

热带亚热带常绿阔叶林维持酸性土壤 有效磷水平的磷转化过程

陈建会^{1,3}, 邹晓明^{1,2,*}, 杨效东¹

(1. 中国科学院西双版纳热带植物园, 昆明 650223; 2. Institute for Tropical Ecosystem Studies, University of Puerto Rico, P.O. Box 23341, San Juan, PR 00936, USA; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 热带和亚热带酸性土壤磷矿物的沉淀通常被认为会限制土壤有效磷的供应。选择以西双版纳山地季风常绿阔叶林和哀牢山中山湿性常绿阔叶林为代表的热带亚热带酸性土壤, 探讨两类森林维持土壤有效磷水平的磷转化过程。哀牢山中山湿性常绿阔叶林腐殖质厚, 而西双版纳山地季风常绿阔叶林的腐殖质几乎不存在。两地均显示土壤有效磷库随着土壤有机质含量的减少而降低。有机质含量较低的两双版纳表层矿质土(0~10 cm)的微生物生物量磷库大于有机质含量相对较高的哀牢山表层矿质土的微生物生物量磷库, 且微生物对磷的固定占有有效磷来源(磷矿物的溶解和有机磷的矿化)的比例为 74%, 高于哀牢山表层矿质土的 63%。哀牢山表层矿质土的土壤有效磷库大于西双版纳, 其土壤有效磷库可能更多的依赖于覆盖于其上的腐殖质分解后向下的磷输入。与两地的矿质土相比, 哀牢山腐殖质具有高的磷净溶解率、总有机磷矿化速率和磷微生物固定速率。结果表明, 热带山地季风常绿阔叶林主要通过微生物固定来避免土壤磷矿物的沉淀和保持土壤磷的有效供应; 而亚热带中山湿性常绿阔叶林除具有较高的微生物固定外, 地表腐殖质层的存在也帮助避免土壤磷矿物的沉淀而保持土壤有效磷的供应。

关键词: 磷生物地球化学; 磷库; 磷矿化; 磷微生物固定; 哀牢山; 西双版纳

文章编号: 1000-0933(2006)07-2294-07 **中图分类号:** **文献标识码:** A

Retention of plant available P in acid soils of tropical and subtropical evergreen broad-leaved forests

CHEN Jian-Hui^{1,3}, ZOU Xiao-Ming^{1,2,*}, YANG Xiao-Dong¹ (1. Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223, China; 2. Institute for Tropical Ecosystem Studies, University of Puerto Rico, P.O. Box 23341, San Juan, PR 00936, USA; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(7): 2294 ~ 2300.

Abstract: Mineral phosphate precipitation is often recognized to limit the availability of phosphorus in acid soils of tropical and subtropical forests. We studied extractable phosphorus pools and transformation rates in soils of a tropical evergreen forest at Xishuangbanna and a subtropical montane wet forest at the Ailao Mountains in order to understand biogeochemical processes that regulate phosphorus availability in acid soils. The two forests differ in forest floor-mass with a deep humus layer in the Ailao forest and little presence of humus materials in the Xishuangbanna forest. Resin and sodium-bicarbonate extractable phosphorus pools decreased when soil organic carbon content was low. The lowest levels of extractable P pools occurred in surface (0~10 cm) mineral soils of the Xishuangbanna forest. However, microbial P in the mineral soil of the Xishuangbanna forest was twice that in

基金项目: 云南省自然科学基金资助项目(200100C0063M, 2005C0056M)

收稿日期: 2006-03-15; **修订日期:** 2006-05-31

作者简介: 陈建会(1980~), 男, 河南辉县人, 硕士生, 主要从事土壤生态学研究. E-mail: chenjh@xtbg.ac.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xzou2000@yahoo.com

