

鼎湖山5种森林土壤的无机氮和有效磷含量*

黄文娟^{1,2} 刘菊秀¹ 唐旭利¹ 黄钰辉^{1,2} 刘世忠¹ 褚国伟¹ 周国逸^{1**}

(¹中国科学院华南植物园 广州 510650)

(²中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 研究了鼎湖山5种森林——马尾松林(PF)、针阔叶混交林(混交林, MF)、季风常绿阔叶林(季风林, BF)、沟谷雨林(RF)和山地常绿阔叶林(山地林, MMF)下土壤无机氮(铵态氮 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ +硝态氮 $\text{NO}_3^-\text{-N}$)和有效磷含量的垂直分布情况. 5种森林分4个土层(0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm和40~60 cm)进行比较. 结果表明, 无机氮、有效磷含量因不同森林类型而异, 但都表现为: 随着土层的加深, 无机氮、有效磷呈减少的趋势, 但无机氮与有效磷之比呈增加的趋势. 随着森林的演替(马尾松林→混交林→季风林), 4个土层中无机氮在逐渐积累, 而有效磷仅在2个土层(0~10 cm和10~20 cm)表现为此趋势; 土壤无机氮的组成形式也发生变化, 铵态氮占无机氮的比例表现为马尾松林>混交林>季风林. 沿着海拔梯度分布的沟谷雨林、季风林和山地林土壤的无机氮和有效磷含量与海拔高度无明显的相关关系, 但铵态氮占无机氮的比例大致表现为季风林<沟谷雨林<山地林的趋势. 此外, 在4个土层中, 无机氮与有效磷之比分别与森林演替或是海拔高度都无明显的相关关系. 图6 表1 参40

关键词 鼎湖山; 无机氮; 有效磷; 森林演替; 海拔梯度

CLC S714.8

Inorganic Nitrogen and Available Phosphorus Concentrations in the Soils of Five Forests at Dinghushan, China*

HUANG Wenjuan^{1,2}, LIU Juxiu¹, TANG Xuli¹, HUANG Yuhui^{1,2}, LIU Shizhong¹,

CHU Guowei¹ & ZHOU Gouyi^{1**}

(¹South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China)

(²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The vertical distribution of inorganic N and available P was studied in the soils of five forests, that is, *Pinus massoniana* forest (PF), coniferous and broad-leaved mixed forest (MF), monsoon evergreen broad-leaved forest (BF), ravine rain forest (RF) and mountainous evergreen broad-leaved forest (MMF) at Dinghushan in Guangdong, China. The concentrations of inorganic N and available P in four soil layers (0~10 cm, 10~20 cm, 20~40 cm and 40~60 cm) were investigated. The concentrations varied among the different forests, and decreased with the depth of soil, while the ratios of inorganic N to available P increased. In the process of forest succession (PF→MF→BF), the concentrations of inorganic N increased in the four soil layers, while available P accumulated only in the upper two layers (0~10 cm and 10~20 cm). Furthermore, the percentage of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in inorganic N ranked as PF>MF>BF. The concentrations of inorganic N and available P in soil were not affected by altitude variation among RF, BF and MMF distributed along altitudinal gradient. But, the percentage of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in inorganic N was found approximately in the order: BF<RF<MMF. In addition, there were no significant differences in the ratios of inorganic N to available P in all soil layers among the five forests which showed the stages of forest succession or altitude variation. Fig 6, Tab 1, Ref 40

Keywords Dinghushan; inorganic nitrogen; available phosphorus; forest succession; altitudinal gradient

CLC S714.8

氮(N)、磷(P)是植物生长所必须的大量元素, 也是最受限制的元素. 一般来说, 在温带森林生态系统中, N是主要的限制元素; 在热带和亚热带森林生态系统中, P则为主要的限制

元素^[1]. 近年来, 由于人类活动的强烈影响, 这两种元素的循环在速度和规模上都发生了前所未有的变化, 导致了一系列的环境问题. 如化石燃料的大量燃烧、N肥的生产与使用等人类活动, 向大气中排放大量的含N化合物, 导致大气N沉降增加^[2]. 在生态系统中, 过量的N素会导致植物体内各种营养元素含量的比例失衡^[3-5]. N沉降不断增加对P的影响, 已逐渐引起了许多科学家的关注. N增多导致了土壤中N、P比例失调, 土壤性质发生变化. 土壤中供应的P不足以平衡增加的N^[6,7], 从而使P成为许多陆地生态系统生物生长和重要生态过程的限制因子^[8,9].

收稿日期: 2008-07-28 接受日期: 2008-10-06

*国家杰出青年科学基金(No. 30725006)、国家自然科学基金重点项目(No. 40730102)和国家自然科学基金面上项目(No. 30700112)联合资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China for Outstanding Young Scientists (No. 30725006), the Key Project of the National Natural Science Foundation of China (No. 40730102) and the General Project of the National Natural Science Foundation of China (No. 30700112)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: gyzhou@scbg.ac.cn)

在海洋生态系统中, Redfield研究发现, 浮游植物中C : N : P的原子个数比为106 : 16 : 1^[10]. 这驱使生态学家们也开始运用N、P比(N : P)化学计量学来研究陆地生态系统, 从独特的角度来诠释生态系统各个层次对环境变化的响应及其相互间的关系. 研究表明, N : P能够反映出陆地生态系统中的营养条件和资源有效性, 及其对生态系统结构和功能的控制作用^[11, 12]. Reich和Oleksyn通过研究1 200多种植物, 得出植物体叶的N:P随着纬度降低而增加的结论^[13]. 在对美国西部生态系统的研究中, 科学家们已经开始运用植物叶片的N : P来衡量系统是否达到“氮饱和”的问题^[14-16]. 在日益增加的N沉降对生态系统的影响问题上, 用植物叶片的N : P来指示系统是否受养分限制可能是一个有效的方法之一^[17]. 然而, 关于森林生态系统中土壤N : P是否也具有与植物叶片N : P相似的功能研究却很少^[18].

