

鼎湖山主要森林类型植物胸径生长 对氮沉降增加的初期响应

方运霆^{1,2}, 莫江明^{1*}, 周国逸¹, 薛璟花¹

(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, 广东 肇庆 526070;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 在林地分别喷加 0、50、100 和 150 kg N hm⁻²a⁻¹, 研究鼎湖山马尾松林、马尾松荷木混交林和季风常绿阔叶林乔木层植物胸径生长(年增长率)对增施氮的响应。结果表明, 不喷加 N, 马尾松林、混交林和阔叶林胸径年增长率分别为 4.84%、4.09% 和 2.99%; 外加氮对植物胸径生长的影响因森林类型和植物种而异。马尾松林和混交林, 低氮处理(喷加 50 kg N hm⁻²a⁻¹) 没有对胸径生长产生明显影响, 中氮处理(喷加 100 kg N hm⁻²a⁻¹) 则分别增加了 77.8% 和 105.6%。外加氮处理均使阔叶林胸径年增长率下降, 低氮、中氮和高氮处理(喷加 150 kg N hm⁻²a⁻¹) 分别比对照(不喷 N) 低 36.8%、28.5% 和 41.0%。这表明外加氮处理促进马尾松生长, 但抑制大多数阔叶树种生长。

关键词: 氮沉降; 乔木生长; 鼎湖山; 广东

中图分类号: S718.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2003)03-0198-07

Response of Diameter at Breast Height Increment to N Additions in Forests of Dinghushan Biosphere Reserve

FANG Yun-ting^{1,2}, MO Jiang-ming^{1*}, ZHOU Guo-yi¹, XUE Jing-hua¹

(1. Dinghushan Forest Ecosystem Research Station, South China Botanical Garden, the Chinese Academy of Science,

Zhaoqing 526070, China; 2. The Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The responses of diameter at breast height (DBH) in tree layer to nitrogen (N) additions were studied in three representative forest types in Dinghushan Biosphere Reserve: a pine (*Pinus massoniana*) forest, a pine-broadleaved mixed forest, and a broadleaved forest. Dissolved NH₄NO₃ was sprayed monthly with equal applications dose onto the forest floor of 10 m×20 m plots within a year to simulated elevated N deposition. Four treatments were established in the broadleaved forest: control, low N (50 kg N hm⁻²a⁻¹), moderate N (100 kg N hm⁻²a⁻¹) and high N (150 kg N hm⁻²a⁻¹), and three treatments (control, low N and moderate N), in mixed and pine forests. All the treatments were in three replicates. Annual increment rates of DBH in control plots were estimated to be 4.84%, 4.09% and 2.99% for the pine, mixed and broadleaved forests, respectively. After treatment with N additions for one year, in the pine and mixed forest, the DBH increment rate in low N plots was similar to that in the control, while in moderate N plots the increment rates in pine forest and mixed forest were by 77.8% and 105.6%, respectively, higher than those of the control. In contrast, in the broadleaved forest, all N addition treatments decreased the tree growth, though the treatment effect was not significant, and the increment rates in the low, moderate and high N plots were by 36.8%, 28.5% and 41.0%, respectively, lower as compared to the control. The effects of N addition on tree growth different in species. N additions stimulated the growth of *Pinus*

收稿日期: 2004-07-22 接受日期: 2004-11-01

基金项目: 国家自然科学基金(30270283); 中国科学院方向性项目(KSCX2-SW-133); “中国科学院知识创新工程领域前沿项目和中国科学院华南植物园园主任基金项目”资助

* 通讯作者 Corresponding author

massoniana both in pine forest and mixed forest, but decreased that of most broadleaved species in all the three forests.

Key words: Nitrogen addition; Tree growth; Dinghushan Biosphere Reserve; Guangdong

近年来,一些发展中国家因使用肥料、化石燃料和生物物质燃烧所释放的氮在快速增长,氮排放源和分布由原来集中在发达国家地区向全球迅速扩展,从而导致全球化氮沉降增加^[1,2]。我国南亚热带一些地区也存在高氮沉降量现象,如广东鼎湖山国家级自然保护区在20世纪90年代降水氮沉降量为35–38 kg N hm⁻²a⁻¹^[3,4];广州市1988年降水氮沉降量为45.6 kg N hm⁻²a⁻¹,到1990年升至72.6 kg N hm⁻²a⁻¹^[5]。随着经济、工农业的发展,一些地区大气氮沉降量可能还会继续升高^[1,2,5]。

