土壤中氮(S-MN); (3)土壤高氮(S-HN); (4)冠层对照(C-CK); (5)冠层中氮(C-MN); (6)冠层高氮(C-HN), 每个处理设置6个重复。研究结果表明: 不同氮添加量下, 土壤施氮和冠层施氮对植物幼苗生长的影响不同, 氮添加量、氮添加方式和物种3个因子之间存在显著的交互效应。与对照相比, S-MN增加了马占相思和木荷幼苗的生物量, 降低了马尾松的株高和生物量, 而C-MN仅增加了马占相思的生物量, 对其他3个树种没有影响; S-HN增加了马占相思的生物量, 显著降低了马尾松的基径、株高和生物量($p < 0.01$), C-HN增加了马占相思、木荷和马尾松的基径、株高和生物量($p < 0.01$)。不同氮添加量和氮添加方式对幼苗生长的影响因物种而异, 所有氮处理下海南红豆和马占相思的生长均明显快于木荷和马尾松; 木荷和马尾松幼苗的生长在两种氮添加方式间差异显著, 冠层施氮比土壤施氮对其幼苗生长的促进作用更大。由此可见: 在氮沉降背景下, 阔叶豆科植物(海南红豆、马占相思)比阔叶非豆科植物(木荷)生长快; 阔叶树种(海南红豆、马占相思和木荷)比针叶树种(马尾松)生长快。在长期氮沉降环境下, 不同物种生长的差异响应有可能导致亚热带森林物种组成发生变化。

关键词 生物量, 高氮, 豆科植物, 冠层加氮

引用格式: 刘双娥, 李义勇, 方熊, 黄文娟, 龙凤玲, 刘菊秀 (2015). 不同氮添加量和添加方式对南亚热带4个主要树种幼苗生长的影响. 植物生态学报, 39, 950–961. doi: 10.17521/cjpe.2015.0092

Effects of the level and regime of nitrogen addition on seedling growth of four major tree species in subtropical China

LIU Shuang-E^{1,2}, LI Yi-Yong^{1,2}, FANG Xiong^{1,2}, HUANG Wen-Juan¹, LONG Feng-Ling^{1,2}, and LIU Ju-Xiu^{1*}

¹South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; and ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract

Aims Numerous studies have been carried out concerning the effects of atmospheric nitrogen (N) deposition on forest ecosystems. However, most of previous experiments were conducted by adding N fertilizer to the surface soil directly. Realistically simulated canopy N deposition and comparison of the effects of soil N addition and canopy N addition on ecosystems were rare. Our purpose is to better understand the effects of two N addition regimes at different N addition levels on seedling growth in major tree species of subtropical China.

Methods A 2-year pot experiment was conducted, with seedlings of four species (*Ormosia pinnata*, *Acacia mangium*, *Schima superba*, *Pinus massoniana*) grown in pots subjected to treatments of three levels (ambient, medium, and high) and two regimes (in soil vs. on canopy) of N addition, specifically including S-CK (ambient N addition in soil), S-MN (medium N addition in soil), S-HN (high N addition in soil), C-CK (ambient N addition on canopy), C-MN (medium N addition on canopy), and C-HN (high N addition on canopy). The total amounts of added N in the three N levels were 5.6, 15.6 and $20.6 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, respectively. Tree basal diameter and tree height were measured in June and December 2012, and November 2013. All trees were harvested in November 2013, and then the biomass was calculated according to the dry-mass of roots, shoots and leaves; the root-shoot ratios

were calculated.

Important findings N treatments affected seedling growth, along with significant interactive effects among N addition level, N addition regime and species. Compared to CK, S-MN stimulated the biomass in seedlings of *A. mangium* and *S. superba*, but decreased the tree height and biomass in seedlings of *P. massoniana*; C-MN increased the biomass in seedlings of *A. mangium*; S-HN promoted the biomass in seedlings of *A. mangium*, but significantly decreased the biomass, basal diameter and tree height in seedlings of *P. massoniana* ($p < 0.01$); C-HN led to the greater growth in seedlings of *A. mangium*, *S. superba* and *P. massoniana* ($p < 0.01$). N addition responses were dependent upon plant species: while seedlings in *O. pinnata* and *A. mangium* grew faster than *S. superba* and *P. massoniana* under all N treatments, the differences in the growth of *S. superba* and *P. massoniana* seedlings between the two N addition regimes were more pronounced than in *O. pinnata* and *A. mangium* seedlings. We concluded that legumes (*O. pinnata* and *A. mangium*) grew faster than non-legumes (*S. superba*). And growth stimulation in broadleaved trees (*O. pinnata*, *A. mangium*, and *S. superba*) by N addition was significantly greater than in coniferous trees (*P. massoniana*). Our findings suggest that the relatively high and chronic atmospheric N deposition in subtropical forest ecosystems may lead to changes in species composition.

Key words biomass, high N addition levels, legumes, N addition on the canopy

Citation: Liu SE, Li YY, Fang X, Huang WJ, Long FL, Liu JX (2015). Effects of the level and regime of nitrogen addition on seedling growth of four major tree species in subtropical China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 39, 950–961. doi: 10.17521/cjpe.2015.0092

工业革命以来, 由于化石燃料的燃烧、施肥和其他工业活动向大气中排放大量氮氧化物, 导致温带和热带地区的氮沉降量急剧增加(Galloway *et al.*, 2004)。据研究报道, 亚洲地区氮沉降量从1961年的14 Tg N·a⁻¹增加到2000年的68 Tg N·a⁻¹, 预计到2030年, 全球氮沉降量将达到105 Tg N·a⁻¹ (Zheng *et al.*, 2002)。目前, 我国已成为全球第三大氮沉降区(Galloway & Cowling, 2002), 大气氮沉降量在中国南方部分森林中达到30–73 kg N·hm⁻²·a⁻¹ (任仁等, 2000; Mo *et al.*, 2006)。

