

文章编号: 1001-1498(2009)02-0190-06

# 枫香种源生物量和 NRA 对供氮水平的响应差异<sup>\*</sup>

冷华妮<sup>1,2</sup>, 陈益泰<sup>2</sup>, 饶龙兵<sup>2</sup>, 段红平<sup>1\*\*</sup>, 施翔<sup>2</sup>, 黄秀凤<sup>3</sup>

(1. 云南农业大学资源与环境学院, 云南 昆明 650201; 2. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江 富阳 311400;  
3. 浙江省富阳市林业局, 浙江 富阳 311400)

**摘要:**为研究不同纬度枫香种源经过无营养胁迫生长后对供氮水平的响应差异,按种源与氮 2 因素裂区设计砂培试验,以 N 水平为主处理,枫香种源为副处理,3 次重复,随机排列(水平内种源间)。结果表明:低氮胁迫会刺激枫香叶片提前形成花青素变红,且低纬区种源变红早于高纬区种源;另外低纬区种源与高纬区种源硝酸还原酶活性(NRA)存在各自的变化规律。以最高生物量为对照,在 0 N 水平下福建延平种源生物量降低最少(54.54%),且具有较高的生物量,但其在 2N 水平生物量迅速降低,耐肥性较差;其它种源生物量变化趋势一致。各种源根冠比从 0 N 到 1/2 N 水平均迅速降低:广西南丹 > 福建延平 > 浙江永康 > 安徽泾县,即随着纬度的升高,枫香种源根冠比受 N 的影响越来越小。统计分析发现,福建延平种源在无 N 及低 N 水平时 NRA 极显著高于其它种源,且具有较高生物量,受环境影响较小(主要是棚内重复间光照的差异),可以认为福建延平是优良的耐低 N 型种源。

**关键词:**枫香种源;氮水平;硝酸还原酶活性;根冠比;生物量

中图分类号: S722.7

文献标识码: A

## Response Difference of NRA, Shoot/Root Ratio and Biomass of Maple Provenances to Different Nitrogen Supplies

LENG Hua-ni<sup>1,2</sup>, CHEN Yi-tai<sup>2</sup>, RAO Long-bing<sup>2</sup>, DUAN Hong-ping<sup>1</sup>, SHI Xiang<sup>2</sup>, HUANG Xiu-feng<sup>3</sup>

(1. College of Resource and Environmental, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, Yunnan, China;

2. Research Institute of Subtropical Forestry, CAF, Fuyang 311400, Zhejiang, China;

3. Forestry Bureau of Fuyang City, Zhejiang Province, Fuyang 311400, Zhejiang, China)

**Abstract:** Four typical maple provenances from different latitudes (Jingxian of Anhui, Yongkang of Zhejiang, Yanping of Fujian and Nandan of Guangxi) were selected and did a split experiment of sand-breeding in which four levels of N (0 N, 1/2 N, 1 N, 2 N) were set up to study the responses of maple provenances from different latitudes to nitrogen stress after grown without nutrition by analyzing nitrate reductase activity (NRA), shoot/root ratio and biomass under different nitrogen supplies. The results showed that low nitrogen stress would stimulate leaves to form anthocyanin to turn red and low-latitudes areas source earlier than the high-latitude; In addition, there may be certain correlation between maple provenance responses to different nitrogen supplies and latitude that NRA in the low-latitude areas and in high-latitudes maple provenance has the same trend, respectively. Compared with the highest biomass, the percentage of Fujian Yanping provenance biomass decreased under 0 N was the least (54.54%) and had high biomass, other provenances had the same trend in different nitrogen supplies and from 0 N to 1/2 N the reduction range of R/S ratio in the order: Guangxi Nandan > Fujian Yanping > Zhejiang Yongkang > Anhui Jingxian

收稿日期: 2008-03-17

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2006BAD03A1401)和浙江省科技厅重大项目(2006C12065)

作者简介: 冷华妮(1981—),女,山东海阳人,硕士研究生,从事植物抗逆性方面的研究。E-mail: lenghuan8245760@163.com

\* 本试验在中国林科院亚热带林业研究所资助下完成,特此致谢!

