

离子交换树脂袋法研究森林土壤硝态氮 及其对氮沉降增加的响应

方运霆^{1, 2}, 莫江明^{1*}, 周国逸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: 用离子交换树脂袋法, 研究了鼎湖山三种森林 (马尾松林、马尾松针叶阔叶混交林和季风常绿阔叶林) 土壤硝态氮对外加氮的响应特征。结果表明, 土壤硝态氮显著地受森林类型、季节和氮处理的影响。整体而言, 阔叶林土壤硝态氮极显著高于马尾松林和混交林, 而马尾松林和混交林之间的差异则不显著。三种森林土壤硝态氮的季节变化均表现为春季和夏季极显著高于冬季和秋季, 而冬季又显著高于秋季。外加氮处理提高土壤硝态氮水平, 其中在马尾松林和阔叶林氮处理效应显著。所得结果与直接采集土壤或土壤水测定的硝态氮含量的结果一致, 表明离子交换树脂袋法是评价土壤硝态氮水平行之有效的手段之一。

关键词: 氮沉降; 森林土壤; 硝态氮; 离子交换树脂袋法; 鼎湖山

中图分类号: S714

文献标识码: A

文章编号: 1672-2175 (2005) 04-0483-05

铵态氮和硝态氮是土壤有效氮主要存在形式, 也是植物吸收氮素的主要形态, 但土壤有效氮组成变化往往受光照、水分和温度等环境因子与土壤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^[1~3], 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和氮素的循环与转化具有重要的意义^[1~3]。评价土壤氮素动态有直接收集土壤或土壤水测定其含量、埋土袋 (管) 和埋离子交换树脂袋法 (Ion-exchange resin bags method) 等多种方法。其中离子交换树脂袋法, 与其它方法相比, 具有简单容易掌握的优点, 且避免了土壤风干、磨粉等制备过程, 因而在国外上世纪80年代初就受到重视^[4, 5]。近期, 国外有关使用离子交换树脂袋法研究氮沉降对森林土壤硝态氮动态报道也屡见不鲜^[6~8]。但是, 在我国使用离子交换树脂袋法研究森林土壤氮素动态仅近年来受一些学者的关注。前期, 我们采用离子交换树脂袋法研究了鼎湖山三种森林土壤有效氮特性^[1, 2, 9], 并以此探讨了土壤有效氮与森林演替和人为干扰 (林下层收割) 间的关系^[10], 对该方法在我国的使用和推广做了很多有益的探索。

由于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^[11]。氮沉降的增加会直接或通过增加硝化作用而间接增加森林土壤铵态氮和硝态氮水平^[6~8, 11~13]。与铵态氮相比, 硝态氮由于容易从土壤流失, 从而导致土壤和土壤水酸化。而且, 硝态氮在离开森林生态

系统后进入水生生态系统还会导致系统富营养化, 因而更多地受到生态学家的关注^[6~8, 11~13]。本文的目的是首先报道采用离子交换树脂袋法研究鼎湖山马尾松林、混交林和季风常绿阔叶林土壤硝态氮对外加氮处理的响应特征, 然后与直接采集土壤和土壤水的方法所得结果^[14, 15]比较, 从而对该方法做些评价。

1 研究地概况

鼎湖山国家级自然保护区始建于1956年, 位处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℃^[16]。

为研究氮沉降对亚热带森林生态系统结构和功能的影响及其机制, 在鼎湖山自然保护区新建了马尾松针叶林、马尾松针阔混交林和季风常绿阔叶林样地。3个森林研究样地具有相同的土壤类型 (赤红壤) 类似的海拔高度 (150~350 m) 和坡度 (20°~30°)。其中, 针叶林样地位于保护区东南角缓冲带, 森林由政府林场于1930 - 1950年间营造, 在过去允许当地农民砍小树和收割林下层作为薪柴。林下层植物稠密, 以桃金娘 (*Rhodomyrtus tomentosa*) 等为优势。混交林在保护区的缓冲带地质疗养院背后, 森林起源于上世纪30年代营造的马尾松林, 因得到良好保护, 荷木和锥栗 (*Castanopsis*

