

南亚热带森林土壤有效氮含量及其对 模拟氮沉降增加的初期响应

方运霆^{1,3}, 莫江明^{1*}, 周国逸¹, Per Gundersen², 李德军^{1,3}, 江远清^{1,3}

(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. Forest & Landscape Denmark, Hoersholm Kongevej 11, DK-2970; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 研究了南亚热带主要森林类型(马尾松林、混交林和季风常绿阔叶林)土壤有效氮含量对模拟氮沉降的初期响应。结果显示: (1) 马尾松林、混交林和阔叶林 0~10cm 和 10~20cm 两个土层有效氮(铵态氮+硝态氮)含量总平均分别为 6.24、6.22 和 14.77 mg/kg, 其中铵态氮占 45.3%、48.7% 和 14.5%。(2) 外加氮处理使 3 个森林两个土层的有效氮含量都在增加, 但其影响程度取决于土层、氮处理水平、氮处理时间和森林类型。总体而言, 0~10cm 土层略比 10~20cm 土层敏感; 氮处理水平越高土壤有效氮增加越多; 外加氮处理时间越长, 处理样方与对照样方的差距越大; 阔叶林的响应稍落后于马尾松林和混交林。

关键词: 氮沉降; 森林土壤; 铵态氮; 硝态氮; 鼎湖山

The short-term responses of soil available nitrogen of Dinghushan forests to simulated N deposition in subtropical China

FANG Yun-Ting^{1,3}, MO Jiang-Ming^{1*}, ZHOU Guo-Yi¹, Per Gundersen², LI De-Jun^{1,3}, JIANG Yuan-Qing^{1,3}

(1. Dinghushan Forest Ecosystem Research Station, South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Zhaoqing, Guangdong 526070, China; 2. Forest & Landscape Denmark, Royal Veterinary and Agricultural University, Hoersholm Kongevej 11, DK-2970; 3. The graduate school of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China). Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(11): 2353~2359

Abstract The short-term responses of soil available nitrogen (N) to simulated N deposition were studied in subtropical China in three representative forest types of the Dinghushan Biosphere Reserve: a pine (*Pinus massoniana*) forest, a pine and broadleaf mixed forest, and a monsoon evergreen broadleaf forest. Dissolved NH_4NO_3 was sprayed monthly onto the forest floor of 10 m \times 20 m plots as equal applications over the whole year to simulate elevated N deposition. Four treatments were established within the broadleaf stand: Control (0 kg N/(hm² · a)), Low N (50 kg N/(hm² · a)), Medium N (100 kg N/(hm² · a)) and High N (150 kg N/(hm² · a)), but only three treatments (Control, Low N, and Medium N), within the pine and the mixed stand; all in three replicates. N additions began in July 2003, and soil samples were obtained every month approx. a month after the latest N addition and analyzed for extractable $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$.

Total means of soil available nitrogen in two depths (0~10 cm and 10~20 cm) of the control plots were 6.2, 6.2 and 14.8 mg/kg with 45, 49% and 15% as $\text{NH}_4^+\text{-N}$ form for the pine, mixed and broadleaf stand, respectively. The soil N availability increased after N additions for both soil depths in all stands, and increased with N addition level. However, the magnitude of

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30270283); 中国科学院知识创新工程领域前沿资助项目; 中国科学院华南植物研究所所长基金资助项目和广东省自然科学基金资助项目(021524)

收稿日期: 2004-03-08; **修订日期:** 2004-09-10

作者简介: 方运霆(1976~), 男, 博士生, 从事森林生态系统 C、N 循环及其与全球变化的关系研究。

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: mojm@scib.ac.cn

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 30270283); Director Foundation of South China Institute of Botany CAS; Field Frontiers Project of CAS Knowledge Innovation Program; and the Provincial Natural Science Foundation of Guangdong China (No. 021524)

Received date: 2004-03-08; **Accepted date:** 2004-09-10

Biography: FANG Yun-Ting, Ph. D. candidate, Assistant professor, mainly engaged in carbon and nitrogen cycling in forest ecosystems and their relationships with global changes

responses varied depending on forest, soil depth and treatment time. The responses to N addition in the broadleaf stand where N is relative abundant were not as strong as in the pine and mixed stand where N is short supply. The response was slightly stronger at 0~10cm depth than at 10~20cm depth. The difference in soil available N between N addition plots and control plots increased with experimental time.