近年来, 广东省的鼎湖山地区受到人为活动影响强烈, 大气降水N沉降量由1989~1990年度的平均35.57 kg hm⁻² a⁻¹^[19]增长到1998~1999年度的平均38.40 kg hm⁻² a⁻¹^[20], 2004~2005年, 大气降水无机N的输入量平均为32~34 kg hm⁻² a⁻¹, 此外, 2005年大气降水有机N的输入量为18 kg hm⁻² a⁻¹^[21]. 鉴于该区受到N沉降的严重影响, 本研究选择鼎湖山5种森林类型即马尾松林、针阔混交林、季风常绿阔叶林、沟谷雨林和山地林为对象, 通过观测其土壤无机N和有效P的情况, 分析了南亚热带森林土壤在不同的植被类型中土壤无机N和有效P的差异, 并讨论了以下3个方面的内容: (1) 在土壤母质相同的背

景下, 森林演替过程是如何影响土壤无机N、有效P的含量? (2) 沿海拔梯度分布的不同植被类型对土壤无机N和有效P含量的影响怎样? (3) 检验两个梯度上不同植被类型土壤无机N与有效P的比值是否存在差异.

1 材料与方 法

1.1 研究地区和样地概况

鼎湖山自然保护区(112°30'~112°33'E, 23°09'~23°11'N)位于广东省中部, 总面积约1 133 hm², 是我国建立的第一个自然保护区. 其气候属于南亚热带湿润季风型气候, 水热条件丰富, 年平均气温21.4 °C. 保护区年平均降雨量达1 927 mm, 有明显的干湿季节, 4~9月为主要降雨季节, 10月至翌年3月为少雨季节, 年平均相对湿度为80%.

本区地带性植被类型为季风常绿阔叶林(简称季风林). 在保护区季风林外围的丘陵山地上, 过去曾人工种植了单种马尾松林, 一部分林地由于封山育林的结果, 松林中出现了大量的阔叶树, 这样就形成了针叶、阔叶混交林类型, 简称混交林. 而另一部分林在自然状况下发展, 使鼎湖山还分布着大面积的针叶林. 这3种森林群落处在群落演替进程中的3个不同阶段, 它们按自然演替发生的顺序为: 马尾松林→混交林→季风林^[22].

鼎湖山的最高峰为鸡笼山, 海拔1 000.3 m. 由于受到海拔梯度等因素的影响, 鼎湖山丘陵山地各个不同部位水热状况不同, 因而发育着不同的植被^[23]. 在海拔50~150 m的河谷

表1 鼎湖山5种森林基本情况

Table 1 The background information of the five forests at Dinghushan

项目 Item	演替系列 Successional series			海拔梯度 Altitudinal gradient		
	PF	MF	BF	RF	BF	MMF
主要植物 Dominant tree species	马尾松, 黄牛木, 三 叉苦 <i>Pinus massoniana</i> , <i>Cratoxylon</i> <i>ligustrinum</i> , <i>Evodia</i> <i>lepta</i>	锥栗, 荷木, 马尾 松 <i>Castanopsis</i> <i>chinensis</i> , <i>Schima</i> <i>superba</i> , <i>P.</i> <i>massoniana</i>	荷木, 锥栗, 黄果 厚壳桂 <i>Schima superba</i> , <i>C. chinensis</i> , <i>Cryptocarya</i> <i>chinensis</i>	凸脉榕, 鱼尾葵 <i>Ficus nervosa</i> , <i>Caryota</i> <i>ochlandra</i>	荷木, 锥栗, 黄果 厚壳桂 <i>S. superba</i> , <i>C.</i> <i>chinensis</i> , <i>C.</i> <i>chinensis</i>	少叶黄杞, 密花树, 黄 叶树 <i>Engelhardtia fengalii</i> , <i>Rapanea nerifolia</i> , <i>Xanthophyllum</i> <i>hainanense</i>
海拔 Elevation (h/m)	150~300	150~300	150~300	<50	150~300	500~800
演替阶段 Succession stage	初级 Initial	过渡 Transitional	顶级 Climax	顶级 Climax	顶级 Climax	顶级 Climax
树龄 Approx. age of dominant trees (t/a)	50	50	400	300	400	100
盖度 ^[24] Coverage (P/%)	70~80	80~90	80~90	70~90	80~90	80~90
土壤类型 ^[24] Soil types	赤红壤 Lateritic red soil	赤红壤 Lateritic red soil	赤红壤 Lateritic red soil	赤红壤 Lateritic red soil	赤红壤 Lateritic red soil	黄壤 Yellow soil
土壤pH Soil pH	3.98	3.73	3.72	3.92	3.72	3.85
有机质 Soil organic matter (w/%)	2.60	5.54	6.94	4.68	6.94	7.28
全N Total N (w/%)	0.08	0.15	0.19	0.16	0.19	0.18
全P Total P (w/mg kg ⁻¹)	432	671	663	740	663	590

PF: 马尾松林; MF: 混交林; BF: 季风林; RF: 沟谷雨林; MMF: 山地林. 下同. 海拔梯度中BF与演替系列中BF相同. 土壤pH、有机质、全N和全P为该试验土壤0~10 cm土层的所测值