氮沉降对陆地森林生态系统的影响引起了科学家们的关注和深入研究(George & Seith, 1998; Gundersen *et al.*, 2006)。早期的氮沉降研究主要集中在氮沉降严重的欧洲和北美温带森林地区, 如20世纪80年代在瑞典针叶林进行的长期氮饱和实验(NITREX)表明氮沉降对森林生态系统结构和功能产生了严重影响(Gundersen *et al.*, 1998)。氮沉降改变了生态系统中的氮循环并影响生态系统生产力和物质能量流动, 从而间接地影响了生态系统碳循环(Gruber & Galloway, 2008)。大量研究表明: 在氮素缺乏的森林生态系统中, 氮沉降能提高叶片光合作用速率, 对植物生物量积累有促进作用, 从而可增加陆地生态系统的植被碳储量; 而在氮饱和的生态系统中, 外源性氮输入会抑制植物生长, 减少生态系统生产力(Nohrstedt, 2001; Magill *et al.*, 2004)。

不同物种对氮沉降的响应也存在差异(Nakaji *et al.*, 2001; 李德军等, 2003, 2005), 特别是在不同功能型之间差异更大。氮沉降通过改变植物养分的可供给性, 有利于适应高氮水平物种生存, 从而改变物种组成(Bobbink *et al.*, 1998)。豆科植物由于其固氮作用, 高氮环境有利于其生长(Dyhrman *et al.*, 2006; 赵亮等, 2011); 不同森林氮沉降模拟实验比较发现阔叶树种比针叶树种的氮促进效应更大(Xia & Wan, 2008), 物种间长期的差异响应将导致群落的物种组成发生变化, 进而改变生态系统结构。

目前, 国内外模拟森林氮沉降的研究多为直接向土壤表层添加氮, 忽略了氮沉降过程中植物冠层对氮的吸收和截留。植物冠层直接吸收的这部分氮对植物生长有重要的作用。有研究表明, 森林生态系统冠层对大气氮沉降的吸收能满足植物2%–8%的总氮需求(Boyce *et al.*, 1996)。Wilson (1992)通过研究两种针叶树冠层对NH₄⁺和NO₃⁻的吸收发现, 叶片能通过质流快速地吸收NH₄⁺, 叶片直接吸收的无机氮对植物体内氮饱和有重要的贡献; 美国云冷杉林叶冠的净氮吸收量是1.8–5.4 kg·hm⁻²·a⁻¹, 这部分氮会导致植物碳存储量增加250–1 350 kg C·hm⁻²·a⁻¹ (Sievering *et al.*, 2000)。由于冠层对氮的吸收和截留, 真实的冠层氮沉降对植物生长的影响可能并没有向土壤直接添加氮剧烈, 从而导致已有研究高估了植物生长对氮的响应, 同时由于冠层直接吸收

氮对植物生长有促进作用,也可能低估了氮对植物生长的促进作用。不同氮沉降量对生态系统的影响有差异,那么不同氮水平下模拟冠层氮添加和土壤氮添加对植物生长的影响是否存在显著差异,冠层施氮是否比土壤施氮对植物生长的促进作用更大?不同物种对氮添加的响应是否一致?为弄清这些问题,我们设置了3个氮添加水平,每个氮添加水平分两种施氮方式(幼苗冠层施氮、土壤表层施氮),模拟不同氮添加水平下土壤施氮和冠层施氮对亚热带4个不同树种幼苗生长的影响,以揭示不同物种对氮添加量和氮添加方式的响应差异,探讨氮沉降量增加背景下亚热带森林生态系统中物种组成变化,并为氮沉降量增加背景下亚热带森林动态及其经营管理提供参考。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

实验地点位于广州市近郊的中国科学院华南植物园科研区(23.16° N, 113.35° E)。该地属于亚热带季风气候区,全年平均可见光辐射总量为4 367.2–4 597.3 MJ·m⁻²,年平均气温21.5 °C,年降水量约1 700 mm,4–9月的降水量约占全年降水量的80%,平均相对湿度77%。土壤类型为地带性赤红壤,植被类型属于典型的亚热带季风常绿阔叶林,其主要的优势树种是木荷(*Schima superba*)、黄果厚壳桂(*Cryptocarya concinna*)、锥栗(*Castanea henryi*)。该地区受工业影响,大气污染严重,是我国的高氮沉降地区,2006年试验地的大气氮沉降量为56 kg N·hm⁻²·a⁻¹ (Liu *et al.*, 2008)。

1.2 实验设计

本试验参考广州2006年大气氮沉降量(56 kg N·hm⁻²·a⁻¹)以及以往类似研究的设计(Mo *et al.*, 2006; Liu *et al.*, 2011),采用裂区试验设计,设置3个氮添加水平,每个氮添加水平分别用2种喷洒方法(幼苗冠层喷洒和土壤表层喷洒),共6个实验处理,每个处理设置6个重复。供试土壤采自华南植物园游览区季风林表层土壤(0–20 cm),土壤理化参数背景

值见表1。四种亚热带主要树种分别是海南红豆(*Ormosia pinnata*)、马占相思(*Acacia mangium*)、木荷(*Schima superba*)和马尾松(*Pinus massoniana*),其中海南红豆和马占相思为豆科树种,木荷和马尾松为非豆科树种,马尾松为针叶树种,其余均为阔叶树种。

1.3 实验处理

2012年3月29日,从苗圃地选择株高、基径及生长状况基本一致的海南红豆、马占相思、木荷和马尾松幼苗各36株移栽至温室的144个花盆中,花盆高30 cm,上口直径40 cm。幼苗移栽至花盆待缓苗后进行氮添加处理。6个实验处理分别是:(1)土壤对照处理:背景大气氮沉降量5.6 g·N·m⁻²·a⁻¹ (S-CK);(2)土壤中氮处理:15.6 g·N·m⁻²·a⁻¹ (S-MN);(3)土壤高氮处理:20.6 g·N·m⁻²·a⁻¹ (S-HN);(4)冠层对照处理:背景大气氮沉降量5.6 g·N·m⁻²·a⁻¹ (C-CK);(5)冠层中氮处理:15.6 g·N·m⁻²·a⁻¹ (C-MN);(6)冠层高氮处理:20.6 g·N·m⁻²·a⁻¹ (C-HN)。实验添加的氮均为硝酸铵(NH₄NO₃),从6月1日开始,每周五将对照、中氮、高氮处理所需1.85、5.16和6.81 g NH₄NO₃分别与4.8 L水混匀后放入花洒中从幼苗顶端和土壤表层喷洒。

