

## 氮沉降模拟对不同种源木荷幼苗叶片生理及 光合特性的影响

张蕊<sup>1</sup>, 王艺<sup>1</sup>, 金国庆<sup>1</sup>, 周志春<sup>1\*</sup>, 陈爱明<sup>2</sup>, 储德裕<sup>2</sup>

(1. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所 浙江 富阳 311400; 2. 浙江省淳安县姥山林场 浙江 淳安 311700)

**摘要:** 以浙北、闽北和赣南 3 个木荷代表性种源为试验材料, 比较不同氮沉降水平下木荷幼苗叶片的光合-光响应曲线、氮和磷含量、光合色素含量及可溶性蛋白含量之间的差异。结果表明: (1) 中、低氮沉降水平促进了木荷幼苗叶片的光合能力, 降低了呼吸消耗, 叶片氮含量及叶绿素含量增高, 叶片磷含量及可溶性蛋白含量降低, 光合同化物易于积累; 而高氮沉降水平对光合能力的促进作用减小甚至产生危害。(2) 木荷不同种源间叶片利用光能的程度差异较大, 浙江杭州种源净光合速率较高, 利用弱光的能力强, 易发生光抑制现象, 光合同化物不易积累; 福建建瓯种源利用强光能力强, 暗呼吸速率较低, 同化物最容易积累; 江西信丰种源光合能力和暗呼吸速率介于浙江杭州和福建建瓯种源之间。(3) 低氮沉降水平对北部浙江杭州种源促进性强, 叶片叶绿素和可溶性蛋白含量增加, 光合能力增强, 同时暗呼吸速率降低; 中氮沉降水平对福建建瓯种源生产力促进最大, 而叶绿素及可溶性蛋白含量在此水平下却较低; 低氮沉降水平显著促进了南部江西信丰种源的净光合速率及利用弱光能力, 呼吸消耗却并未显著增长, 叶片可溶性蛋白增多。因此, 在森林土壤磷含量较低的环境下, 木荷育种不仅要考虑不同种源间的生长差异, 同时也要充分考虑氮沉降的影响, 才能达到最佳效果。

**关键词:** 木荷; 种源; 氮沉降; 低磷; 光响应曲线; 光合色素; 可溶性蛋白

中图分类号: S718.43

文献标识码: A

## The Effects of Nitrogen Deposition on Leaf Physiological and Photosynthetic Characters of *Schima superba* Seedlings from Three Provenances

ZHANG Rui<sup>1</sup>, WANG Yi<sup>1</sup>, JIN Guo-qing<sup>1</sup>, ZHOU Zhi-chun<sup>1</sup>, CHEN Ai-ming<sup>2</sup>, CHU De-yu<sup>2</sup>

(1. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fuyang 311400, Zhejiang, China;

2. Laoshan Forest Farm of Chun'an County, Zhejiang Province, Chun'an 311700, Zhejiang, China)

**Abstract:** To evaluate the responses of physiological and photosynthetic character of *Schima superba* leaf to elevated nitrogen (N) deposition, dissolved  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  with different treatments (0, 50, 100 and 200  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  N) was sprayed on one-year-old seedlings of three *S. superba* provenances. The photosynthetic light response curve, leaf N/P/pigments and soluble protein contents were determined. The results indicated that the treatment of 100  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  N deposition increased the apparent quantum efficiency (AQE), light saturation point (LSP), and maximum net photosynthetic rate ( $P_{\text{max}}$ ), but reduced the dark respiration rate ( $R_d$ ). Meanwhile, the leaf N and pigment content were higher, but leaf P and soluble protein content were lower than that of the control. However, the treatments of 200  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  N deposition had a negative effect on the seedlings. There was large difference among the three provenances. The Hangzhou provenance from Zhejiang Province (HZ) had higher  $P_{\text{max}}$  and could use low

收稿日期: 2012-10-22

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项项目(201104001); 浙江省科技厅农业新品种选育重大科技专项项目(2012C12908-4); “十二五”国家科技支撑计划课题(2012BAD01B04); 浙江省重点科技创新团队项目(2009R50035)

作者简介: 张蕊(1981—), 女, 河北邯郸人, 助理研究员, 博士研究生, 主要从事珍贵用材树种遗传改良研究。

\* 通讯作者. E-mail: zczhou\_risf@163.com.

light easily. However, it was hard to accumulate the assimilation product. The Jian'ou provenance (JO) from Fujian Province showed stronger ability in using high light and the  $R_d$  was lower too, so this provenance was easier to accumulate assimilation product than other provenances. The leaf net photosynthetic rate, pigment and soluble protein content of HZ increased under the treatment of  $50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  N deposition, however, the  $R_d$  was reduced. The leaf pigment and soluble protein content of JO provenance was lower, but the production was largest under  $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  N. The N deposition of  $50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  N promoted the photosynthetic rate of the Xinfeng provenance (XF) from Jiangxi Province increased the soluble protein content and improved the ability in using low light and the  $R_d$  was not increased either.