PF: *Pinus massoniana* forest; MF: Coniferous and broad-leaved mixed forest; BF: Monsoon evergreen broad-leaved forest; RF: Ravine rain forest; MMF: Mountainous evergreen broad-leaved forest. The same below. BF in the altitudinal gradient is the same as BF in the successional series. Soil pH, soil organic matter, total N and total P were tested in 0~10 cm soil layer in this paper

两侧山坡,发育着沟谷雨林;在100~490 m的山坡上,主要分布着季风林;在500 m以上的山坡上,则分布着山地常绿阔叶林(简称山地林)。这样,从山麓到山顶,依次分布着沟谷雨林、季风林、山地林。

本研究选择鼎湖山的5种森林,即马尾松林、混交林、季风林、沟谷雨林、山地林。前3种森林类型是季风常绿阔叶林演替系列的典型植被类型,而季风林、沟谷雨林和山地林又从不同的海拔高度上构成了典型的亚热带常绿阔叶林自然植被类型。表1是对5种森林类型的详细描述。

1.2 样品采集与处理

土样采集:于2007年4月在鼎湖山的马尾松林、混交林、季风林、沟谷雨林和山地林内进行随机布点采样。每种森林类型内布5个采样点,去除表土上覆盖的枯枝落叶,用内径2.5 cm的土钻在每个取样点钻取3钻土,取土深度为0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm。同一深度的3钻土混合为一个土样,将土样装入布袋并用标签做好标记带回实验室。共采集100个土样(100个土样=5种森林类型×5个采样点×4个土层)。

土样制备:将土样放至通风干燥处,剔除石粒、草根等杂物,自然风干。用滚轴磨碎风干土,过2 mm筛,装袋待用。

1.3 测定方法

土样pH值用水土比2.5:1测定。土壤有机质用重铬酸钾氧化-外加加热法测定。土壤全N和全P用硫酸钾和硫酸铜消煮,流动注射分析仪(QC 8000)测定。

无机N(铵态N+硝态N)测定:取10.00 g土加50 mL的2 mol L⁻¹ KCl浸提液浸提,振荡1 h后过滤,分别采用靛酚蓝比色法和镀铜镉还原-重N化偶合比色法测定铵态N和硝态N^[25]。铵态N和硝态N之和即为无机N。

有效P测定:取5.00 g的土加0.03 mol L⁻¹ 氟化铵-0.025 mol L⁻¹ 盐酸50 mL浸提,振荡5 min后过滤,用ICP-OES (Optima 2000 DV)测定有效P^[3]。

1.4 统计方法

采用统计软件SPSS 16.0 for windows中单因素方差分析(One way ANOVA)和Tukey多重比较(Tukey's multiple-range test)检验同一土层不同森林类型间无机N、有效P的差异。

2 结果与分析

2.1 无机氮在5种森林类型土壤中的变化情况

2.1.1 无机氮在不同演替系列森林土壤中的变化情况 由图1-A可见,随着土层的加深,不同演替系列上的3个森林土壤无机N含量呈递减的趋势。在浅层土壤(0~20 cm),无机N含量表现为马尾松林<混交林<季风林,季风林与混交林之间差异不显著,但它们都显著大于马尾松林($P<0.05$)。浅层土壤马尾松林、混交林和季风林无机N平均含量分别为:8.18 mg kg⁻¹、12.69 mg kg⁻¹和12.99 mg kg⁻¹。在深层土壤(20~60 cm),无机N含量仍表现为马尾松林<混交林<季风林,但仅季风林显著大于马尾松林($P<0.05$)。按演替系列排列,深层土壤无机N平均含量依次为:4.95 mg kg⁻¹、8.55 mg kg⁻¹和10.51 mg kg⁻¹。

3种森林类型中,马尾松林土壤铵态N占了无机N的绝大部分(图1-B),随着土层加深,铵态N所占的比例依次为:82%

±3%、92%±2%、98%±1%、96%±4%。混交林次之,随着土层加深,依次为:50%±5%、50%±7%、57%±5%、74%±9%。季风林主要以硝态N为主,随着土层加深,依次为:41%±6%、44%±7%、37%±3%、38%±3%,显著地低于马尾松林土壤中铵态N占无机N的比例($P<0.05$)。

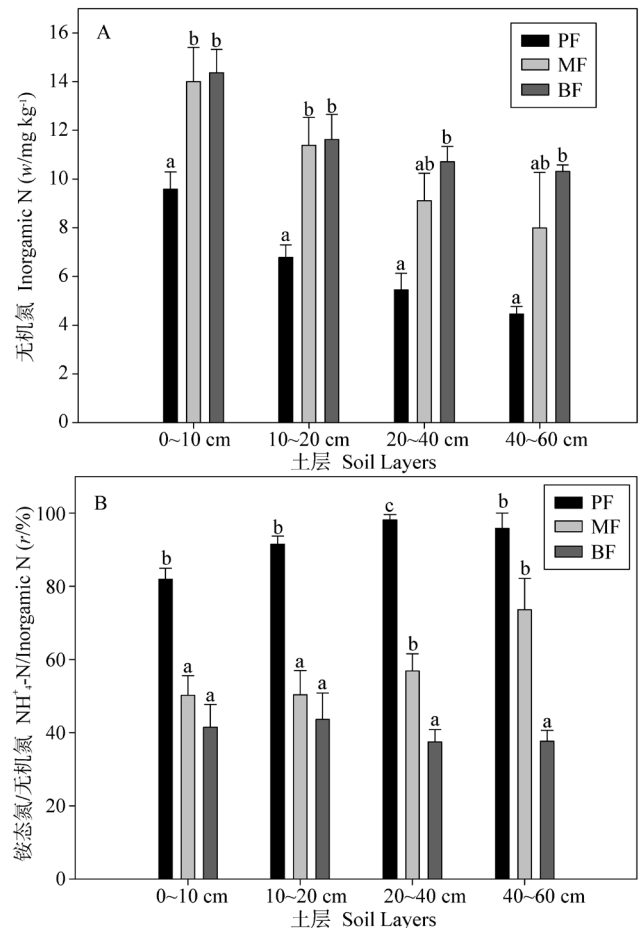


图1 鼎湖山3个演替系列森林土壤无机氮含量(A)和铵态氮占无机氮的比例(B) ($\bar{x} \pm s$, $N=5$)

