

# 模拟氮沉降对鼎湖山森林土壤酸性磷酸单酯酶活性和有效磷含量的影响\*

李 银<sup>1,2</sup> 曾曙才<sup>1,4</sup> 黄文娟<sup>2,3\*\*</sup>

(<sup>1</sup> 华南农业大学林学院, 广州 510642; <sup>2</sup> 中国科学院华南植物园, 广州 510650; <sup>3</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049; <sup>4</sup> 农业部生态农业重点开放实验室, 广州 510642)

**摘 要** 采用野外原位试验模拟氮(N)沉降,研究了其对鼎湖山马尾松林、混交林和季风林3种森林类型土壤酸性磷酸单酯酶活性(APA)和有效磷(AP)含量的影响.在季风林中设置对照(0 kg N · hm<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup>)、低N(50 kg N · hm<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup>)、中N(100 kg N · hm<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup>)和高N(150 kg N · hm<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup>)处理,在马尾松林和混交林中只设置对照、低N和中N处理.结果表明:随着土层加深,土壤APA和AP含量降低.土壤APA在季风林中最高,而AP含量在3种林型中没有显著差异.N沉降增加对土壤APA的作用与林型有关.季风林中适度N沉降可使APA升高,且低N处理的APA(19.52 μmol · g<sup>-1</sup> · h<sup>-1</sup>)最高;马尾松林和混交林中,中N处理的APA最高,分别为12.74和11.02 μmol · g<sup>-1</sup> · h<sup>-1</sup>.3种林型的AP含量均在低N处理下最高,但各N处理之间的差异并不显著.土壤APA与AP含量之间呈显著正相关关系.

**关键词** 酸性磷酸单酯酶活性 有效磷 氮沉降 鼎湖山

文章编号 1001-9332(2011)03-0631-06 中图分类号 S714.2 文献标识码 A

**Effects of simulated nitrogen deposition on soil acid phosphomonoesterase activity and soil available phosphorus content in subtropical forests in Dinghushan Mountain.** LI Yin<sup>1,2</sup>, ZENG Shu-cai<sup>1,4</sup>, HUANG Wen-juan<sup>2,3</sup> (<sup>1</sup>College of Forestry, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; <sup>2</sup>South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; <sup>3</sup>Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; <sup>4</sup>Ministry of Agriculture Key Laboratory of Ecological Agriculture, Guangzhou 510642, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2011, 22(3): 631-636.

**Abstract:** An *in situ* field experiment was conducted to study the effects of simulated nitrogen (N) deposition on soil acid phosphomonoesterase activity (APA) and soil available phosphorous (AP) content in *Pinus massoniana* forest (PF), coniferous and broad-leaved mixed forest (MF), and monsoon evergreen broad-leaved forest (MEBF) in Dinghushan Mountain. In PF and MF, three treatments were installed, *i. e.*, CK (0 kg N · hm<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup>), low N (50 kg N · hm<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup>), and medium N (100 kg N · hm<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup>); in MEBF, four treatments were installed, *i. e.*, CK, low N, medium N, and high N (150 kg N · hm<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup>). The soil APA and soil AP content decreased with soil depth. The soil APA was the highest in MEBF, while the AP content had no significant difference in the three forests. The effects of N addition on soil APA differed with forest types. In MEBF, the APA was the highest (19.52 μmol · g<sup>-1</sup> · h<sup>-1</sup>) in low N treatment; while in PF and MF, the APA was the highest (12.74 and 11.02 μmol · g<sup>-1</sup> · h<sup>-1</sup>, respectively) in medium N treatment. In the three forests, soil AP content was the highest in low N treatment, but had no significant differences among the N treatments. There was a significant positive correlation between soil APA and soil AP content.

**Key words:** acid phosphomonoesterase activity; available phosphorous; nitrogen deposition; Dinghushan Mountain.

\* 国家杰出青年科学基金项目(30725006)、国家自然科学基金重点项目(40730102)和广东省自然科学基金团队项目(8351065005000001)资助.

\*\* 通讯作者. E-mail: wjhuang@scbg.ac.cn

2010-09-15 收稿, 2010-12-19 接受.