\*\* 通讯作者: E-mail: duanhp\_yn@163.com

(1.055, 1.047, 0.616, 0.1043) could be considered that nitrogen had less influence on biomass allocation of maple provenance in high-latitudes. Statistical analysis showed that it can be considered that Yanping provenance is an excellent provenance adapts to low-N-resistance-type provenance with significant higher NRA of the leaves and roots, in conjunction with the highest biomass of all kind provenances under the absence and low level of nitrogen and less sensitive to environment (sunshine).

**Key words:** maple provenance; nitrogen supplies; nitrate reductase activity; R/S ratio; biomass

氮被称为生命元素,是蛋白质、核酸、磷脂、叶绿素及植物生长发育所必需的有机氮化合物的构成成分<sup>[1]</sup>。在自然生态系统中,氮素一般较为缺乏,特别是高山丘陵带,中国农业科学院土壤肥料研究所调查表明:土壤中存在主要养分限制因子,所有的土壤均缺氮,67%土壤缺磷,76%土壤缺钾,因此林木耐瘠薄试验一直是国内外研究的热点。枫香(*Liquidambar formosana* Hance)属金缕梅科(Hamamelidaceae)枫香属(*Liquidambar* L.),根系发达,萌芽力强,广泛分布于我国南方各省区,是我国南方林区中主要森林树种之一。该树种适应性很强,在较瘠薄的山脊、山坡、峭壁、石缝中均能生存;能耐干旱瘠薄,生长较为迅速;抗风、抵寒能力强,耐火烧,对SO<sub>2</sub>尤其氯化物有较强的抗性;天然更新容易,有“荒山先锋”树种之称<sup>[2]</sup>,对改善生态环境有重要的意义。

近年来,国内多个单位陆续开展了枫香生长节律、提取物物理化学性质分析、优树选育及其最佳DNA提取方法等诸多方面的研究<sup>[3-6]</sup>,但有关经过营养胁迫后,枫香种源生物量、根冠比、叶绿素及硝酸还原酶活性(NRA)对供氮水平响应差异方面的研究国内外还未见报道。鉴于此,本文以采自枫香主要分布区中4省(不同纬度)4个种源为研究材料,在浙江富阳进行了苗期试验,旨在研究不同纬度枫香对不同氮水平响应的种源差异,以及了解氮胁迫条件下枫香苗期的生长生理特性,以期为我国不同肥力地区生态林建设良种选育提供新的思路。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验在浙江富阳中国林科院亚热带林业研究所大棚内进行,地理位置为30°03'N, 119°57'E,海拔12 m。棚内平均温度28℃,相对湿度75%以上,日光照12~13 h。供试材料为安徽泾县、浙江永康、福建延平和广西南丹4种不同纬度的枫香种源(表1),主要基于何贵平等<sup>[7]</sup>对来自8省(区)的20个枫香种源的造林试验研究。

表 1 不同纬度的枫香种源

种源	纬度(N)/(°)	经度(E)/(°)	海拔/m	年均气温/°C
广西南丹	24.59	107.32	380	16.9
福建延平	26.38	118.10	480	19.3
浙江永康	29.54	120.01	310	17.5
安徽泾县	30.41	118.24	300	15.0

### 1.2 试验设计

砂培试验于2007年7月按种源与氮2因素裂区设计。以无N(0N)、低N(1/2N)、标准(1N)和高N(2N)4个N水平为主处理,不同枫香种源为副处理,3次重复(每次重复5杯,重复之间存在光照差异),随机排列(种源间)。培养基质为河砂(多次水洗至不含任何养分)。枫香种子于2007年5月上中旬播于苗床,生长正常,40 d后将生长一致的枫香幼苗(三叶一心)根系冲洗干净,移至装有河砂的塑料杯(有孔),每杯1株,置于另一个一次性水杯(上杯杯底距下杯杯底2~3 cm为宜)中,以减小由于养分流失带来的试验误差。经过约20 d的无营养胁迫生长(期间喷雾供水),于7月中旬进行处理。每个处理每隔2 d浇1次营养液,每杯每次20 mL,喷雾供水。试验处理营养液采用E. G. Bollard大量元素配方<sup>[8]</sup>(表2)和Amon微量元素混合液配方,调节pH为5.5~6.0,10月中旬终止处理,11月初收获。

表 2 试验处理配方

营养元素	0 N	1/2 N	1 N(标准)	2 N
KNO <sub>3</sub>	-	-	2	-
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	1	1	1	1
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	-	-	2	12
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	-	2	3	2
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1	1	-	1
MgSO <sub>4</sub>	2	2	2	2
CaSO <sub>4</sub>	2	-	-	-
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-	2	2	2