1.4 幼苗基径、株高、生物量测定及计算

分别于2012年6、12月和2013年11月测定所有幼苗的基径和株高。2013年11月,所有树苗采用全收割法进行收割。收割后,先将根系的泥土洗净,再按照粗根(直径> 2 mm)、细根(直径< 2 mm)、茎枝、叶称取鲜质量,然后选定各部位单位质量的部分样品放入60 °C烘箱内烘干至恒定质量,分别称其干物质量,通过干、鲜质量比计算出整株植物根、茎枝及叶的干物质量,得到每株树苗各部位的生物量和总生物量,同时计算植株的根冠比。在植物全收割的同时采集土壤样品,带回实验室测土壤pH值和水分系数(附录I)。

1.5 土壤理化参数分析

土壤装盆前全部混合均匀。随机采取部分土壤样品进行化学分析获得土壤理化参数背景值。土壤

表1 氮添加处理前土壤理化参数背景值(平均值±标准偏差, n = 12)

Table 1 Background values of soil physicochemical properties at beginning of the experiment (mean ± SD, n = 12)

土壤深度 Soil depth (cm)	pH值 pH value	有效磷 Available phosphorus (mg·kg ⁻¹)	硝态氮 Nitrate nitrogen (mg·kg ⁻¹)	铵态氮 Ammonium nitrogen (mg·kg ⁻¹)	有机质 Organic matter (g·kg ⁻¹)
0–20	3.99 ± 0.096	0.84 ± 0.072	17.39 ± 1.34	6.01 ± 0.69	22.72 ± 1.20

有机质用重铬酸钾氧化-外加热法测定。有效P用HCl-氟化铵浸提-钼锑抗比色法分析。铵态氮和硝态氮采用KCl浸提-紫外分光光度计比色法测定。背景和最后一次土壤样品的pH值采用电极法测定(称取10 g土加入25 mL去离子水混合均匀)。

1.6 数据处理

所有数据均运用SPSS 17.0统计软件进行分析,对基径和株高以及生物量进行物种、添氮量和添氮方式多因素方差分析。对照、中氮和高氮之间以及土壤和冠层两种氮添加方式间的基径、株高和生物量(2013年11月)差异显著性用单因素方差分析以及Duncan氏多重比较,显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$;土壤pH值和水分数分析时,每2盆土壤混合成一个样品, $n = 3$ 。

2 结果和分析

2.1 不同氮添加量和0添加方式对4种不同乡土树种基径与树高的影响

经过两个生长季, 4种幼苗的株高和基径在物种间差异显著($p < 0.001$), 所有氮处理下, 海南红豆和马占相思的株高和基径均高于木荷和马尾松。并且氮添加量、添加方式和物种三因素间存在着明显的交互效应($p < 0.001$)(表2)。不同氮添加量对基径和株高的影响有差异, 与对照(CK)相比, S-MN仅降低了马尾松的株高, 对其他物种没有影响, S-HN降低

了海南红豆的基径以及马尾松的株高和基径; C-MN对4个树种影响不明显, C-HN处理明显促进了木荷和马尾松的基径和株高(图1, 图2)。

两种氮添加方式间海南红豆和马占相思的基径和株高没有差异, 但木荷和马尾松的株高和基径差异较大。木荷在CK、MN、HN 3个氮添加水平下, 冠层氮添加的基径和株高均高于土壤氮添加, 冠层氮添加比土壤氮添加更能促进木荷的生长; 马尾松在CK和MN处理下, 土壤氮添加的株高和基径明显高于冠层氮添加, HN处理下则相反(图1, 图2)。

2.2 不同氮添加量和添加方式对4种不同乡土树种总生物量及其分配的影响

总生物量在物种间的差异也极为明显($F = 122.901$, $p < 0.001$)。所有氮处理下, 海南红豆和马占相思总生物量积累均高于木荷和马尾松。总生物量在不同氮添加量间差异明显, 且氮添加量、添加方式和物种三因素间存在着明显的交互效应($p < 0.001$)(表2)。与CK相比, S-MN增加了海南红豆、马占相思和木荷的总生物量, 明显降低了马尾松的总生物量($p < 0.01$), C-MN仅增加了马占相思的总生物量, 对其他3个树种幼苗没有影响; S-HN增加了马占相思的总生物量, 但显著降低了马尾松总生物量($p < 0.01$), C-HN明显增加了马占相思和马尾松的总生物量。总生物量在氮添加方式之间的响应差异与基径、株高基本一致(图3)。

表2 氮添加量和氮添加方式对4种树种幼苗生长的影响(三因素方差分析)

Table 2 Effects of N addition level and regime on seedling growth in four major tree species (three-way ANOVA)

主要因素及相互作用 Main factors and interactions	基径 Basal diameter		株高 Tree height		生物量 Biomass		土壤pH Soil pH	
	<i>F</i> and <i>p</i> values	<i>d.f.</i>	<i>F</i> and <i>p</i> values	<i>d.f.</i>	<i>F</i> and <i>p</i> values	<i>d.f.</i>	<i>F</i> and <i>p</i> values	<i>d.f.</i>
处理水平 Level	6.721 0.002	2	4.013 0.021	2	3.608 0.039	2	70.555 <0.001	2
施氮方式 Regime	0.906 0.344	1	0.544 0.463	1	6.421 0.017	2	107.545 <0.001	1
物种 Species	48.661 <0.001	3	386.887 <0.001	3	122.901 <0.001	3	31.299 <0.001	3
水平×施氮方式 Level × regime	19.591 <0.001	2	1.799 0.171	2	12.949 <0.001	2	7.314 0.002	3
水平×物种 Level × species	5.293 <0.001	6	2.088 0.062	6	12.266 <0.001	6	1.681 0.146	6
施氮方式×物种 Regime × species	7.207 <0.001	3	8.017 <0.001	3	11.592 <0.001	3	3.458 0.023	3
水平×施氮方式×物种 Level × regime × species	9.227 <0.001	6	1.673 0.136	6	10.981 <0.001	6	5.313 <0.001	6
误差 Error		95		95		103		48

表中数据为4个树种的基径、株高、生物量和土壤pH三因素(氮添加水平、氮添加方式和物种)方差分析及交互作用下*t*检验的*F*值、*p*值以及自由度, 加粗字体的*p*值均为差异显著($p < 0.05$)。

Data in the table are *F* values, degrees of freedom (*d.f.*) and *p* values of *t*-test for basal diameter, tree height, biomass, soil pH in four major tree species in three-way ANOVA of N addition level, N addition regime, and species. *p*-values with bold indicate significant differences ($p < 0.05$).