在许多森林生态系统中,磷(P)是一种限制植物生长的重要元素,是调节生态系统生产力、结构和功能的关键性元素。热带地区的土壤由于高度风化以及强烈的固P作用,土壤有效磷(available phosphorous, AP)含量通常很低,因此P常被认为是热带森林植物生长最重要的限制因子之一<sup>[1]</sup>。莫江明等<sup>[2]</sup>对鼎湖山亚热带常绿阔叶林植物营养元素含量分配格局的研究结果表明,P很可能是限制亚热带常绿阔叶林植物生产力的最重要的营养元素之一。土壤磷酸酶是一类催化土壤有机磷矿化为无机磷的酶,有利于提高土壤P的有效性,而在森林生态系统中,则以酸性磷酸单酯酶(acid phosphomonoesterase)占主导地位<sup>[3]</sup>。

氮(N)沉降持续增加已成为全球性的环境问题,其对陆地生态系统的影响已引起科学家的广泛关注。Dezi等<sup>[4]</sup>研究发现,长期N沉降使森林碳蓄积量显著增加;Papanikolaou等<sup>[5]</sup>研究表明,随着N沉降的增加,凋落物中胞外酶的活性增强,其中磷酸酶最敏感;Janssens等<sup>[6]</sup>从有机质分解、微生物生长、土壤固碳等方面综述了森林土壤呼吸降低对N沉降的响应。由于N沉降改变了土壤理化性质,可能对土壤中P的有效性产生较大影响。但N沉降对土壤P的影响研究相对较少。

鼎湖山地区受N沉降影响严重,2004–2005年,大气降水无机N输入量平均为 $32 \sim 34 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,2005年大气降水有机N输入量为 $18 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ <sup>[7]</sup>。同时,鼎湖山土壤多呈强酸性。因此,研究鼎湖山主要森林类型土壤酸性磷酸单酯酶活性(acid phosphomonoesterase activity, APA)和AP含量的变化,有助于了解土壤P的生物转化进程和土壤潜在肥力的有效化程度,以及该地区森林生态系统APA和AP含量对大气N沉降的响应规律。为此,本研究通过外加N控制试验,分析了其对鼎

湖山不同演替阶段森林土壤APA和AP含量的影响,并探讨了土壤APA和AP含量之间的相关性。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究地区概况

鼎湖山位于广东省肇庆地区境内( $23^{\circ}10' \text{ N}$ ,  $112^{\circ}34' \text{ E}$ ),多为丘陵和低山,海拔在 $100 \sim 700 \text{ m}$ ,最高峰鸡笼山海拔 $1000.3 \text{ m}$ 。该地区属亚热带季风湿润型气候,冬夏气候交替明显,年均气温 $21^{\circ} \text{ C}$ ,最热月7月,最冷月1月。年降水量 $2103 \text{ mm}$ ,雨季为4–9月,年均蒸发量为 $1115 \text{ mm}$ ,年均相对湿度 $82\%$ 。

本研究在鼎湖山生物圈保护区分布的同一演替系列的3种典型性森林中进行,即演替初期的马尾松(*Pinus massoniana*)针叶林(简称马尾松林,PF)、演替中期的马尾松针叶阔叶混交林(简称混交林, MF)和地带性群落季风常绿阔叶林(简称季风林, MEBF)。3种演替群落凋落物年凋落量表现为季风林>混交林>马尾松林,马尾松林凋落物分解速率较季风林迟缓<sup>[8]</sup>。长期N添加试验对3种林型0~10 cm土壤全N、全P、全碳(C)以及C/N没有显著影响,土壤pH值随着N添加的增加而降低<sup>[9]</sup>。3种森林类型的详细描述见表1。

### 1.2 样地设计

2002年10月,在马尾松林、混交林和季风林3个林地分别建立了9、9和12个 $10 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 的N添加长期试验样方,样方内又分为8个 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 的小样方。样方之间留有约 $10 \text{ m}$ 的间隔,以防止互相干扰。马尾松林和混交林分别设置对照、低N和中N3个处理组,季风林设置对照、低N、中N和高N4个处理组,每个处理组3个重复。对照、低N、中N和高N处理分别按 $0, 50, 100, 150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 外加N。2003年7月至2009年3月,每月月初对3个样地进