Key words: nitrogen deposition; forest soil; NH_4^+ -N; NO_3^- -N; Dinghushan Biosphere Reserve

文章编号: 1000-0933(2004)11-2353-07 中图分类号: Q 149 文献标识码: A

近几十年来矿物燃料燃烧、含氮化肥的生产和使用及畜牧业等人类活动向大气中排放的含氮化合物激增并引起大气氮沉降也成比例增加^[1-3]。氮沉降的增加,目前已造成了河口、海口和江湖等水域氮富集和陆地生态系统氮超负荷,并引起了科学家和公众的广泛关注^[1-6]。国外一些生态学家已开展了一些关于氮沉降对森林生态系统结构和功能影响的研究,如欧洲NITREX (Nitrogen Saturation Experiments)和EXMAN (Experimental Manipulation of Forest Ecosystems in Europe)项目^[7,8]。事实上,我国一些地区也存在高氮沉降量问题,如广东鼎湖山自然保护区仅降水氮沉降量就有 35.57 和 38.4 kg N/(hm²·a)^[9,10]。况且,随着我国社会经济、工农业的进一步发展,大气氮沉降量可能还会继续升高。同时,由于气候和水分供应的极大差异会导致经济发展的不平衡,氮沉降的分布状况,增加的速度及其影响存在巨大的区域性差异^[1]。目前的氮沉降状况和未来的发展趋势已引起了国际社会的高度关注^[1]。然而,尽管如此,有关氮沉降对我国森林生态系统结构和功能的影响及其机制方面的研究报道极为少见^[11]。

为此,于 2002 年 10 月在鼎湖山国家级自然保护区选择南亚热带代表性的森林(马尾松林、混交林和季风常绿阔叶林)建立了永久性的试验样地,在林地人工外加氮来模拟氮沉降量增加,系统地研究氮沉降对南亚热带森林生态系统结构与功能影响及其机理^[12]。本文作为该研究的一部分,报道 3 个森林类型土壤有效氮在模拟氮沉降处理下的早期响应特征。

1 研究地概况

鼎湖山保护区始建于 1956 年,位于广东肇庆东北郊,东经 112°33',北纬 23°10',总面积约为 1155hm²。保护区气候具有明显的季风性,年平均降雨量为 1927mm,其中 75% 分布在 3 月到 8 月份,而 12 月到翌年 2 月份仅占 6%。年均相对湿度为 80%。年均温度为 21.4℃,最冷月(1 月份)和最热月(7 月份)的平均温度分别为 12.6℃ 和 28.0℃^[13]。保护区降水中的氮沉降量在 1994 年和 1999 年测得为 35.57 和 38.4 kg N/(hm²·a)^[9,10],目前还没有干沉降量的数据。

所选择 3 个样地具有相同的土壤类型(赤红壤)、类似的海拔高度(100~350m)和坡度(20~30°)。马尾松林和混交林均由政府林场 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,在过去允许当地农民砍些小树和收割林下层植物作为薪柴,而混交林也虽在保护区的缓冲带(地质疗养院背后),但因得到良好保护,荷木(*Schinus molle*)和锥栗(*Castanopsis fissa*)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,400 多年来群落一直得到较好的保护。森林植物种类丰富,结构复杂,乔木层主要为锥栗、厚壳桂(*Cryptocarya concinna*)、红车(*Syzygium rehderianum*)和华润楠(*Machilus chinensis*)等树种^[14]。3 个研究样地乔木层群落结构一些参数见表 1。

2 研究方法

2.1 样地设计和处理

参照欧洲 NITREX 项目^[7,8]和北美 Harvard Forest^[5,6]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 和 12 个样方(10m×20m),进行外加氮处理试验。其中阔叶林设置 4 个处理,分别为对照(Control)、低氮(Low N)、中氮(Medium N)和高氮(High N),分别在林地喷加 0、50、100 和 150 kg N/(hm²·a),但马尾松林和混交林仅各 3 个处理,即对照、低氮和中氮。3 个样地每个处理均为 3 个重复。阔叶林设置高氮处理中考虑了阔叶林植物可能对 N 需求量较大,各样方间留有约 10m 的间隔,以防止相互干扰。

把低氮、中氮和高氮处理样方统称为外加氮处理样方。自 2003 年 7 月开始,每月月初对 3 个样地开始进行氮处理。方法是根据氮处理水平,将每个样方每次所需要喷施的 NH_4NO_3 溶解在 20L 水中(全年所增加的水量相当于新增降水 1.2mm)后,以背式喷雾器在林地人工来回均匀喷洒。对对照样方则喷洒同样量的水,以减少因外加的水而造成对森林生物地球化学循环的影响。

表 1 鼎湖山保护区 3 个森林样地乔木层结构一些参数

Table 1 Indices of the tree structure of three forests in Dinghushan Biosphere Reserve(DHSBR)