**Key words:** *Schima superba*; provenance; nitrogen deposition; phosphorus limitation; photosynthetic-light response curve; photosynthesis pigments; soluble protein

近年来,大气氮沉降已成为全球关注的生态热点问题之一。我国珠三角、长三角等地区大气氮沉降量超过  $30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,已成为世界三大高沉降区之一<sup>[1-4]</sup>。已有研究指出,较低水平的氮素可以促进植株生长<sup>[5-9]</sup>,但过量的氮素却使植物系统养分平衡失调,削弱树木对环境胁迫的抗性,甚至威胁树木的生长,最终致使某些物种消失,即“氮过滤”(N “filters”)现象产生等<sup>[10-11]</sup>。氮素是植物叶绿素的组成部分,氮素丰缺与叶片中叶绿素含量和光合酶活性有密切的关系,同时植物体内氮同化过程又与磷素密不可分,细胞中磷浓度与光合速率密切相关,合理的氮磷配比对于植株碳水化合物积累及优质高产具有重要意义<sup>[12]</sup>。我国南方土壤多为酸性红壤和砖红壤,其有效磷含量不到  $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,而林地有效磷含量更低,已严重影响了人工林和森林生态系统的生产力<sup>[13-15]</sup>。氮沉降的加剧,改变了林地原有氮磷营养状况。因此,在低磷土壤环境下研究氮沉降对植株叶片光合生理的影响,对于了解植物光合能力改变、碳同化物积累等具有重要意义。叶片的叶绿素和可溶性蛋白含量是与光合能力有关的重要生理指标,其中,叶绿素含量的提高有利于光合能力的改善;叶片可溶性蛋白中有50%左右是光合作用的关键酶(RuBP羧化酶),因此,该指标被广泛用于指示光合能力高低<sup>[16-17]</sup>。

木荷(*Schima superba* Gardn. et Champ.)是山茶科(Theaceae)木荷属(*Schima* Reinw.)常绿阔叶大乔木,为亚热带地带性常绿阔叶林的主要建群种,广泛分布于我国南方大部分省区,造林成效好,优质速生,丰产性显著。研究认为,木荷具有较强觅取斑块养分的能力<sup>[18]</sup>,同时对酸雨也有较强的适应性<sup>[19]</sup>,适量的氮素处理可促进木荷幼苗生长,叶片日平均净光合速率增强,气孔导度降低,叶绿素含量提高等<sup>[7-8, 20-21]</sup>;但氮沉降对木荷叶片光合能力、叶片氮

磷和可溶性蛋白的影响仍不清晰。本课题组自2001年以来,开展了以速生优质用材为目标的木荷育种,已发现其存在丰富的种源和家系遗传变异,初选了一批早期速生的优良种源和家系<sup>[21-24]</sup>,本文在此基础上选用木荷不同生长类型的地理种源材料,拟通过模拟大气氮沉降,利用拟合光响应曲线研究木荷不同生态型材料的光合性能,阐明不同种源幼苗叶片对氮沉降的响应差异,为在大气氮沉降环境下,选育光能高效利用的木荷速生优质新品种以及育林施肥策略提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料和设计

以浙江杭州、福建建瓯和江西信丰3个木荷代表性种源为试验材料。种源种子是2001年全分布区种源试验收集保存的同一批种子,分别采自浙江杭州西湖景区、福建建瓯徐墩镇和江西信丰崇仙乡。盆栽基质取自浙江省淳安县姥山林场的酸性贫瘠红壤,其有机质含量为  $6.68 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全氮和全磷含量分别为  $0.41$ 、 $0.35 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,水解氮、速效钾和有效磷含量分别为  $46.35$ 、 $91.11$ 、 $5.49 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,pH值5.06。

根据国内外氮沉降研究成果<sup>[2-4, 7-8, 25-28]</sup>,试验设置4个氮沉降水平,分别为N0(对照  $0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )、N50(低氮  $50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )、N100(中氮  $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )和N200(高氮  $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ),每处理组12株,共计360株。选用上端内径16 cm,下端内径13.5 cm,高18 cm的营养钵作为盆栽容器,整个盆植试验在浙江省淳安县姥山林场试验大棚内进行。木荷种子于2011年3月7日播种,5月中旬,将生长整齐一致的芽苗移植,每盆移植2株芽苗,成活后保留1株,幼苗在充分供水条件下培养。2011年6月至11月,每月月初和月中

分 2 次向幼苗全株喷施  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , 以模拟氮沉降对幼苗的影响。