Fig. 1 Concentrations of soil inorganic nitrogen (A) and the percentage of NH_4^+ -N in inorganic nitrogen (B) in three forest types at different successional stages at Dinghushan ($\bar{x} \pm s$, $N=5$)

同一土层具有不同字母的表示差异显著($P<0.05$),下同
Different letters indicate significant differences at the confidence level of $P<0.05$ among the three forests in the same soil layer. The same below

2.1.2 无机氮在不同海拔梯度森林土壤中的变化情况 由图2-A可见,沟谷雨林、季风林、山地林土壤无机N含量随土层的加深而降低。在0~10 cm土层,土壤无机N含量依次为:18.77 mg kg⁻¹±2.12 mg kg⁻¹、14.36 mg kg⁻¹±0.96 mg kg⁻¹和14.10 mg kg⁻¹±1.44 mg kg⁻¹。除40~60 cm土层无机N含量表现为山地林显著地低于季风林与沟谷雨林外($P<0.05$),其它土层无机N含量在3种森林类型中差异都不显著。

3种森林类型中,土壤无机N的组成形式表现为:山地林土壤以铵态N占优势(图2-B),在4个土层中铵态N占无机N的比例都显著地高于季风林($P<0.05$);沟谷雨林土壤铵态N占无机N的比例介于山地林与季风林之间;在浅层土壤,沟谷雨

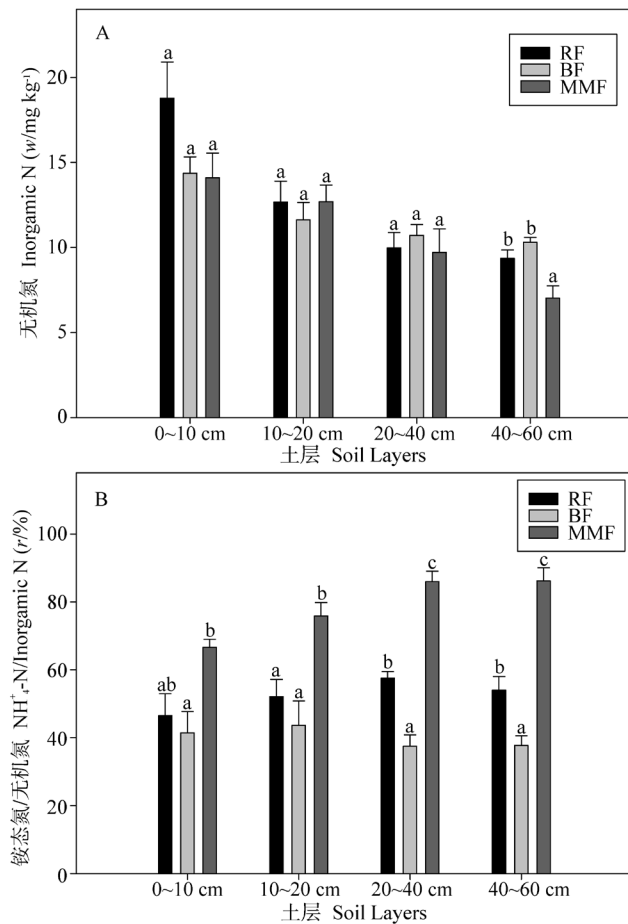


图2 鼎湖山沿海拔梯度的3种森林土壤无机氮含量(A)和铵态氮占无机氮的比例(B) ($\bar{x} \pm s, N=5$)

Fig. 2 Concentrations of soil inorganic nitrogen (A) and the percentage of NH_4^+ -N in inorganic nitrogen (B) in three forest types along altitudinal gradient at Dinghushan ($\bar{x} \pm s, N=5$)

林与季风林差异不显著;在深层土壤,沟谷雨林显著地高于季风林($P < 0.05$).

2.2 有效磷在5种森林类型土壤中的变化情况

2.2.1 有效磷在不同演替系列森林土壤中的变化情况 在演替系列的3种森林类型中,土壤有效P含量随着土层的加深呈逐渐减少的趋势(图3).在0~10 cm土层中,随森林演替,有效P含量依次为 $1.52 \text{ mg kg}^{-1} \pm 0.13 \text{ mg kg}^{-1}$ 、 $1.55 \text{ mg kg}^{-1} \pm 0.08 \text{ mg kg}^{-1}$ 和 $2.67 \text{ mg kg}^{-1} \pm 0.43 \text{ mg kg}^{-1}$.在10 cm以下的土层有效P含量都很低,均小于 1 mg kg^{-1} .浅层土壤的有效P含量大致表现为季风林>混交林>马尾松林的趋势,但是它们之间的差异均未达到统计显著水平.

2.2.2 有效磷在不同海拔梯度森林土壤中的变化情况 沿着海拔梯度分布的3种森林类型也表现为随着土层加深土壤有效P含量逐渐减少.3种森林类型中,沟谷雨林土壤有效P含量最高(图4),在0~10 cm土层中,达到 $4.51 \text{ mg kg}^{-1} \pm 0.44 \text{ mg kg}^{-1}$,在浅层土壤中显著地高于季风林与山地林($P < 0.05$).季风林与山地林的4个土层土壤有效P含量差异都不显著.