样地 Plot	平均胸径 Mean DHB (cm)	平均树高 Mean height (m)	胸高断面面积 Area at the height of breast (m ² /hm ²)	乔木密度 Stem density (tree/hm ²)
针叶林 Pine forest	12.16	5.81	13.96	767
混交林 Mixed forest	7.32	5.46	13.78	1933
阔叶林 Broadleaf forest	10.18	7.02	26.01	1729

* 针叶林和混交林样地调查面积为 1800m²,阔叶林调查面积为 2400m²。Survey areas were 1800m² for the pine stand and mixed stand, and 2400m² for the broadleaf stand, respectively

2.2 实验方法

2003 年 6、8、9、11、12 月和 2004 年的 1、2 月的月底在 3 个研究样地进行取样。为取样和调查方便, 把每个样方又分为 8 个 $5\text{m} \times 5\text{m}$ 的小样方, 并编上号。取样时, 在每个样方的 1、3、5 和 7 号小样方分别取 3 钻土, 然后按小样方分 0~10cm 和 10~20cm 两个土层合并为一个土样。每次每个样方上下土层 8 个土样, 3 个森林 30 个样方合计 240 个。取好的土样立即带回实验室, 手捡粗根、石块和其它杂物后过 2mm 筛, 再取约 10g 土壤用 50ml 1M KCl 溶液浸提, 分别用靛酚兰比色法和镀铜镉还原-重氮化偶比色法测定铵态氮和硝态氮含量^[15]。

2.3 数据统计

采用统计软件 SPSS for windows 12.0 中单因素方差分析 (One way ANOVA) 和 Duncan 多重比较 (Duncan's multiple range test) 检验不同森林类型、土层和外加氮处理间的差异。

3 结果与分析

3.1 对照样方土壤有效氮

马尾松林、混交林和阔叶林 0~10cm 和 10~20cm 两个土层有效氮 (铵态氮+硝态氮) 含量在研究期间总平均分别为 6.24、6.22 和 14.77 mg/kg, 其中铵态氮占 45.3%、48.7% 和 14.5%。铵态氮和硝态氮含量还因森林类型、取样时间和土层不同而异 (图 1)。其中马尾松林与混交林土壤铵态氮和硝态氮都较接近, 但铵态氮略高于阔叶林, 而硝态氮则显著低于阔叶林 (除 2003 年 8 月份外, 阔叶林是马尾松林和混交林的 1.96~11.98 倍, 图 1)。不同时间比较, 铵态氮 8 月和 1 月份高于其它月份 (图 1), 而硝态氮月份间差异还因林型不同而异 (阔叶林月份间波动比马尾松林和混交林大, 图 2)。0~10cm 和 10~20cm 两个土层比较, 铵态氮和硝态氮基本上是 0~10cm 土层略高于 10~20cm 土层, 但不显著 (图 1)。如 2004 年 2 月, 3 个森林 0~10cm 土层铵态氮分别是 10~20cm 土层的 1.21、1.07 和 1.46 倍, 硝态氮为 1.22、1.12 和 1.05 倍。此外, 研究期间 3 个森林土壤有效氮中铵态氮所占比例也因森林类型不同而异, 其中马尾松林和混交林高于阔叶林 (3 个森林分别为 21.7%~68.4%、26.9%~65.5% 和 0.4%~37.8%, 图 2)。