### 1.2 光响应曲线测定及特征参数计算

2011 年 9 月 23 日至 10 月 1 日, 用美国 Licor 公司的 LI-6400XT 便携式光合作用测定仪进行光响应曲线的测定: 采用红蓝光源, 使用开路系统测定叶片的净光合速率 ( $P_n$ ), 空气流速为  $0.5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ , 温度控制在  $(26 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$ , 相对湿度 60% 左右,  $\text{CO}_2$  浓度

为  $365 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。测定光强从  $2000 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  开始, 依次为 1500、1000、600、300、200、100、80、50、20、0  $\text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 测定时间为 9:00—11:30, 每个处理随机选择 5 株, 每株木荷取顶芽向下第 3~4 枚完全伸展的 1 枚叶片(成熟的功能叶片)进行测定。依据非直线曲线模型拟合光响应曲线方程<sup>[29]</sup>:

$$P_n = \frac{AQE \times PAR + P_{\max} - \sqrt{(AQE \times PAR + P_{\max})^2 - 4\theta \times AQE \times PAR \times P_{\max}}}{2\theta} - R_d$$

式中:  $P_n$  为净光合速率,  $AQE$  为表观量子效率,  $P_{\max}$  为最大净光合速率,  $PAR$  为光量子通量密度,  $\theta$  为光响应曲线曲角,  $R_d$  为暗呼吸速率, 拟合计算得出光补偿点 ( $LCP$ ) 和光饱和点 ( $LSP$ ) 等。

### 1.3 叶片光合色素、可溶性蛋白及氮、磷含量测定

光合作用测定后, 立即将所测定叶片摘下带回试验室。光合色素的提取、测定和计算参考 Lichtenthaler 的方法<sup>[30]</sup>。可溶性蛋白采用考马斯亮蓝 G250 显色法<sup>[31]</sup>。经浓  $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$  消煮, 钼锑抗比色法和凯氏定氮法测定叶片磷、氮含量<sup>[32-33]</sup>。

### 1.4 统计分析

利用 Origin8.0 软件进行光合-光响应曲线的拟合, 并通过直线回归方法得到各参数。利用 SAS 软件 ANOVA 程序进行性状方差分析, 并用 DUN-

CAN 法进行多重比较, 以检验种源、氮素及其互作效应的显著性。

## 2 结果与分析

### 2.1 氮沉降对不同种源木荷幼苗光合参数的影响

从表 1 看出: 不同氮沉降水平对木荷幼苗叶片光能利用能力产生了不同程度的影响, 随着氮沉降水平的提高, 木荷幼苗叶片最大净光合速率 ( $P_{\max}$ ) 和光饱和点 ( $LSP$ ) 逐渐提高, 在中氮沉降水平达到最大值后下降; 而表观量子效率 ( $AQE$ ) 在低氮沉降水平达到最大值后, 随氮沉降水平的提高呈降低的趋势; 暗呼吸速率 ( $R_d$ ) 则在中、低氮沉降水平下降, 而高氮沉降水平下升高。

表 1 氮沉降水平对不同种源木荷幼苗叶片光合参数的影响

光合参数	种源	氮沉降水平			
		N0	N50	N100	N200
$P_{\max} / (\text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	浙江杭州	8.81(0.12) b	9.03(0.27) a	8.94(0.19) a	8.90(0.14) a
	福建建瓯	8.53(0.09) ab	8.05(0.09) b	8.71(0.11) ab	8.84(0.14) a
	江西信丰	7.61(0.26) b	8.36(0.34) a	9.05(0.25) a	8.41(0.18) a
$LCP / (\text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	浙江杭州	13(0.69) a	13(0.60) a	12(0.98) a	12(1.20) a
	福建建瓯	9(0.69) a	10(0.69) a	12(1.20) a	13(1.50) a
	江西信丰	8(0.82) b	12(1.20) a	12(0.98) a	14(1.55) a
$LSP / (\text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	浙江杭州	561(28.45) b	586(13.32) b	641(23.20) ab	662(58.38) a
	福建建瓯	548(37.19) b	600(38.89) a	560(42.79) ab	536(86.85) b
	江西信丰	552(22.62) b	557(49.37) b	595(40.73) a	566(88.34) b
$AQE / (\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$	浙江杭州	0.060(0.003) b	0.076(0.013) a	0.075(0.008) a	0.061(0.004) b
	福建建瓯	0.053(0.002) b	0.054(0.003) b	0.056(0.003) b	0.065(0.005) a
	江西信丰	0.057(0.008) b	0.079(0.019) a	0.073(0.011) a	0.061(0.006) b
$R_d / (\text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	浙江杭州	1.80(0.07) a	1.22(0.16) b	1.11(0.12) b	1.35(0.09) b
	福建建瓯	0.71(0.06) b	0.57(0.06) b	0.21(0.07) b	1.05(0.09) a
	江西信丰	0.83(0.17) b	0.86(0.21) b	1.04(0.15) a	1.14(0.12) a