表1 鼎湖山3种森林类型基本概况

Table 1 Background information of three forest types at Dinghushan Mountain

林型 Forest type	主要植物 Dominant tree species	海拔 Elevation (m)	演替阶段 Succession stage	树龄 Approx age of dominant trees (a)	盖度 Coverage (%)	土壤类型 Soil type	土壤 pH* Soil pH
PF	马尾松 <i>P. massoniana</i> , 黄牛木 <i>Cratogeomys ligustrinum</i> , 三叉苦 <i>Evodia lepta</i>	50 ~ 200	初级 Initial	70	70 ~ 80	赤红壤 Lateritic red soil	3.95
MF	锥栗 <i>Castanopsis chinensis</i> , 荷木 <i>Schima superba</i> , 马尾松 <i>P. massoniana</i>	200	过渡 Transitional	70	80 ~ 90	赤红壤 Lateritic red soil	3.90
MEBF	荷木 <i>S. superba</i> , 锥栗 <i>C. chinensis</i> , 厚壳桂 <i>Cryptocarya chinensis</i>	250 ~ 300	顶极 Climax	400	80 ~ 90	赤红壤 Lateritic red soil	3.84

PF: 马尾松林 *Pinus massoniana* forest; MF: 混交林 Coniferous and broad-leaved mixed forest; MEBF: 季风林 Monsoon evergreen broad-leaved forest. 下同 The same below. \* 土壤 pH 为该试验土样 0~20 cm 土层的平均值 Soil pH was the mean value in 0–20 cm soil layer in this study.

行 N 处理. 方法是根据 N 处理水平, 将每个样方所施的  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  溶解在 20 L 自来水中(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. 对照样方则喷洒同样量的水, 以减少外加水而造成对森林生物地球化学循环的影响<sup>[10]</sup>.

### 1.3 采样与试验方法

2009 年 3 月, 在马尾松林、混交林、季风林的每个样地内进行随机布点采样. 去除土面上覆盖的枯枝落叶, 用内径 2.5 cm 的土钻在每个取样点钻取 3 钻土, 取土深度分别为 0~10 cm 和 10~20 cm, 同一深度的 3 钻土混合为一个土样, 共采集 60 个土样. 将土样分为两部分: 一部分土样立即除去石粒、草根等杂物后过 10 目(2 mm)筛, 保存于 4 °C 的冰箱中, 在 28 d 内分析 APA; 另一部分土样则放至通风干燥处, 剔除石粒、草根等杂物, 自然风干后用滚轴磨碎风干土, 过 10 目筛, 分析 AP 含量.

土壤理化性质的测定方法均按照中国生态系统研究网络观测与分析标准方法进行<sup>[11]</sup>. 含水率用烘干法测定; 土壤 pH 用水土比 2.5 : 1 电位法测定; 土壤 AP 采用盐酸-氟化铵法测定. 土壤 APA 采用 Schneider 等<sup>[12]</sup>针对有机质含量高的森林土壤, 通过改进 Tabatabai 等<sup>[13]</sup>提出的方法来测定.

### 1.4 数据处理

所得数据均采用 SPSS 软件进行分析. 采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较不同林型和 N 处理间的差异, 用 *t* 检验法比较不同土层之间的差异, 用 Pearson 相关系数评价土壤 APA 与 AP 含量之间的相关关系. 显著性水平设定为  $\alpha=0.05$ .

## 2 结果与分析

### 2.1 鼎湖山主要森林类型土壤 APA 和 AP 含量变化

**2.1.1 土壤 APA** 鼎湖山 3 种演替阶段森林土壤 APA 表现出一致的垂直分布规律, 即 0~10 cm 土层的 APA 均高于 10~20 cm 土层. 马尾松林、混交林、季风林 10~20 cm 土层的 APA 分别比 0~10 cm 土层极显著降低了 50%、59% 和 41%. 在 0~10 cm 土层, 季风林土壤 APA 最高, 且与其他 2 种林型差异极显著, 马尾松林与混交林之间差异不显著. 10~20 cm 土层 APA 的变化趋势与 0~10 cm 土层相同(图 1).