通常认为,大多数温带森林生态系统生产力受氮限制,氮输入增加首先会增加森林土壤有效氮含量,缓冲植物和微生物对氮的竞争,从而增加生态系统生产力^[2,6,7]。因此,氮沉降增加一定程度上能提高初级生产力和碳贮存量,从而减缓全球大气CO₂浓度升高的速度。然而,相对于温带地区年轻的土壤,热带地区古老的森林土壤由于强烈风化和旺盛的生物循环,生态系统生产力可能不受氮限制,而受P和Ca等矿质元素的限制^[2,7-9]。因此,一些科学家预测外加氮不但不会增加生态系统生产力和碳贮量,反而会加剧土壤酸化,增加K⁺、Ca²⁺和Mg²⁺等碱性阳离子大量丢失和N₂O大量的排放,土壤-植被间的正反馈作用持续发生从而使生产力和碳贮量进一步减少^[2,7-9]。南亚热带是热带向亚热带的过渡地带,其植被组成和土壤特性既有热带也有温带的特征。但有关氮沉降增加对南亚热带森林生产力的影响研究还未见报道^[10]。

本研究选择南亚热带具有代表性的3种森林类型(马尾松林、马尾松荷木混交林和季风常绿阔叶林),

通过人工外加氮,模拟氮沉降量增加,探讨森林生态系统结构与功能对氮沉降的响应特征及其机理。我们曾相继报道了氮沉降增加对3种森林优势种凋落物分解^[11]、土壤有效氮含量与组成^[12]、土壤渗透水(土壤深20 cm)酸度和无机氮含量^[13]对氮沉降的初期响应特征,本文报道这3种森林类型乔木层植物胸径生长(年增长率)在氮处理1 a后的响应特征,为氮沉降增加环境下的森林管理提供科学依据。

1 研究地概况

鼎湖山国家级自然保护区始建于1956年,位于广东省肇庆市东北郊,东经112°33',北纬23°10',总面积约为1 155 hm²。保护区气候具有明显的季风性,年平均降雨量为1 927 mm,其中75%分布在3月到8月份,而12月到次年2月仅占6%。年均相对湿度为80%。年均温度为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℃^[14]。

所选择3个样地海拔高度在100–350 m,坡度为20–30°。马尾松林和混交林均于20世纪30年代营造,其中马尾松林样地位于保护区东南角缓冲带,过去允许当地农民砍些小树和收割林下层植物作为薪柴,而混交林虽也在保护区的缓冲带(地质疗养院背后),但因得到良好保护,由荷木(*Schima superba*)和锥栗(*Castanopsis chinensis*)等阔叶树种逐渐入侵而形成混交林。阔叶林样地位于三宝峰东北坡,在季风常绿阔叶林生物多样性研究永久样地的右侧,长期得到较好的保护。森林植物种类丰富,结构复杂,乔木层主要有锥栗、厚壳桂(*Cryptocarya*

表1 鼎湖山3种森林土壤有效氮含量、pH值和容重

Table 1 Available nitrogen content, pH and bulk density in soils under pine, mixed and broadleaved forest in Dinghushan

林型 Forests	土层深度 Soil depth (cm)	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N (mg kg ⁻¹)	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N (mg kg ⁻¹)	总有效氮 Total available N (mg kg ⁻¹)	铵态氮比例 Percent of NH ₄ ⁺ -N (%)	pH	容重 Bulk density (g cm ⁻³)
马尾松林 Pine forest	0–10	3.65±0.37	3.26±0.26	6.50±0.40	49.35±3.05	4.08±0.04	1.16±0.03
	10–20	2.94±0.35	3.28±0.38	5.89±0.52	47.17±2.96	4.25±0.02	1.48±0.03
	平均 Mean	3.30±0.26	3.27±0.23	6.19±0.33	48.26±2.12	4.16±0.04	1.32±0.02
混交林 Mixed forest	0–10	3.53±0.35	4.17±0.42	7.70±0.68	44.55±2.27	3.95±0.01	1.22±0.03
	10–20	3.42±0.50	2.79±0.27	6.15±0.71	47.11±2.58	4.19±0.01	1.43±0.08
	平均 Mean	3.47±0.30	3.49±0.26	6.95±0.49	45.79±1.71	4.07±0.05	1.32±0.05
阔叶林 Broadleaved forest	0–10	1.79±0.24	11.57±1.48	13.82±1.47	26.04±4.13	3.81±0.03	0.98±0.04
	10–20	2.05±0.26	8.72±1.08	10.62±1.03	32.61±4.87	3.96±0.02	1.15±0.07
	平均 Mean	1.92±0.18	10.13±0.92	12.25±0.91	29.23±3.18	3.88±0.04	1.06±0.05