致谢 实验征得哀牢山国家自然保护区相关单位的同意, 得到中国科学院哀牢山森林生态定位研究站的大力协助, 在此表示感谢; 借此机会向提供资助的王宽诚先生、西双版纳热带植物园的沙丽清副研究员、冯志立助理研究员、陈安潜博士、李明锐、冯文婷、何云玲, 在室内实验中给予帮助的西双版纳热带植物园生物地球化学实验室的付响高级工程师及工作人员, 在野外取样工作中给予帮助的杨文争、李乔顺表示诚挚的谢意

Foundation item: The project was supported by Natural Science Foundation of Yunnan Province (No. 200100C0063M, 2005C0056M)

Received date: 2006-03-15; **Accepted date:** 2006-05-31

Biography: CHEN Jian-Hui, Master candidate, mainly engaged in soil ecology. E-mail: chenjh@xtbg.ac.cn

the Ailao forest. Potential rates of microbial P immobilization were greater than those of organic P mineralization in mineral soils for both forests. Our data suggest that microbial P immobilization plays an essential role in avoiding mineral P precipitation and retain plant available P in tropical acid soils, whereas both floor mass accumulation and microbial P immobilization function to retain plant available P in subtropical montane wet forests.

Key words: Ailao Mountains; phosphorus pools; phosphorus microbial immobilization; phosphorus mineralization; phosphorus pools; Xishuangbanna

磷在热带亚热带土壤中普遍缺乏,常常被认为是生态系统生产力的限制因子之一。当土壤 $\text{pH} \leq 5$ 时,土壤溶液中的无机磷极易与含水的 Fe、Al、Mg 氢氧化合物及 Fe、Al、Mn 离子形成不溶性的磷化合物沉淀,影响到森林生态系统中磷的正常生物地球化学循环^[1]。土壤微生物通过分泌胞外酶将有机质分解为简单的分子状态,并吸收利用^[2]。1995 年邹晓明等^[3]发表的一组热带磷转化数据显示微生物固定了土壤中溶解磷的 23.2% ~ 37.7%。2001 年赵小蓉等^[4]实验发现某些微生物在矿化磷过程中体内储存了大量的无机磷,形成类似液泡的结构。微生物不仅参与磷的矿化,而且还要固定可溶性无机磷为有机磷或者直接储存可溶性无机磷。土壤中微生物生物量磷是植物磷素营养的活性库^[5-9]。土壤中微生物生物量磷的多少及其循环速率的快慢也直接影响森林生态系统的生产力^[10]。热带和亚热带森林具有较高的生产力的事实说明微生物生物过程在保证热带和亚热带土壤有效磷的供应中起着重要作用^[11,12]。

热带山地季风和亚热带中山湿性常绿阔叶林虽然地处不同气候带,所表现的磷转化过程也不尽相同,但两地同为酸性土壤。热带山地季风常绿阔叶林因水热条件好,凋落物分解快,土壤表层的腐殖质稀少;而亚热带中山湿性常绿阔叶林夏暖冬凉,凋落物分解较为缓慢,地表腐殖质积累较厚。虽然土壤磷含量受到海拔高度和植被等因素的影响^[13],森林地表腐殖质的存在与否也可直接影响磷的生物地球化学循环。本研究选定哀牢山中山湿性常绿阔叶林和西双版纳山地季风常绿阔叶林中的酸性土壤,比较研究磷的转化机制。以阐明其维持植物有效磷水平的磷转化机制。研究结果还将对两类森林的保护管理具有一定的指导意义。

