

鼎湖山主要林下层植物光合生理特性 对模拟氮沉降的响应

鲁显楷^{1,2} 莫江明¹ 李德军¹ 张 炜^{1,2} 方运霆^{1,2}
(1 中国科学院华南植物园鼎湖山森林生态系统定位研究站 2 中国科学院研究生院)

摘要:通过模拟氮沉降试验,研究了亚热带季风常绿阔叶林林下层 3 种优势树种光叶山黄皮、黄果厚壳桂和厚壳桂叶片的光合生理特性对氮沉降增加的响应。试验 21 个月后,氮沉降显著增加了林下层 3 种植物叶片的全氮含量,但对磷含量没有明显的影响。总体而言,中等强度水平的氮处理(100 kg/(hm²·a))对光叶山黄皮和厚壳桂的最大净光合速率、光饱和点以及比叶重具有明显的促进作用,表现出一定的同步性。黄果厚壳桂最大净光合速率和光饱和点则在低氮处理下(50 kg/(hm²·a))达到最大值,而比叶重在中氮处理下达到最大值。这说明比叶重对氮沉降的敏感性远滞后于最大净光合速率。然而这些生理指标在高氮处理下普遍表现出了明显的抑制作用。氮沉降对黄果厚壳桂的光合色素有影响,其余两种植物色素随氮处理水平的变化不明显。氮处理对表观最大量子效率、光补偿点没有产生明显的影响。但光叶山黄皮和厚壳桂的表观最大量子效率表现出了低氮处理有利于植物利用光能而高氮处理不利于利用光能的变化趋势。研究表明,尽管季风常绿阔叶林已达到氮饱和状态,但是 3 种植物有一定的自我调节和适应能力。黄果厚壳桂的光合指标对氮沉降的响应比光叶山黄皮和厚壳桂敏感,在低氮条件下(50 kg/(hm²·a))更能维持其生理优势;而其他两种植物则在中氮条件下(100 kg/(hm²·a))生长最好。适量氮沉降在短期内还是有利于这 3 种植物的生长,但高氮处理(150 kg/(hm²·a))可能已超出了植物可承受的程度,打乱了植物体内的生理进程,不利于植物的正常生长。

关键词:氮沉降, 光合能力, 比叶重, 生理特征, 季风常绿阔叶林, 亚热带

中图分类号:S718.43 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1522(2007)06-0001-09

LU Xian-kai^{1,2}; MO Jiang-ming¹; LI De-jun¹; ZHANG Wei^{1,2}; FANG Yurting^{1,2}. **Effects of simulated N deposition on the photosynthetic and physiologic characteristics of dominant understorey plants in Dinghushan Mountain of subtropical China.** *Journal of Beijing Forestry University* (2007) 29(6) 1-9 [Ch, 48 ref.]

1 Dinghushan Forest Ecosystem Research Station, South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Zhaoqing City, Guangdong Province, 526070, P. R. China;

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, P. R. China.

Recent increase of nitrogen (N) deposition in forest ecosystem has shown a variety of effects on plants, including elemental imbalance, growth disturbance, foliar accumulation of free amino acids, etc. The purpose of this study is to determine the effects of simulated N deposition on the photosynthetic physiology of three dominant understorey plants (*Randia canthioides*, *Cryptocarya concinna*, and *C. chinensis*) in a monsoon evergreen broadleaved forest of subtropical China. The experimental design was a randomized complete block with three replications (plots) of four treatments, consisting of the control (0 kg/(hm²·year)), low N (50 kg/(hm²·year)), medium N (100 kg/(hm²·year)) and high N (150 kg/(hm²·year)). Each plot covered an area of 10 m × 20 m, surrounded by a 10 m wide buffer zone. From July 2003, NH₄NO₃ solution, whose concentrations were about 0, 0.3, 0.6 and 0.9 mol/L (nitrogen) for the control, low N, medium N and high

收稿日期:2006-07-14

<http://www.bjfujournal.cn>

基金项目:国家自然科学基金项目(30670392)、中国科学院知识创新工程重大方向性项目(KZCX2-YW-432-2、KSCX2-SW-133)。

第一作者:鲁显楷, 博士生。主要研究方向:环境生理生态学和生态系统生态学。电话:0758-2624429 Email:luxiankai@scbg.ac.cn 地址:526070 广东肇庆中国科学院华南植物园鼎湖山森林生态系统定位研究站。

责任作者:莫江明, 博士, 研究员。主要研究方向:生态系统生态学、恢复生态学和自然保护区管理。电话:0758-2621187 Email:mjmm@scbg.ac.cn 地址:同上。

N treatments respectively, was sprayed onto the floor of these plots once every month. Here, the authors reported the results after being treated for 21 months. The foliar N content increased greatly with increasing N deposition, but there were no significant changes for foliar P content among the treatments. Generally, mediate N deposition significantly enhanced the maximum net photosynthetic rate ($P_{\max}$), light saturation point (LSP) and specific leaf weight (SLW) for *R. canthioides* and *C. chinensis*. But the $P_{\max}$ and LSP reached the highest values in low N treatment for *C. concinna*. This may imply that the responses of SLW to N deposition lagged behind the photosynthetic parameters. However, these physiologic parameters greatly and negatively responded to high N treatment. The chlorophyll content of *C. concinna* increased significantly with N addition, but not significantly for the other two. The responses of apparent quantum yield (AQY) and light compensation point (LCP) for the three plants to the simulated N deposition were not significant either. But AQY of *Randia canthioides* and *Cryptocarya chinensis* exhibited the trends that lower dose of nitrogen deposition may be propitious to utilizing light and higher dose of nitrogen deposition may be not. The results above indicate that the three plants could still self-regulate and adapt to the N deposition environment, though the monsoon evergreen broadleaved forest has been N saturated. *C. concinna* is more sensitive to N deposition than the other two plants, and low N treatment is in favor of its growth. However, *Randia canthioides* and *Cryptocarya chinensis* are still growing well in medium N treatment. So lower dose of N deposition is in favor of plant growth in the monsoon evergreen broadleaved forest in a short term, but higher deposition may exceed the sustainability, disturb physiological process and restrain the plant growth.