concinna)、荷木、红车(*Syzygium rehderianum*)和华润楠(*Machilus chinensis*)等树种^[13,14]。

3 个样地的土壤类型为赤红壤, 但马尾松林和混交林表层土壤铵态氮含量、铵态氮的比例、pH 值和容重显著高于阔叶林, 而硝态氮和总有效氮含量低于阔叶林, 马尾松林和混交林间各指标差异不大(表 1)^[12]。

2 研究方法

2.1 样地设计和氮处理

参照欧洲 NITREX 项目^[15,16]和北美 Harvard Forest^[6,17]等类似研究的设计, 于 2002 年 10 月在马尾松林、混交林和阔叶林样地分别设置 9、9 和 12 个氮处理样方(10 m×20 m), 进行外加氮处理试验。其中阔叶林设置 4 个处理: 对照(control)、低氮(low N)、中氮(moderate N)和高氮(high N), 分别在林地喷加 0、50、100 和 150 kg N hm⁻²a⁻¹, 但马尾松林和混交林仅各设 3 个处理, 即对照、低氮和中氮。每个处理均设 3 个重复。在阔叶林设置高氮处理是考虑阔叶林植物可能对 N 的需求量较大。各样方间留有 10 m 左右的间隔, 以防止相互干扰^[12,13]。2003 年 7 月开始, 每月月初根据氮处理水平, 将每样方每次需要喷施的 NH₄NO₃ 溶解在 20 L 水中(全年所增加的水量相当于新增降水 1.2 mm)后, 以背式喷雾器人工来回均匀喷洒在林地。对照样方则喷洒同样多的水, 以减少处理间因外加水不同而造成对森林生物地球化学循环的影响^[12]。

2.2 样地调查

2003 年 6 月份(氮处理前), 对所有样方内(10 m×20 m)胸径大于 2.5 cm 的植物进行编号、挂牌, 并测量株高、胸径和冠幅。为取样和调查方便, 我们把每个样方又分为 8 个 5 m×5 m 的小样方, 并编上号。选择其中的 7 号小样方(5 m×5 m)作为灌木层样方, 然后在灌木层样方的两个底角处各设置一个草本层样方(1 m×1 m), 进行灌木和草本植物样方调查。灌木层分别调查各种类的个体数、高度、基径和覆盖度。草本层则调查草本植物和幼苗的种类、覆盖度、丛(棵)数和高度。2004 年 6 月 11 日–30 日按同样的方法重复调查一次。由于林下植物生物量占整个生态系统的比例很少^[18], 本文分析氮沉降对森林植物生长的影响时只考虑乔木层的变化。

2.3 数据统计

分别计算各样方胸径 2.5–10 cm、10–20 cm 和 >20 cm 这 3 个径级和主要树种的胸径年增长率。用胸径年增长率表示树木生长的速度, 外加氮处理样方的增长率与对照样方差异作为对模拟氮沉降增加的响应差异。本文用胸径生长而不用生物量生长来评价氮处理对植物生长的影响, 是因为鼎湖山生物量生长模型都基于胸径和树高建立^[19], 而目测树高并不十分准确。

年增长率(%) = [(2004 年平均胸径–2003 年平均胸径)/2003 年平均胸径]×100%

采用统计软件 SPSS for windows 10.0 中单因素方差分析(One way ANOVA)和邓肯多重比较(Duncan's multiple-range test)检验森林乔木层胸径增长率在森林类型、径级、植物种和氮处理间的差异。显著和极显著分别指在 p=0.05 和 p=0.01 水平上的差异。