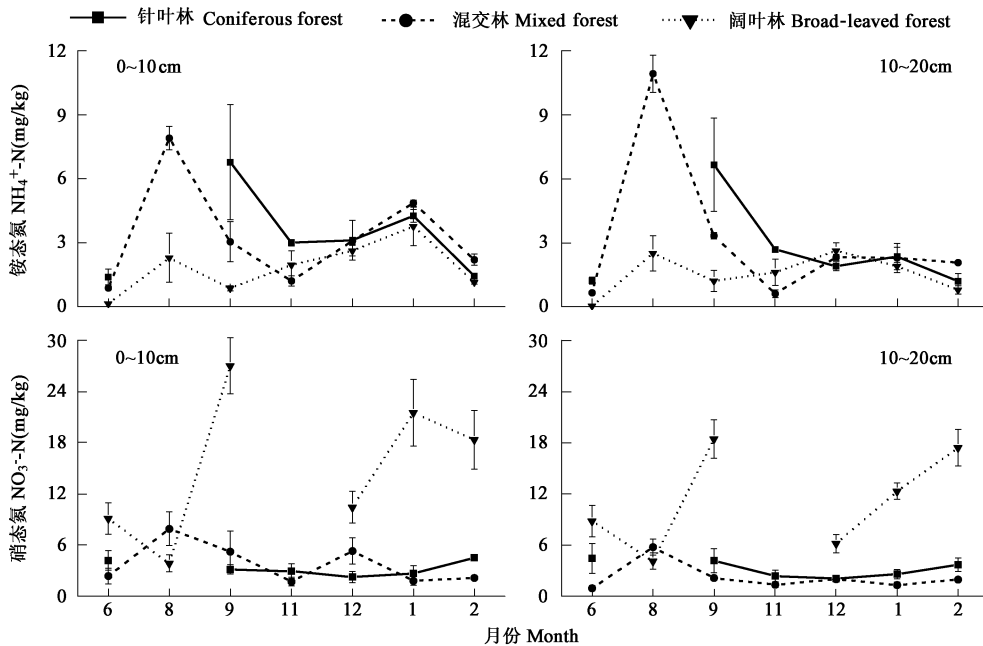


图 1 鼎湖山森林土壤 0~10cm 土层和 10~20cm 土层铵态氮和硝态氮含量月变化

Fig. 1 Monthly changes in extractable $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ for two soil depths (0~10cm and 10~20cm) of the control plots in three forests. Error bar means one SE, $n=3$

3.2 土壤有效氮对氮沉降的响应

虽然不是所有月份 3 个森林加氮处理样方有效氮含量都显著高于对照样方, 但是从平均值可以看出外加氮确实使其含量都在增加, 而其增加的程度又取决于土层、氮处理水平和氮处理时间 (图 3~5)。

在马尾松林, 中氮处理样方两个土层铵态氮含量在氮处理后均随即表现出比对照高的格局, 而低氮处理出现此格局较晚 (2004 年 1 月); 对于硝态氮, 低氮和中氮处理也相继出现高于对照的格局, 同时 0~10cm 土层对外加氮的响应比 10~20cm 土

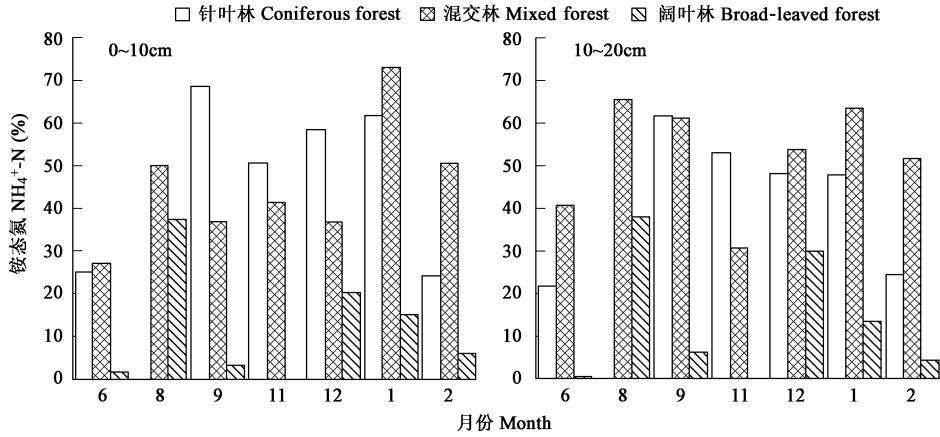


图2 鼎湖山森林土壤 0~10cm 土层和 10~20cm 土层铵态氮占总有效氮的比例月变化

Fig. 2 Monthly changes in the percentage of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ to total available nitrogen for two soil depths (0~10cm and 10~20cm) of control plots in three forests. Error bar means one SE, $n = 3$

层更加敏感。如氮处理前(6月份),中氮处理 0~10cm 土层和 10~20cm 土层的含量均低于对照,但 0~10cm 土层在处理后的 9 月份和 11 月份转变为高于对照,而 10~20cm 土层虽然在接近对照但没有显著高出对照(图 3)。在混交林,低氮和中氮处理均使两个土层铵态氮和硝态氮含量增加,但还不显著。与马尾松林类似,低氮处理增加的幅度小于中氮处理,但不同的是对氮处理的响应在两个土层间差异还不明显(图 4)。阔叶林在最初的几个月份各处理样方间有效氮含量存在一些差异(可能因为土壤异质性),如一些外加氮处理样方含量低于对照样方,但随着氮处理进行各处理样方间的差异越来越少,到了 2004 年 2 月同样表现出氮处理水平越高其含量也越高的格局(图 5)。与马尾松林类似,土壤有效氮含量 0~10cm 土层对外加氮的响应比 10~20cm 土层更加敏感。如 2004 年 2 月份 0~10cm 土层氮处理显著高于对照,而 10~20cm 土层还没有(图 5)。