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

作者简介: 方运霆 (1976 -), 男, 助理研究员, 博士研究生, 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, E-mail: mojm@scbg.ac.cn

收稿日期: 2005-01-28

fissa)等阔叶树种逐渐入侵而成^[14]。群落结构较为简单,乔木层为马尾松和荷木,更新层及灌木层为荷木、变叶榕(*Ficus variolosa*)、三叉苦(*Evodia lepta*)、豺皮樟(*Litsea rotundiflora*)和桃金娘等植物种。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,群落保存较完好。森林植物种类丰富,主要为锥栗、黄果厚壳桂(*Cryptocarya concinna*),结构复杂。3个研究样地,马尾松林和混交林土壤铵态氮含量、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均无显著差异^[14]。

表1 鼎湖山3个森林0~10 cm土层有效氮含量、pH值和容重(平均值±标准差)^[14]

Table 1 Available nitrogen concentration, pH value and bulk density in pine, mixed and mature forest soils in Dinghushan(means±SE)^[14]

森林类型	铵态氮 (mg·kg ⁻¹)	硝态氮 (mg·kg ⁻¹)	总有效氮 (mg·kg ⁻¹)	pH值	体积质量 (g·cm ⁻³)
马尾松林	3.65±0.37	3.26±0.26	6.50±0.40	4.08±0.04	1.16±0.03
混交林	3.53±0.35	4.17±0.42	7.70±0.68	3.95±0.01	1.22±0.03
阔叶林	1.79±0.24	11.57±1.48	13.82±1.47	3.81±0.03	0.98±0.04

2 研究方法

2.1 样地设计和处理

2002年10月25日,开始建立试验样地,其中阔叶林样地12个10 m×20 m的处理样方,混交林和马尾松林各9个。样方之间留有足够宽的地带,以防止相互之间造成干扰。为调查和取样方便,各样方又分为8个5 m×5 m的小样方。阔叶林设置对照(Control)、低氮处理(Low N, 5 g·m⁻²·a⁻¹)、中氮处理(Medium N, 10 g·m⁻²·a⁻¹)和高氮处理(High N, 15 g·m⁻²·a⁻¹)四个处理,但混交林和马尾松林各设置对照、低氮和中氮三个处理。每个处理3个重复。2003年7月开始,每个月初进行氮处理。方法是根据氮处理水平,将每个样方所施的NH₄NO₃溶解在20升自来水中(全年所增加的水量相当于新增降水0.12 mm)后,以背式喷雾器人工来回在林地均匀喷洒。对于对照处理样方则喷洒同样多的水,

以减少不同处理间外加的水对森林生物地球化学循环的影响^[14]。

2.2 实验方法

采用埋离子交换树脂埋袋法测定了3个森林土壤硝态氮在2003年6月至2004年6月期间不同季节对外加氮处理的响应。实验开始前,准备240个离子交换树脂袋(3个森林30个样方,每个样方8个)。这些袋由尼龙袜做成,每袋放6 g干强阳离子树脂,然后用线手工缝好^[1,2,9,10]。在2003年6月28-29日,把这些树脂袋分别埋在每个样方的1、3、5和7号小样方的(每个小样方2个),土壤深度约10 cm。2003年9月28-29日(3个月后)再把这些树脂袋取出,放在冰盒内带回实验室,在把附在袋里的根和土壤小心地用手取走后,用50 ml 2 mol/L的KCl溶液浸提,分别用靛酚兰比色法和镀铜锡还原-重氮化偶比色法^[14]测定浸提液中硝态氮含量。2003年9月-12月、2003年12月-2004年3月和2004年3月-6月分别重复以上工作。以上4个培养阶段分别表示夏季、秋季、冬季和春节。