3 结果和分析

3.1 三种森林的乔木层群落结构特征

氮处理前(2003 年 6 月), 马尾松林乔木层虽有一定数量的阔叶树种, 但从胸径断面积来看, 马尾松还是占绝对优势(表 2)。混交林与马尾松林起源相同, 但混交林中马尾松密度明显减少, 而荷木密度大幅度增加, 以致荷木胸高断面积超出了马尾松(表 2)。阔叶林乔木层植物种类丰富, 主要优势种有锥栗、华润楠、荷木、厚壳桂和红车 5 个种(胸高断面积占整个群落的 83%, 表 2)。阔叶林的平均树高显著高于马尾松林和混交林, 而马尾松林平均胸径最高(图 1)。阔叶林胸高断面积约是马尾松林和混交林的 2 倍(表 2)。同一研究样地乔木层植物平均树高和平均胸径在不同处理间无显著差异(图 1), 为进一步比较不同氮处理对树木生长的影响差异增加了可比性。

3.2 对照样方胸径年增长率

3 种森林对照样方的胸径相对年增长率因森林类型和径级不同而异。在 2.5–10 cm 径级, 马尾松林的年增长率显著高于混交林和阔叶林, 马尾松林、混交林和阔叶林平均依次为 15.18%、5.02% 和 4.87%; 而在 10–20 cm 和 >20 cm 两个径级, 森林间差异不显著(0.90%–4.31%)。整个群落而言, 马尾松林和混交林的年增长率平均为 4.84% 和 4.09%,

表 2 鼎湖山保护区 3 种森林样地的乔木层结构
Table 2 Data for tree layer in the forests of Dinghushan

树种 Species	树种密度 Stem density (tree hm ⁻²)	树种密度 Mean height (m)	树种密度 Mean DBH (cm)	树种密度积 Basal area (m ² hm ⁻²)	树种密度积计的比例 % of total basal area
树种密度 Pine forest					
树种密 <i>Pinus massoniana</i>	456	6.85	17.47	13.27	95.07
树种 Other plants	311	4.28	4.39	0.69	4.93
树种 Total	767			13.96	100.00
树种密 Mixed forest					
树种密 <i>Pinus massoniana</i>	133	10.19	21.95	5.64	40.97
树种 <i>Schima superba</i>	1567	5.24	6.40	7.38	53.59
树种 Other plants	233	4.21	5.13	0.75	5.44
树种 Total	1933			13.78	100.00
树种密 Broadleaved forest					
树种 <i>Castanopsis chinensis</i>	83	12.7	23.5	9.63	37.0
树种密 <i>Machilus chinensis</i>	208	7.1	8.6	4.12	15.8
树种 <i>Schima superba</i>	183	7.7	10.3	3.78	14.5
树种密 <i>Cryptocarya chinensis</i>	113	11.5	20.6	2.31	8.9
树种 <i>Syzygium rehderianum</i>	129	11.1	29.4	1.60	6.2
树种 Other plants	1013	5.4	5.8	4.57	17.6
树种 Total	1729			26.01	100.00

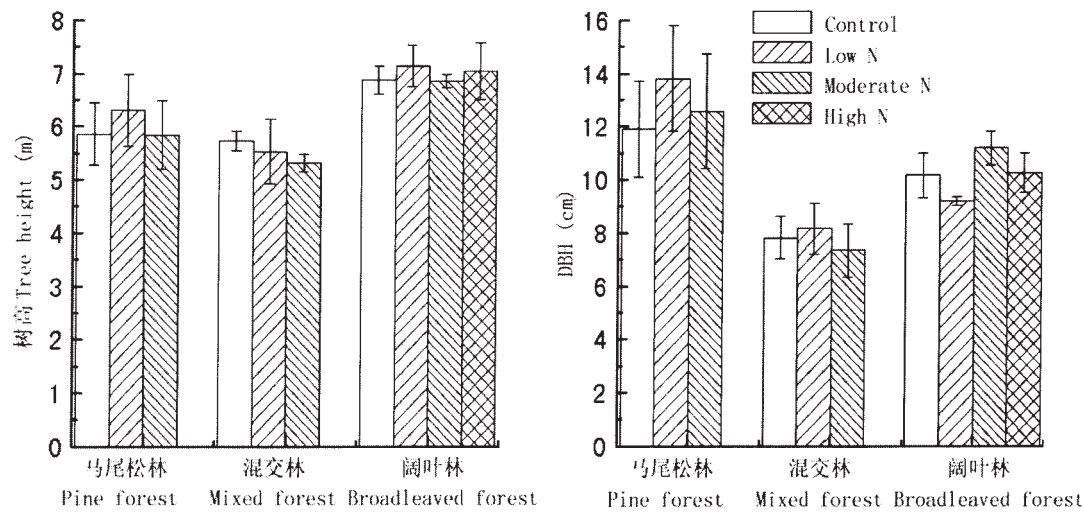


图 1 2003 年的样方乔木层植物平均树高和平均胸径
Fig. 1 Mean tree height and diameter at breast height (DBH) in tree layer in 2003