注: 括号内为标准差  $n=5$ ; 不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著, 图 1~3 同。

木荷不同种源间叶片利用光能的程度差异较大。浙江杭州种源木荷幼苗最大净光合速率( $P_{max}$ )、表观量子效率(AQE)在低氮沉降水平下最高,分别超过对照2%和27%;暗呼吸速率( $R_d$ )随氮沉降水平的提高相应降低,但在高氮沉降水平下升高;光补偿点(LCP)变化不大,说明浙江杭州种源幼苗对氮沉降反应相对敏感,低氮沉降量下就表现出了较高的光合能力,但中、高氮沉降水平对光合促进作用减小,物质和能量的消耗也相应增加。江西信丰种源幼苗的表观量子效率(AQE)在低氮沉降水平时最高,最大净光合速率( $P_{max}$ )、光饱和点(LSP)在中氮沉降水平最高,光补偿点(LCP)和暗呼吸速率( $R_d$ )则随氮沉降水平的提高呈现上升的趋势,说明中、低氮沉降量对江西信丰种源幼苗光合能力影响较大,高氮沉降使该种源苗木利用弱光能力变差,苗木物质和能量的消耗也相应增加。福建建瓯种源幼苗最大净光合速率( $P_{max}$ )、表观量子效率(AQE)在高氮沉降水平下最高,说明福建建瓯种源在高氮沉降下仍具有较强的光合能力,光补偿点(LCP)随氮沉降水平的提高而增大,但暗呼吸速率( $R_d$ )在高氮沉降水平下出现最大值,为对照的1.5倍,说明高氮环境下,该种源即使具有较强的光合能力,然而其物质和能量的消耗却较大,生物量不易积累。

## 2.2 氮沉降对不同种源木荷幼苗光合色素含量的影响

不同种源木荷幼苗叶片光合色素含量在氮沉降影响下差异较大(图1)。低氮沉降水平下,浙江杭州和福建建瓯种源总叶绿素、类胡萝卜素含量增多,浙江杭州种源分别比对照增长24.1%和10.5%,福建建瓯种源分别比对照增长17.2%和5.6%,而江西信丰种源总叶绿素、类胡萝卜素含量却呈现抑制状态,尤其叶绿素a降低最为明显(下降30.4%)。中氮沉降水平下,浙江杭州和江西信丰种源总叶绿素含量增多,分别比对照增长23.0%和5.4%,而福建建瓯种源总叶绿素则比对照降低,类胡萝卜素含量除浙江杭州种源比对照增多外,福建建瓯和江西信丰种源均呈现下降趋势。高氮沉降水平降低了浙江杭州种源总叶绿素含量和江西信丰种源总叶绿素、类胡萝卜素含量,但福建建瓯种源类胡萝卜素含量明显增加。可见,较低的氮沉降水平对3个木荷种源的总叶绿素、类胡萝卜素含量具有明显的促进作用,较高水平氮沉降抑制了色素的增加;江西信丰种源在低氮沉降水平下总叶绿素、类胡萝卜素含量最低,福建建瓯种源在中氮沉降水平下总叶绿素、类胡萝卜素含量最低,这可能与其在该氮沉降水平下较大的生长量产生的稀释效应有关。