**2.1.2 土壤 AP 含量** 3 种林型中, 随着土层加深, AP 含量也在减少, 其中马尾松林和季风林均极显著

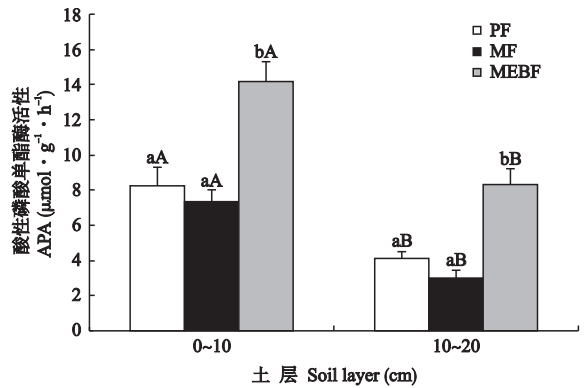


图 1 鼎湖山 3 种森林类型土壤酸性磷酸单酯酶活性

Fig. 1 Soil APA in three forest types at Dinghushan Mountain (mean±SE).

PF: 马尾松林 *Pinus massoniana* forest; MF: 混交林 Coniferous and broad-leaved mixed forest; MEBF: 季风林 Monsoon evergreen broad-leaved forest. 下同 The same below. 同一土层不同小写字母表示林型间差异显著 ( $P<0.05$ ) Different small letters indicated significant differences among forests in the same soil layer at 0.05 level, 不同大写字母表示相同林型不同土层间差异极显著 ( $P<0.01$ ) Different capital letters indicated significant differences between soil layers under the same forest type at 0.01 level.

减少了 31%, 但混交林只减少了 18%, 且差异不显著(表 2). 同一土层各林型之间的 AP 含量差异未达到统计显著水平.

### 2.2 N 沉降对不同森林类型土壤 APA 和 AP 含量的影响

**2.2.1 N 沉降下土壤 APA** 由图 2 可以看出, N 添加处理对马尾松林和混交林土壤 APA 产生了显著影响, 随着 N 添加量的增加, 土壤 APA 随之升高. 在马尾松林中, 0~10 cm 土层中 N 处理的 APA 最高, 为  $12.74 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ , 10~20 cm 土层中对照最低, 为  $4.12 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ; 混交林的 APA 在  $3.01 \sim 11.02 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ . N 添加处理对季风林 0~10 cm 土层 APA 没有显著影响, 其最高活性 ( $19.52 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ) 出现在低 N 处理; 而 10~20 cm 土层 APA 也在低 N 下最高, 且显著高于其他处理.

**2.2.2 N 沉降下土壤 AP 含量** 加 N 处理下, 3 种森林类型土壤 AP 含量表现为低 N 下最高, 但各加 N 处理之间的差异并不显著(表 3).

表 2 鼎湖山 3 种森林类型土壤有效磷含量

Table 2 Soil AP content in three forest types at Dinghushan Mountain (mean±SE,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

土层深度 Soil depth (cm)	森林类型 Forest type		
	PF	MF	MEBF
0~10	1.81±0.12b	1.63±0.12a	1.93±0.10b
10~20	1.24±0.09a	1.33±0.14a	1.33±0.08a

同列不同字母表示差异极显著 ( $P<0.01$ ) Different letters indicated significant differences in the same column at 0.01 level.

表3 氮添加对不同森林类型土壤有效磷含量的影响

Table 3 Effects of N addition on soil AP content in different forest types (mean±SE, mg·kg<sup>-1</sup>)

处理 Treatment	PF		MF		MEBF	
	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm
对照 CK	1.50±0.05a	1.53±0.37a	1.63±0.32a	1.35±0.29a	1.57±0.13a	1.25±0.08a
低 N LN	2.08±0.20a	1.34±0.23a	1.75±0.26a	1.44±0.48a	2.11±0.28a	1.34±0.28a
中 N MN	1.85±0.20a	1.18±0.13a	1.56±0.09a	1.24±0.08a	2.03±0.08a	1.41±0.16a
高 N HN	-	-	-	-	2.01±0.15a	1.33±0.15a

同列不同字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different letters indicated significant difference in the same column at 0.05 level.