略高于阔叶林的 2.99%,但森林间的差异不显著。3 种森林均表现为径级越小年增长率越大的格局。其中 2.5–10 cm 径级的年增长率显著高于 10–20 cm 和(或)>20 cm 两个径级,前者约是后者的 1.2–11.8 倍(图 2)。

3 种森林的胸径相对年增长率还因种而异。在马尾松林和混交林,荷木等阔叶树种显然高于马尾松这种针叶树种(图 3)。马尾松林的马尾松年增长率为 2.08%,约是其它树种(21.06%)的 1/10。马尾松林和混交林中的马尾松的年龄和胸径(表 2)都较大,可能是导致这种差异的主要原因。在阔叶林,5 优势种的年增长率以厚壳桂(4.39%)和红军(4.38%)

较高,锥栗最低(2.48%),5 个种间差异不显著(图 3)。

3.3 胸径年增长率对外加氮处理的响应

经过 1 a 的氮处理,低氮处理没有对马尾松林和混交林胸径年增长率产生影响,但中氮处理则使其增加了 77.8%和 105.6%(图 2)。所有的外加氮处理都使阔叶林胸径年增长率减少(低氮、中氮和高氮处理依次减少 36.8%、28.5%和 41.0%),但只有在 >20 cm 径级高氮处理达到差异显著水平(图 3)。不同径级对外加氮处理的响应格局基本上与整个群落的格局相似,说明氮处理对树木生长的影响不存在明显的径级差别(图 3)。

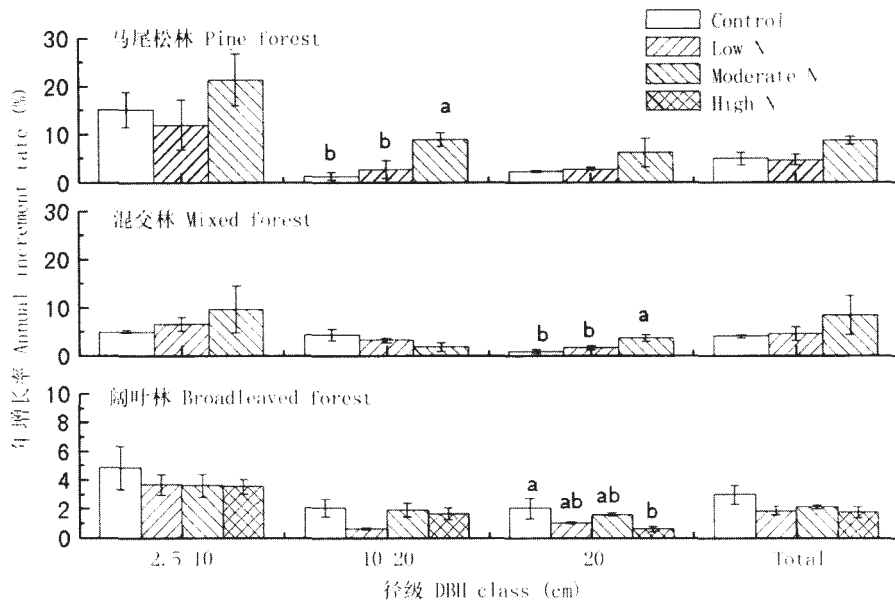


图 2 不同径级的胸径增长率及其对模拟氮沉降增加的响应

Fig. 2 The response of annual increment rates of DBH to N additions for different DBH classes

不同字母表示同一径级处理间在 $p < 0.05$ 水平上存在显著差异 Bars with different letters at same DBH class indicate significant difference at $p < 0.05$.