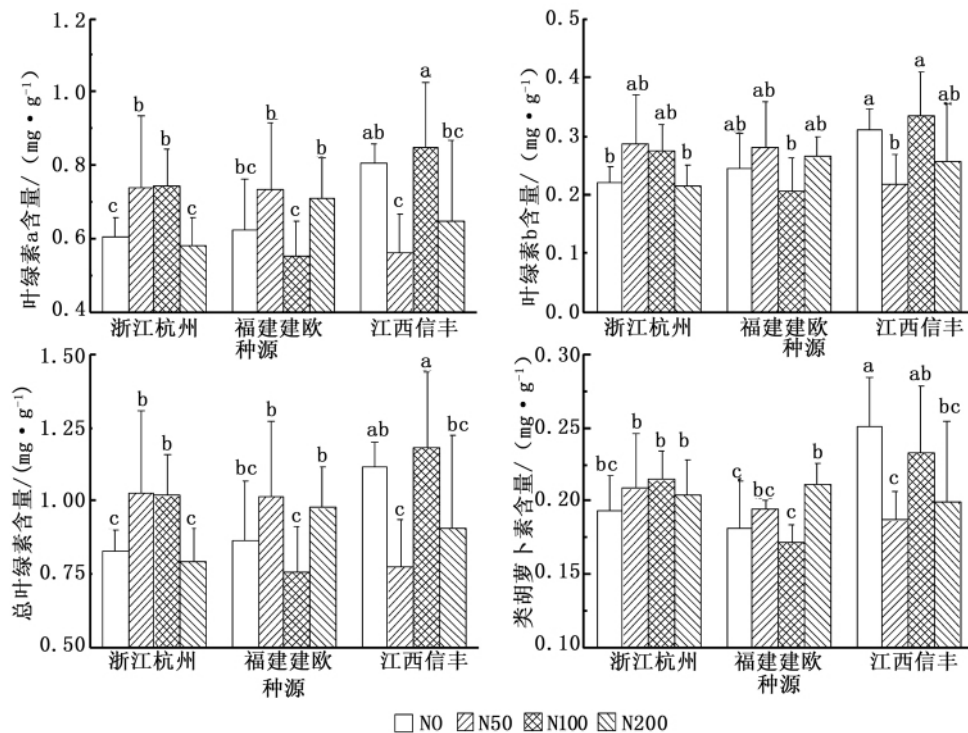


图1 氮沉降水平对不同种源木荷幼苗叶片光合色素含量的影响

### 2.3 氮沉降对不同种源木荷幼苗氮、磷及可溶性蛋白含量的影响

木荷幼苗叶片磷素含量随氮沉降水平的提高呈下降趋势,而叶片氮素含量则呈现增长趋势。木荷不同种源间叶片氮、磷含量变化差异较大(图2),如浙江杭州和福建建瓯种源叶片磷含量在低氮沉降水平下就已显著下降,而江西信丰种源则在中、高氮沉降水平下叶片磷含量显著降低。在中、低氮沉降水

平下,浙江杭州和江西信丰种源叶片氮含量比对照略有增长,但并不显著,而福建建瓯种源则在低氮沉降水平下显著下降。高氮沉降水平显著提高了浙江杭州种源叶片氮素含量,比对照增长33.0%。不同种源木荷幼苗叶片氮磷比随氮沉降水平提高呈现增长趋势,在中氮沉降水平下氮磷比平均为16.0,比对照提高53.3%,而在高氮沉降水平下达最大值。