图1 不同氮添加量和氮添加方式对幼苗基径的影响(平均值±标准偏差)。不同小写字母(a, b)和大写字母(A, B)分别表示土壤氮添加和冠层氮添加下低氮、中氮、高氮处理间差异显著($p < 0.05$); *表示两种施氮方式间有差异(Duncan多重比较; $* p < 0.05$, $** p < 0.01$)。CK, 对照处理; HN, 高氮处理; MN, 中氮处理。CN, 冠层氮添加; SN, 土壤氮添加。AM, 马占相思; OP, 海南红豆; PM, 马尾松; SS, 木荷。

Fig. 1 Effects of N addition level and regime on tree basal diameter in four tree species (mean $\pm$ SD). Different lowercase letters (a, b) and capital letters (A, B) above the error bars indicate significant differences among N addition levels in soil and on canopy, respectively, in each species ($p < 0.05$); * above the error bars indicate significant difference between two N addition regimes (Duncan multiple range test; $* p < 0.05$, $** p < 0.01$). CK, ambient N addition; HN, high N addition; MN, medium N addition. CN, N addition on canopy; SN, N addition in soil. AM, *Acacia mangium*; OP, *Ormosia pinnata*; PM, *Pinus massoniana*; SS, *Schima superba*.

不同氮添加量和氮添加方式对4个树种粗根和茎生物量积累的影响与总生物量一致,但对叶和细根生物量影响更明显(图4)。其中,S-HN明显降低了海南红豆的细根生物量,增加了其叶生物量;4个树种C-HN细根生物量均高于S-HN细根生物量。

3 讨论

3.1 不同氮添加量对植物幼苗生长的影响

已有研究表明,在氮缺乏或尚未饱和的生态系统中,适量的氮添加会增加土壤有效氮,对植物生长有促进作用,但长期过量的氮输入反而会降低植物的初级生产力,这是由于高氮量会导致土壤酸化、营养元素不平衡,不利于幼苗的生长(Aber *et al.*, 1998; Bauer *et al.*, 2004; Lu *et al.*, 2014)。与对照相比,土壤和冠层MN、HN均促进了木荷和马占相思的生长,但S-HN明显抑制了马尾松的生长;海南

红豆、木荷和马尾松S-MN下的生物量明显高于S-HN,说明土壤中氮比高氮对植物生长有利。其他一些氮添加实验也得到类似的结果,如:Magill等(2004)在哈佛森林氮处理实验中,松林生物量随着氮输入量的增多而减少;高氮添加抑制了日本赤松(*Pinus densiflora*)幼苗的生长(Nakaji *et al.*, 2001);李德军等(2004)研究了氮添加对亚热带木荷、黄果厚壳桂2种常绿阔叶树种幼苗生长的影响,发现中等程度的氮处理促进了幼苗的生长,而高氮处理对幼苗生长产生了负面效应。

本研究中,叶和细根生物量对氮添加量的响应比较明显。有研究表明氮添加会改变植株生物量的分配进而影响幼苗的生长,一定量的氮添加使土壤有效氮含量增加,促进植物地上部分的积累(Flückiger & Braun, 1998; 段洪浪等, 2009)。本实验中,S-MN增加了海南红豆、马占相思和木荷的叶生

图2 不同氮添加量和氮添加方式对幼苗株高的影响(平均值±标准偏差)。不同小写字母(a, b)和大写字母(A, B)分别表示土壤氮添加和冠层氮添加下低氮、中氮、高氮处理间差异显著($p < 0.05$); *表示两种施肥方式间有差异(Duncan多重比较; $* p < 0.05$, $** p < 0.01$)。CK, 对照处理; HN, 高氮处理; MN, 中氮处理。CN, 冠层氮添加; SN, 土壤氮添加。AM, 马占相思; OP, 海南红豆; PM, 马尾松; SS, 木荷。

Fig. 2 Effects of N addition level and regime on tree height in four tree species (mean $\pm$ SD). Different lowercase letters (a, b) and capital letters (A, B) above the error bars indicate significant differences among N addition levels in soil and on canopy, respectively, in each species ($p < 0.05$); * above the error bars indicate significant differences between two N addition regimes (Duncan multiple range test; $* p < 0.05$, $** p < 0.01$). CK, ambient N addition; HN, high N addition; MN, medium N addition. CN, N addition on canopy; SN, N addition in soil. AM, *Acacia mangium*; OP, *Ormosia pinnata*; PM, *Pinus massoniana*; SS, *Schima superba*.

表3 不同氮添加量和氮添加方式下幼苗的根冠比(平均值±标准偏差)

Table 3 Root-shoot ratios under different nitrogen (N) treatments (mean $\pm$ SD)

物种 Species	冠层施N N addition on canopy			土壤施N N addition in soil		
	CK	MN	HN	CK	MN	HN
海南红豆 <i>Ormosia pinnata</i>	0.275 $\pm$ 0.029	0.307 $\pm$ 0.003	0.315 $\pm$ 0.067	0.453 $\pm$ 0.103 ^a	0.332 $\pm$ 0.018 ^{ab}	0.253 $\pm$ 0.009 ^b
马占相思 <i>Acacia mangium</i>	0.251 $\pm$ 0.071	0.222 $\pm$ 0.039	0.317 $\pm$ 0.059	0.262 $\pm$ 0.059	0.235 $\pm$ 0.005	0.391 $\pm$ 0.175
木荷 <i>Schima superba</i>	0.514 $\pm$ 0.128	0.489 $\pm$ 0.021	0.754 $\pm$ 0.241	0.575 $\pm$ 0.055	0.544 $\pm$ 0.124	0.608 $\pm$ 0.008
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	0.336 $\pm$ 0.119	0.277 $\pm$ 0.021	0.223 $\pm$ 0.070	0.170 $\pm$ 0.035 ^b	0.299 $\pm$ 0.075 ^{ab}	0.343 $\pm$ 0.003 ^a

表中不同的小写字母(a, b)表示同一施肥方式下3种氮添加量之间差异显著(Duncan多重比较; $p < 0.05$)。CK, 对照处理5.6 g N·m⁻²·a⁻¹; HN, 高氮处理20.6 g N·m⁻²·a⁻¹; MN, 中氮处理15.6 g N·m⁻²·a⁻¹。

Different lowercase letters (a, b) indicate significant differences among N addition levels within the same regimes (Duncan multiple range test; $p < 0.05$). CK, ambient N addition 5.6 g N·m⁻²·a⁻¹; HN, high N addition 20.6 g N·m⁻²·a⁻¹; MN, medium N addition 15.6 g N·m⁻²·a⁻¹.