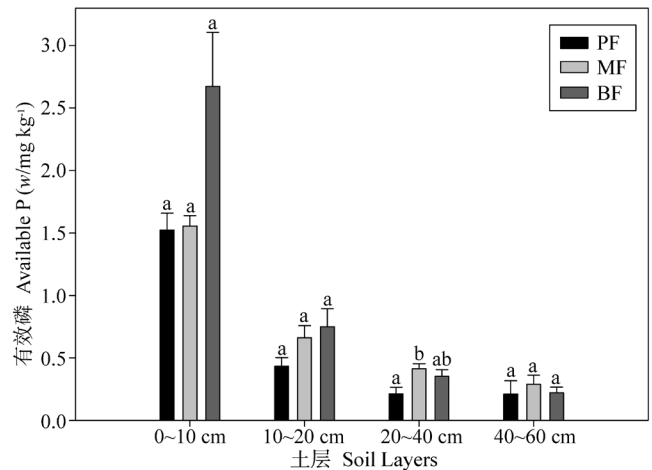


图3 鼎湖山3个演替系列森林土壤有效磷含量($\bar{x} \pm s, N=5$)

Fig. 3 Concentrations of soil available phosphorus in three forest types at different successional stages at Dinghushan ($\bar{x} \pm s, N=5$)

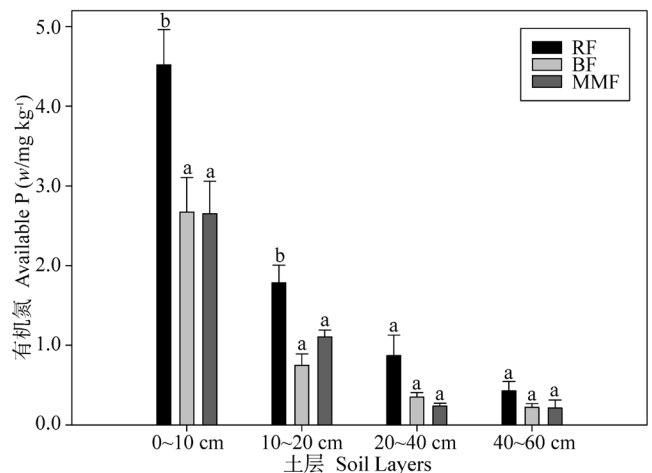


图4 鼎湖山沿海拔梯度的3种森林土壤有效磷含量($\bar{x} \pm s, N=5$)

Fig. 4 Concentrations of soil available phosphorus in three forest types along altitudinal gradient at Dinghushan ($\bar{x} \pm s, N=5$)

2.3 无机氮与有效磷比值在5种森林类型土壤中的变化情况

2.3.1 无机氮与有效磷比值在不同演替系列森林土壤中的变化情况 马尾松林、混交林和季风林土壤无机N与有效P的比值(N:P)随土层的加深而增大(图5).3种森林类型在4个土层中N:P差异都不显著.从上到下的4个土层中,3种森林类型土壤N:P的平均值分别为7、18、31和77.

2.3.2 无机氮与有效磷比值在不同海拔梯度森林土壤中的变化情况 沟谷雨林、季风林和山地林土壤N:P随着土层加深呈逐渐增加的趋势(图6).在0~10 cm与40~60 cm土层,3种森林类型土壤N:P差异都不显著.在10~20 cm与20~40 cm土层,沟谷雨林土壤N:P显著地低于山地林($P < 0.05$),季风林分别与沟谷雨林、山地林之间差异不显著.

3 小结与讨论

3.1 土层深度及森林类型对无机氮和有效磷含量的影响

在自然生态系统中,植物生长所需的大部分N和P是由植物凋落物和土壤有机质分解所提供^[1].在本研究中,5种森林

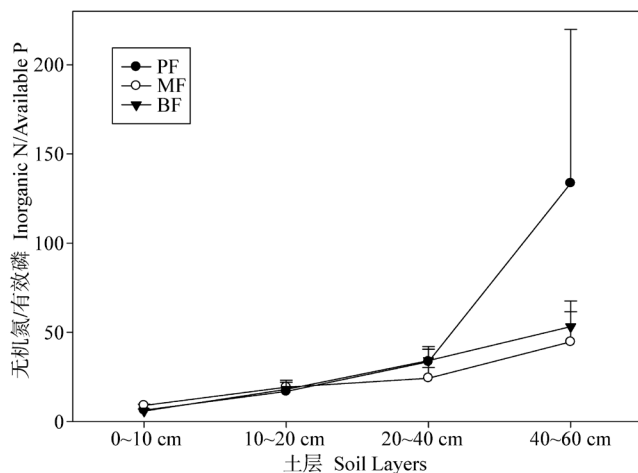


图5 鼎湖山3个演替系列森林土壤无机氮:有效磷($\bar{x} \pm s$, $N=5$)

Fig. 5 Ratios of inorganic nitrogen to available phosphorus of soils in three forest types at different successional stages at Dinghushan ($\bar{x} \pm s$, $N=5$)

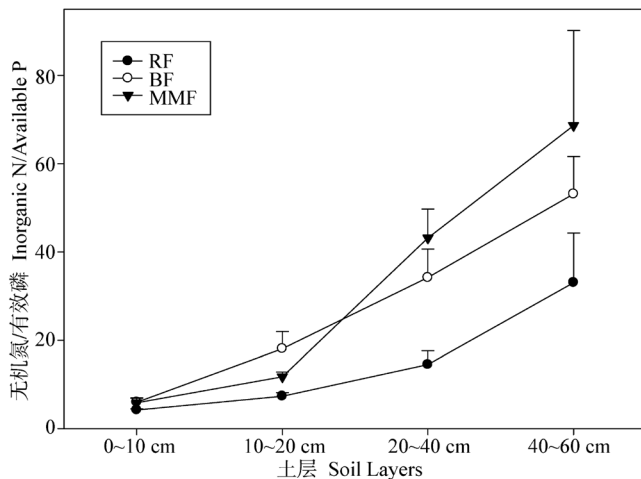


图6 鼎湖山沿海拔梯度的3种森林土壤无机氮:有效磷($\bar{x} \pm s$, $N=5$)