Key words N deposition, photosynthetic capacity, specific leaf weight, physiological characteristics, monsoon evergreen broadleaved forests, low subtropical China

近数十年来,工农业活动的集约化导致了大气中活性氮含量(reactive nitrogen)急剧增加,使陆地和水域生态系统的氮沉降也相应增加^[1].据估计,全球每年沉降到各类生物群系的活性氮达 43.47 Tg/a^[2],沉降到海洋表面的达 27 Tg/a^[3],而且未来氮沉降还会继续升高^[4].氮沉降的增加,使许多陆地生态系统尤其是温带经济发达地区的森林生态系统氮饱和^[5],严重威胁这些生态系统的健康,甚至成为一些地区森林生态系统退化的重要原因^[1,6-7].此外,近年来氮沉降的格局也发生了重大的变化^[2],不仅温带地区大气氮输入增加,热带亚热带地区的氮沉降量也急剧增加^[7];不仅在工业发达地区,也在许多发展中地区都在继续升高,导致了氮沉降全球化^[8].因此,氮沉降对森林生态系统的影响及机理研究已成为当前全球生态学研究的热点内容之一^[9].

对植物光合生理方面的研究是反映植物生长和生产力的一个重要内容.植物的净光合速率、叶绿素含量、比叶重、酶活性,以及叶内部养分含量的变化等都是研究植物光合生理的一些重要指标.对这些指标的研究,有利于合理评估和预测植物生产力方面的变化.这些指标通常会受到环境条件的影响,在氮沉降日益全球化的今天,生态系统的氮状态和大气氮沉降量将直接或间接地影响到植物的生长和发育.研究结果表明,当过多大气氮沉降输入时,氮将会在植物体内积累,植物的叶氮浓度明显增加^[10].叶氮浓度的增加将会改变植物氮代谢进程^[11]、打破

体内元素平衡^[12-13],以及影响到植物的光合作用^[14-15],使植物光合速率下降^[16].然而,国际上关于氮沉降对植物叶片化学和光合生理的研究绝大多数集中在温带地区的针叶林,对热带、亚热带森林植物光合生理的影响鲜见报道^[14,17-18].在国内,相关的研究则更缺乏,仅见于李德军等^[15]对几种南亚热带阔叶树幼苗进行的苗圃控制实验,对森林的研究则还未见报道.由于缺乏热带和亚热带森林植物的研究,目前还无法知道氮沉降如何影响热带、亚热带森林植物的生长.

事实上,我国也存在着高氮沉降的问题.据报道,我国降水 NO_3^- 离子浓度 ($0.32 \times 10^{-6} \text{ mol/L}$) 与美国、日本接近,降水 NH_4^+ 浓度 ($3.77 \times 10^{-6} \text{ mol/L}$) 则分别为美国和日本的 4 倍和 3.7 倍.目前,我国氮沉降通量分别是美国和日本的 3 倍和 1.8 倍,是世界上三大氮沉降集中区(分别是中国、欧洲和美国)之一^[2,6,19].许多地区尤其华南地区氮沉降非常高.如广州市 1988—1990 年降水氮沉降量为 50~73 kg/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)^[20].处于广东省珠江三角洲下风口的鼎湖山自然保护区 1989—1990 年和 1998—1999 年的降水氮沉降分别为 35.57 和 38.4 kg/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)^[21-22],到 2005 年升高至 47.6 kg/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)^[23],与欧洲和北美一些高氮沉降区的量相当.莫江明等^[24]在鼎湖山自然保护区进行的模拟氮沉降研究结果表明,季风常绿阔叶林中凋落物分解速率并没有表现出明显的正效应,甚至产生了负面效应,因此季风常绿阔叶林可能

已经氮饱和. 以上推论还得到进一步研究结果的证实^[9]. 况且, 随着我国社会经济、工农业的进一步发展, 氮沉降量可能还会继续升高^[3].

为此, 本研究选取了鼎湖山南亚热带常绿阔叶林林下层代表性植物为对象, 通过模拟氮沉降试验, 研究其光合生理的响应特征, 试图了解氮沉降如何影响植物的光合生理特性, 从光合生理的角度探讨氮沉降对南亚热带森林植物的影响及其机制, 为我国开展相关的研究和探讨全球变化尤其在氮沉降增加的背景下南亚热带森林动态及其保护和管理提供参考.

1 研究地概况与研究方法

1.1 样地概况

本研究在鼎湖山自然保护区进行. 鼎湖山自然保护区位于广东省中部, 东经 112°33', 北纬 23°10', 属亚热带季风性气候. 年平均降雨量 1 927 mm, 其中 75 %集中在 3—8 月, 年平均相对湿度为 80 %. 年平均温度为 21.4℃, 最冷月(1 月)和最热月(7 月)的平均温度分别为 12.6℃和 28.0℃^[25]. 土壤由泥盆纪厚层变质砂岩、砂页岩发育形成, 主要土壤类型有赤红壤、红壤等^[26].

季风常绿阔叶林为本地典型的地带性植被, 位于海拔 300~360 m 处, 有 400 多年的历史, 土壤为砂页岩发育的赤红壤, pH3.76~3.81, 土层厚 30~90 cm^[27]. 植物种类丰富, 成层现象明显, 郁闭度 95%~99%, 群落垂直结构可分为乔木层(乔木层又可分 3~4 层)^[28], 林下灌木层和草本层. 此外, 还有层间植物, 主要为木质藤本植物和少量的附生植物. 乔木层主要有锥栗(*Castanopsis chinesis*)、荷木(*Schima superba*)、厚壳桂(*Cryptocarya chinensis*)、黄果厚壳桂(*C. concinna*)、华润楠(*Machilus chinensis*)和云南银柴(*Aporosa yunnanensis*)等. 灌木层主要有柏拉木(*Blastus cochinchinensis*)、九节(*Psychotria rubra*)、光叶山黄皮(*Randia canthioides*)等耐阴种类居多. 草本层植物较少, 主要是一些幼苗. 林下层植物主要是胸径 <2.5 cm 的木本植物^[29]. 它们以光叶山黄皮、黄果厚壳桂、厚壳桂、柏拉木等居多^[11].