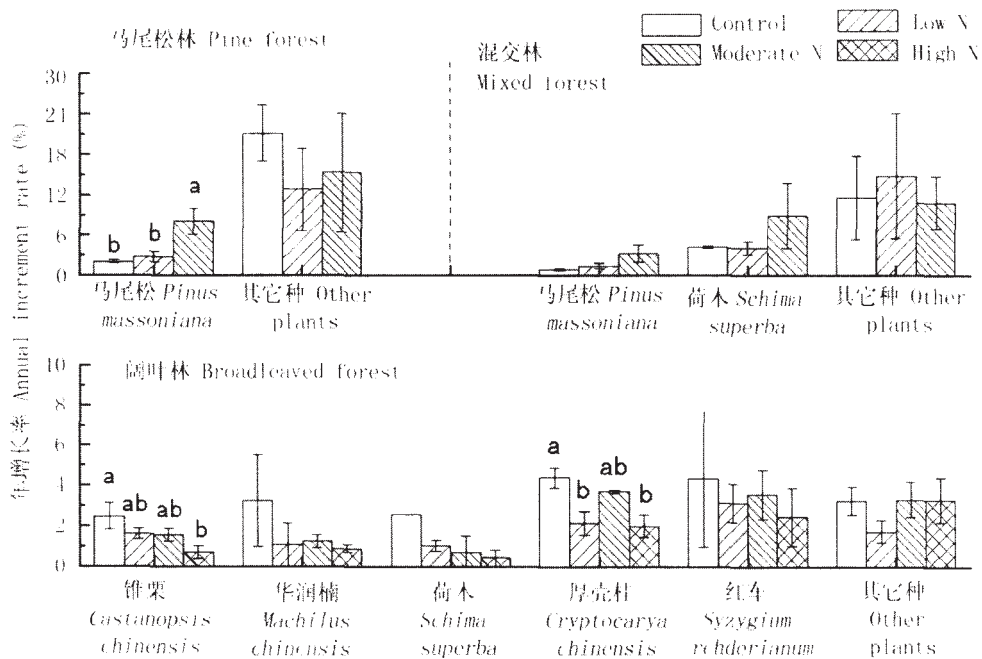


图 3 主要树种的胸径增长率及其对模拟氮沉降增加的响应

Fig. 3 The response of annual increment rates of DBH to N additions for dominant species

不同字母表示同一树种不同处理间在 $p < 0.05$ 水平上存在显著差异 Bars with different letters for same species indicate significant difference at $p < 0.05$.

3 种森林的胸径相对年增长率对外加氮处理的响应也因种而异。在马尾松林和混交林,外加氮处理均使马尾松的年增长率增加,而使其它阔叶林树种减少(除了混交林荷木中氮处理略高于对照外),也说明中氮处理使整个群落的胸径年增长率增加主要为马尾松所贡献;外加氮处理均使阔叶林

主要植物种的年增长率减少。可见,外加氮处理促进鼎湖山森林中马尾松这种针叶树种生长,而抑制阔叶树种生长(图 3)。

4 讨论

本研究结果表明不同森林植物胸径生长对外

加氮处理表现出完全不同的格局。虽然低氮处理对马尾松林和混交林乔木层植物胸径年增长率影响不大,但是中氮处理却使其分别增加了 77.8% 和 105.6%。而所有的外加氮处理却使阔叶林乔木层植物胸径生长减慢了 28.5%–41.0%。已有的研究表明,当一个生态系统生产力受氮限制时,喷加无机氮不但可直接增加土壤有效氮水平,而且还增强土壤氮矿化硝化作用,从而进一步增加土壤氮的有效性,缓冲了植物和细菌间对氮的竞争。而当生态系统生产力不受氮限制,或者说生态系统达到氮饱和时,外加氮处理不但 not 增加生产力,还有可能减少森林活力而导致森林衰退^[26,7]。据此,我们认为鼎湖山马尾松林和混交林应属于氮限制生态系统,而阔叶林则为氮饱和生态系统。

从以往的研究来看^[20],阔叶林生态系统比马尾松林和混交林生态系统更加富氮。本研究的马尾松林和混交林样地均起源马尾松人工林,混交林样地因得到较好的保护而发展为混交林,但是它们的植物组成(表 2)和土壤特性(表 1)仍然十分相似,两个森林有相似的氮素供给水平。阔叶林生态系统由于受到 400 多年的保护,植物组成与马尾松林和混交林已经大不相同,其土壤养分状态也明显不同。土壤有效氮以硝态氮组成为主,说明具有较强的硝化作用。土壤全氮含量也是阔叶林显著高于马尾松林和混交林^[20]。莫江明等^[11]同期进行的凋落物分解试验,表明外加氮处理对马尾松林和混交林凋落物分解有利,而对阔叶林凋落物分解不利,说明马尾松林和混交林凋落物分解初期受氮的限制,而阔叶林不然。此外,土壤渗透水无机氮含量和组成也反映出阔叶林比马尾松林和混交林富氮^[13]。