Fig. 6 Ratios of inorganic nitrogen to available phosphorus of soils in three forest types along altitudinal gradient at Dinghushan ($\bar{x} \pm s$, $N=5$)

类型的土壤有机质与无机N、有效P分别存在着显著的正相关关系($P < 0.01$), 其相关系数分别为0.615和0.731; 土壤无机N和有效P含量随着土层加深而降低, 是因为在上层土壤中, 有机质含量较高, N和P来源丰富的缘故。

土壤有效养分含量受土壤母质类型、所处的气候环境以及植被类型等多种因素共同影响。鼎湖山的5种森林类型具有相同的土壤母质, 同处于亚热带湿润季风型气候, 因此造成这5种森林类型土壤无机N和有效P差异的主要因素是小气候环境(如海拔梯度)和其上分布的植被类型^[26]。

在演替系列的3种森林类型中, 马尾松林土壤无机N含量最低, 其次是混交林。原因是马尾松针叶凋落物的N含量较低(1.39%)^[27], 即林下土壤N素的可获得性较低, 且马尾松林的凋落物又不易分解。此外, 土壤的N素矿化速率与土壤有机质、全N成正比关系^[28]。本试验所测的土壤全N与无机N也存在极显著的正相关关系($r=0.687$, $P < 0.01$)。而这3种森林土壤有机质与全N含量的大小关系为马尾松林<混交林<季风林, 所以造成这3种不同演替阶段的森林土壤无机N含量表现为早期<中期<晚期。

马尾松林土壤以铵态N为主, 且在各个土层明显地高于季风林。这可能是受马尾松林的生物学特性影响所造成。在针叶林的试验表明针叶树通常喜好铵态N^[29]。马尾松为了满足对铵态N的需求, 有可能形成某种机制来抑制其林下土壤铵态N转化为其它形式的N。可能由于这种抑制作用, 使土壤中铵态N的含量及其在无机N所占的比例均表现为马尾松>混交林>季风林。本研究中季风林土壤硝态N占优势, 这是因为相对于马尾松林与混交林而言, 季风林土壤结构更为疏松, 凋落物种类丰富且量大, 以及土壤微生物活性较高^[30]等, 有利于季风林土壤的硝化作用, 导致土壤中更多的铵态N转化为硝态N。方运霆等对南亚热带森林土壤无机N含量的研究结果^[31]进一步证明了季风林土壤硝化作用较强。在有关森林演替对N素矿化的影响研究中, Robertson等认为, 硝化作用在演替后期阶段相对于演替其它阶段都大^[32]。本研究也支持这一观点。

沿着海拔梯度分布的3种森林类型, 土壤无机N含量差异不显著, 说明土壤无机N含量随着海拔梯度的上升没有明显的上升或下降的趋势。山地林与季风林有机质较多, 且土壤微生物量多^[33], N的矿化作用较强, 因此无机N含量较高。沟谷雨林0~10 cm土层无机N含量很高, 这与其所处的特殊地理位置有关: 沟谷雨林位于鼎湖山自然保护区海拔最低处, 位于高海拔处的土壤硝态N随雨水冲刷下来沉积在其土壤表层, 导致0~10 cm土层硝态N含量较高, 从而造成土壤无机N含量高。此外, 雨水中高N素输入^[21], 可能也是3种成熟森林土壤无机N含量都较高的原因之一。

与国内外一些有关土壤有效P研究相比^[34, 35], 鼎湖山土壤P的有效性相对低, 反映了在热带亚热带地区土壤有效P低, 森林生态系统很易出现P限制的事实。莫江明等对鼎湖山季风林植物营养元素含量分配格局研究发现, 鼎湖山植物叶片P含量低于我国各气候带的平均水平, 仅占平均值的43%, 从叶片营养元素含量特征可以推出, 在鼎湖山南亚热带常绿阔叶林中, P可能是植物生产力的限制因素^[36]。本研究中5种森林类型土壤有效P含量较低, 也进一步证实了鼎湖山森林有可能存在P限制的问题, 也有待于今后作控制试验来进一步证明。

在季风常绿阔叶林演替系列的3种森林类型比较中, 得出在浅层土壤中有效P的含量随着森林演替有逐渐增加的趋势, 这是因为季风林相对于马尾松林和混交林拥有更多的凋落物和微生物数量^[24, 37], 且凋落物相对容易分解, 导致了季风林土壤有效P含量高于混交林和马尾松林, 而混交林的情况则介于季风林与马尾松林之间。这支持了莫江明对鼎湖山马尾松林、混交林和季风林土壤有效P的研究结果^[38], 即土壤有效P浓度以季风林最高, 其次是混交林, 最低为马尾松林。以上结果也说明了随着森林演替, 土壤有效P在逐渐积累。

沿着海拔梯度分布的3种森林类型土壤有效P含量与海拔的高度无明显的相关关系。这与Soethe等对热带森林的研究结果^[39]相一致, 即土壤中的有效养分不随海拔梯度的变化而变化。3种森林类型中, 沟谷雨林土壤有效P含量相对最高, 特别是在表层土壤0~10 cm中有效P量达到了4.52 mg kg⁻¹, 这可能与沟谷雨林所处的地理位置有关, 因沟谷雨林位