一些外加氮处理样方土壤的有效氮含量在外加氮处理前(2003 年 6 月份)低于对照样方,但在外加氮处理后逐渐增加而转变为接近或高于对照样方,这在混交林表现得尤为突出(图 4),如混交林中氮处理 0~10cm 土层铵态氮在一开始是对照样方的 78%,而从 8 月份(外加氮处理后)开始反而比对照样方高出 5%~164%(图 4)。而一些在一开始就高于对照样方含量的氮处理样方,随着时间与对照样方的差距越来越大。如马尾松林 0~10cm 土层低氮处理样方土壤硝态氮在一开始比对照样方高 40%,而从 2003 年 9 份(外加氮处理后)开始比对照高 43%~198%(图 3)。可见,外加氮处理对土壤有效氮的影响存在累积性效应,外加氮处理时间越长,处理样方有效氮含量与对照样方差距也越来越大。

总体而言,鼎湖山 3 个森林土壤有效氮含量对外加氮处理的响应呈现如下特点:氮处理水平越高土壤有效氮含量增加得越多;0~10cm 土层略比 10~20cm 土层敏感;外加氮处理时间越长,外加氮处理样方有效氮含量与对照样方的差距越大;阔叶林的响应稍落后于马尾松林和混交林。

4 讨论

4.1 鼎湖山南亚热带森林土壤有效氮组成特点

土壤铵态氮和硝态氮是有效氮主要存在形式,也是植物从土壤中吸收氮素的主要形态。研究森林土壤有效氮动态及其影响因素对于了解森林生产力、营养循环和氮素的循环与转化具有重要的意义^[16-18]。但土壤有效氮组成往往受光照、水分和温度等

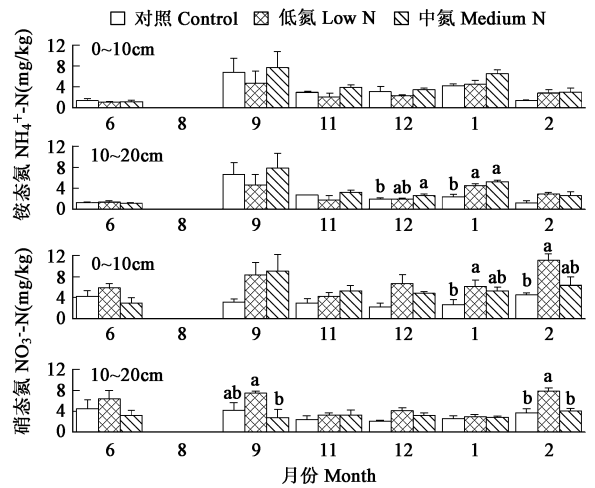


图3 马尾松林土壤有效氮含量对模拟氮沉降的响应

Fig. 3 Extractable $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in soils of the pine stand, in response to simulated nitrogen deposition. Error bar means one SE, $n = 3$. Significant treatment effects were presented by using small letters, where they exist at $p < 0.05$

环境因子和土壤 pH 值、凋落物数量和质量、土壤动物、微生物种群和活性等基质条件的影响^[19]。因此,不同地域不同时间,森林土壤有效氮含量可能存在很大差异。一些对热带亚热带森林土壤有效氮含量的研究发现,铵态氮是有效氮的主要组成形式,甚至占绝对优势。如李贵才等^[20]测得云南哀牢山中山湿性常绿阔叶林地区的原生木果柯林、栎类次生林和人工茶叶地土壤在干季期间铵态氮占无机氮总量的 95% 以上。孟盈等^[18]发现云南西双版纳森林土壤的铵态氮含量也较高,龙山林、季节雨林和橡胶林年均铵态氮分别约占 67%、78% 和 82%。然而,本研究结果显示,马尾松林、混交林铵态氮总平均还不到一半,而且在阔叶林始终处于明显的弱势(图 3),显然低于云南两个地区。

为什么鼎湖山 3 个森林土壤硝态氮的比例较高呢? 作者认为可能与实验分析前的土样处理有关。因为土壤分析样本的干燥、贮存和制备会对其矿化性质产生影响,其中风干、烘干过程中往往会使土壤铵态氮含量显著增加,而对硝态氮的含量影响不大或使其含量减少^[21, 22]。如西双版纳 3 个热带森林土壤风干和烘干处理均使铵态氮含量增加,风干土和烘干土比新鲜土分别高 11%~32% 和 11%~99%,而烘干处理使硝态氮含量略有下降^[21]。因此,作者也建议为了能反映森林土壤自然状况下的含量最好采用新鲜土样。另外,通过对鼎湖山保护区内 3 个相同类型的森林类型土壤有效氮含量测定,也发现风干土壤铵态氮比例较高(铵态氮分别占 61.9%、51.6% 和 46.8%)。也就是说,干燥处理会增加铵态氮的比例。对云南哀牢山和西双版纳森林研究中土壤都经过 60 天烘干处理^[20],而本研究均采用新鲜土样。