2.3 数据处理

我们把单位时间内离子交换树脂袋里吸收硝态氮的量作为土壤硝态氮水平,用每天每克干树脂吸收的氮表示(μg·d⁻¹·g⁻¹ dry resin)。每次把每个样方8个重复的平均作为该样方硝态氮的水平,然后采用3因素方差分析(Three-way ANOVA)和Duncan多重比较(Duncan's multiple-range test)检验土壤硝态氮在不同森林类型、季节和外加氮处理水平间的差异,采用2因素方差分析(Two-way ANOVA)和Duncan多重比较分别检验马尾松林、混交林和阔叶林在不同季节和外加氮处理水平间的差异。另外,单因素方差分析(One way ANOVA)和Duncan多重比较被用来检验同一森林类型同一季节土壤硝态氮水平在不同外加氮处理间的差异。

3 结果与分析

土壤硝态氮水平极显著地受森林类型、季节和氮处理水平的影响($P \leq 0.001$,表2和图1)。整体而言,阔叶林土壤硝态氮(8.35 μg·d⁻¹·g⁻¹ dry resin)

表2 鼎湖山马尾松林、混交林和阔叶林土壤硝态氮影响因素方差分析结果

Table 2 Results of three-way ANOVA on soil nitrate-N in Dinghushan forests

	森林		季节		处理		森林×季节		森林×处理		季节×处理	
	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P
所有森林	7.78	0.001	36.60	<0.001	8.79	<0.001	2.27	0.045	0.405	0.805	1.31	0.244
马尾松林			15.14	<0.001	6.79	0.005					1.46	0.234
混交林			10.03	<0.001	0.60	0.557					0.10	0.995
阔叶林			19.39	<0.001	5.03	0.006					0.97	0.480

极显著($P < 0.001$)高于马尾松林(4.91 μg·d⁻¹·g⁻¹ dry resin)和混交林(3.28 μg·d⁻¹·g⁻¹ dry resin),而马尾松林和混交林间差异不显著($P = 0.098$)。就所有森林来讲,季节差异极显著($P < 0.001$,表2),春季(10.06 μg·d⁻¹·g⁻¹ dry resin)和夏季(9.10 μg·d⁻¹·g⁻¹

dry resin)极显著($P < 0.001$)高于冬季(3.37 μg·d⁻¹·g⁻¹ dry resin)和秋季(0.68 μg·d⁻¹·g⁻¹ dry resin),而冬季又显著($P = 0.014$)高于秋季。就单个森林来讲,季节差异也极显著($P < 0.001$,表2)。但是,方差分析结果显示森林和季节间的相互作用