1 材料和方法

1.1 研究样地

(1) 哀牢山中山湿性常绿阔叶林样地^[14]位于哀牢山西坡徐家坝地区,24°32'N,101°01'E,海拔 2476 m。年平均降雨量达 1931 mm,年均温度为 11.3 °C,最热月(7 月份)平均温度是 15.6 °C,最冷月(1 月份)平均温度低至 5.4 °C。全年分为明显的干湿两季,湿季 5 月至 10 月份,干季 11 月至翌年 4 月份,年平均相对湿度 86%。样地林木密度 2728 株 hm^{-2} ,乔木层树木平均胸径 12 cm,群落高 25 m,群落乔木胸高断面面积为 56.4 $\text{m}^2 \text{hm}^{-2}$ 。优势种主要有景东石栎(*Lithocarpus chintungensis*)、薄叶马银花(*Rhododendron leptothrium*)、乌饭(*Vaccinium duclouxii*)、木果石栎(*Lithocarpus xylocarpus*)、腾冲栲(*Castanopsis wattii*)、滇木荷(*Schima noronhae*),还有舟柄茶(*Hartia sinensis*)、红花木莲(*Manglietia insignis*)、绿叶润楠(*Machilus viridis*)、南亚枇杷(*Eriobotrya bengalensis*)、绿背石栎(*Lithocarpus hipovirides*)、大花八角(*Illicium macranthum*)、细果冬青(*Ilex sp.*)等,林下主要以箭竹为主。土壤类型为山地黄棕壤,酸性, $\text{pH} \leq 5$ 。

(2) 西双版纳热带山地季风常绿阔叶林^[15]样地位于 21°105'N,101°12'E。海拔达 800 ~ 900 m。年平均降雨量为 1557 mm,全年干湿季分明,年平均相对湿度为 86%,年平均气温 21.5 °C,最热月(5 月份)均温为 25.3 °C,最冷月(1 月份)均温为 15.5 °C。主要树种包括小果栲(*Castanopsis fleuryi*)、颠银柴(*Aporosa yunnanensis*)、红木荷(*Schima wallichii*)、湄公栲(*Castanopsis menkongensis*)、截头石栎(*Lithocarpus truncates*)、银叶栲(*Castanopsis argyrophylla*)、杯斗栲(*Castanopsis calathiformis*)、红皮水锦(*Wendlandia tinctoria*)、毛黄杞(*Engelhardtia roxburghiana*)、黄牛木(*Cratogeomys cochinchinensis*)、柴龙树(*Apodytes dimidiata*)、颠南插柚柴(*Linociera insignis*)、窄序岩豆树(*Millettia leptobotrya*)、野毛柿(*Diospyros kaki var. sylvestris*)、华南石栎(*Lithocarpus fenestratus*)、海南蒲桃(*Syzygium sp.*)、紫金牛(*Ardisia sp.*)、红花木樨榄(*Olea rosea*)、小叶藤黄(*Carcinia cowa*)、艾胶树(*Glochidion*

lanceolarius)、倒卵黄肉楠(*Actinodaphne obovata*)等。土壤为砖红壤,强酸性, $\text{pH} \leq 4.5$ 。

1.2 研究方法

1.2.1 取样方法 取样时间 2004 年 8 月初。在每样地中各随机选取 5 个取样点,相距 5 m 以上,分别取腐殖质层和 0~10 cm 矿质土层,其中西双版纳样地中几乎不存在腐殖质只取 0~10 cm 矿质土。腐殖质用 $25 \times 25 \text{ cm}^2$ 取样筐,矿质土层用直径 5 cm,长 10 cm 的土壤环刀取样。每个样品即刻称重,放入自封袋中带回实验室。所有土壤样品过 2 mm 土壤筛,去除 > 2 mm 的根和石块,封入自封袋中常温放置待测。

1.2.2 实验方法

(1)阴离子树脂提取的有效无机磷^[3,16] 称 1.75 g 鲜土放入 50 ml 塑料瓶中,同时放入一个阴离子树脂交换袋和 30 ml 去离子水。在振荡器上以高速振荡 1h 后,将阴离子树脂交换袋取出。阴离子树脂交换袋和塑料瓶用去离子水冲洗干净,然后阴离子树脂交换袋放回塑料瓶中加 30 ml $0.5 \text{ mol L}^{-1} \text{ HCl}$ 在振荡器上以高速振荡 1h,萃取树脂吸附的磷。萃取液用来分析阴离子提取的有效无机磷。