4.2 鼎湖山南亚热带森林土壤有效氮对氮沉降的响应

在林地喷加无机氮不但直接增加土壤有效氮水平,而且因增强土壤氮素矿化硝化,从而进一步增加土壤氮的有效性。因为土壤氮素转换过程是基质限制过程,氮输入增加了土壤和凋落物层的矿质氮含量,缓冲了硝化菌、反硝化菌与植物吸收的竞争^[4, 6, 8, 11]。本研究结果表明,外加氮处理使 3 个森林类型两个土层土壤有效氮含量都在增加,但是阔叶林增加的幅度似乎落后于马尾松林和混交林。如马尾松林和混交林两个土层在外加氮处理 4 个月后(2003 年 11 月)都一致表现中氮处理样方土壤铵态氮和硝态氮高于对照样方(图 3、4),而阔叶林进行到 7 个月(2004 年 2 月)才表现此格局(图 5)。再如,最后一次取样中,马尾松林和混交林低氮处理样方 0~10cm 土层铵态氮含量比对照高 98% 和 42%,而阔叶林仅高 10%。

阔叶林土壤无论全氮含量^[23]还是有效氮含量都约是马尾松林和混交林的两倍,而且阔叶林植物叶片氮含量和凋落物氮素输入也高于马尾松林和混交林。应该说,阔叶林氮相对富足,对外加氮处理的响应更强烈才是。但是,为什么阔叶林土壤有效氮对外加氮处理的响应出乎意料的比马尾松林和混交林落后呢? 究其原因:(1) 马尾松林和混交林生态系统可能受氮限制,而阔叶林不然。在本研究 3 个森林进行氮沉降对凋落物分解的研究初步结果显示,外加氮处理对马尾松林和混交林凋落物的分解有利,而对阔叶林凋落物分解的影响不大或不利^[12],意味着外加氮增强马尾松林和混交林凋落物中氮矿化、硝化作用,从而增加了土壤层有效氮的输入。(2) 阔叶林的平均树高和胸高断面面积都比马尾松林和混交林大得多(表 1),随之其生态系统的氮需求量也大。本研究每次所测的土样是在喷氮 1 个月取得,阔叶林所直接喷加氮和刺激矿化硝化作用而增加的氮经过 1 个月可能更多的被植物根系吸收或被微生物固持。(3) 在阔叶林有效氮更容易从土壤损失。本研究对土壤有效氮含量的测定结果阔叶林土壤硝态氮占绝对的优势(图 2),说明阔叶林土壤硝化作用比马尾松林和混交林强,而硝化作用转变成的硝态氮容易从土壤流

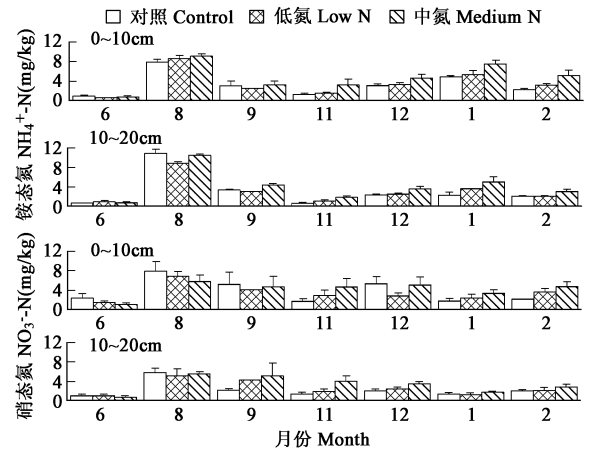


图 4 混交林土壤有效氮含量对模拟氮沉降的响应

Fig. 4 Extractable $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in soils of the mixed stand, in response to simulated nitrogen deposition. Error bar means one SE, $n = 3$. Significant treatment effects were presented by using small letters, where they exist at $p < 0.05$