1.2 样地设计与处理

参照欧洲 NITREX 项目^[30-31]和北美 Harvard Forest^[32-33]等类似研究的设计, 并结合本地氮沉降情况, 于 2002 年 10 月在季风常绿阔叶林按照完全随机区组设计原则建立 12 个样方(10 m×20 m), 样方之间留有 10 m 左右的缓冲区, 以防止相互干扰^[24]. 12 个样方分属 4 个处理组, 分别为对照(0 kg/(hm²·a))、低氮(50 kg/(hm²·a))、中氮(100 kg/

(hm²·a))和高氮(150 kg/(hm²·a))(氮含量, 不包括大气氮沉降量), 即每个处理组包括 3 个样方. 自 2003 年 7 月开始, 每月月初对样地喷施氮肥(NH₄NO₃), 全年平均喷施. 方法是根据氮处理水平, 将每个样方每次所需要喷施的 NH₄NO₃ 溶解在 20 L 水中(相当于降水 1.2 mm/a), 用背式喷雾器来回喷洒, 以保证均匀, 喷洒高度 1.5 m 左右. 对照样方喷洒同样量的水. 除施氮处理外, 各样地的其他处理均保持一致^[24].

1.3 样品的采集、处理与测定

1.3.1 样品的采集

选定的 3 种林下层优势植物为光叶山黄皮、黄果厚壳桂和厚壳桂. 这 3 种植物在阔叶林分布较广, 且在每个样方中均分布有一定数量, 其结构参数见表 1. 采样时间为 2005 年 4 月下旬, 采样时每种植物在每个样方中分别随机选择生长较一致的植株 6~9 棵. 所研究的叶片均为一年生成熟叶.

表 1 季风常绿阔叶林林下层 3 种优势树种的一些结构参数^[11]

TABLE 1 Indices of tree structure of three dominant understory species in the monsoon evergreen broadleaved forests				
树种	平均树高/m	平均基径/cm	树木密度/(株·hm ⁻²)	平均树龄/a
光叶山黄皮	1.32	1.05	2 761	8
黄果厚壳桂	1.08	1.07	3 422	7
厚壳桂	1.36	1.43	893	8

注: 调查面积为 2 400 m².

1.3.2 光合作用光响应曲线的测定

在每株植物上部选取完全伸展的、具有相似生理生态特征的叶片. 用 Li-6400 便携式光合系统(Li-Cor, Inc, 美国)测定叶片光合作用光响应曲线. 使用开放气路, 空气流速为 500 μmol/s, 温度 25~27℃, 相对湿度 80%, CO₂ 浓度 370 μmol/mol. 测定从 2 000 μmol/(m²·s) 光量子的光强开始, 依次降为 1 500、1 000、800、600、400、200、100、50 和 0 μmol/(m²·s), 测定时每一光强下停留 3 min. 测定前叶片在 600~1 200 μmol/(m²·s) 光强(依植物种类及生长光强而定)下诱导 30 min, 叶片与光源之间具 8 cm 厚的流动隔热水层, 以减少叶片升温. 以光量子通量密度(PFD, photon flux density)为横轴, 净光合速率(P_n)为纵轴绘出光合作用光响应曲线(P_n-PFD 曲线), 依据 Bassman 等^[34]的方法拟合 P_n-PFD 的曲线方程:

$$P_n = P_{max} (1 - C_0 e^{-\alpha PFD / P_{max}})$$

式中, P_{max} 为最大净光合速率, 即光合潜力; α 为弱光下光量子利用效率, 即表观量子效率(AQY,

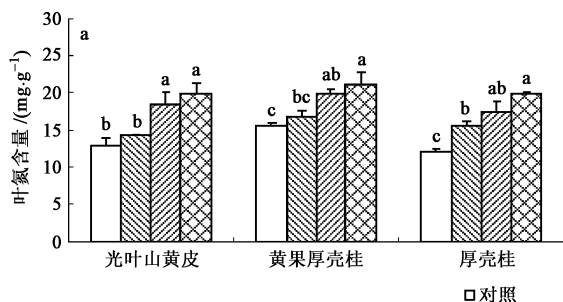
apparent quantum yield); C_0 为度量弱光下净光合速率趋近于 0 的指标. 通过适合性检验, 若拟合效果良好, 光补偿点 (LCP , light compensation point) 和光饱和点 (LSP , light saturation point) 可通过下列公式计算: $LCP = P_{\max} \ln C_0 / \alpha$ 和 $LSP = P_{\max} \ln(100 C_0) / \alpha$. 这些参数的测定, 每一处理 6~9 个重复. 光响应曲线测定后, 进行叶片采集. 同一样方种植物的叶片进行混合, 在冰冻条件下运回实验室进行分析^[17].

1.3.3 叶绿体色素含量和比叶重的测定

用一定面积 (0.2865 cm^2) 的打孔器在成熟叶片上, 避开主叶脉, 打下 12 个叶圆片, 按 Lichtenthaler^[35] 的方法测定叶绿素和类胡萝卜素含量. 此外取一定数量的叶圆片, 80℃ 烘至恒重, 电子天平称重, 即可计算出比叶重 (specific leaf weight, SLW , 单位面积叶干重).

1.3.4 叶片全氮和全磷的测定

叶片烘干、磨粉, 采用半微量凯氏消解法^[36] 测定植物叶片全氮, 用钼锑抗比色法测定全磷^[37]. 所有结果以 105℃ 恒重为基准.



1.4 统计分析

采用单因素方差 (One-way ANOVA) 方法分析氮处理对 3 种植物光合生理的影响. 处理间的差异显著性利用统计软件 SPSS for windows 12.0 以 Duncan 多重检验实现.

2 结果与分析

2.1 叶片全氮和全磷

由图 1a 可以看出, 3 种植物叶片全氮含量均随氮处理水平的升高而增加, 且中、高氮处理下全氮含量都显著高于对照 ($P < 0.05$). 在低、中、高氮处理下, 光叶山黄皮、黄果厚壳桂、厚壳桂叶片全氮含量分别是对照的 1.11、1.44 和 1.56 倍, 1.07、1.28 和 1.31 倍, 以及 1.28、1.44 和 1.64 倍. 相关分析也表明光叶山黄皮、黄果厚壳桂、厚壳桂叶片全氮含量都与氮处理水平呈极显著相关 ($P < 0.01$, 相关系数分别为 0.711、0.772 和 0.924). 但是, 3 种植物叶片中全磷含量在各氮处理之间没有显著差异 ($P > 0.05$, 图 1b).