物量,说明适量的氮添加有效地促进了地上部分生物量的积累,根冠比下降(表3)。NITREX实验发现氮沉降在一定程度上对地上部分的生长有促进作用,但同时对根系的生长不利(Persson *et al.*, 1998)。Mo等(2008)在广东省鼎湖山自然保护区3种成熟森

林中进行的氮添加实验表明:过量氮沉降危害根系生长,不利于细根生物量的生长和养分的吸收。本研究中,S-HN降低了海南红豆、马尾松的根生物量,尤其是细根生物量明显减少($p < 0.05$)(图4),可能原因是土壤高氮引起的土壤酸化不利于细根的生长

图3 不同氮添加量和氮添加方式对幼苗生物量的影响(平均值±标准偏差)。不同小写字母(a, b)和大写字母(A, B)分别表示土壤氮添加和冠层氮添加下低氮、中氮、高氮处理间差异显著($p < 0.05$); *表示两种施氮方式间有差异(Duncan多重比较; * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$)。CK, 对照处理; HN, 高氮处理; MN, 中氮处理。CN, 冠层氮添加; SN, 土壤氮添加。AM, 马占相思; OP, 海南红豆; PM, 马尾松; SS, 木荷。

Fig. 3 Effects of N addition level and regime on biomass in four tree species (mean ± SD). Different lowercase letters (a, b) and capital letters (A, B) above the error bars indicate significant differences among N addition levels in soil and on canopy, respectively, in each species ($p < 0.05$); * above the error bars indicate significant differences between two N addition regimes (Duncan multiple range test; * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$). CK, ambient N addition; HN, high N addition; MN, medium N addition. CN, N addition on canopy; SN, N addition in soil. AM, *Acacia mangium*; OP, *Ormosia pinnata*; PM, *Pinus massoniana*; SS, *Schima superba*.

(Nakaji *et al.*, 2001)。

3.2 不同氮添加量下两种氮添加方式对幼苗生长的影响

本研究结果表明,不同氮添加方式对幼苗生长的影响不同,特别是生物量差异明显($p = 0.017$),且物种、氮添加量和施氮方式间存在着明显的交互效应(表2),这表明氮添加方式对幼苗生长的影响因不同物种和不同氮添加量而异。不同氮添加方式对固氮树种海南红豆和马占相思的生长没有影响,而对非固氮树种木荷和马尾松的基径、株高和生物量影响较大。木荷在3个氮添加水平下,冠层施氮幼苗的生长均明显快于土壤施氮幼苗的生长;马尾松在HN水平下,冠层施氮促进了幼苗的生长,而土壤施氮抑制了幼苗的生长。冠层施氮促进植物生长的作用大于土壤施氮,可能包括两个方面的

机制:一方面,植物叶冠能直接吸收一部分氮促进植物的生长,Tomaszewski等(2003)研究了科罗拉多亚高山森林冠层对大气中氮的吸收,结果表明在生长季冠层能吸收氮2–3 kg·hm⁻²,占叶片生长所需氮的10%–15%,Sievering等(2007)在美国西部针叶林的氮沉降研究表明生长季约20%净生态系统碳交换量(NEE)是由冠层吸收氮导致的;另一方面,Morris等(2003)也指出冠层截留后的穿透雨中NH₄⁺和NO₃⁻分别减少了73%和47%,到达土壤中的无机氮明显减少,能够缓和土壤氮含量过高,土壤酸化程度较轻。

两种氮添加方式对幼苗细根和叶生物量的影响不同。HN水平下,4个树种细根生物量在土壤施氮方式下均低于冠层施氮,当土壤氮过量时,植物体会减少细根生物量以减少氮的吸收(Zhu *et al.*, 2013);

图4 不同氮添加量和氮添加方式下对幼苗各部位(粗根、细根、茎和叶)生物量积累的影响(平均值±标准差)。不同小写字母(a, b)和大写字母(A, B)分别表示土壤氮添加和冠层氮添加下低氮、中氮、高氮处理间差异显著($p < 0.05$); *表示两种施氮方式间有差异(Duncan多重比较; $* p < 0.05$, $** p < 0.01$)。CK, 对照处理; HN, 高氮处理; MN, 中氮处理。CN, 冠层氮添加; SN, 土壤氮添加。AM, 马占相思; OP, 海南红豆; PM, 马尾松; SS, 木荷。

Fig. 4 Effects of N addition level and regime on biomass accumulation in leaves, stem and coarse-roots and fine-roots (mean $\pm$ SD). Different lowercase letters (a, b) and capital letters (A, B) above the error bars indicate significant differences among N addition levels in soil and on canopy, respectively, in each species ($p < 0.05$); * above the error bars indicate significant differences between two N addition regimes (Duncan multiple range test; $* p < 0.05$, $** p < 0.01$). CK, ambient N addition; HN, high N addition; MN, medium N addition. CN, N addition on canopy; SN, N addition in soil. AM, *Acacia mangium*; OP, *Ormospira pinnata*; PM, *Pinus massoniana*; SS, *Schima superba*.