注: N、P、K、Mg、Ca、S的标准水平分别为224、31、156、48、80、160 mg·L<sup>-1</sup>;每个处理水平中NH<sub>4</sub><sup>+</sup>NO<sub>3</sub><sup>-</sup>=1:1。

### 1.3 测定方法

1.3.1 NRA测定 硝酸还原酶活性采用离体法测定<sup>[9]</sup>(略有修改)。于10月初晴天8:00,取生长一

致的枫香幼苗根系和叶片(每个种源 3 个重复,各选 1 株取混合样)分别置于事先放有冰块的保温箱内,迅速带回实验室。测定前用蒸馏水将植株根系和叶片洗净吸干水分。叶片用直径 1 cm 的打孔器打孔、根系剪碎,分别称取 3 份 0.3 g 放入锥形瓶。向各锥形瓶加入  $\text{KNO}_3 \cdot$  异丙醇 · 磷酸缓冲液混合液 9 mL 和蔗糖溶液 0.5 mL,其中对照锥形瓶(D)立即加入 0.5 mL 三氯乙酸混匀。将所有锥形瓶置真空干燥器中接真空泵抽气(约 10 min),反复几次直至叶片沉至瓶底并无气泡产生;然后于 30℃ 暗保温 30 min,取出立即向其它非对照的锥形瓶(A)加 0.5 mL 三氯乙酸终止酶反应。静置 2 min,吸取上清液 2 mL 加入试管,各加入 4 mL 对氨基苯磺酰胺和 4 mL 萘胺,室温显色 20 min 后测定 540 nm 波长下的光密度。用 A 溶液光密度平均值减去 D 溶液得到的值在标准曲线上查出相应含量。

1.3.2 叶绿素相对含量测定 用 SPAD-502 叶绿素仪测定叶片的 SPAD 值。于 10 月上旬 8:00—11:00,每个氮水平每 1 种源随机夹取 3 片功能叶,测定 SPAD 值,取平均值。

1.3.3 生物量测定 以裂区为单位,选取 4 株生长状况一致的幼苗混合取样,根茎叶用 1/100 电子天平分别称质量。样品在 105℃ 杀青 30 min,75℃ 烘至恒质量,计算根冠比。

#### 1.4 数据处理与分析

用 DPS 7.05、EXCEL 2003、ORIGIN 7.5 进行数据分析和绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 供氮水平对种源生物量及根冠比的影响

由表 3 可知:随供氮水平的增加,除福建延平种源外,各枫香种源生物量变化大致相同,呈上升趋势,与 Chang 等<sup>[10]</sup>研究结果一致。0 N 水平生物量极显著低于 1/2 N、1 N、2 N 各水平(Duncan,  $P = 0.005, 0.006, 0.002$ ),其它 3 个水平间没有显著差异。在 0 N、1/2 N、1 N 水平,福建延平、广西南丹和浙江永康种源生物量均显著高于安徽泾县种源;在 2 N 水平,广西南丹和浙江永康种源生物量显著高于福建延平和安徽泾县种源。在供氮水平由 1 N 增加到 2 N 时,浙江永康和安徽泾县种源生物量增加幅度较小(10.46%、11.43%),广西南丹种源仍然保持较高增长幅度(19.33%),而福建延平种源生物量下降了 40.90%。以各种源最高生物量为对照,在 0 N 水平下,广西南丹、福建延平、浙江永康种源

和安徽泾县种源生物量分别降低了 67.86%、54.54%、61.91% 和 64.01%,其中延平种源生物量降低最少且具有较高的生物量。因此,可以推知,在高氮条件下,南丹种源生长最好,具有较好的耐高氮特性;延平种源在低氮条件下,生长最好,比较耐低氮,但其耐高氮性差。

枫香种源的根冠比随着供氮水平的增加而下降,无氮条件下根冠比最大(表 3)。在 1/2 N、1 N、2 N 3 个水平之间变化很小,0 N 到 1/2 N 水平迅速降低,根冠比降低幅度:广西南丹 > 福建延平 > 浙江永康 > 安徽泾县(1.055, 1.047, 0.616, 0.1043)。4 个枫香种源根冠比在 0 N 和 1/2 N 两水平内均没有显著差异;1 N 水平,浙江永康种源显著高于广西南丹种源( $P = 0.026$ );2 N 水平,浙江永康和安徽泾县种源显著高于福建延平种源( $P = 0.0062, 0.004$ )。