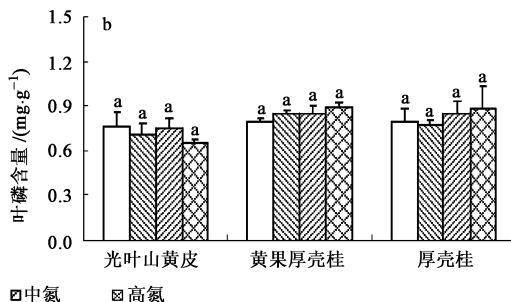


图 1 模拟氮沉降对叶片全氮和全磷含量的影响

FIGURE 1 Effects of simulated N deposition on the foliar nitrogen and phosphorus content

注: 不同字母表示处理间在 $P < 0.05$ 水平上差异显著, 下同.

2.2 气体交换参数

3 种植物最大净光合速率对氮处理的响应存在一定差异, 但均出现了相同的趋势, 即随氮处理水平升高呈现先增加后减少的变化 (表 2). 对光叶山黄皮而言, 低、中氮处理增加了 10.32%、19.26%, 高氮处理下又下降到了接近原先的水平, 但差异不显著. 黄果厚壳桂在低氮处理时最大净光合速率值最大, 中、高氮处理下依次下降, 其中高氮处理与低氮处理相比, 最大净光合速率降低了 28.65%, 并且低于对照水平. 厚壳桂在中氮处理下最大净光合速率比对照显著增加了 28.49% ($P < 0.05$), 但高氮处理下比对照显著降低了 22.67% ($P < 0.05$). 然而, 不同氮处理下表观量子效率 (AQY, 代表了植物潜在的光合能力, 即初始光能利用效率) 差异不显著, 但光叶山黄皮和厚壳桂变化幅度较大, 分别为 0.039~0.046 和 0.033~0.041, 黄果厚壳桂的变化幅度最

小, 为 0.039~0.040.

氮处理对 3 种植物的光饱和点的影响规律因种不同而异, 而对光补偿点的影响不明显 (图 2a、b). 氮处理下, 光叶山黄皮的光饱和点随氮处理水平的增加而升高, 低、中、高氮处理依次比对照升高了 18.82%、69.82%、71.47%, 中、高氮处理升高显著 ($P < 0.05$). 黄果厚壳桂在低氮处理下光饱和点最大, 比对照提高了 24.8%, 但中、高氮处理下出现下降趋势, 与低氮处理相比, 高氮处理下显著降低. 厚壳桂在中氮处理下光饱和点最大, 比对照提高了 23.61%, 高氮处理下降, 氮各处理间差异不显著. 对光补偿点而言, 除厚壳桂在中氮处理下显著降低以外, 其余皆不显著. 光叶山黄皮、黄果厚壳桂、厚壳桂 3 种植物光补偿点变化范围分别在 2.93~3.73、3.96~4.08 和 2.75~4.53 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 之间.

表 2 模拟氮沉降对最大净光合速率和表观量子效率的影响
TABLE 2 Effects of simulated N deposition on P_{max} and AQY

树种	参数	处理			
		对照	低氮	中氮	高氮
光叶山黄皮	$P_{max}/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	3.40 ±0.47 a	3.75 ±0.48 a	4.05 ±0.49 a	3.49 ±0.35 a
	AQY	0.046 ±0.004 a	0.046 ±0.004 a	0.040 ±0.006 a	0.039 ±0.011 a
黄果厚壳桂	$P_{max}/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	3.12 ±0.24 ab	3.77 ±0.29 a	2.95 ±0.24 ab	2.69 ±0.29 b
	AQY	0.039 ±0.003 a	0.039 ±0.004 a	0.040 ±0.003 a	0.040 ±0.004 a
厚壳桂	$P_{max}/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	3.44 ±0.19 b	3.08 ±0.21 bc	4.42 ±0.20 a	2.66 ±0.35 c
	AQY	0.041 ±0.004 a	0.042 ±0.008 a	0.039 ±0.003 a	0.033 ±0.005 a

注:所给数值为平均值 ±标准误 ($n=6\sim9$);后附不同字母表示处理间在 $P<0.05$ 水平上差异显著,表 3~4 同此.

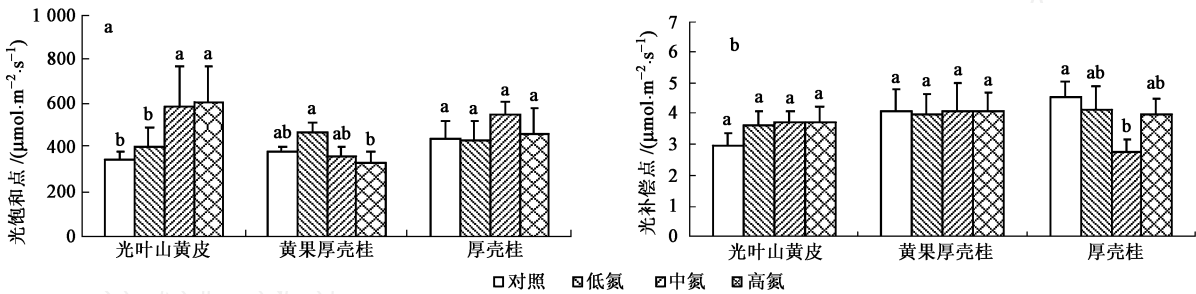


图 2 模拟氮沉降对光饱和点和光补偿点的影响

FIGURE 2 Effects of simulated N deposition on LSP and LCP

2.3 比叶重和光合色素含量

总体而言,3种植物的比叶重随氮处理水平的升高也出现了先增加后降低的变化趋势(表 3),而且都在中氮处理时植物的比叶重达到最大值.光叶

山黄皮、黄果厚壳桂分别比对照增加了 12.09 %和 10.94 % ($P<0.05$),高氮条件下又降低到了接近对照水平.厚壳桂在高氮条件下比叶重降低明显,低于对照水平.

表 3 模拟氮沉降对比叶重的影响

$\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$

TABLE 3 Effects of simulated N deposition on the specific leaf weight

树种	比叶重	处理			
		对照	低氮	中氮	高氮
光叶山黄皮	SLW	61.48 ±0.42 b	61.82 ±0.29 b	68.91 ±0.54 a	63.60 ±2.19 b
黄果厚壳桂	SLW	70.94 ±0.72 b	71.81 ±0.67 b	78.70 ±3.74 a	71.43 ±1.08 b
厚壳桂	SLW	86.87 ±3.52 ab	89.40 ±1.84 a	90.42 ±3.20 a	78.65 ±1.61 b

注:所给数值为平均值 ±标准误 ($n=3$).