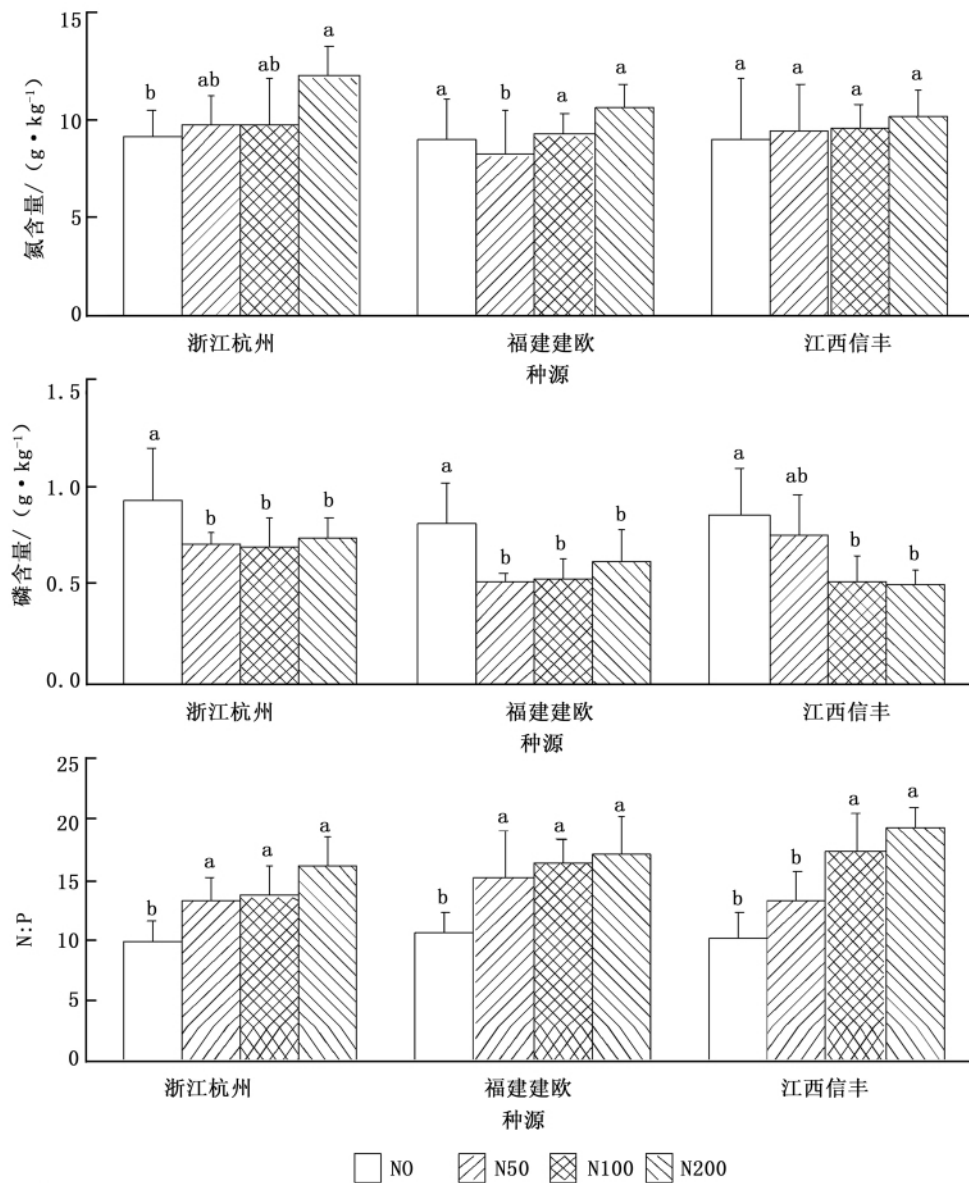


图2 氮沉降水平对不同种源木荷幼苗叶片氮、磷含量的影响

在氮沉降作用下,木荷幼苗叶片可溶性蛋白含量整体水平降低且随氮沉降水平的提高而下降,但木荷不同种源叶片可溶性蛋白含量随氮沉降水平增高的差异较大(图3)。在氮沉降下,浙江杭州种源

和福建建瓯种源叶片可溶性蛋白含量较对照整体出现下降趋势,浙江杭州种源在中氮沉降下叶片可溶性蛋白含量最低,较对照下降8.5%;在高氮沉降下,福建建瓯种源叶片可溶性蛋白最低,较对照下降

17.6%;而江西信丰种源则较对照升高,平均增加17.8%,但随着氮沉降水平的提高,江西信丰种源叶片可溶性蛋白含量却呈现下降趋势。

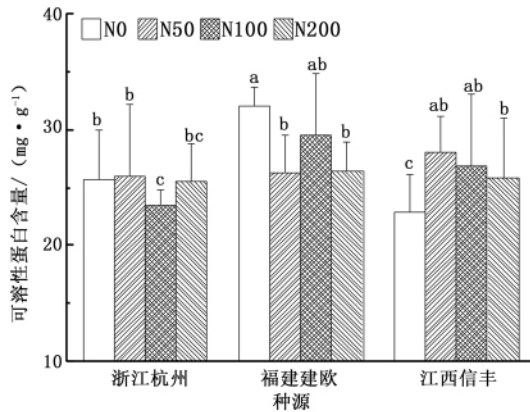


图3 氮沉降水平对不同种源木荷幼苗叶片可溶性蛋白含量的影响

### 3 讨论

叶片特征是植物响应光环境能力的一个较好的表征,同时叶片光合作用与植株体内氮、磷含量密切相关<sup>[34]</sup>;因此,在低磷环境下,大气氮沉降作用无疑会影响植物叶片光合作用及相关生理过程。本研究结果表明:中、低氮沉降水平提高了木荷幼苗叶片叶绿素含量,叶片净光合速率增加,光合能力增强,不易发生光抑制,暗呼吸速率降低,物质能量消耗减少,光合产物更容易积累,因此,植株生长量和生物量大幅度提高,这与李德军等<sup>[20]</sup>的研究结果一致;而高氮沉降下,木荷幼苗叶片光合能力显著下降,呼吸消耗增强。研究表明,植物叶片氮含量与光合作用呈显著正相关关系<sup>[35-36]</sup>,而本研究发现,随着氮沉降水平的提高,木荷幼苗叶片氮含量也呈现升高趋势,叶片净光合速率增强,但当叶片氮含量超过某一阈值时( $9.6 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} < N_{\text{木荷叶}} < 11.1 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ),植株净光合速率则呈下降趋势,这可能与过量氮素降低PS II反应中心的开放比例,降低了实际光能转换效率有关<sup>[37]</sup>。Mo等<sup>[8]</sup>对林地木荷2年生苗氮沉降研究结果显示,木荷植株该阈值范围为 $9.8 \sim 11.2 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,与本文结果极为相似,推测该阈值可能与植物本身光合生理机制有关,受外界环境条件影响较小。

磷是植物体内氮素代谢过程的组分之一,与蛋白质代谢关系极为密切,同时,可溶性蛋白是植物所有蛋白质组分中最活跃的一部分,包括各种酶源、酶分子和代谢调节物。本文研究结果显示,随着外界氮沉降水平的提高,木荷幼苗叶片中磷素及可溶性蛋白含

量较对照有所下降。大气氮沉降增加了植株叶片氮吸收及土壤氮素含量,植株氮同化作用增强,作为酶类及ATP的重要成分的磷素需求量加大。试验证实,当土壤磷素供应不足时,氮同化主要在根部进行,各种酶类活性也较高<sup>[38-39]</sup>,因此,叶片磷素含量相对下降,可溶性蛋白含量减少,但此过程并未直接影响到植株的光合能力,说明植株体内仍保持良好的氮磷比平衡,如本试验中氮沉降下氮磷比为16.0。当氮浓度超过一定限度时,植株体内这种平衡被打破,光合系统崩溃,呼吸消耗增强,植株营养系统紊乱,植株停止生长,甚至死亡<sup>[10-11,40-42]</sup>。