(2) NaHCO_3 提取的有效无机和有机磷^[3,8] 称 1.75 g 鲜土放入 50 ml 塑料瓶中,加入 30 ml $0.5 \text{ mol L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ ($\text{pH} = 8.5$)。在振荡器上以高速振荡 1h,然后过滤上清液用来测定 NaHCO_3 提取的有效无机磷。另取上清液 5 ml 加入酸化的过(二)硫酸铵氧化,测定氧化后溶液中磷的含量。两者之差即为 NaHCO_3 提取的有机磷。

(3)微生物生物量磷的测定^[17] 称取两份 10 g 鲜土,分别装入 100 ml 塑料瓶中,其中一份放入装有氯仿的可抽气干燥器中,抽气直到氯仿沸腾,关闭气阀培养 24h,另一份土样放入同样规格的干燥器中,不加氯仿密闭培养 24h。熏蒸培养后加 Bray^{-1} 浸提剂(土液比 1:4),振荡提取 30 min,滤液用来测定微生物生物量磷(P_{mic})。 $P_{\text{mic}} = E_p / 0.4$, 其中 E_p = 熏蒸土壤磷含量 - 未熏蒸土壤磷含量。

(4)磷转化速率的测定^[3,16] 每个土样取 3 份鲜土,每份 2.5 g,分别装入 0.25L 聚乙烯袋中。其中 1 份土样作为对照;另 2 份用⁶⁰Co (2 Kgy h^{-1})在室温 25°C 下照射 10h,然后将样品翻转再照射 5h,以达到灭菌的效果。将 3 份样品分别移入 250 ml 长颈瓶中,其中 1 份被辐射过的样品在 120°C , 2.12 MPa 条件下灭菌锅内处理 5 min 以解除酶的活性。加 0.5 ml 甲苯到 2 份被照射过的样品中,以抑制微生物的生长。每个样品加 2 个阴离子树脂交换袋(规格同上)及 50 ml 去离子水。所有的样品在旋转的摇床上有氧条件下以 100 r/min 振荡 24h。取出阴离子交换袋,用 30 ml $0.5 \text{ mol L}^{-1} \text{ HCl}$ 萃取,萃取液用钼锑抗比色法分析磷含量。修正值:对照、放射性照射、放射性照射加高温灭活酶 3 种处理的样品分别取 4 份,每份 1.75 g。用阴离子交换袋加 30 ml 去离子水浸泡 1h,再用去离子水将阴离子交换袋和离心管冲洗干净,然后用 30 ml $0.5 \text{ mol L}^{-1} \text{ HCl}$ 萃取,钼锑抗比色法分析。同样的方法测定放射性照射放射性照射后加 0.5 ml 甲苯加 0.5 ml 甲苯对照的样品,相应的磷含量的差值即为处理的修正值。此实验中各个处理对土壤磷含量没有影响,故各修正值均为零。磷转化速率的计算公式如下:

$$\text{有机磷矿化速率 } P_{\text{gm}} = (P_r - P_{\text{ra}}) / t$$

$$\text{微生物固定磷速率 } P_{\text{im}} = (P_r - P_c) / t$$

$$\text{无机磷净溶解率 } P_{\text{ns}} = P_{\text{ra}} / t$$

式中, P_r 为辐照处理样品 1 d 培养后测定的磷量; P_{ra} 为辐照后高压灭活酶的样品 1 d 培养后测定的磷量; P_c 为对样品培养 1 d 后测定的磷量; $t = 1 \text{ d}$; 磷转化速率单位为 $\text{mg P kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$

(5)酸性磷酸酶活性^[18] 称取 1g 鲜土置于 50 ml 三角瓶中,加入 0.5 ml 甲苯(以使土壤湿润为宜)放置 15 min。然后,加入 10 ml 苯磷酸二钠溶液和 10 ml 醋酸盐缓冲液($\text{pH} = 5.0$),仔细混合。将反应混合物置于 40°C 恒温培养箱中,培养 24 h。培养结束后,将悬浮液用致密滤纸过滤至 100 ml 容量瓶中,定容。分取 1 ml 于 100 ml 容量瓶中显色定容,578 nm 波长比色测定,单位表示为: $\text{mg phenol kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 。