表 4 中表明,模拟氮沉降并没有对光叶山黄皮和厚壳桂叶片中各色素含量和 $Chla/Chlb$ 比值造成显著影响 ($P>0.05$),而厚壳桂中各色素含量和 $Chla/Chlb$ 比值均在中氮处理下达到最大值.氮处理促进了黄果厚壳桂各色素含量的提高, $Chla$ 、 $Chlb$ 以及 $Chl(a+b)$ 均在低氮处理下达到最大值,与对照差异显著 ($P<0.05$);类胡萝卜素 Car 在氮处理下均显著高于对照 ($P<0.05$),但 $Chla/Chlb$ 在各处理间无明显的差异 ($P>0.05$).

3 讨 论

在鼎湖山季风常绿阔叶林进行氮沉降对凋落物分解速率影响的研究表明,由于长期受高氮沉降的影响和 400 多年发育历史的原因,季风常绿阔叶林已达到氮饱和状态^[9,24],因此氮沉降的进一步增加将可能降低植物生产力.然而本研究表明,氮沉降在

一定程度上促进了 3 种植物光合生理指标的变化,但这种变化也存在着阈值效应.这种阈值效应具体依植物种类而异.总体而言,光叶山黄皮和厚壳桂以中氮处理,即 $100\text{ kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$ (氮含量),对植物生长较好.如在中氮条件下均达到最大值,超过中氮处理水平后则呈现下降的变化.但是黄果厚壳桂最大净光合速率和光饱和点在低氮条件下 ($50\text{ kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$) 达到最大值,而比叶重却在中氮条件下达到最大值.高氮处理对 3 种植物的影响表现出了一致的负面效应,不利于植物的生长.这些结果与国内外相关的研究结果相类似.李德军等^[15,38]在苗圃进行的实验表明,施氮处理 11 个月后,无论以基径、株高,还是以全株生物量,或者是以相对生长速率来衡量,尽管不同植物种间存在差异但均以中等程度氮处理 (100 或 $150\text{ kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$) 的幼苗生长得最好.同时反映其生长状况的光合生理指标也进一步验证了该结

表 4 模拟氮沉降对叶片光合色素含量的影响

TABLE 4 Effects of simulated N deposition on the content of photosynthetic pigments

mg·g⁻¹

树种	色素	处理			
		对照	低氮	中氮	高氮
光叶山黄皮	Chla	4.67 ±0.67	4.45 ±0.29	4.40 ±0.24	4.23 ±0.15
	Chlb	2.39 ±0.38	2.33 ±0.18	2.08 ±0.15	2.12 ±0.01
	Car	0.39 ±0.06	0.35 ±0.04	0.45 ±0.01	0.35 ±0.07
	Chl (a + b)	7.05 ±1.03	6.77 ±0.47	6.49 ±0.39	6.35 ±0.15
	Chla/ Chlb	1.97 ±0.11	1.92 ±0.03	2.12 ±0.05	2.00 ±0.07
黄果厚壳桂	Chla	3.86 ±0.05 b	4.53 ±0.08 a	4.29 ±0.07 ab	4.34 ±0.33 ab
	Chlb	1.79 ±0.03 b	2.04 ±0.03 a	1.91 ±0.04 ab	1.95 ±0.09 ab
	Car	0.74 ±0.01 b	0.86 ±0.01 a	0.85 ±0.01 a	0.87 ±0.04 a
	Chl (a + b)	5.65 ±0.07 b	6.57 ±0.11 a	6.21 ±0.08 ab	6.30 ±0.42 ab
	Chla/ Chlb	2.16 ±0.03	2.22 ±0.01	2.24 ±0.05	2.22 ±0.08
厚壳桂	Chla	4.31 ±0.21	4.51 ±0.28	5.27 ±0.76	4.69 ±0.31
	Chlb	1.88 ±0.13	2.00 ±0.11	2.26 ±0.36	2.12 ±0.10
	Car	0.98 ±0.03	0.90 ±0.03	1.10 ±0.17	0.92 ±0.09
	Chl (a + b)	6.19 ±0.34	6.50 ±0.38	7.52 ±1.12	6.82 ±0.41
	Chla/ Chlb	2.29 ±0.05	2.25 ±0.03	2.34 ±0.04	2.21 ±0.04

注:所给数值为平均值 ±标准误 (n = 3)。

果^[15]。然而,当氮输入量超过 100 或 150 kg/(hm²·a) 后,以上幼苗生长指标则受到抑制^[38]。且高氮处理 (300 kg/(hm²·a)) 样地的幼苗成活率显著低于对照和其他较低氮处理样地的成活率^[15]。在日本的幼苗试验结果也存在阈值效应^[39],在低氮处理水平 57 kg/(hm²·a) 下, *Cryptomeria japonica* 幼苗净光合作用速率随氮输入量的增加而增加,但超过此水平后净光合作用速率明显降低,而且幼苗的生物量也表现了类似的变化趋势。Brown 等^[40]对 3 种常绿松树,即西加云杉 (*Picea sitchensis*)、美西侧柏 (*Thuja plicata*) 和西部铁杉 (*Tsuga heterophylla*) 的幼苗进行施氮处理时发现,当叶片氮含量在 21 mg/g 以下时,所有树种的光合速率均随叶片氮含量线性增加,但当叶片氮含量超过 21 mg/g 时,最大净光合速率反而下降。郭盛磊等^[41]对落叶松 (*Larix gmelinii*) 幼苗进行外加氮处理时发现,当叶片氮含量超过 24 mg/g 后,最大净光合速率开始下降。Bauer 等^[14]对哈佛森林进行为期 10 年的施氮实验也表明,高氮处理 (150 kg/(hm²·a)) 下红松 (*Pinus koraiensis*) 的光合能力显著下降。

本研究中反映光合作用的其他气体交换参数,尽管统计上不显著,但氮处理同样表现出了类似的变化。如光叶山黄皮和厚壳桂的表观最大量子效率,特别是在高氮处理下,表观量子效率降低比较明显,都低于对照水平。由于表观量子效率降低是光抑制的显著特征^[42],所以高氮处理不利于植物的光合作用,光叶山黄皮和厚壳桂最大净光合速率在高氮条件下降低也许能说明这一点。氮处理对 3 种植物的光补偿点的影响不明显。但是低或中氮处理促进了光饱和点的升高,有利于其进一步适应环境更广泛地利用光能。而黄果厚壳桂和厚壳桂的光饱和点在