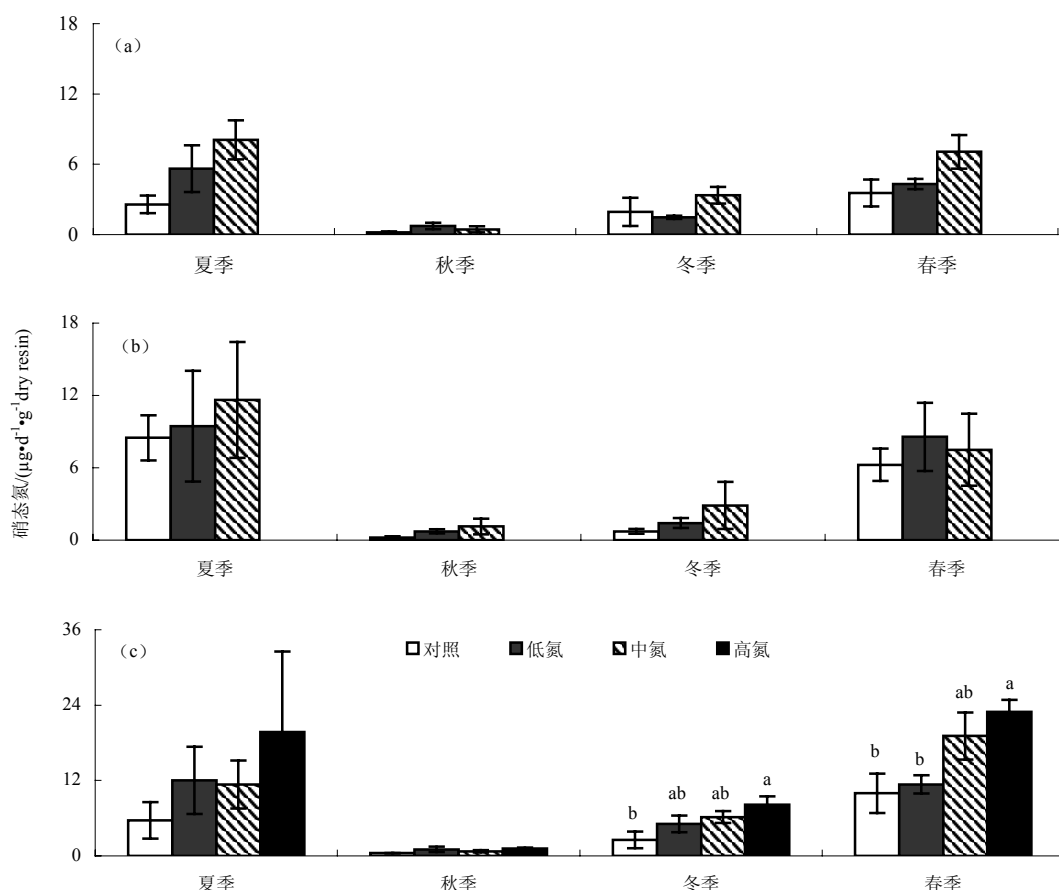


图1 鼎湖山马尾松林 (a) 混交林 (b) 和阔叶林 (c) 土壤离子交换树脂测得硝态氮水平 (平均值 $\pm$ 标准误, $n=3$) 在不同季节对氮处理的响应特征 (不同字母表示氮处理间差异显著)

Fig. 1 Soil nitrate-N in pine (a), mixed (b) and broadleaf (c) forests in Dinghushan, in response to simulated nitrogen deposition, assessed by ion exchange resin bags (Error bar mean one standard error, $n=3$. Different letters indicated significant differences between N treatment)

也显著 ($P=0.045$, 表2), 说明土壤硝态氮季节格局因森林类型不同而异。如, 马尾松林季节格局表现为夏季 ($5.42 \mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ dry resin) > 春季 ($4.98 \mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ dry resin) > 冬季 ($2.26 \mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ dry resin) > 秋季 ($0.47 \mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ dry resin), 混交林也表现相同的格局, 夏季 ($9.86 \mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ dry resin) > 春季 ($7.44 \mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ dry resin) > 冬季 ($1.67 \mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ dry resin) > 秋季 ($0.70 \mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ dry resin), 但阔叶林却表现为春季 ($15.83 \mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ dry resin) > 夏季 ($11.50 \mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ dry resin) > 冬季 ($5.49 \mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ dry resin) > 秋季 ($0.84 \mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ dry resin)。尽管如此, 3个森林土壤硝态氮水平均表现春夏季节极显著 ($P<0.01$) 高于秋冬季节, 冬季又显著 ($P<0.05$) 高于秋季。

外加氮处理极显著提高土壤硝态氮水平 ($P<0.001$, 表2)。整个研究期间, 低氮、中氮和高氮处理分别使硝态氮水平提高了45.4%、86.9%和249.0%。但是, 如果就单个森林类型而言, 不同氮处理间在混交林差异并不显著 ($P=0.557$), 说明土壤硝态氮对外加氮处理的响应程度因森林类型不同略有不同。如, 低氮使马尾松林和阔叶林土壤硝

态氮水平分别增加47.1%和58.8%, 中氮处理使两个森林增加129.9%和101.1%, 而低氮和中氮处理使混交林增加仅28.7%和58.8%。森林类型和氮处理间相互作用不显著 ($P=0.805$, 表2), 说明3个森林土壤硝态氮对外加氮处理的响应格局十分相似。类似地, 由于3个森林外加氮处理样方土壤硝态氮水平与对照样方表现相似的季节动态格局 (图1), 季节和氮处理间相互作用也不显著 ($P=0.244$, 表2)。由于不同森林类型、季节和氮处理水平间差异极显著 ($P\leq 0.001$, 表2), 以致森林类型、季节和氮处理3间的相互作用不显著 ($F=0.378$, $P=0.968$)。此外, 图1显示在阔叶林, 土壤硝态氮水平在不同处理样方间的差异由不显著变为显著, 说明氮处理对土壤的影响可能存在累积作用。