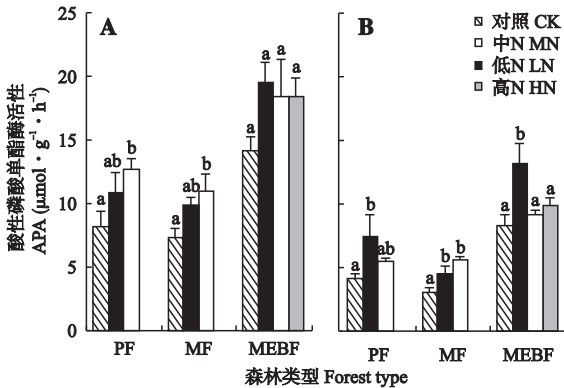


图2 氮添加对不同森林类型土壤酸性磷酸单酯酶活性的影响

Fig. 2 Effects of N addition on soil APA in different forest types (mean±SE).

A: 0~10 cm 土层 0~10 cm soil layer; B: 10~20 cm 土层 10~20 cm soil layer. 同一林型不同字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different letters indicated significant differences among N addition treatments of the same forest at 0.05 level.

### 2.3 鼎湖山主要森林类型土壤 APA 与 AP 含量的关系

对 3 种林型土壤 APA 与 AP 含量进行相关性分析,结果表明,鼎湖山主要森林类型土壤 APA 与 AP 含量之间的决定系数  $R^2$  为 0.259,超过  $n = 60$  时的  $R^2$  为 0.250,呈显著正相关关系(图 3)。

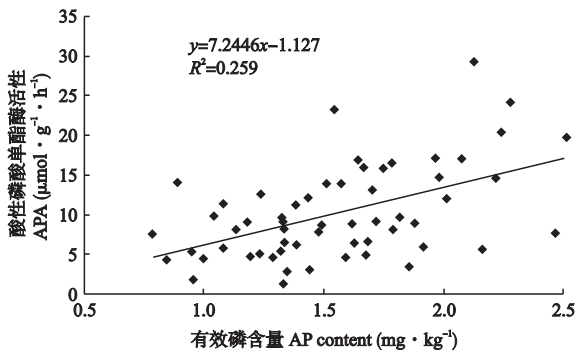


图3 鼎湖山 3 种森林类型土壤酸性磷酸单酯酶活性与有效磷含量的相关关系

Fig. 3 Correlation between soil APA and AP content in three forest types at Dinghushan Mountain.

## 3 讨论

### 3.1 不同森林类型中土壤 APA 和 AP 含量变化

本研究结果表明,3 种林型的土壤 APA 和 AP 含量与土层深度密切相关,随土层深度的增加而呈降低趋势.这与前人研究结果一致<sup>[14-16]</sup>.由于土壤酶主要来源于植物根系分泌物、土壤微生物及动植物残体的分解释放过程<sup>[17]</sup>,AP 含量主要由植物凋落物和土壤有机质分解所提供<sup>[18]</sup>.而在该地区浅层土壤中,微生物较活跃<sup>[19]</sup>,有机质含量较高<sup>[20]</sup>,P 来源较丰富,因此浅层土壤 APA 和 AP 含量较深层土壤高.这进一步证实了浅层土壤是森林生态系统中物质循环和能量流动最活跃的生态界面。

季风林中的 APA 显著高于马尾松林和混交林.这可能与季风林拥有较高的植物多样性和更多的微生物数量<sup>[21]</sup>有关.因为植物种类和组成不同,其根系分泌物和枯落物的质和量也不同,从而可能引起土壤酶活性的差异.杨万勤等<sup>[22]</sup>的研究支持了此观点.他们发现,不同演替阶段的森林生态系统的植物多样性与土壤酸性磷酸酶活性呈显著正相关。