Migall 等^[17]对 Harvard forest 中的红松林和硬木林进行的外加氮研究,也表现同样的规律。经过 5 a 的外加氮处理,受氮限制的硬木林净初级生产力增加,而相对富氮的红松林有所下降。Migall 等认为两个森林对外加氮处理响应的差异要归因于 100–200 a 前的土地利用方式不同^[6]。硬木林曾为农业用地,在氮处理前的净矿化速率比红松林低,且也没有明显的净硝化作用^[17],因此,硬木林比红松林更加受氮限制。本研究马尾松林和混交林均起源于马尾松人工林,与受到 400 多年保护的阔叶林不同。

与许多在温带森林进行的外加氮模拟试验结果不同的是,鼎湖山无论是受氮限制的生态系统(马尾松林和混交林)还是氮饱和的生态系统(阔叶林),

其植物生长对外加氮的响应速度都较快(1 a 时间)。而在丹麦,75 a 生的云杉林在喷加 NH_4NO_3 5 a 后 ($35 \text{ kg N hm}^{-2}\text{a}^{-1}$),外加氮没有对树木生长产生显著的影响,作者认为出乎意料的 4 a 干旱影响了试验结果^[21]。同样,在瑞典一针叶林集水区进行的外加氮模拟试验,持续 5 a 的氮输入增加(约 $40 \text{ kg N hm}^{-2}\text{a}^{-1}$)也没有改变植物生长的速度^[22]。在 Harvard 的红松林和硬木林在进行 3 a 的氮处理(喷加 NH_4NO_3 50 和 $150 \text{ kg N hm}^{-2}\text{a}^{-1}$)后初级生产力才开始发生变化^[17]。Gundersen 等^[16]认为,温带森林植物生长对氮沉降的响应较慢,一般需要 5 a 以上的时间。

鼎湖山受氮限制的马尾松林和混交林植物生长对外加氮的响应较快的原因可能是较高的年降水量和较长的生长期。而较高的降水量对施加氮后的阔叶林植物生长不利,因为阔叶林受到长期的保护,土壤自然酸化强烈($\text{pH}<4.0$,表 1),增加氮的输入,将导致土壤 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 进一步损失和土壤更加酸化。对土壤渗透水无机氮含量和 pH 的测定结果显示,阔叶林外加氮处理使硝态氮含量增加了 65%–85%,土壤渗透水 pH 平均降低了 0.08–0.18 个 pH 值单位^[13]。而且,由于土壤酸度较低和阳离子大量损失,土壤还可能通过释放 Al^{3+} 来缓冲外来的酸^[2,7]。 Al^{3+} 大量析出将对植物根系产生毒害^[2,7]。如,1997–1998 年测定鼎湖山阔叶林 0–20 cm 土壤的交换性 Al^{3+} 含量为 $10.11\pm 0.18 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$,分别是马尾松林和混交林的 1.7 和 1.4 倍(未发表)。Matson 等^[2,7]认为热带地区古老的森林土壤由于强烈风化和旺盛的生物循环,生态系统生产力可能不受氮限制(而受 P 和 Ca 等矿质元素的限制),氮沉降增加使 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等碱性阳离子大量丢失,从而使生产力进一步降低。因此,如果从土壤有效氮、渗透水无机氮和植物生长对氮沉降的响应方式来看,阔叶林则更多地表现出热带森林的特点。

致谢 中国科学院华南植物园鼎湖山国家级自然保护区管理局徐国良、李德军、张佑昌、方晓明和莫定升等参加了植被调查,特此致谢!