高氮处理下出现下降趋势,这不利于其利用光能。

那么,为何过量的氮输入会影响到植物的光合生理呢?产生上述“阈值效应”的原因又是什么呢?这些变化可能与植物体内的养分失衡有关。氮处理使氮在植物体内累积,从而打破了植物体内的养分原有平衡,进而影响了植物正常的生理进程。本研究中,3 种植物叶片全氮含量在中、高氮处理下都比对照有明显的增加,而且全氮含量与氮处理水平呈极显著相关。然而,与之相反,氮处理对 3 种植物叶片全磷含量则没有明显影响,导致了氮磷比的增加,从而可能引发养分失衡。李德军等^[13]在苗圃模拟氮沉降的实验中发现,氮处理引起植物体内 P、K、Ca、Mg 等元素含量的降低和氮与其他营养元素的比值增加,而且高氮处理造成了植物的营养失衡。Nakaji 等^[43]研究发现,即使在氮过量且限制植物生长时,植物叶氮含量仍会随着外界氮的输入而增加。而环境中可利用性氮的增加直接影响植物对其他元素的吸收和利用^[44]。Weikert 等^[45]发现挪威云杉 (*Picea abies*) 针叶中 Ca 和 Mg 元素的减少将导致光合能力降低。但是,也有学者^[40]认为高氮处理下光合速率下降是由于植物产生自遮蔽 (self-shading) 效应所致。

其次光合色素的变化也可能是植物光合生理发生变化的原因。在本研究中黄果厚壳桂各光合色素含量在氮处理下均高于对照。因此,氮沉降增加影响光合作用的原因可能是通过影响叶片光合色素的含量造成的。Warren 等^[46]的研究中,氮处理导致单位面积叶绿素的含量增加了 4 倍,并且色素含量与单位面积氮含量呈正相关。Pérez-Solba 等^[47]对欧洲赤松 (*Pinus sylvestris*) 幼树进行为期 14 周熏氨气实验,结果表明针叶中 Chla、Chlb 和 Car 含量分别比对照高 29%、38%和 11%。李德军等^[15]对荷木和黄果厚

壳桂幼苗的研究中也发现了类似的趋势. 但是, 在本研究中氮处理并没有对光叶山黄皮和厚壳桂叶片光合色素含量造成显著影响. 国外有些研究也有类似的结果, 如 Schaberg 等^[17] 发现施氮没有引起各个不同氮处理间色素含量的明显变化. 这也许是不同树种对氮沉降响应存在差异, 其内部适应机理也不尽相同, 再加上自然林里高度的复杂性, 导致植物体内生理指标发生了不同的变化. 但是, 以上推测还需要进一步的研究证实.

光叶山黄皮和厚壳桂的最大净光合速率与比叶重最大值都出现在中氮处理, 表现出了同步性, 这说明了植物对中氮输入的调节能力较强, 有利于植物利用光能制造更多的有机物, 使比叶重得以提高. 由于光合能力与比叶重变化表现同步性, 因此氮处理可能增加了叶片的厚度, 叶片厚度的增加 (特别是栅栏组织细胞的数目或大小增加) 使单位叶面积的最大净光合速率提高^[48]. 但是黄果厚壳桂光合能力与比叶重变化并没有表现出同步性, 其最大净光合速率和光饱和点在低氮条件下 ($50 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$) 达到最大值, 而比叶重却在中氮条件下达到最大值. 这也许能反映植物对氮沉降可承受程度的大小. 与光叶山黄皮和厚壳桂相比, 黄果厚壳桂对过量的氮沉降响应更为敏感, 中、高氮处理对其干扰最大, 不利于其光合生理反应. 最大净光合速率与植物当时的生长环境密切相关, 能较直接和迅速的反映氮沉降对植物的影响. 而比叶重则是其平时有机物质积累的具体体现, 具有滞后性和延时性, 其对氮沉降的敏感性远不如最大净光合速率. 这可能是导致植物叶片生理代谢受到严重干扰的情况下, 比叶重仍然保持较高数值的原因. 3 种植物在高氮处理下最大净光合速率和比叶重都明显降低, 说明高氮对植物的生长不利. 有关氮沉降对植物生长的影响有诸多报道, 普遍认为适量的氮沉降促进植物生长, 过量的氮沉降不利植物生长^[10, 15, 39, 43]. Bauer 等^[14] 通过实际研究并结合模型预测表明, 在高氮样地, 由于光饱和条件下的光合速率显著降低, 施氮 8 年后松林的净初级生产力降低了 80%.

综上所述, 尽管季风常绿阔叶林已达到氮饱和状态, 但是 3 种植物有一定的自我调节和适应能力. 黄果厚壳桂的光合指标对氮沉降的响应比光叶山黄皮和厚壳桂敏感, 在低氮条件下 ($50 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$) 更能维持其生理优势; 而其他两种植物则在中氮条件下 ($100 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$) 生长最好. 适量氮沉降在短期内还是有利于这 3 种植物的生长, 但高氮处理 ($150 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$) 可能已超出了植物可承受的程度, 打乱了植物体内的生理进程, 不利于植物的正常生长. 考虑

到当年的大气降水氮沉降量 (约 $50 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ^[23]), $150 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 的氮沉降在一定时期内仍能促进光叶山黄皮和厚壳桂的生长, 黄果厚壳桂为 $100 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$; 但是一旦超过 $150 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 3 种植物的生长很可能受到严重威胁. 当然具体情况如何, 仍需进行深入地研究.