两种添加方式对幼苗叶生物量的影响差异因物种而异,这可能与不同树种叶片氮吸收特性和叶片对氮添加的敏感度有关。以上结果表明:对于非固氮植物,冠层氮添加比土壤氮添加对植物生长的促进效应更大,植物冠层直接吸收的这部分氮对植物生长的促进作用很重要,但被以前的研究所忽略,可能低估了氮沉降对植物生长的正效应。向土壤直接添加高氮也夸大了对植物生长的负面效应(马尾松),从而导致已有氮沉降研究高估了植物生长对高氮的响应。

3.3 不同树种对氮添加量和氮添加方式的响应差异

物种因本身的氮利用特性不同,对不同氮水平的适应能力存在差异。长期的氮沉降会改变物种的组成,从而影响群落结构,降低森林植物的多样性,最终影响群落的演替(Robbink *et al.*, 1998; Suding *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2011)。氮沉降效应在不同功能型之间差异显著,有研究表明豆科植物在高氮环境下比非豆科植物更有优势(Dyhrman *et al.*, 2006)。本研究4个树种对氮处理的响应差异极显著($p < 0.001$),

图5 不同氮添加量和氮添加方式对土壤pH值的影响(平均值±标准偏差)。不同小写字母(a, b)和大写字母(A, B)分别表示土壤氮添加和冠层氮添加下低氮、中氮、高氮处理间差异显著($p < 0.05$); *表示两种施氮方式间有差异(Duncan多重比较; * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$)。CK, 对照处理; HN, 高氮处理; MN, 中氮处理。CN, 冠层氮添加; SN, 土壤氮添加。AM, 马占相思; OP, 海南红豆; PM, 马尾松; SS, 木荷。

Fig. 5 Effects of N addition level and regime on soil pH value (mean $\pm$ SD). Different lowercase letters (a, b) and capital letters (A, B) above the error bars indicate significant differences among N addition levels in soil and on canopy, respectively, in each species ($p < 0.05$); * above the error bars indicate significant differences between two N addition regimes (Duncan multiple range test; * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$). CK, ambient N addition; HN, high N addition; MN, medium N addition. CN, N addition on canopy; SN, N addition in soil. AM, *Acacia mangium*; OP, *Ormosia pinnata*; PM, *Pinus massoniana*; SS, *Schima superba*.

表4 不同树种幼苗生长对氮添加方式和氮添加量响应差异(Duncan多重比较)

Table 4 Differential responses of seedling growth to N addition regime and level among different tree seedlings (Duncan multiple range test)

		土壤施N N addition in soil			冠层施N N addition on canopy		
		CK	MN	HN	CK	MN	HN
豆科与非豆科相比 Legumes versus non-legumes	基径	18.450	36.161	5.461	5.747	15.424	3.38
	Base diameter	0.001	<0.001	0.038	0.03	0.002	0.087
	株高	46.039	32.859	8.979	16.937	9.629	9.111
	Tree height	<0.001	<0.001	0.011	0.001	0.008	0.009
	生物量	9.126	21.174	30.829	0.932	11.908	6.263
阔叶与针叶相比 Broadleaf versus conifers	Biomass	0.029	0.006	0.002	0.379	0.026	0.046
	基径	0.679	1.262	24.355	23.799	32.911	1.297
	Basal diameter	0.338	0.276	<0.001	<0.001	<0.001	0.269
	株高	2.516	6.264	7.065	11.620	17.643	10.767
	Tree height	0.129	0.022	0.018	0.003	<0.001	0.004
	生物量	0.110	10.299	8.170	16.323	33.324	1.11
	Biomass	0.750	0.013	0.017	0.004	0.001	0.323

表中数值为基径、株高、生物量在相同添加方式和氮添加量下豆科(海南红豆、马占相思)与非豆科(木荷)、阔叶树种(海南红豆、马占相思、木荷)与针叶树种(马尾松)间多重比较的F值和p值,表中加粗字体的p值均为差异显著($p < 0.05$)。CK, 对照处理; HN, 高氮处理; MN, 中氮处理。

Data in the table are F values and p values for basal diameter, tree height, and biomass (Duncan multiple range test) for comparison between Legumes (*Ormosia pinnata* and *Acacia mangium*) and non-legumes (*Schima superba*), and between broadleaf (*Ormosia pinnata*, *Acacia mangium*, and *Schima superba*) and conifers (*Pinus massoniana*) within same N addition levels and regimes. p-values with bold indicate significant differences ($p < 0.05$). CK, ambient N addition; HN, high N addition; MN, medium N addition.

同为阔叶树种的豆科植物(海南红豆、马占相思)和非豆科植物(木荷)之间差异明显(表4), 在所有氮添加处理下, 豆科植物的株高、基径和总生物量均大于非豆科植物, 豆科植物由于生物固氮作用比非豆科植物在氮利用上有优势; 同时豆科植物还可以利用细胞外的磷酸酯酶分解有机P, 从而提高P的利用率(Houlton *et al.*, 2008)。不同氮添加量和氮添加方式对海南红豆生长无显著差异, 海南红豆是典型的固氮树种, 具有根瘤固氮作用, 氮素的增加并不能显著促进植物的生长; 但同为豆科植物的马占相思, 中氮和高氮促进了其幼苗生长, 且高氮比中氮的促进作用更大, 马占相思在氮沉降增加背景下比其他几个乡土树种生长更快, 这说明豆科植物对氮的响应机制是复杂的。

不同氮添加量和氮添加方式对非豆科植物影响很大, 中氮和高氮均促进了木荷幼苗的生长, 且冠层施氮对植物生长的促进作用比土壤施氮更大。马尾松(针叶)幼苗在S-HN处理下植物生长受到明显的抑制, 其幼苗死亡率达到了50%, 土壤高氮不利于马尾松幼苗的生长可能与土壤酸化有关, 土壤pH值随着氮添加量增加而下降, 马尾松S-HN处理下pH值最低, 仅为3.52 (图5), 氮沉降引起的土壤酸化导致可利用性P以及其他阳离子的流失使生产力下降(Matson *et al.*, 1999)。庞丽等(2014)通过氮添加对马尾松幼苗的生长研究也表明氮处理增加了马尾松根系有机酸和酸性磷酸酶的分泌, 使植株极度缺磷, 抑制了幼苗的生长。在氮沉降量增加的背景下, 阔叶树种比针叶树种在生长上更有优势。其他研究也得到相似的结论, 如Xia和Wan (2008)经过Meta分析表明氮沉降对阔叶树种生长的促进作用比针叶树种更大; Magill等(2004)在美国哈佛实验林的研究也证实了氮素对植物生长的影响因森林类型、植物种类而不同。不同树种对氮处理响应差异的原因是复杂的, 与物种本身的氮利用特性、氮处理时间、氮沉降量、植株生长的自然环境、生长策略等有关, 这有待于我们今后做进一步研究。

基金项目 广东省林业科技创新专项资金(2012-KJCX019-02)和国家自然科学基金(31370530)。

参考文献

Aber J, McDowell W, Nadelhoffer K, Magill A, Berntson G, Kamakea M, McNulty S, Currie W, Rustad L, Fernandez I (1998). Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems.