4 讨论

在1992年9月 - 1993年9月期间, 我们曾经研究鼎湖山马尾松林、混交林和阔叶林土壤有效氮动态^[1, 2, 6]。本研究与前期的研究相比, 本研究三种森林对照样方硝态氮水平年平均分别为2.06、3.92和4.64 $\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ dry resin, 与1992 - 1993年的研究结果十分相近 (3个森林0~10cm土层年平均分别约为1.7、2.3

和 $5.0 \mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ dry resin)^[1,2,9]。但是,本研究三种森林土壤硝态氮水平的季节差异更为显著($P < 0.001$,表2)和更为一致的季节格局(图1)。如本研究马尾松林对照样方季节最高值(春季, $3.55 \mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ dry resin)是季节最低值(秋季, $0.20 \mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ dry resin)的17.7倍,而1992~1993年季节最高值(春季, $2.538 \mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ dry resin)是季节最低值(夏季, $0.763 \mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ dry resin)的3.3倍。本研究三种森林土壤硝态氮水平季节差异均为春夏季节显著高于秋冬季节而冬季又高于秋季的格局,但1992-1993年三种森林的季节格局因森林类型不同而异(马尾松林为春>秋>冬>夏^[1],混交林为春>秋>夏>冬^[2],阔叶林为春>冬>夏>秋^[9])。

本研究所得森林土壤硝态氮季节动态格局与同一时期大气降水的季节分配格局(图2)极为相似,说明大气降水是导致土壤硝态氮水平季节差异的重要因素。这是因为离子交换树脂对土壤硝态氮的吸收必须在水分运动过程实现,季节降水越多而越有利于离子交换树脂袋中的阳离子与土壤硝酸根离子的交换。

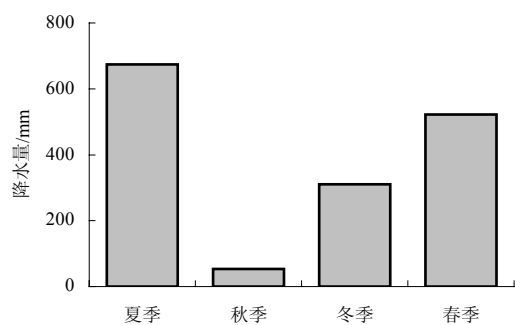


图2 鼎湖山保护区2003年7月1日—2004年6月30日
大气降水季节分配格局

Fig. 2 Distribution pattern of precipitation in Dinghushan Biosphere Reserve during the period from June 1, 2003 to June 30, 2004

本研究结果也显示,土壤硝态氮水平显著地受森林类型的影响。整体而言,阔叶林土壤硝态氮极显著高于马尾松林和混交林,而马尾松林和混交林间差异不显著。自然状态下(对照样方),土壤硝态氮水平年平均在三种森林的排序为阔叶林($4.65 \mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ dry resin)>混交林($3.92 \mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ dry resin)>马尾松林($2.07 \mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ dry resin)。通过采样对0~10 cm土层硝态氮含量直接测定的结果显示,其平均含量在三种森林的高低排序为阔叶林($11.57 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>混交林($4.17 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>马尾松林($3.26 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) (表1)。另外,2003年8月-2004年4月期间,通过采集20cm深处土壤水对硝态氮含量测定结果也显示,其平均含量在三种森林的高低排序也为阔叶林($11.30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)>混交林($5.95 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)>马尾松林($5.34 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)^[15]。这说明埋离子交换树脂袋法测得土壤硝态氮水平与直接采集