(6)阴离子树脂交换袋的制备 称取 1g Cl^- 阴离子交换树脂放入尼龙袋中($2 \times 3 \text{ cm}^2$, 100 目尼龙布, 1g Cl^- 阴离子交换树脂——强碱性阴离子交换树脂 201×7 交换量 ≥ 3.2)。磷的测定用钼锑抗比色法,单位为

mg P kg⁻¹干土。统计方法用单因素方差分析(SPSS11.0)。

2 结果

2.1 P 库

两类森林的有效磷库明显不同,阴离子树脂提取的有效无机磷(Pi)和碳酸氢钠提取的有效无机磷(Pi)和有机磷(Po)在哀牢山腐殖质层中含量最高,哀牢山表层矿质土层次之,含量最低为西双版纳表层矿质土层。哀牢山腐殖质层的阴离子树脂提取 Pi 是哀牢山表层矿质土阴离子树脂提取 Pi 的 6~7 倍,是西双版纳表层矿质土的 10 倍以上,同样碳酸氢钠提取的 Pi 也有相同的规律。而碳酸氢钠提取的 Po,哀牢山腐殖质层仅为哀牢山表层矿质土的 2~3 倍,为西双版纳表层矿质土的 6~7 倍。土壤中微生物生物量磷是土壤中水溶性无机磷的 1.2~13 倍,水溶性无机磷含量最低的两双版纳表层矿质土的微生物生物量磷是哀牢山表层矿质土的两倍(图 1,表 2)。

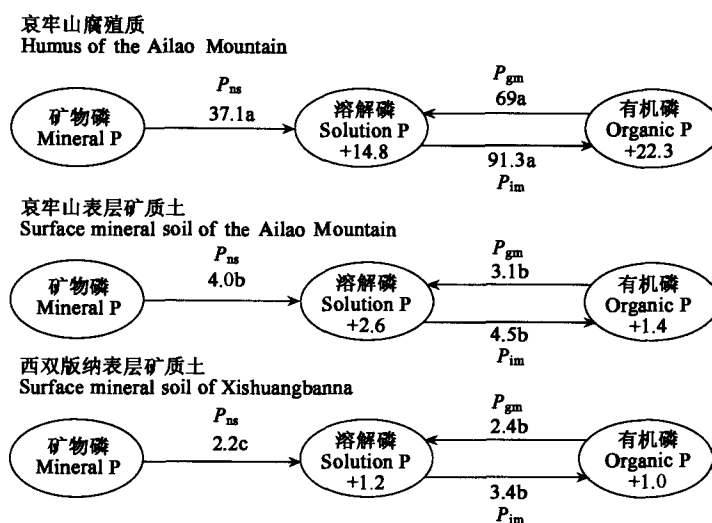


图 1 哀牢山和西双版纳常绿阔叶林中的腐殖质与表层 0~10cm 矿质土的磷转化

Fig. 1 Phosphorus transformations in humus and 0~10 cm mineral soil in forests of Ailao Mountain and Xishuangbanna

P_{ns} 磷净溶解速率 net phosphorus solubilization rate, P_{gm} 磷的总矿化速率 gross phosphorus mineralization rate, P_{im} 磷的微生物固定速率 microbial phosphorus immobilization rate; 溶解磷变化量 Changes in Solution P = $P_{ns} + P_{gm} - P_{im}$, 有机磷变化量 Changes in organic P = $P_{im} - P_{gm}$ (mg P kg⁻¹ d⁻¹); 不同字母表示不同土壤之间差异显著 ($\alpha = 0.05$) Different letters indicate significant difference among the three soil types ($\alpha = 0.05$)