BioScience, 48, 921–934.

Bauer GA, Bazzaz FA, Minocha R, Long S, Magill A, Aber J, Berntson GM (2004). Effects of chronic N additions on tissue chemistry, photosynthetic capacity, and carbon sequestration potential of a red pine (*Pinus resinosa* Ait.) stand in the NE United States. *Forest Ecology and Management*, 196, 173–186.

Bobbink R, Hornung M, Roelofs JGM (1998). The effects of air-borne nitrogen pollutants on species diversity in natural and semi-natural European vegetation. *Journal of Ecology*, 86, 717–738.

Boyce RL, Friedland AJ, Chamberlain CP, Poulson SR (1996). Direct canopy nitrogen uptake from ¹⁵N-labeled wet deposition by mature red spruce. *Canadian Journal of Forest Research*, 26, 1539–1547.

Duan HL, Liu JX, Deng Q, Chen XM, Zhang DQ (2009). Effects of elevated CO₂ and N deposition on plant biomass accumulation and allocation in subtropical forest ecosystems: A mesocosm study. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 33, 570–579. (in Chinese with English abstract) [段洪浪, 刘菊秀, 邓琦, 陈小梅, 张德强 (2009). CO₂浓度升高与氮沉降对亚热带森林生态系统植物生物量积累及分配格局的影响. *植物生态学报*, 33, 570–579.]

Dyhrman ST, Chappell PD, Haley ST, Moffett JW, Orchard ED, Waterbury JB, Webb EA (2006). Phosphonate utilization by the globally important marine diazotroph *Trichodesmium*. *Nature*, 439, 68–71.

Flüickiger W, Braun S (1998). Nitrogen deposition in Swiss forests and its possible relevance for leaf nutrient status, parasite attacks and soil acidification. *Environmental Pollution*, 102, 69–76.

Galloway JN, Cowling EB (2002). Reactive nitrogen and the world: 200 years of change. *AMBIO*, 31, 64–71.

Galloway JN, Dentener FJ, Capone DG, Boyer EW, Howarth RW, Seitzinger SP, Asner GP, Cleveland CC, Green PA, Holland EA, Karl DM, Michaels AF, Porter JH, Townsend AR, Vöosmarty CJ (2004). Nitrogen cycles: Past, present, and future. *Biogeochemistry*, 70, 153–226.

George E, Seith B (1998). Long-term effects of a high nitrogen supply to soil on the growth and nutritional status of young Norway spruces trees. *Environmental Pollution*, 102, 301–306.

Gruber N, Galloway JN (2008). An earth-system perspective of the global nitrogen cycle. *Nature*, 451, 293–296.

Gundersen P, Emmett BA, Kjognaas OJ, Koopmans CJ, Tietema A (1998). Impact of nitrogen deposition on nitrogen cycling in forests: A synthesis of NITREX data. *Forest Ecology and Management*, 101, 37–55.

Gundersen P, Schmidt IK, Raulund-Rasmussen K (2006). Leaching of nitrate from temperate forests effects of air pollution and forest management. *Environmental Reviews*, 14, 1–57.