表 3 不同 N 水平下枫香种源 NRA、叶绿素相对含量、根冠比和生物量

氮水平	种源	叶绿素相对含量 (SPAD)	根冠比	总生物量 /g
0 N	福建延平	21.975a	1.603a	0.511a
	广西南丹	18.263a	1.761a	0.431ab
	浙江永康	21.188a	1.472a	0.408ab
	安徽泾县	22.488a	1.098a	0.256b
1/2 N	福建延平	34.288a	0.556a	1.203a
	广西南丹	36.162a	0.706a	1.045ab
	浙江永康	36.050a	0.856a	0.982ab
	安徽泾县	35.713a	0.994a	0.262b
1 N	福建延平	40.063ab	0.564ab	1.016a
	广西南丹	38.663b	0.496b	1.083a
	浙江永康	43.400a	0.761a	0.958ab
	安徽泾县	38.475b	0.686ab	0.630b
2 N	福建延平	42.088a	0.387b	0.721b
	广西南丹	42.663a	0.619a	1.342a
	浙江永康	40.550a	0.707a	1.070ab
	安徽泾县	35.088b	0.742a	0.711b

注:表中数据为除叶绿素为 8 个重复外,其它各处理为 3 次重复,每个重复 4 株;字母表示水平内种源的显著差异(Duncan,  $P < 0.05$ )。

### 2.2 氮水平对种源叶色和叶绿素相对含量 (SPAD) 的影响

枫香经过不同供氮处理,于 8 月下旬出现叶色变化差异,随供氮水平的增加,叶色变化:黄绿色 - 浅绿色 - 绿色 - 绿色;于 10 月中旬,0 N 水平各枫香种源出现不同程度叶色变红,随氮水平升高,变红现象消失,其中安徽泾县种源变红最明显。

随氮水平的增加,在一定范围内各种源的叶绿素相对含量均呈上升趋势<sup>[11]</sup>,0 N、1/2 N 水平 SPAD 值与 1 N、2 N 水平存在极显著差异,1 N 与 2 N 水平的差异不显著。在 0 N、1/2 N 水平,各种源间的 SPAD 值不存在显著差异;在 1 N 水平,浙江永康种

源的 SPAD 值显著高于广西南丹和安徽泾县种源, 福建延平种源与其它 3 个种源差异不显著; 在 2 N 水平, 安徽泾县种源与福建延平、广西南丹种源和浙江永康种源存在显著差异。

### 2.3 枫香种源 NRA 对 N 水平的响应差异

2.3.1 同一 N 水平不同种源间的 NRA 差异 不同氮水平 4 个枫香种源叶片和根系均表现为福建延平种源 NRA 最高, 安徽泾县种源最低。福建延平种源根系的 NRA 活性显著高于安徽泾县 (0.015 1), 叶

片的 NRA 极显著高于其它 3 个种源 (浙江永康 0.007 1, 广西南丹 0.005 8, 安徽泾县 0.000 7), 而浙江永康、广西南丹、安徽泾县 3 个种源间活性差异不显著。叶片 NRA 在 0 N、1/2 N、2 N 3 个水平下, 种源差异大致具有相同的变化规律: 福建延平 > 浙江永康 > 广西南丹 > 安徽泾县, 在 0 N 水平下, 安徽泾县叶片 NRA 检测不到 (图 1 (a)); 根系 NRA 在 0 N、1/2 N、1 N 3 个水平下变化规律相同: 福建延平 > 广西南丹 > 浙江永康 > 安徽泾县 (图 1 (b))。