于鼎湖山自然保护区海拔最低处,位于高海拔处的土壤被雨水冲刷下来沉积在其土壤表层,导致养分在土壤表层的逐渐累积,因此沟谷雨林表层土壤有效P含量较高。

3.2 土层深度及森林类型对无机氮:有效磷的影响

随着土层的加深无机N:有效P逐渐增大,表明随着土层加深,有效P的减少速度大于无机N的减少速度。在本研究中,虽然不同森林类型的同一土层中土壤无机N和有效P含量变幅较大,且存在差异,如在0~10 cm土层中,无机N含量最大为18.78 mg kg⁻¹,最小为9.58 mg kg⁻¹,有效P含量的变化范围从1.52 mg kg⁻¹到4.52 mg kg⁻¹,但是无机N与有效P的比值在5种森林类型中相对恒定。土壤中无机N:有效P与海拔高度也没有明显的相关关系。之前的研究表明,植物体叶的全N与全P之比可以作为该植物群落营养限制的指标^[12, 17];当N:P<14时,表现为N限制;当N:P>16时,则表现为P限制。然而,鼎湖山植被组成种类复杂多样^[40],同一生境下的不同植物种间N、P含量差异很大^[36],植物叶片中的N:P的变异较大。因此,对于鼎湖山而言,运用上文提到的植物叶片N:P以14和16为界限作为植物群落营养限制的指标,得到的结果往往很难令人信服。Cleveland等研究表明,在全球尺度上,土壤微生物生物量中的N:P变化范围相对较小,可以作为衡量陆地生态系统营养限制的指标之一^[18]。在鼎湖山不同植被类型下土壤微生物生物量养分中的N:P也存在很大的差异^[30],很难运用它来找到一个特定的标准来衡量鼎湖山森林生态系统养分限制的问题。本研究中土壤无机N与有效P是植物吸收养分的主要形式,研究这两者之间的比值可以更直接地反应出土壤养分供应状况,且其值在鼎湖山不同植被类型的相同土层中相对恒定,可能表明土壤无机N与有效P的比值将是另一种衡量森林生态系统中是否受N或P限制的指标之一,这有待今后进一步的研究来证实。

References

- Chapin FS III, Matson PA, Mooney HA. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. New York, USA: Springer-Verlag, 2002. 198-200
- Yang JY (杨金艳), Zhao HX (赵惠勋), Wang CK (王传宽). Responses of forests to nitrogen saturation. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), 2004, **10** (4): 507-511
- Liu JX, Zhou GY, Zhang DQ. Effects of acidic solutions on element dynamics in the monsoon evergreen broad-leaved forest at Dinghushan, China. Part 1: Dynamics of K, Na, Ca, Mg and P. *Environ Sci & Poll Res*, 2007, **14** (2): 123-129
- Li DJ (李德军), Mo JM (莫江明), Fang YT (方运霆), Peng SL (彭少麟), Gundersen P. Impact of nitrogen deposition on forest plants. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2003, **23** (9): 1891-1900
- Liu WF (刘文飞), Fan HB (樊后保), Zhang ZW (张子文), Yang YL (杨跃霖), Wang QQ (王启其), XU L (徐雷). Foliar nutrient contents of Chinese fir in response to simulated nitrogen deposition. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), 2008, **14** (3): 319-323
- Asner GP, Townsend AR, Riley WJ, Matson PA, Neff JC, Cleveland CC. Physical and biogeochemical controls over terrestrial ecosystem responses to nitrogen deposition. *Biogeochemistry*, 2001, **54** (1): 1-39
- He YQ, Zhu YG, Smith SE, Smith FA. Interactions between soil moisture content and phosphorus supply in spring wheat plants grown in pot culture. *J Plant Nutr*, 2002, **25** (4): 913-925
- Gleeson SK, Good RE. Root allocation and multiple nutrient limitation in the New Jersey Pinelands. *Ecol Lett*, 2003, **6** (3): 220-227
- Kerkhoff AJ, Enquist BJ. Ecosystem allometry: The scaling of nutrient stocks and primary productivity across plant communities. *Ecol Lett*, 2006, **9** (4): 419-427
- Redfield A. The biological control of chemical factors in the environment. *Am Sci*, 1958, **46**: 205-221
- Vitousek PM, Hobbie S. Heterotrophic nitrogen fixation in decomposing litter: patterns and regulation. *Ecology*, 2000, **81** (9): 2366-2376
- Gusewell S. N:P ratios in terrestrial plants: Variation and functional significance. *New Phytol*, 2004, **164** (2): 243-266
- Reich PB, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2004, **101** (30): 11001-11006
- Williams MW, Baron JS, Caine N, Sommerfeld R, Sanford R. Nitrogen saturation in the Rocky Mountains. *Environ Sci & Technol*, 1996, **30** (2): 640-646
- Fenn ME, Poth MA, Johnson DW. Evidence for nitrogen saturation in the San Bernardino Mountains in southern California. *For Ecol & Manage*, 1996, **82**: 211-230
- Tessier JT, Raynal DJ. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation. *J Appl Ecol*, 2003, **40** (3): 523-534
- Koerselman W, Meuleman AFM. The vegetation N:P ratio: A new tool to detect the nature of nutrient limitation. *J Appl Ecol*, 1996, **33** (6): 1441-1450
- Cleveland CC, Liptzin D. C:N:P stoichiometry in soil: Is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass? *Biogeochemistry*, 2007, **85** (3): 235-252
- Huang ZL (黄忠良), Ding MM (丁明懋), Zhang ZP (张祝平), Yi WM (蚁伟民). The hydrological processes and nitrogen dynamics in a monsoon evergreen broad-leaved forest of Dinghushan. *Acta Phytoecol Sin* (植物生态学报), 1994, **18** (2): 194-199
- Zhou GY, Yan JH. The influence of region atmospheric precipitation characteristics and its element inputs on the existence and development of Dinghushan forest ecosystems. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2001, **21** (12): 2002-2010
- Fang YT, Gundersen P, Mo JM, Zhu WX. Input and output of dissolved organic and inorganic nitrogen in subtropical forests of South China under high air pollution. *Biogeosciences*, 2008, **5** (2): 339-352
- Wang ZH (王铸豪), He DQ (何道泉), Song SD (宋绍敦), Chen SP (陈树培), Chen DR (陈定如), Tu MZ (屠梦照). The vegetation of the Dinghushan Biosphere Reserve. *Trop Subtrop For Ecosyst* (热带亚热带森林生态系统研究), 1982, **1**: 77-141
- Wu HS (吴厚水). 鼎湖山自然保护区水热状况及其与生态环境的关系. *Trop Geogr* (热带地理), 1982 (4): 25-36
- Zhou LX (周丽霞), Yi WM (蚁伟民), Yi ZG (易志刚), Ding MM (丁明懋). Soil microbial characteristics of several vegetations at different