参考文献

- [1] Galloway J N, Cowling E B. Reactive nitrogen and the world: 200 years of change [J]. *Ambio*, 2002, 31:64–71.
- [2] 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.
- [3] Huang Z L(黄忠良), Ding M M(丁明懋), Zhang Z P(张祝平), et al. The hydrological processes and nitrogen dynamics in a mon-

- soon evergreen broad-leaved forest of Dinghu shan [J]. *Acta Phytocol Sin*(植物生态学报), 1994, 18(2):194–199.(in Chinese)
- [4] Zhou G Y(周国逸), Yan J H(闫俊华). The influence of region atmospheric precipitation characteristics and its element inputs on the existence and development of Dinghushan forest ecosystems [J]. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2001, 21 (12):2002–2012. (in Chinese)
- [5] Ren R(任仁), Mi F J(米丰杰), Bai N B(白乃彬). A chemometrics analysis on the data of precipitation chemistry of China [J]. *J Beijing Polytechn Univ*(北京工业大学学报), 2000, 26(2):90–95. (in Chinese)
- [6] Aber J, McDowell W, Nadelhoffer K, et al. Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems, hypotheses revisited [J]. *Bioscience*, 1998, 48:921–934.
- [7] Matson P A, Lohse K A, Hall S J. The globalization of nitrogen deposition: consequences for terrestrial ecosystems [J]. *Ambio*, 2002, 31(2):113–119.
- [8] Hall S J, Matson P A. Nitrogen oxide emissions after nitrogen additions in tropical forests [J]. *Nature*, 1999, 400:152–155.
- [9] Hall S J, Matson P A. Nutrient status of tropical rain forests influences soil N dynamics after N additions [J]. *Ecol Mono*, 2003, 73(1):107–129.
- [10] Fang Y T(方运霆), Mo J M(莫江明), Gundersen P, et al. Nitrogen transformations in forest soils and its responses to atmospheric nitrogen deposition: A review [J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报), 2004, 24(7):1523–1531.(in Chinese)
- [11] Mo J M(莫江明), Xue J H(薛璟花), Fang Y T(方运霆). The primary study on the effects of simulated N deposition on litter decomposition of the major forest plants in subtropical China [J]. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2004, 24(7):1413–1420.(in Chinese)
- [12] Fang Y T(方运霆), Mo J M(莫江明), Zhou G Y(周国逸), et al. The short-term responses of soil available nitrogen of Dinghushan forests to simulated N deposition in subtropical China [J]. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2004, 24(11):2353–2359. (in Chinese)
- [13] Fang Y T(方运霆), Mo J M(莫江明), Jiang Y Q(江远清), et al. Acidity and inorganic nitrogen concentrations of soil solution in short-term response to N addition in subtropical forests [J]. *J Trop Subtrop Bot*(热带亚热带植物学报), 2005, 13(2):123–129.(in Chinese)
- [14] Huang Z F(黄展帆), Fan Z G(范征广). The climate of Ding Hu Shan [A]. In: *Tropical and Subtropical Forest Ecosystem Vol. 1* [C]. Haikou: Popular Science Press, Guangzhou Branch, 1982. 11–16.(in Chinese)
- [15] Wright R F, Rasmussen L. Introduction to the NITREX and EXMAN projects [J]. *For Ecol Manag*, 1998, 101:1–7.
- [16] 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]. *For Ecol Manag*, 1998, 101:37–55.
- [17] Magill A H, Aber J D, Hendricks J J, et al. Biogeochemical response of forest ecosystems to simulated chronic nitrogen deposition [J]. *Ecol Appl*, 1997, 7(2):402–415.
- [18] Fang Y T(方运霆), Mo J M(莫江明), Peng S L(彭少麟), et al. Role of forest succession on carbon sequestration of forest ecosystems in lower subtropical China [J]. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2003, 23(9):1685–1694.(in Chinese)
- [19] Peng S L(彭少麟), Li M G(李鸣光), Lu Y(陆阳). A primary study on the biomass and productivity of *Pinus massoniana* population in Dinghu Shan Biosphere Reserve [A]. In: *Tropical and Subtropical Forest Ecosystem Vol. 5* [C]. Beijing: Science Press, 1989. 75–82. (in Chinese)
- [20] Mo J M, Brown S, Peng S L, et al. Nitrogen availability in disturbed, rehabilitated and mature forests of tropical China [J]. *For Ecol Manag*, 2003, 175:573–583.
- [21] Gundersen P. Effects of enhanced nitrogen deposition in a spruce forest at Klosterhede, Demark, examined by moderate NH_4NO_3 addition [J]. *For Ecol Manag*, 1998, 101:251–268.
- [22] Kjonaas O J, Stuanes A O, Huse M. Effects of weekly nitrogen additions on N cycling in a coniferous forest catchment, Gardsjon, Sweden [J]. *For Ecol Manag*, 1998, 101:227–250.