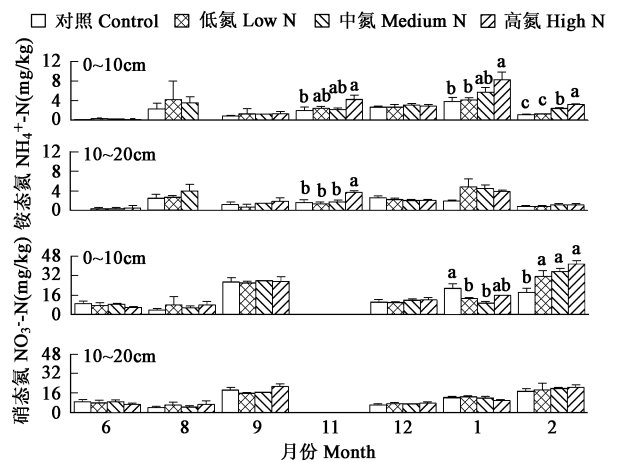


图 5 阔叶林土壤有效氮含量对模拟氮沉降的响应

Fig. 5 Extractable $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in soils of the broadleaf stand, in response to simulated nitrogen deposition. Error bar means one SE, $n = 3$. Significant treatment effects were presented by using small letters, where they exist at $p < 0.05$

失。Mo 等^[23]曾采用离子交换树脂袋研究鼎湖山 3 个森林土壤氮的有效性,也测得马尾松林和混交林离子交换树脂袋中硝态氮含量占总有效氮的比例也明显低于阔叶林,进一步证明了阔叶林土壤硝化作用较强。

欧洲和北美一些通过模拟氮沉降增加对森林生态系统影响研究表明,氮沉降对生态系统氮素循环的改变程度和方向往往取决于物种组成、森林年龄、土壤类型、土地利用历史、地形和外加氮的组成与施加的频率等多种因素^[4, 6, 8, 11],而且生态系统对外加氮处理响应的一些特征需要较长时间才能表现出来。因此,要分析不同森林生态系统对氮沉降响应的差异还需要更深入和更长时间的研究。然而,目前研究结果也充分显示了,外加氮使鼎湖山 3 个森林土壤有效氮可得性在增加,土壤有效氮含量增加既可能增加森林生产力,也有可能增加有效氮从系统流失的潜力,尤其是阔叶林,而这些还有待进一步研究证实。

References

- [1] Galloway J N, Aber J D, Erisman J W, *et al*. The N Nitrogen Cascade. *Bioscience*, 2003, **53**: 341~ 356
- [2] Kaiser J. The other global pollutant: nitrogen proves tough to curb. *Science*, 2001, **294**: 268~ 269.
- [3] Vitousek P M, Aber J D, Howarth R W, *et al*. Human alteration of the global nitrogen cycle: Sources and consequences. *Ecological Applications*, 1997, **7** (3): 737~ 750
- [4] Fenn M A, Poth M A, Aber J D, *et al*. Nitrogen excess in North American ecosystems: Predisposing factors, ecosystem responses, and management strategies. *Ecological Applications*, 1998, **8**: 706~ 733.
- [5] Aber J D, Magill A H, Boone R, *et al*. Plant and soil responses to chronic nitrogen additions at the Harvard forest, Massachusetts. *Ecological Applications*, 1993, **3**: 156~ 166
- [6] Aber J D, McDowell W, Nadelhoffer K J, *et al*. Nitrogen saturation in Northern forest ecosystems, hypotheses revisited. *Bioscience*, 1998, **48**: 921~ 934
- [7] Wright R F and Rasmussen L. Introduction to the NITREX and EXMAN projects. *Forest Ecology and Management*, 1998, **101**: 1~ 7.
- [8] Gundersen P, Emmett B A, Kjønaas O J, *et al*. Impact of nitrogen deposition on nitrogen cycling in forest: a synthesis of NITREX data. *Forest Ecology and Management*, 1998, **101**: 37~ 55.
- [9] Huang Z L, Ding M M, Zhang Z P, *et al*. The hydrological processes and nitrogen dynamics in a monsoon evergreen broad-leafed forest of Dinghu Shan. *Acta Phytocologica Sinica*, 1994, **18**(2): 194~ 199
- [10] Zhou G Y and Yan J H. The influence of region atmospheric precipitation characteristics and its element inputs on the existence and development of Dinghushan forest ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(12): 2002~ 2012
- [11] Fang Y T, Mo J M, Gundersen P, *et al*. Nitrogen transformations in forest soils and their responses to atmospheric nitrogen deposition: a review. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **24**(7): 1523~ 1531.
- [12] Mo J M, Xue J H, Fang Y T. The primary study on the effects of simulated N deposition on litter decomposition of the major forest plants in subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **24**(7): 1413~ 1420
- [13] Huang Z F and Fan Z G. The climate of Ding Hu Shan. *Tropical and Subtropical Forest Ecosystem*, 1982, **1**: 11~ 23
- [14] Fang Y T, Mo J M, Peng S L, *et al*. Role of Forest Succession on Carbon Sequestration of Forest Ecosystems in Lower Subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(9): 1685~ 1694
- [15] Liu G S, Jiang N H, Zhang L D, *et al*. *Soil physical and chemical analysis and description of soil profiles*. Beijing: Standards Press of China, 1996. 121~ 265
- [16] Mo J M, Peng S L, Fang Y T, *et al*. A preliminary study on the dynamics of bio-available nitrogen in soil of pine-broadleaf mixed forest in Dinghushan Biosphere Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(3): 492~ 497.
- [17] Mo J M, Yu M D, Kong G H. The dynamics of soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in a pine forest of Dinghushan, as assessed by ion exchange resin bag method. *Acta Phytocologica Sinica*, 1997, **21**(4): 335~ 341.
- [18] Meng Y, Xue J Y, Sha L Q, *et al*. Variations of soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and N mineralization under different forests in Xishuangbanna, Southwest China. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, **25**(1): 99~ 104
- [19] Su B, Han X G, Qu C M. Factors affecting soil N availability in forest ecosystems: a literature review. *Chinese Journal of Ecology*, 2002, **21**(2): 40~ 46
- [20] Li G C, Han X G, Huang J H. Dry-season dynamics of soil inorganic nitrogen pools in primary *Lithocarpus xylocarpus* forest and degraded vegetations in Ailao Mountain, Yunnan Province. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, **25**(2): 210~ 217.
- [21] Meng Y, Sha L Q. Variation of contents of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in three tropical forest soils during air-drying and heat-drying. *Agro-Environmental Protection*, 2001, **20**(5): 367, 369.
- [22] Song J G, Liu W, Zhao Z J, *et al*. Effects of desiccation of soil samples on easily mineralizing nitrogen. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001, **7**(2): 183~ 188