土壤或土壤水所得结果一致。

在林地喷加无机氮不但直接增加土壤有效氮水平,而且因外加氮会增强土壤的氮矿化硝化作用,从而进一步增加土壤有效氮。本研究结果显示氮处理明显增加土壤硝态氮水平,在低氮和中氮处理使马尾松林土壤硝态氮水平分别增加47.1%和129.9%,使混交林增加28.7%和58.8%,低氮、中氮和高处理使阔叶林分别增加58.8%、101.1%和166.1%。这与通过直接采集土壤或土壤水测定的结果一致^[14,15]。如2003年8月-2004年4月期间,低氮和中氮处理使马尾松林深20 cm处土壤水硝态氮平均含量增加88.5%和124.4%,使混交林增加56.4%和132.2%,低氮、中氮和高度处理使阔叶林分别增加75.4%、60.6%和85.5%^[15]。但是,可以发现,用离子交换树脂袋法测定外加氮处理对土壤硝态氮水平的影响程度与直接采集土壤或土壤水法的结果略有不同。引起差异的原因是多方面的。首先,方法上不同。如埋离子交换树脂袋法反映一段时期内土壤氮素的供给水平,而土壤水测定的结果反映流失水平;其次,时间段上不同。本研究报道的是2003年6月-2004年6月期间结果,而直接采集土壤或土壤水方法报道2003年6月-2004年2月或4月的结果,但是土壤氮素动态存在显著的季节差异(图1)。

可见,本研究结果显示采用离子交换树脂袋法是评价森林土壤硝态氮水平的一种行之有效的方法。但是,离子交换树脂袋法还存在一些不足的地方:1)不同的研究者所使用的离子交换树脂不同,使不同的研究者的结果比较起来困难。如果广泛推广该方法,还需要对这些实行同样的指标;2)量化土壤氮素动态时,通常用单位时间每g干树脂吸收的量^[1,2,9,10]、或每袋吸收的量^[8,17]、或每毫升树脂吸收的量^[4]来表示,这与生态系统养分循环过程中通量单位(单位时间单位面积的交换量)联系起来较困难。不过,为了克服该不足,一些学者尝试把离子交换树脂袋法与埋管法结合起来,或把离子交换树脂袋做成预定大小(袋内放置足够多的量),然后用单位面积吸收的量来表示土壤氮素通量^[6,7]。另外,与其它方法相比,离子交换树脂袋法不但具有简单容易掌握的优点,而且它还避免了土壤风干、磨粉等制备过程,因此省时省力,这些优点是很多其它方法无法比拟,因而具有广阔的使用前景。

参考文献:

- [1] 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[J]. 植物生态学报, 1997, 21(4): 335 - 341.
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[J]. Acta Phytocologica Sinica, 1997, 21(4): 335 - 341.