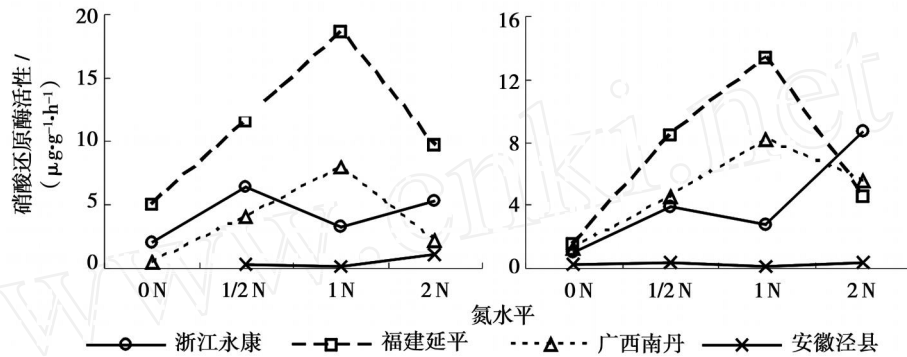


图 1 同一氮水平下枫香叶片 (左 (a)) 和根系 (右 (b)) 硝酸还原酶活性 (NRA) 种源差异

2.3.2 同一种源不同 N 水平 NRA 差异 随着培养基中氮水平的增加, 福建延平和广西南丹种源 NRA 具有相同的变化规律 (图 2): 升高 - 降低, 在 1 N 水平达到最大; 不同的是福建延平叶片的 NRA 较高, 而广西南丹根系较高。浙江永康和安徽泾县种源 NRA 的变化规律也相同: 升高 - 降低 - 升高; 除浙江永康种源叶片在 1/2 N 水平达到最大外, 其它都在 2 N 水平达到最大; 不同的是浙江永康种源 0 N、1/2 N、1 N 叶

片高于根系, 2 N 水平时根系较高, 而安徽泾县种源除在 0 N 水平时叶片 NRA 不存在外, 另外 3 个水平均是叶片高于根系。对枫香种源叶片和根系 NRA 进行二因素方差分析 (Duncan) 的结果表明: 福建延平种源 NRA 叶片极显著高于根系 ( $P = 0.004 4$ ), 其它 3 个种源叶片和根系 NRA 差异不显著; 福建延平和广西南丹种源水平间差异显著, 而浙江永康种源和安徽泾县种源水平间没有显著差异。

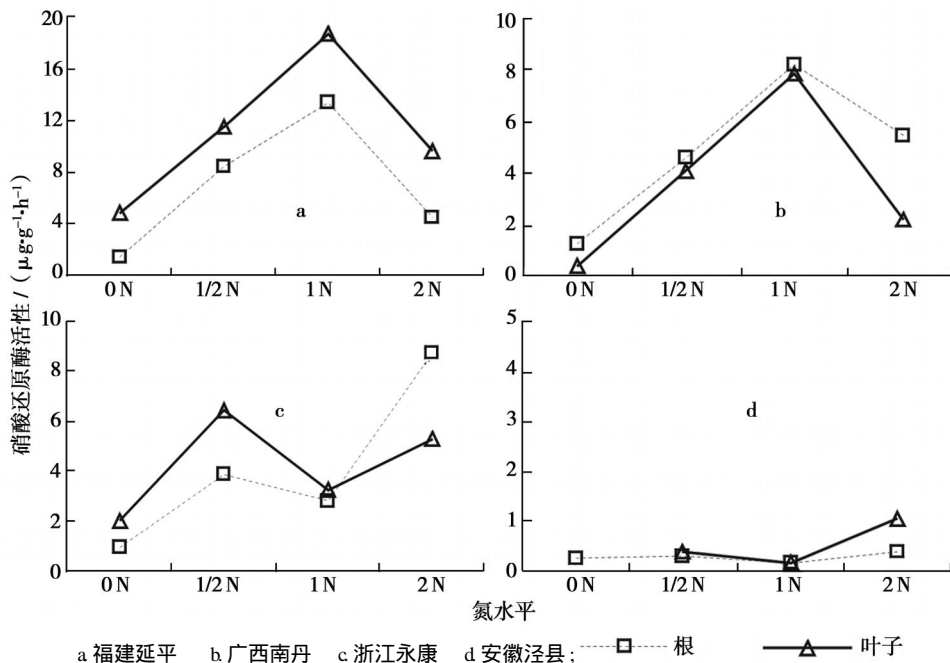


图 2 枫香种源不同氮水平下叶片和根系的硝酸还原酶活性 (NRA)

### 3 结论与讨论

生物量是衡量植物生长状况的重要指标。与其它 3 个种源相比,福建延平种源在 0 N 水平具有最低的生物量下降率,且其生物量最高,具有较好的耐贫瘠特性;但其在高于 1 N 水平时,生物量急剧下降,可能是由于种源之间的耐肥性差异<sup>[12]</sup>导致耐肥性弱的种源,在高氮水平生长受到抑制甚至出现毒害现象<sup>[13]</sup>;所以可以推断福建延平具有耐低 N 特性,但其耐肥性较差。广西南丹、浙江永康种源和安徽泾县种源生物量保持增大趋势,具有较好的耐肥性,其中广西南丹种源在高氮条件下生长最好,但由于其重复间生物量标准误差较大,重复性较差,受环境影响较大(主要是大棚内重复间光照差异),适应的生长环境有待于进一步探讨。