- [23] Mo J M, Brown S, Peng S L, *et al*. Nitrogen availability in disturbed, rehabilitated and mature forests of tropical China. *Forest Ecology and Management*, 2003, **175**: 573~ 583.

参考文献:

- [9] 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. *植物生态学报*, 1994, **18**(2): 194~ 199.
- [10] 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. *生态学报*, 2001, **21**(12): 2002~ 2012.
- [11] 方运霆, 莫江明, Per Gundersen, 等. 森林土壤氮素转换及其对氮沉降的响应. *生态学报*, 2004, **24**(7): 1523~ 1531.
- [12] 莫江明, 薛球花, 方运霆. 鼎湖山森林主要植物凋落物分解及其对N₂O₃沉降响应的初步研究. *生态学报*, 2004, **24**(7): 1413~ 1420.
- [13] 黄展帆, 范征广. 鼎湖山的气候. *热带亚热带森林生态系统研究*, 1982, **1**: 11~ 23.
- [14] 方运霆, 莫江明, 彭少麟, 等. 森林演替在南亚热带森林生态系统碳吸存中的作用. *生态学报*, 2003, **23**(9): 1685~ 1694.
- [15] 刘光崧, 蒋能惠, 张连第, 等主编. *土壤理化性质分析和土壤剖面描述*. 北京: 中国标准出版社, 1996. 121~ 265.
- [16] 莫江明, 彭少麟, 方运霆, 等. 鼎湖山马尾松针叶阔叶混交林土壤有效氮动态的初步研究. *生态学报*, 2001, **21**(3): 492~ 497.
- [17] 莫江明, 郁梦德, 孔国辉. 鼎湖山马尾松人工林土壤硝态氮和铵态氮动态研究. *植物生态学报*, 1997, **21**(4): 335~ 341.
- [18] 孟盈, 薛敬意, 沙丽清, 等. 西双版纳不同热带森林下土壤铵态氮和硝态氮动态研究. *植物生态学报*, 2001, **25**(1): 99~ 104.
- [19] 苏波, 韩兴国, 渠春梅, 等. 森林土壤氮素可利用性的影响因素研究综述. *生态学杂志*, 2002, **21**(2): 40~ 46.
- [20] 李贵才, 韩兴国, 黄建辉. 哀牢山木果柯林及其退化植被下土壤无机氮库的干季动态特征. *植物生态学报*, 2001, **25**(2): 210~ 217.
- [21] 孟盈, 沙丽清. 风干、烘干对不同热带森林土壤样品NH₄⁺-N和NO₃⁻-N测定结果的影响. *农业环境保护*, 2001, **20**(5): 366~ 367, 369.
- [22] 宋建国, 刘伟, 赵紫娟, 等. 土壤干燥过程对土壤易矿化有机态氮的影响. *植物营养与肥料学报*, 2001, **7**(2): 183~ 188.