随着森林演替,土壤 AP 含量的差异并没有达到统计显著水平.这与黄文娟等<sup>[16]</sup>对鼎湖山 5 种森林土壤 AP 含量的研究结果相同.分析其原因,可能与鼎湖山森林土壤本身存在 P 限制<sup>[2]</sup>有关.在自然生态系统中,在较短的时间内,AP 的主要来源是土壤有机质,短期的 P 迁移、转化、贮存是由生物(植物与微生物)因素控制的.低 P 胁迫时,植物会通过一系列的生理、生化及形态上的变化来提高 P 的吸收和利用效率<sup>[23]</sup>,而土壤微生物为了维护其自身生存也会固持一部分无机 P<sup>[24]</sup>.虽然季风林和混交林中有有机质含量较高,但植物生物量和微生物生物量较大,对 P 的需求也大.在长期低 P 状态下,微生物对 P 的固持作用也可能加大,从而降低了土壤 P 的有效性,导致 3 种林型之间的差异不显著.这种现象的具体机理还有待进一步研究。

### 3.2 N 沉降对土壤 APA 和 AP 含量的影响

本研究结果表明,随着 N 沉降增加,马尾松林和混交林中土壤磷酸酶活性提升. Carreiro 等<sup>[25]</sup>认为,N 沉降增加可以提高凋落物分解过程中土壤磷酸酶活性; Saiya-Cork 等<sup>[26]</sup>发现,随着 N 沉降的增加,土壤中磷酸酶的活性亦明显增加;涂利华等<sup>[27]</sup>也发现氮沉降增加了苦竹林土壤酸性磷酸酶活性. 因此,N 沉降增加使土壤磷酸酶活性提高,将有助于含 P 有机物的分解,提高土壤 P 的有效性,有利于缓解土壤 P 限制的问题.

在季风林中,N 沉降增加对土壤 APA 的作用与马尾松林、混交林不同. 适度 N 沉降有利于季风林土壤 APA 升高. 这可能是由于不同林型中凋落物化学组成不同而造成的<sup>[28]</sup>. 在季风林中,阔叶凋落物较多,土壤中含有较多的 N、P、K 等营养元素,C/N 低,有利于土壤微生物的活动和繁衍;而在马尾松林和混交林中,针叶含量较大,N、P、K 等营养元素浓度较低,C/N 较高,不利于土壤微生物生长<sup>[29]</sup>. 所以当有外源 N 时,季风林会首先达到 N 饱和,并抑制微生物生长,从而影响土壤 APA,使最高活性出现在低 N 处理上.

3 种森林类型土壤均表现为低 N 处理下 AP 含量最高. 这可能与低 N 处理下土壤中的磷酸酶活性增强从而提高了土壤 P 有效性有关. 适度的 N 沉降可以增加森林的生产力,促进了林地养分 AP 含量的增加,但当 N 输入超过生态系统对 N 的需求时就会抑制其生产力,使林地 AP 含量下降<sup>[30]</sup>,即生态系统存在 N 临界点问题. 在本试验中,低 N 处理明显增强了土壤 APA,提高了土壤 AP 含量. 这为在南方低 P 土壤上进行森林资源的保护、利用和管理提供了科学依据.

### 3.3 土壤 APA 与 AP 含量之间的相关性

土壤 APA 与 AP 含量呈显著正相关关系. 国际上有关磷酸酶活性与 AP 的关系尚且存在争议. 有研究者表明,由于磷酸酶是一种诱导酶,受产物抑制的调节作用,因此,高的磷酸单酯酶活性表明土壤低的 AP 含量<sup>[31]</sup>;而 Schneider 等<sup>[12]</sup>发现,西班牙西部森林土壤的 APA 很高,但与 AP 含量之间的相关性不显著;也有研究者发现,在磷含量高的样地中,磷酸酶的活性最高<sup>[32]</sup>. 这些结果可能与土壤类型有关. 此外,有研究指出,AP 含量超过  $20 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$  时,磷酸酶活性便下降;当  $\text{P}_2\text{O}_5$  增加到  $60 \sim 80 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$  时,则检测不到磷酸酶活性<sup>[17]</sup>. 由于鼎湖山地区土壤 AP 含量低,所以在营林过程中人

工林施磷肥可使磷酸酶活性增强,有利于增强土壤 P 的有效性. 但 K/P 值、C/P 值和 N/P 值不适也会引起磷酸酶活性减弱<sup>[17]</sup>,因此在人工林的经营上应注意复合肥的合理使用.