- Houlton BZ, Wang YP, Vitousek PM, Field CB (2008). A unifying framework for dinitrogen fixation in the terrestrial biosphere. *Nature*, 454, 327–330.
- Li DJ, Mo JM, Fang YT, Cai XA, Xu GL (2004). Effects of simulated nitrogen deposition on growth and photosynthesis of *Schima superba*, *Castanopsis chinensis* and *Cryptocarya concinna* seedlings. *Acta Ecologica Sinica*, 24, 876–882. (in Chinese with English abstract) [李德军, 莫江明, 方运霆, 蔡锡安, 徐国良 (2004). 模拟氮沉降对三种南亚热带树苗生长和光合作用的影响. *生态学报*, 24, 876–882.]
- Li DJ, Mo JM, Fang YT, Li ZA (2005). Effects of simulated nitrogen deposition on biomass production and allocation in *Schima superba* and *Cryptocarya concinna* seedlings in subtropical China. *Acta Phytocologica Sinica*, 29, 543–549. (in Chinese with English abstract) [李德军, 莫江明, 方运霆, 李志安 (2005). 模拟氮沉降对南亚热带两种乔木幼苗生物量及其分配的影响. *植物生态学报*, 29, 543–549.]
- Li DJ, Mo JM, Fang YT, Peng SL, Gundersen P (2003). Impact of nitrogen deposition on forest plants. *Acta Ecologica Sinica*, 23, 1891–1900. (in Chinese with English abstract) [李德军, 莫江明, 方运霆, 彭少麟, Gundersen P (2003). 氮沉降对森林植物的影响. *生态学报*, 23, 1891–1900.]
- Liu JX, Zhang DQ, Zhou GY, Faivre-Vuillin BF, Deng Q, Wang CL (2008). CO₂ enrichment increases nutrient leaching from model forest ecosystems in subtropical China. *Biogeosciences*, 5, 1783–1795.
- Liu JX, Zhou GY, Xu ZH, Duan HL, Li YL, Zhang DQ (2011). Photosynthesis acclimation, leaf nitrogen concentration, and growth of four tree species over 3 years in response to elevated carbon dioxide and nitrogen treatment in subtropical China. *Journal of Soils and Sediments*, 11, 1155–1164.
- Lu XK, Mao QG, Gilliam FS, Luo YQ, Mo JM (2014). Nitrogen deposition contributes to soil acidification in tropical ecosystems. *Global Change Biology*, 20, 3790–3801.
- Magill AH, Aber JD, Currie WS, Nadelhoffer KJ, Martin ME, McDowell WH, Melillo JM, Steudler P (2004). Ecosystem response to 15 years of chronic nitrogen additions at the Harvard Forest LTER, Massachusetts, USA. *Forest Ecology and Management*, 196, 7–28.
- Matson PA, McDowell WH, Townsend AR, Vitousek PM (1999). The globalization of N deposition: Ecosystem consequences in tropical environments. *Biogeochemistry*, 46, 67–83.
- Mo JM, Brown S, Xue JH, Fang YT, Li ZA (2006). Response of litter decomposition to simulated N deposition in disturbed, rehabilitated and mature forests in subtropical China. *Plant and Soil*, 282, 135–151.
- Mo JM, Zhang W, Zhu WX, Gundersen P, Fang YT, Li DJ, Wang H (2008). Nitrogen addition reduces soil respiration in a mature tropical forest in southern China. *Global Change Biology*, 14, 403–412.
- Morris DM, Gordon AG, Gordon AM (2003). Patterns of canopy interception and throughfall along a topographic sequence for black spruce dominated forest ecosystems in northwestern Ontario. *Canadian Journal of Forest Research*, 33, 1046–1060.
- Nakaji T, Fukami M, Dokiya Y, Izuta T (2001). Effects of high nitrogen load on growth, photosynthesis and nutrient status of *Cryptomeria japonica* and *Pinus densiflora* seedlings. *Trees*, 15, 453–461.
- Nohrstedt HÖ (2001). Response of coniferous forest ecosystems on mineral soils to nutrient additions: A review of Swedish experiences. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 16, 555–573.
- Pang L, Zhang Y, Zhou ZC, Feng ZP, Chu DY (2014). Effects of simulated nitrogen deposition on *Masson pine* root exudates of different pedigrees and phosphorus efficiency in *Pinus massoniana* families under low phosphorus stress. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 38, 27–35. (in Chinese with English abstract) [庞丽, 张一, 周志春, 丰忠平, 储德裕 (2014). 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. *植物生态学报*, 38, 27–35.]
- Persson H, Ahlström K, Clemensson-Lindell A (1998). Nitrogen addition and removal at Gårdsjön—effects on fine-root growth and fine-root chemistry. *Forest Ecology and Management*, 101, 199–206.
- Ren R, Mi FJ, Bai NB (2000). A chemometrics analysis on the data of precipitation chemistry of China. *Journal of Beijing Polytechnic University*, 26(2), 90–95. (in Chinese with English abstract) [任仁, 米丰杰, 白乃宾 (2000). 中国降水化学数据的化学计量学分析. *北京工业大学学报*, 26(2), 90–95.]
- Robbink R, Hornung M, Roelofs JGM (1998). The effects of air-borne nitrogen pollutants on species diversity in natural and semi-natural European vegetation. *Journal of Ecology*, 86, 717–738.
- Sievering H, Fernandez I, Lee J, Hom J, Rustad L (2000). Forest canopy uptake of atmospheric nitrogen deposition at eastern U. S. conifer sites: Carbon storage implications. *Global Biogeochemical Cycles*, 14, 1153–1159.
- Sievering H, Tomaszewski T, Torizzo J (2007). Canopy uptake of atmospheric N deposition at a conifer forest: Part I—Canopy N budget, photosynthetic efficiency and net ecosystem exchange. *Tellus B*, 59, 483–492.
- Suding KN, Collins SL, Gough L, Clark C, Cleland EE, Gross KL, Milchunas DG, Pennings S (2005). Functional- and abundance-based mechanisms explain diversity loss due to N fertilization. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102, 4387–4392.
- Tomaszewski T, Boyce RL, Sievering H (2003). Canopy uptake

of atmospheric nitrogen and new growth nitrogen requirement at a Colorado subalpine forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 33, 2221–2227.

Wilson EJ (1992). Foliar uptake and release of inorganic nitrogen compounds in *Pinus sylvestris* L. and *Picea abies* (L.) Karst. *New Phytologist*, 120, 407–416.

Xia JY, Wan SQ (2008). Global response patterns of terrestrial plant species to nitrogen addition. *New Phytologist*, 179, 428–439.

Zhao L, Zhou GY, Zhang DQ, Duan HL, Liu JX (2011). Effects of elevated CO₂ concentration and nitrogen deposition on the biomass accumulation and allocation in south subtropical main native tree species and their mixed communities. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 22, 1949–1954. (in Chinese with English abstract) [赵亮, 周国逸,

张德强, 段洪浪, 刘菊秀 (2011). CO₂浓度升高和氮沉降对亚热带主要乡土树种及群落生物量的影响. *应用生态学报*, 22, 1949–1954.]

Zheng XH, Fu CB, Xu XK, Yan XD, Huang Y, Han SH, Hu F, Chen GX (2002). The Asian nitrogen cycle case study. *AMBIO*, 31, 79–87.

Zhu FF, Yoh M, Gilliam FS, Yoh M, Lu XK, Mo JM (2013). Nutrient limitation in three lowland tropical forests in southern china receiving high nitrogen deposition: Insights from fine root responses to nutrient additions. *PLoS ONE*, 8, e82661.

责任编辑: 杨元合 责任编辑: 王 葳

附录I 两种氮添加方式下土壤含水量(平均值±标准偏差)

Supplement I Soil water content (%) under two N addition regimes (mean ± SD)

物种 Species	对照 Ambient N addition		中氮 Medium N addition		高氮 High N addition	
	土壤施氮 SN	冠层施氮 CN	土壤施氮 SN	冠层施氮 CN	土壤施氮 SN	冠层施氮 CN
海南红豆 <i>Ormosia pinnata</i>	17.11 ± 1.68	14.07 ± 1.40	18.28 ± 1.08	15.74 ± 1.99	17.06 ± 1.25	16.67 ± 1.01
马占相思 <i>Acacia mangium</i>	17.63 ± 2.17	13.87 ± 2.48	19.69 ± 0.39 ^a	13.83 ± 2.74 ^b	16.65 ± 1.12	14.33 ± 3.51
木荷 <i>Schima superba</i>	18.14 ± 1.13	16.73 ± 1.61	19.18 ± 0.80 ^a	16.03 ± 1.68 ^b	17.22 ± 0.81	15.70 ± 0.60
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	17.39 ± 2.49	15.52 ± 1.72	18.03 ± 1.18	17.28 ± 0.33	17.60 ± 0.74	15.85 ± 0.93

表中不同的小写字母(a, b)表示两种氮添加方式间有差异($p < 0.05$)。

Different lowercase letters (a, b) indicate significant differences between two N addition regimes within same N addition levels (Duncan multiple range test; $p < 0.05$); SN, N addition in soil; CN, N addition on canopy.