参 考 文 献

- [1] VITOUSEK P M, ABER J D, HOWARTH R W, et al. Human alteration of the global nitrogen cycle: Sources and consequences [J]. *Ecological Applications*, 1997, 7 (3): 737-750.
- [2] HOLLAND E A, DENTENE F J R, BRASWELL B H, et al. Contemporary and pre-industrial global reactive nitrogen budgets [J]. *Biogeochemistry*, 1999, 46: 7-43.
- [3] GALLOWAY J N, COWLING E B. Reactive nitrogen and the world: 200 years of change [J]. *AMBIO*, 2002, 31 (2): 64-71.
- [4] GALLOWAY J N, LEVY H II, KASIBHATLA P S. Year 2020: Consequences of population growth and development on the deposition of oxidized nitrogen [J]. *AMBIO*, 1994, 23 (2): 120-123.
- [5] WRIGHT R, VAN BREEMEN N. The NITREX project: An introduction [J]. *Forest Ecology and Management*, 1995, 71 (1-2): 1-6.
- [6] MOFFAT A S. Goba nitrogen overload problem grows critical [J]. *Science*, 1998, 279: 988-989.
- [7] MATSON P A, MCDOWELL W H, TOWNSEND A R, et al. The globalization of N deposition: Ecosystem consequences in tropical environments [J]. *Biogeochemistry*, 1999, 46: 67-83.
- [8] GALLOWAY J N, ABER J D, ERISMAN J W, et al. The nitrogen cascade [J]. *BioScience*, 2003, 53 (4): 341-356.
- [9] MO J M, BROWN S, XUE J H, et al. Response of litter decomposition to simulated N deposition in disturbed, rehabilitated and mature forests in subtropical China [J]. *Plant and Soil*, 2006, 282: 135-151.
- [10] MAGILL A H, ABER J D, BERNITSONE G M, et al. Long-term nitrogen additions and nitrogen saturation in two temperate forests [J]. *Ecosystems*, 2000, 3: 238-253.
- [11] 鲁显楷, 莫江明, 彭少麟, 等. 鼎湖山季风常绿阔叶林林下层三种优势树种游离氨基酸和蛋白质对模拟氮沉降的响应 [J]. *生态学报*, 2006, 26 (3): 743-753.
- LU X K, MO J M, PENG S L, et al. Effects of simulated N deposition on free amino acids and soluble protein of three dominant understory species in a monsoon evergreen broadleaved forest of subtropical China [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2006, 26 (3): 743-753.
- [12] EDFAST A, NASHOLM T, ERICSSON A. Free amino acid concentrations in needles of Norway spruce and Scots pine trees on different sites in areas with two levels of nitrogen deposition [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1990, 20: 132-136.
- [13] 李德军, 莫江明, 彭少麟, 等. 南亚热带森林两种优势树种幼苗的元素含量对模拟氮沉降增加的响应 [J]. *生态学报*, 2005, 25 (9): 2165-2172.

- LID J, MO J M, PENG S L, *et al.* Effects of simulated nitrogen deposition on elemental concentrations of *Schima superba* and *Cryptocarya concinna* seedlings in subtropical China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25 (9): 2 165-2 172.
- [14] BAUER G A, BAZZAZ F A, MINOCHA R, *et al.* 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 [J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, 196(1): 173-186.
- [15] 李德军, 莫江明, 方运霆, 等. 模拟氮沉降对南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.
- LID J, MO J M, FANG Y T, *et al.* Effects of simulated nitrogen deposition on growth and photosynthesis of *Schima superba*, *Castanopsis chinensis* and *Cryptocarya concinna* seedlings[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(5): 876-882.
- [16] 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): 1 891-1 900.
- LID J, MO J M, FANG Y T, *et al.* Impact of nitrogen deposition on forest plants[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(9): 1 891-1 900.
- [17] SCHABERG P G, PERKINS T D, MCNULTY S G. Effects of chronic low-level N additions on foliar elemental concentrations, morphology, and gas exchange of mature montane red spruce[J]. *Can J Res*, 1997, 27: 1 622-1 629.
- [18] ELVIR J A, WIERSMA G B, DAY M E, *et al.* Effects of enhanced nitrogen deposition on foliar chemistry and physiological processes of forest trees at the Bear Brook Watershed in Maine [J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 221(1-3): 207-214.
- [19] 孙崇基. 酸雨[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2001.
- SUN C J. *Acid rain* [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2001.
- [20] 任仁, 米丰杰, 白乃彬. 中国降水化学数据的化学计量学分析[J]. *北京工业大学学报*, 2000, 26(2): 90-95.
- REN R, MI F J, BAI N B. A chemometrics analysis on the data of precipitation chemistry of China [J]. *Journal of Beijing Polytechnic University*, 2000, 26(2): 90-95.
- [21] 黄忠良, 丁明懋, 张祝平, 等. 鼎湖山季风常绿阔叶林的水文学过程及其氮素动态[J]. *植物生态学报*, 1994, 18(2): 194-199.
- HUANG Z L, DING M M, ZHANG Z P, *et al.* The hydrological processes and nitrogen dynamics in a monsoon evergreen broad-leaved forest of Dinghushan [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1994, 18(2): 194-199.
- [22] 周国逸, 闫俊华. 鼎湖山区域大气降水特征和物质元素输入对森林生态系统存在和发育的影响[J]. *生态学报*, 2001, 21(12): 2 002-2 012.
- ZHOU G Y, YAN J H. The influence of region atmospheric precipitation characteristics and its element inputs on the existence and development of Dinghushan forest ecosystems [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(12): 2 002-2 012.
- [23] 方运霆. 氮沉降对鼎湖山森林土壤氮素过程的影响[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006.
- FANG Y T. *Effects of nitrogen deposition on soil nitrogen processes in Dinghushan forests* [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [24] 莫江明, 薛球花, 方运霆. 鼎湖山主要森林植物凋落物分解及其对N沉降的早期响应[J]. *生态学报*, 2004, 24(7): 1 413-1 420.
- MO J M, XUE J H, FANG Y T. Litter decomposition and its responses to simulated N deposition for the major plants of Dinghushan forests in subtropical China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(7): 1 413-1 420.
- [25] 黄展帆, 范征广. 鼎湖山的气候[J]. *热带亚热带森林生态系统研究*, 1982(1): 11-16.
- HUANG Z F, FAN Z G. The climate of Ding Hu Shan [J]. *Tropical and Subtropical Forest Ecosystem*, 1982(1): 11-16.
- [26] 何金海, 陈兆其, 梁永柔. 鼎湖山自然保护区之土壤[J]. *热带亚热带森林生态系统研究*, 1982(1): 25-38.
- HE J H, CHEN Z Q, LIANG Y E. The soil of Ding Hu Shan [J]. *Tropical and Subtropical Forest Ecosystem*, 1982(1): 25-38.
- [27] MO J M, BROWN S, PENG S L, *et al.* Nitrogen availability in disturbed, rehabilitated and mature forests of tropical China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, 175(1-3): 573-583.
- [28] 曹洪麟, 黄忠良, 张林艳, 等. 鼎湖山自然保护区植被类型[J]. *热带亚热带森林生态系统研究*, 2002(9): 1-9.
- CAO H L, HUANG Z L, ZHANG L Y, *et al.* Vegetation map of Dinghu Mountain Nature Reserve [J]. *Tropical and Subtropical Forest Ecosystem*, 2002(9): 1-9.
- [29] 黄忠良, 孔国辉, 魏平. 鼎湖山植物物种多样性动态[J]. *生物多样性*, 1998, 6(2): 116-121.
- HUANG Z L, KONG G H, WEI P. Plant species diversity dynamics in Dinghu Mountain forests [J]. *Chinese Biodiversity*, 1998, 6(2): 116-121.
- [30] WRIGHT R F, RASMUSSEN L. Introduction to the NITREX and EXMAN projects [J]. *Forest Ecology and Management*, 1998, 101(1-3): 1-7.
- [31] GUNDERSEN P, EMMETT B A, KJONAAS O J, *et al.* Impact of nitrogen deposition on nitrogen cycling in forest: A synthesis of NITREX data [J]. *Forest Ecology and Management*, 1998, 101(1-3): 37-55.
- [32] ABER J D, MAGILL A H, BOONE R, *et al.* Plant and soil responses to chronic nitrogen additions at the Harvard forest, Massachusetts [J]. *Ecological Applications*, 1993, 3: 156-166.
- [33] ABER J D, MCDOWELL W, NADELHOFFER K J, *et al.* Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems, hypotheses revisited [J]. *BioScience*, 1998, 48(11): 921-934.
- [34] BASSMAN J, ZWIER J C. Gas exchange characteristics of *Populus trichocarpa*, *Populus deltoids* and *Populus trichocarpa* × *P. deltoids* clone[J]. *Tree Physiology*, 1991, 8: 145-149.
- [35] LICHTENTHALER H K. Chlorophyll and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes[J]. *Methods in Enzymology*, 1987, 148: 349-382.
- [36] BREMNER J M, MULVANEY C S. Nitrogen-total [M]// PAGEA L, MILLER R H, KEENEY D R. *Methods of soil analysis* (): chemical and microbial properties, Agronomy Monograph 9. Madison, Wisconsin: Agronomy Society of America, 1982: 595-624.
- [37] ANDERSON J M, INGRAM J S I. *Tropical soil biology and fertility: A handbook of methods* [M]. Wallingford, Oxford, England: CAB International, 1989.