- [2] 莫江明, 彭少麟, 方运霆, 等. 鼎湖山马尾松针阔叶混交林土壤有效氮动态的初步研究[J]. 生态学报, 2001, 21(3): 492 - 497.
MO J M, PENG S L, FANG Y T, *et al.* A preliminary study on the dynamics of bio-available nitrogen in soils of pine-broadleaf mixed forest in Dinghuashan Biosphere Reserve[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(3): 492 - 497.
- [3] 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[J]. 生态学杂志, 2002, 21(2): 40 - 46.
SU B, HAN X G, QU C M, *et al.* Factors affecting soil availability in forest ecosystems: a literature review[J]. Chinese Journal of Ecology, 2002, 21(2): 40 - 46.
- [4] BINKLEY D, MATSON P. Ion exchange resin bag method for assessing forest soil nitrogen availability[J]. Soil Sci Soc Am J, 1983, 47: 1050 - 1052.
- [5] GIBSON D J. Spatial and temporal heterogeneity in soil nutrient supply measured using in situ ion-exchange resin bags[J]. Plant and Soil, 1986, 96: 445 - 450.
- [6] VESTEGARD L S, SELLE L T, STUANES A O. *In situ* soil nitrogen mineralization in a Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stand: effects of increased nitrogen input[J]. Forest Ecology and Management, 2003, 176: 205 - 216.
- [7] KJONAAS O J, STUANES A O, MAGNE H. effects of weekly nitrogen additions on N cycling in a coniferous forest catchment, Gardsjon, Sweden[J]. Forest Ecology and Management, 1998, 101: 227 - 249.
- [8] RUETH, H. M., J. S. BRAON AND E. J. ALLSTOTT. Responses of Engelmann spruce forests to nitrogen fertilization in the Colorado Rocky Mountains[J]. Ecological Applications, 2003, 13(3): 664 - 673.
- [9] 郁梦德, 莫江明, 孔国辉. 离子交换树脂袋法测定鼎湖山季风常绿阔叶林土壤有效氮的初步研究[J]. 热带亚热带植物学报, 1995, 3(4): 44 - 48.
YU M D, MO J M, KONG G H. Assessing soil nitrogen availability in Dinghushan monsoon evergreen broadleaf forest by ion exchange resin bag method[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 1995, 3(4): 44 - 48.
- [10] MO J M, BROWN S, PENG S L, KONG G H. Nitrogen availability in disturbed, rehabilitated and mature forests of tropical China[J]. Forest Ecology and Management, 2003, 175: 573 - 583.
- [11] GALLOWAY J N, ABER J D, ERISMAN J W, *et al.* The Nitrogen Cascade[J]. Bioscience, 2003, 53: 341 - 356.
- [12] 肖辉林. 大气氮沉降对森林土壤酸化的影响[J]. 林业科学, 2001, 37(4): 111 - 115.
XIAO H L. Effects of atmospheric nitrogen deposition on forest soil acidification[J]. Scientia Silvae Sinica, 2001, 37(4): 111 - 115.
- [13] 肖辉林. 大气氮沉降与森林生态系统的氮动态[J]. 生态学报, 1996, 16(1): 90 - 99.
XIAO H L. Atmospheric nitrogen deposition and nitrogen dynamics of forest ecosystem[J]. Acta Ecologica Sinica, 1996, 16(1): 90 - 99.
- [14] 方运霆, 莫江明, 周国逸, 等. 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[J]. 生态学报, 2004, 24(11): 2353 - 2359.
FANG Y T, MO J M, ZHOU G Y, *et al.* The short-term responses of soil available nitrogen of Dinghushan forests to simulated N deposition in subtropical china[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(11): 2353 - 2359.
- [15] 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.
FANG Y T, MO J M, JIANG Y Q, *et al.* Acidity and inorganic nitrogen concentrations in soil solution in short-term response to N addition in subtropical forests[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2005, 13(2): 123 - 129.
- [16] 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 - 23.
HUANG Z F, FAN Z G. The climate of Ding Hu Shan[J]. Tropical and Subtropical Forest Ecosystem Study, 1982, 1: 11 - 23.
- [17] 莫江明, 孔国辉, Brown S, Lanart M. 凋落物和林下层收割对鼎湖山生物圈保护区马尾松林土壤有效氮的影响[J]. 生态学报, 1997, 17(1): 109 - 112.
MO J M, KONG G H, BROWN S, LANART M. Effects of litter and understory removal on soil N availability in a subtropical pine forest of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 1997, 17(1): 109 - 112.

Response of soil NO_3^- -N dynamics to N additions in Dinghushan forests, assessed by ion-exchange resin bag method

Fang Yun-ting^{1, 2}, Mo Jiang-ming^{1*}, Zhou Guo-yi¹

1. Dinghushan Forest Ecosystem Research Station, South China Botanical Garden, the Chinese Academy of Science, Zhaoqing, Guangdong 526070, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract: Dynamics of soil NO_3^- -N and its response to N additions in the major forests (pine, mixed and monsoon evergreen broadleaf forests) of Dinghushan Biosphere Reserve were studied by using ion-exchange resin bags method. Soil NO_3^- -N concentrations varied depending on forest type, season and N treated level. Overall, soil NO_3^- -N concentrations were significantly higher in monsoon evergreen broadleaf forest than in mixed or pine forests, but the difference was not significant between mixed and pine forests. Soil NO_3^- -N concentrations in all studied forests showed higher in spring and summer than in winter and fall, and higher in winter than in fall. Soil NO_3^- -N concentrations responded N addition in all studied forests and were significantly increased in pine and monsoon evergreen forests. These results were consistent with results assessed by using common methods in the same forests, indicating that ion-exchange resin bags method is one of the effective methods to estimate soil NO_3^- -N dynamics.

Key words: nitrogen deposition; NO_3^- -N; ion-exchange resin bag method; subtropical forests