不同种源木荷幼苗叶片光合作用及生理变化差异较大,北部浙江杭州种源光合能力最强,但同化物不易积累,对低氮沉降水平适应性强,叶片叶绿素和可溶性蛋白含量增加,光合能力增强,虽然暗呼吸速率降低,但相对其它两个种源仍较高,中、高氮沉降水平的这种促进作用开始消失,光合整体水平下降,呼吸消耗持续增强。中心产区福建建瓯种源光合能力较强,同时呼吸消耗最低,同化物最易积累,对氮沉降适应性也最强,随氮沉降水平的提高,光合能力增强,在高氮沉降水平下达最大值,但此时呼吸消耗也最大,因此认为中氮沉降水平对福建建瓯种源生产力促进最大,而叶绿素及可溶性蛋白含量在此水平下却较低。南部江西信丰种源光合能力较低,呼吸消耗适中,但低氮沉降水平显著促进了其净光合速率及利用弱光能力,呼吸消耗却并未显著增长,叶片可溶性蛋白增多。这种种源差异可能是木荷长期适应产地地理环境的结果。北部浙江杭州种源所处地理纬度较高,该区域日照时数较短,光照强度相对较弱,水热资源、立地条件均较为一般;福建建瓯种源位于木荷地理分布中心,当地水热资源丰富,光照适宜,立地条件良好,促进了木荷优良基因型的形成,植株能适应宽泛的肥力条件<sup>[23-24]</sup>;而江西信丰种源所处纬度较低,年均温度较高,降水偏少,日照时数和强度均较大,且该区域位于木荷二级产区,对营养的需求利用仅次于中心产区。生长环境的差异,造成了木荷不同种源间叶片光合能力差异,而氮沉降作用又明显改变了这种差异。因此,在今后的木荷育种过程中,考虑种源间生长差异的同时,也要充分考虑氮沉降的影响,才能达到最佳的育种效果。氮沉降是一个长期的过程,随着沉降时间的增长,木荷林龄的提高,现阶段的结论是否仍然适用,将有待于进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 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
- [2] 郑利霞,刘学军,张福锁. 大气有机氮沉降研究进展[J]. 生态学报, 2007, 27(9): 3828-3834
- [3] 逯超普,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
- [4] 胡正华,李涵茂,杨燕萍,等. 模拟氮沉降对北亚热带落叶阔叶林土壤呼吸的影响[J]. 环境科学, 2010, 31(8): 1726-1732
- [5] Nakaji T, Fukami M, Dokiya Y, et al. Effects of high nitrogen load on growth, photosynthesis and nutrient status of *Cryptomeria japonica* and *Pinus densiflora* seedlings[J]. *Trees*, 2001, 15(8): 453-461
- [6] Nakaji T, Takenaga S, Kuroha M, et al. Photosynthetic response of *Pinus densiflora* seedling to high nitrogen load[J]. *Environmental Sciences*, 2002, 9(4): 269-282
- [7] 李德军,莫江明,方运霆,等. 模拟氮沉降对亚热带两种乔木幼苗生物量及其分配的影响[J]. 植物生态学报, 2005, 29(4): 543-549
- [8] Mo J M, Li D J, Gundersen P. Seedling growth response of two tropical tree species to nitrogen deposition in southern China[J]. *European Journal of Forest Research*, 2008, 127(4): 275-283
- [9] 吴茜,丁佳,闫慧,等. 模拟降水变化和土壤施氮对浙江古田山5个树种幼苗生长和生物量的影响[J]. 植物生态学报, 2011, 35(3): 256-267
- [10] 方运霆,莫江明,江远清,等. 鼎湖山森林土壤渗透水酸度和无机氮含量对模拟氮沉降增加的早期响应[J]. 热带亚热带植物学报, 2005, 13(2): 123-129
- [11] Emmett B A. Nitrogen saturation of terrestrial ecosystems: some recent findings and their implications for our conceptual framework[J]. *Water Air Soil Pollut: Focus*, 2007, 7(1-3): 99-109
- [12] 王琪,徐程扬. 氮磷对植物光合作用及碳分配的影响[J]. 山东林业科技, 2005, 160(5): 59-62
- [13] Han W X, Fang J Y, Guo D L, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. *New Phytologist*, 2005, 168(2): 377-385
- [14] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 483-486
- [15] 张福锁,崔振岭,王激清. 中国土壤和植物养分管理现状与改进策略[J]. 植物学通报, 2007, 24(6): 687-694
- [16] 郭程瑾,李宾兴,王斌,等. 不同磷效率小麦品种的光合特性及其生理机制[J]. 作物学报, 2006, 32(8): 1209-1217
- [17] 段巍巍,赵红梅,郭程瑾,等. 夏玉米光合特性对氮素用量的反应[J]. 作物学报, 2007, 33(6): 949-954
- [18] 马雪红,周志春,金国庆,等. 竞争对马尾松和木荷觅取异质分布养分行为的影响[J]. 植物生态学报, 2009, 33(1): 81-88
- [19] 殷秀敏,伊力塔,余树全,等. 酸雨胁迫对木荷叶片气体交换和叶绿素荧光参数的影响[J]. 生态环境学报, 2010, 19(7): 1556-1562
- [20] 李德军,莫江明,方运霆,等. 模拟氮沉降对三种亚热带树苗生长和光合作用的影响[J]. 生态学报, 2004, 24(5): 876-882
- [21] 张萍,金国庆,周志春,等. 木荷苗木性状的种源变异和地理模式[J]. 林业科学研究, 2004, 17(2): 192-198
- [22] 余琳,张萍,周志春,等. 木荷种源苗期干物质积累和分配差异[J]. 林业科学研究, 2005, 18(1): 91-94
- [23] 张萍,周志春,金国庆,等. 木荷种源遗传多样性和种源区初步划分[J]. 林业科学, 2006, 42(2): 38-42