[38] 李德军,莫江明,方运霆,等. 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[J]. 植物生态学报,2005,29(4): 543-549.

LI D J, MO J M, FANG Y T, et al. Effects of simulated nitrogen deposition on biomass production and allocation in *Schima superba* and *Cryptocarya concinna* seedlings [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(4): 543-549.

[39] NAKAJI T, TAKENAGA S, KUROHA M, et al. Photosynthetic response of *Pinus densiflora* seedlings to high nitrogen load [J]. *Environmental Sciences*, 2002, 9(4): 269-282.

[40] BROWN K R, THOMPSON W A, CAMM E L. Effects of N addition rates on the productivity of *Picea sitchensis*, *Thuja plicata*, and *Tsuga heterophylla* seedlings (): Photosynthesis, ¹³ C discrimination and N partitioning in foliage [J]. *Trees*, 1996, 10: 198-205.

[41] 郭盛磊,阎秀峰,白冰,等. 供氮水平对落叶松幼苗光合作用的影响[J]. 生态学报,2005, 25(6): 1 291-1 298.

GUO S L, YAN X F, BAI B, et al. Effects of nitrogen supply on photosynthesis in larch seedlings[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(6): 1 291-1 298.

[42] BJORKMAN O, DEMMIG-ADAMS B. Regulation of photosynthetic light energy capture, conversion, and dissipation in leaves of higher plants[M]//SCHULZE E D, CALDWELL M M. *Ecophysiology of photosynthesis*. Berlin: Springer-Verlag, 1994: 17-47.

[43] 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: 453-461.

[44] ABER J D, MAGILL A, MCNULTY S D, et al. Forest biogeochemistry and primary production altered by nitrogen saturation [J]. *Water Air Soil Pollut*, 1995, 85: 1 665-1 670.

[45] WEIKERT R M, WEDLER M, LIPPERT M, et al. Photosynthetic performance chloroplast pigments and mineral content of various needle age classes of spruce (*Picea abies*) with and without the new flush and experimental approach for analyzing forest decline phenomena[J]. *Trees*, 1989, 3: 161-172.

[46] WARREN C R, DREYER E, ADAMS M A. Photosynthesis-Rubisco relationships in foliage of *Pinus sylvestris* in response to nitrogen supply and the proposed role of Rubisco and amino acids as nitrogen stores [J]. *Trees*, 2003, 17: 359-366.

[47] PÉREZ-SOLBA M, STULEN I, VAN DER EERDEN L J M. Effects of atmospheric ammonia on the nitrogen metabolism of Scots pine (*Pinus sylvestris*) needles [J]. *Physiologia Plantarum*, 1994, 90: 629-636.

[48] NIINEMETS U. Research review: Components of leaf dry mass per area-thickness and density-alter leaf photosynthetic capacity in reverse directions in woody plant[J]. *New Phytol*, 1999, 144: 35-47.

(责任编辑 赵 勃)

本刊 2008 年第 1 期要目预告

- 朱 琦 等:森林群落无样地取样方法的改进
- 侯 颖 等:CO₂ 浓度和温度升高对川西亚高山红桦幼苗根系结构的影响
- 张 林 等:云南松比叶面积和叶干物质含量随冠层高度的垂直变化规律
- 李 瑞 等:西北半干旱区湿地生态系统植物群落空间分布特征研究
- 刘丽娜 等:北京市三种针叶绿化树种根系结构分析
- 刘鹏举 等:基于 OWL 的森林资源数据智能化采集技术
- 李子君 等:降水变化与人类活动对密云水库入库泥沙量的影响
- 王武魁 :林业电子政务信息系统企业架构框架总体设计
- 张学霞 等:数码照相法估算植被盖度研究