### 参考文献

- [1] Vitousek PM. Litterfall, nutrient cycling, and nutrient limitation in tropical forests. *Ecology*, 1984, **65**: 285–298
- [2] Mo J-M (莫江明), Zhang D-Q (张德强), Huang Z-L (黄忠良), et al. Distribution pattern of nutrient elements in plants of Dinghushan lower subtropical evergreen broad-leaved forest. *Journal of Tropical and Subtropical Botany* (热带亚热带植物学报), 2000, **8** (3): 198–206 (in Chinese)
- [3] Turner BL, Baxter R, Whitton BA. Seasonal phosphatase activity in three characteristic soils of the English uplands polluted by long-term atmospheric nitrogen deposition. *Environmental Pollution*, 2002, **120**: 313–317
- [4] Dezi S, Medlyn BE, Tonon G, et al. The effect of nitrogen deposition on forest carbon sequestration: A model-based analysis. *Global Change Biology*, 2010, **16**: 1470–1486
- [5] Papanikolaou N, Britton AJ, Helliwell RC, et al. Nitrogen deposition, vegetation burning and climate warming act independently on microbial community structure and enzyme activity associated with decomposing litter in low-alpine heath. *Global Change Biology*, 2010, **16**: 3120–3132
- [6] Janssens IA, Dieleman W, Luyssaert S, et al. Reduction of forest soil respiration in response to nitrogen deposition. *Nature Geoscience*, 2010, **3**: 315–322
- [7] Fang YT, Gundersen P, Mo JM, et al. Input and output of dissolved organic and inorganic nitrogen in subtropical forests of South China under high air pollution. *Biogeochemistry*, 2008, **5**: 339–352
- [8] Yan J-H (闫俊华), Zhou G-Y (周国逸), Tang X-L (唐旭利), et al. Characteristics of litter and its contained water in three succession communities in Dinghushan Mountain. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2001, **12** (4): 509–512 (in Chinese)
- [9] Lu XK, Mo JM, Gundersen P, et al. Effect of simulated N deposition on soil exchangeable cations in three forest types of subtropical China. *Pedosphere*, 2009, **19**: 189–198
- [10] Mo JM, Brown S, Xue JH, et al. Response of litter decomposition to simulated N deposition in disturbed, rehabilitated and mature forests in subtropical China. *Plant and Soil*, 2006, **282**: 135–151
- [11] Liu G-S (刘光崧), Jiang N-H (蒋能慧), Zhang L-D (张连第), et al. Soil Physical and Chemical Analysis & Description of Soil Profiles. Beijing: China Standards Press, 1996 (in Chinese)
- [12] Schneider K, Turrión MB, Gallardo JF. Modified meth-