- [24] 周志春,范辉华,金国庆,等. 木荷地理遗传变异和优良种源初选[J]. 林业科学研究, 2006, 19(6): 718-724
- [25] 朱兆良,文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992
- [26] 何园球. 我国热带亚热带森林土壤肥力状况与利用途径[M]//中国科学院红壤生态实验站. 红壤生态系统研究(第二集). 南昌: 江西科学技术出版社, 1993: 16-22
- [27] Sickman J O, Leydecker A, Melack J M. Nitrogen mass balances and abiotic controls on N retention and yield in high elevation catchments of the Sierra Nevada, California, United States[J]. *Water Resources Research*, 2001, 37(5): 1452-1461
- [28] Keene W C, Montag J A, Maben J R, et al. Organic nitrogen in precipitation over Eastern North America[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36(28): 4529-4540
- [29] Prioul I L, Chartier P. Partitioning of transfer and carboxylation components of intracellular resistance to photosynthetic CO<sub>2</sub> fixation: a critical analysis of the methods used[J]. *Annals of botany*, 1977, 41(4): 789-800
- [30] Lichtenthaler H K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes[J]. *Methods in Enzymology*, 1987, 148(14): 350-382
- [31] 张志良. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990
- [32] Anderson J M, Ingram J S I. Tropical soil biology and fertility: a handbook of methods[M]. 2th edn. Wallingford, Oxfordshire: CAB International, 1993
- [33] Bremner J M, Mulvaney C S. Nitrogen-total[M]//Page A L, Miller R H, Keeney D R. Methods of soil analysis. Part 2: chemical and microbial properties, agronomy monograph 9. Madison, Wisconsin: American Society of Agronomy, 1982: 595-624
- [34] Hall D O, Rao K K. Photosynthesis[M]. 4th edn. London: Edward Arnold Press Ltd, 1988: 98-123
- [35] Reich P B, Walters M B, Ellsworth D S, et al. Photosynthesis-nitrogen relations in Amazonian tree species I. Patterns among species and communities[J]. *Oecologia*, 1994, 97(1): 73-81
- [36] Evans J R. Developmental constraints on photosynthesis: effects of light and nutrition[M]//Baker N R. Photosynthesis and the environment. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publisher, 1996: 281-304
- [37] 赵俊晔,于振文. 施氮量对小麦旗叶光合速率和光化学效率、籽粒产量与蛋白质含量的影响[J]. 麦类作物学报, 2006, 26(5): 92-96
- [38] Wu C, Wang Z Q, Fan Z Q, et al. Effects of different concentrations and form ratios of nitrogen on chlorophyll biosynthesis, photosynthesis, and biomass partitioning in *Fraxinus mandshurica* seedlings[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2003, 27(6): 771-779
- [39] Li L H, Qiu X H, Li X H, et al. The expression profiles of genes in rice roots under low phosphorus stress[J]. *Science in China Series C: Life Sciences*, 2009, 52(11): 1055-1064
- [40] Galloway J N, Cowling E B. Reactive nitrogen and the world: 200 years of change[J]. *Ambio*, 2002, 31(2): 64-71
- [41] Persson J, Höglberg P, Ekblad A, et al. Nitrogen acquisition from inorganic and organic sources by boreal forest plants in the field[J]. *Oecologia*, 2003, 137(2): 252-257
- [42] Lindahl B D, Ihrmark K, Boberg J, et al. Spatial separation of litter decomposition and mycorrhizal nitrogen uptake in a boreal forest[J]. *New Phytologist*, 2007, 173(3): 611-620