生物量分配也是衡量植物生长状况的重要指标,植物能根据土壤养分胁迫程度,主动调节生物量(或 C)在地上和地下部分的分配格局,达到内部 C 营养的平衡<sup>[14]</sup>,并以此提高根冠比来适应环境,但这种调节因植物而不同。本试验进行了枫香种源根冠比对氮水平响应差异研究,发现随着介质中氮水平的增加,枫香种源根冠比逐渐减小,0 N 到 1/2 N 水平均迅速降低,1/2 N、1 N、2 N 基本一致,与白尚斌等对北美红杉(*Sequoia sempervirens* (D. Don) Endl.) 幼苗的研究结果一致<sup>[15]</sup>。表明枫香在较低氮水平下能保持较稳定的生物量分配,根冠比基本在一个水平波动。

SPAD 值与叶绿素含量具有显著的相关性,SPAD 值能较好地反映树木叶绿素含量的变化<sup>[16]</sup>。王娟等<sup>[17]</sup>研究表明,棉花(*Gossypium hirsutum* L.) 叶片的叶绿素含量与 SPAD 值呈线性相关,本试验叶绿素相对含量随供氮水平增加而增加,与汤继华等<sup>[18]</sup>对缺氮条件下玉米(*Zea mays* L.) 自交系叶绿素含量变化结果一致。

硝酸还原酶是硝酸盐同化的第一个酶,是限速酶、底物(如  $\text{NO}_3^-$ ) 诱导酶,与植物吸收利用氮肥有关,其水平与底物  $\text{NO}_3^-$  的供给密切相关,植物体内  $\text{NO}_3^-$  浓度的高低直接决定了 NRA 的大小<sup>[19]</sup>。硝态氮是植物主要的氮源,绝大多数有机氮来源于硝态氮的同化,根系吸收的  $\text{NO}_3^-$  可暂时储藏在根细胞内,也可以随蒸腾流由木质部导管输送到地上部<sup>[1]</sup>。试验结果表明,在无氮和低氮水平(0 N、1/2 N、1 N) 下福建延平种源的 NRA 极显著高于其它种源,且其

生物量最高,各种源在同一氮水平 NRA 和生物量大小顺序排列一致,说明 NRA 与生物量有较高的正相关关系<sup>[20]</sup>。也有研究表明<sup>[21-22]</sup>,植物大小会显著影响其 NRA,并且大叶片的 NRA 具有较高的衰退率。林振武等<sup>[12]</sup>和汤玉玮等<sup>[23]</sup>的研究表明,耐肥性强的品种硝酸还原酶活力总是比耐肥性弱的品种低。

值得指出的是,福建延平和广西南丹种源 NRA 具有相同的变化规律:升高-降低;而浙江永康和安徽泾县种源 NRA 变化规律也相同:升高-降低-升高。根据试验地点各环境参数,对比枫香种源的环境差异,可以推断 2 种规律的形成可能源于其地理纬度差异,其内在遗传及基因控制机理及纬度与种源响应差异之间的相关性有待于进一步研究。从 0 N 到 1/2 N 水平各种源根冠比均迅速降低,根冠比降低幅度:广西南丹 > 福建延平 > 浙江永康 > 安徽泾县(1.055, 1.047, 0.616, 0.1043)。鉴于以上推断,可以认为随着纬度的升高,枫香种源根冠比受氮素的影响越来越小。

对枫香种源耐贫瘠差异研究, X. Scott<sup>[24]</sup> 主要侧重枫香生物量、叶面积、净光合及吸收对 N、P 肥水平的响应差异。本试验主要从生物量、根冠比、叶绿素相对含量及 NRA 差异进行差异比较,可以认为福建延平种源具有较好的耐低 N 性,与何贵平等<sup>[7]</sup> 造林试验研究结果一致。