- elevation in Dinghushan Biosphere Reserve. *Trop Subtrop For Ecosyst* (热带亚热带森林生态系统研究), 2002, **9**: 169~174
- 25 Liu GS (刘光崧), Jiang NH (蒋能惠), Zhang LD (张连第), Liu ZL (刘兆礼). *Soil physical and chemical analysis & description of soil profiles*. Beijing, China (北京): Standards Press of China, 1996. 121~265
- 26 Huang ZH (黄志宏), Zhou GY (周国逸), Chu GW (褚国伟), Yin GC (尹光彩), Zhang QM (张倩媚). Response of soil physiochemical characteristics to the gradient of altitudes in Dinghushan of bioreserve. *Trop Subtrop For Ecosyst* (热带亚热带森林生态系统研究), 2002, **9**: 146~152
- 27 Mo JM (莫江明), Brown S, Kong GH (孔国辉), Zhang YC (张佑昌), Lenart M. Nutrient distribution and cycling of a Masson's pine planted forest in Dinghushan. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 1999, **19** (5): 635~640
- 28 Raghubanshi AS. Effect of topography on selected soil properties and nitrogen mineralization in a dry tropical forest. *Soil Biol & Biochem*, 1992, **24** (2): 145~150
- 29 Gosz JR. Nitrogen cycling in coniferous ecosystems. In: Clark FE, Rosswall T eds. *Terrestrial Nitrogen Cycles*. *Ecol Bull* (Stockholm), 1981, **33**: 405~426
- 30 Fu SL (傅声雷), Yi WM (蚁伟民), Ding MM (丁明懋). Mineralization of soil microbial C, N, P and K in different vegetations types at Dinghushan Biosphere Reserve. *Acta Phytoecol Sin* (植物生态学报), 1995, **19** (3): 217~224
- 31 Fang YT (方运霆), Mo JM (莫江明), Zhou GY (周国逸), Gundersen P, Li DJ (李德军), Jiang YQ (江远清). The short-term responses of soil available nitrogen of Dinghushan forests to simulated N deposition in subtropical China. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2004, **24** (11): 2353~2359
- 32 Robertson GP, Vitousek PM. Nitrification potentials in primary and secondary succession. *Ecology*, 1981, **62** (2): 376~386
- 33 Yi WM (蚁伟民), Yi ZZ (易志刚), Ding MM (丁明懋), Zhou LX (周丽霞). Soil microbial biomass and its carbon dynamic in the main forest vegetations in Dinghushan area. *Trop Subtrop For Ecosyst* (热带亚热带森林生态系统研究), 2002, **9**: 180~185
- 34 Chen HJ. Phosphatase activity and P fractions in soils of an 18-year-old Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantation. *For Ecol & Manage*, 2003, **178**: 301~310
- 35 Schneider K, Turrion MB, Gallardo JF. Modified method for measuring acid phosphatase activities in forest soils with high organic matter content. *Commun Soil Sci & Plant Anal*, 2000, **31** (19~20): 3077~3088
- 36 Mo JM (莫江明), Zhang DQ (张德强), Huang ZL (黄忠良), Yu QF (余清发), Kong GH (孔国辉). Distribution pattern of nutrient elements in plants of Dinghushan lower subtropical evergreen broad-leaved forest. *J Trop & Subtrop Bot* (热带亚热带植物学报), 2000, **8** (3): 198~206
- 37 Zhou GY, Guan LL, Wei XH, Zhang DQ, Zhang QM, Yan JH, Wen DZ, Liu JX, Liu SG, Huang ZL, Kong GH, Mo JM, Yu QF. Litterfall production along successional and altitudinal gradients of subtropical monsoon evergreen broadleaved forests in Guangdong, China. *Plant Ecol*, 2007, **188** (1): 77~89
- 38 Mo JM (莫江明). Phosphorus availability of soils under degraded pine, mixed and monsoon evergreen broadleaf forests of subtropical China. *Guihaia* (广西植物), 2005, **25** (2): 186~192
- 39 Soethe N, Lehmann J, Engels C. Nutrient availability at different altitudes in a tropical montane forest in Ecuador. *J Trop Ecol*, 2008, **24**: 397~406
- 40 Cao HL (曹洪麟), Huang ZL (黄忠良), Zhang LY (张林艳), Kong GH (孔国辉). Vegetation map of Dinghu mountain nature reserve. *Trop Subtrop For Ecosyst* (热带亚热带森林生态系统研究), 2002, **9**: 1~9