- od for measuring acid phosphatase activities in forest soils with high organic matter content. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2000, **31**: 3077–3088
- [13] Tabatabai MA, Bremner JM. Use of *p*-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity. *Soil Biology & Biochemistry*, 1969, **1**: 301–307
- [14] Zhang YM, Wu N, Zhou GY, *et al.* Changes in enzyme activities of spruce (*Picea balfouriana*) forest soil as related to burning in the eastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Applied Soil Ecology*, 2005, **30**: 215–225
- [15] Venkatesan S, Senthurpandian VK. Comparison of enzyme activity with depth under tea plantations and forested sites in south India. *Geoderma*, 2006, **137**: 212–216
- [16] Huang W-J (黄文娟), Liu J-X (刘菊秀), Tang X-L (唐旭利), *et al.* Inorganic nitrogen and available phosphorus concentrations in the soils of five forests at Dinghushan, China. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology* (应用与环境生物学报), 2009, **15** (4): 441–447 (in Chinese)
- [17] Guan S-Y (关松荫). Soil Enzyme and Its Research Methods. Beijing: China Agriculture Press, 1986 (in Chinese)
- [18] Chapin FS, Matson PA, Mooney HA. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. New York: Springer-Verlag, 2002
- [19] Yi Z-G (易志刚), Yi W-M (蚁伟民), Ding M-M (丁明懋), *et al.* Vertical distribution of soil organic carbon, soil microbial biomass and soil CO<sub>2</sub> concentration in Dinghushan Biosphere Reserve. *Ecology and Environment* (生态环境), 2006, **15** (3): 611–615 (in Chinese)
- [20] Chen Q-Q (陈庆强), Shen C-D (沈承德), Sun Y-M (孙彦敏), *et al.* Spatial and temporal differentiation of mountainous soil organic matter δ<sup>13</sup>C in Dinghushan Biosphere Reserve. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16** (3): 1077–1081 (in Chinese)
- [21] Yi Z-G (易志刚), Yi W-M (蚁伟民), Zhou L-X (周丽霞), *et al.* Soil microbial biomass of the main forests in Dinghushan Biosphere Reserve. *Ecology and Environment* (生态环境), 2005, **14** (5): 727–729 (in Chinese)
- [22] Yang W-Q (杨万勤), Zhong Z-C (钟章成), Tao J-P (陶建平), *et al.* Study of relationship between soil enzymic activities and plant species diversity in forest ecosystem of Mt. Jinyun. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2001, **37** (4): 124–128 (in Chinese)
- [23] Zhao Q (赵琼), Zeng D-H (曾德慧). Phosphorus cycling in terrestrial ecosystems and its controlling factors. *Acta Phytoecologica Sinica* (植物生态学报), 2005, **29** (1): 153–163 (in Chinese)
- [24] Huang M (黄敏), Wu J-S (吴金水), Huang Q-Y (黄巧云), *et al.* Process in research on microbiological action of soil phosphorus. *Ecology and Environment* (生态环境), 2003, **12** (3): 366–370 (in Chinese)
- [25] Carreiro MM, Sinsabaugh RL, Repert DA, *et al.* Microbial enzyme shifts explain litter decay responses to simulated nitrogen deposition. *Ecology*, 2000, **81**: 2359–2365
- [26] Saiya-Cork KR, Sinsabaugh RL, Zak DR. The effects of long term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an *Acer saccharum* forest soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, **34**: 1309–1315
- [27] Tu L-H (涂利华), Hu T-X (胡庭兴), Zhang J (张建), *et al.* Soil enzyme activities in a *Pleioblastus amurus* plantation in Rainy Area of West China under simulated nitrogen deposition. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20** (12): 2943–2948 (in Chinese)
- [28] Zhao Y-T (赵玉涛), Li X-F (李雪峰), Han S-J (韩士杰), *et al.* Soil enzyme activities under two forest types as affected by different levels of nitrogen deposition. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19** (12): 2769–2773 (in Chinese)
- [29] Xiao C-Y (肖慈英), Ruan H-H (阮宏华), Tu L-B (屠六邦). Biological characteristics of different forests soils in Nanjing-Zhenjiang mountain area. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2002, **13** (9): 1077–1081 (in Chinese)
- [30] Magill AH, Aber JD, Berntson GM, *et al.* Long-term nitrogen additions and nitrogen saturation in two temperate forests. *Ecosystems*, 2000, **3**: 238–253
- [31] Allison SD, Vitousek PM. Responses of extracellular enzymes to simple and complex nutrient inputs. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, **37**: 937–944
- [32] Olander LP, Vitousek PM. Regulation of soil phosphatase and chitinase activity by N and P availability. *Biogeochemistry*, 2000, **49**: 175–190

---

作者简介 李银,女,1987年生,硕士研究生.主要从事森林生态学研究. E-mail: liyin@scbg.ac.cn

责任编辑 李凤琴

---