#### 参考文献:

- [1] 印莉萍,黄勤妮,吴平. 植物营养分子生物学及信号转导[M]. 2版. 北京:科学出版社,2006
- [2] 周家骏,高林. 优良阔叶树种造林技术[M]. 杭州:浙江科学技术出版社,1985
- [3] 刘驰,徐全富,何其敏. 枫香树脂化学成分[J]. 有机化学,1991(5): 508-510
- [4] 杨柳青,刘楚儒. 枫香苗期生长节律及主要育苗技术措施[J]. 湖南林业科技,2001,28(4): 83-84
- [5] 施季森,成铁龙,王洪云. 中国枫香育种研究现状[J]. 林业科技开发,2002,16(3): 17-19
- [6] 孟现东,陈益泰. 枫香 DNA 提取方法与 PCR 扩增程序的优化[J]. 林业科学研究,2004,17(1): 42-46
- [7] 何贵平,陈益泰,唐雪元. 枫香地理种源幼林生长性状变异研究[J]. 江西农业大学学报,2005,27(4): 585-589
- [8] 毛达如. 植物营养研究方法[M]. 北京:中国农业大学出版社,2005
- [9] 赵世杰,史国安,董新纯. 植物生理学试验指导[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2002
- [10] Chang S X, Robison D J. Genotypic effects of fertilization on seed-

- ling sweetgum biomass allocation, N uptake, and N use efficiency [J]. *The Scientific World Journal*, 2001, 1: 407 - 414
- [11] 陈晓远, 高志红, 罗远培. 植物根冠关系专论与综述 [J]. *植物生理学通讯*, 2005 (5): 555 - 563
- [12] 林振武, 陈敬祥. 硝酸还原酶作为作物育种的生化指标研究 [J]. *河北农业大学学报*, 1987, 10 (3): 104 - 110
- [13] Chena B M, Wang Zh H, Li Sh X, *et al* Effects of nitrate supply on plant growth, nitrate accumulation, metabolic nitrate concentration and nitrate reductase activity in three leafy vegetables [J]. *Plant Science*, 2004, 167 (3): 635 - 643
- [14] Hilbert D W, Lariguaderie A, Reynolds J F. The influence of carbon dioxide and daily photon - flux density on optimal nitrogen concentrations and root - shoot ratio [J]. *Ann Bot*, 1991, 68: 365 - 376
- [15] 白尚斌, 王懿祥, 左显东, 等. 北美红杉幼苗对不同供 N 水平的生长反应 [J]. *林业科学研究*, 2005, 18 (5): 561 - 566
- [16] 姜丽芬, 石福臣, 王化田, 等. 叶绿素计 SPAD - 502 在林业上应用 [J]. *生态学杂志*, 2005, 24 (12): 1543 - 1548
- [17] 王 娟, 韩登武, 任 岗, 等. SPAD 值与棉花叶绿素和含氮量关系的研究 [J]. *新疆农业科学*, 2006, 43 (3): 167 - 170
- [18] 汤继华, 谢惠玲, 黄绍敏, 等. 缺氮条件下玉米自交系叶绿素含量与光合效率的变化 [J]. *华北农学报*, 2005, 20 (5): 10 - 12
- [19] Solmonson L P, Barber M J. Assimilatory nitrate reductase: functional properties and regulation [J]. *Annu Rev Plant Biology*, 1990, 41: 225 - 253
- [20] 叶全宝, 张洪程, 戴其根, 等. 施氮水平和栽插密度对水稻生育中后期硝酸还原酶活性的影响 [J]. *植物生理学通讯*, 2005, 41 (1): 41 - 45
- [21] Taghavi T S, Babalar M. The effect of nitrate and plant size on nitrate uptake and in vitro nitrate reductase activity in strawberry (*Fragaria × ananassa* cv. Selva) [J]. *Scientia Horticulturae*, 2007, 112 (4): 393 - 398
- [22] Schrader L E, Cataldo D A, Peterson D M. Use of protein in extraction and stabilization of nitrate reductase [J]. *Plant Physiology*, 1974, 53 (5): 688 - 690
- [23] 汤玉玮, 林振武, 陈敬祥. 硝酸还原酶活力与作物耐肥性的相关性及其在生化育种上应用的探讨 [J]. *中国农业科学*, 1985, 18 (6): 39 - 45
- [24] Chang S X. Seedling sweetgum (*Liquidambar styraciflua* L.) half-sib family response to N and P fertilization: growth, leaf area, net photosynthesis and nutrient uptake [J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, 173: 281 - 291