2.2 磷转化速率

磷潜在转化速率在两类森林土壤中明显不同,哀牢山腐殖质有最高的磷净溶解率、总有机磷矿化速率和磷固定速率,其他两种土壤均低于哀牢山腐殖质,其中哀牢山表层矿质土的磷净溶解率要高于西双版纳表层矿质土。两类森林土壤中,微生物的磷固定速率或多或少都大于总有机磷矿化速率。哀牢山表层矿质土中总有机磷矿化速率小于磷净溶解率,而哀牢山腐殖质和西双版纳表层矿质土则相反。西双版纳表层矿质土微生物对磷的固定占有有效磷来源(磷矿物的溶解和有机磷的矿化)的比例为 74%,高于哀牢山表层矿质土的 63%。潜在的磷转化时间(NaHCO_3 提取的有机磷/潜在微生物磷固定速率),两类森林土壤都小于 1d,其中哀牢山腐殖质潜在磷转化时间最短。

2.3 酸性磷酸酶活性

哀牢山腐殖质层酸性磷酸酶活性最大达到了 47.74 mg phenol kg⁻¹ d⁻¹是哀牢山表层矿质土的 2 倍,是西双版纳表层矿质土的 4 倍(图 2)。

3 讨论

自然界植物有效磷的主要来源为土壤有机磷的矿化。在酸性土壤中,经矿化所产生的游离无机磷或被植

物吸收、或被微生物固定、或被土壤中的铁铝离子及其氧化物和氢氧化物结合形成难溶性的磷酸盐沉淀物。如要保证植物有效磷的来源,则必需在最大程度上减少铁铝离子及其化合物对土壤中游离无机磷的固定。在哀牢山的常绿阔叶林中,磷一方面因有机质的分解缓慢而储存于地表凋落物中,另一方面因微生物的潜在磷固定速率高于有机磷的矿化速率而避免了形成难溶性的磷酸盐沉淀物。有机质含量较低的西双版纳表层矿质土(0~10 cm)的微生物生物量磷库大于有机质含量相对较高的哀牢山表层矿质土的微生物生物量磷库,且微生物对磷的固定占有有效磷来源(磷矿物的溶解和有机磷的矿化)的比例为 74%,高于哀牢山表层矿质土(63%),哀牢山和西双版纳常绿阔叶林的地表凋落物分别为 $34.71\text{ t hm}^{-2[19]}$ 和 7.16^* t hm^{-2} 。由于凋落物量较少,并且养分丰富的腐殖质层几乎不存在,富含铁铝矿物的西双版纳砖红壤极易与 PO_4^{3-} 形成沉淀。不同于哀牢山的常绿阔叶林,西双版纳的常绿阔叶林主要是通过微生物的磷固定来避免难溶性磷酸盐沉淀物的形成。

哀牢山温湿的气候条件下形成的山地黄棕壤,腐殖质层和表层矿质土的 pH 分别为 4.5 和 4.2。西双版纳湿热条件下在山地季风常绿阔叶林下形成了砖红壤,由于凋落物分解强烈,地表几乎没有腐殖质,表层矿质土的 pH 为 4.5。酸性土壤($\text{pH} < 5.5$)中较高 pH 值意味着较高的矿物磷溶解率^[1]。西双版纳表层矿质土 pH 大于哀牢山表层矿质土,但是矿物磷溶解率哀牢山表层矿质土大于西双版纳表层矿质土(图 1),可能的原因是淋溶强烈的砖红壤中全磷量较低(表 1),抵消了高 pH 对矿物磷溶解率的提高。另一个影响矿物磷溶解的重要因素是有机质含量,有机螯合物对土壤中矿物磷的溶解起着关键作用^[3],哀牢山表层矿质土有机质含量高于西双版纳表层矿质土,也是决定两类森林矿质土矿物磷溶解率的主要原因。

表 1 中国云南哀牢山中山湿性常绿阔叶林和西双版纳山地季风常绿阔叶林土壤理化性质

Table 1 Soil physical and chemical properties in the Ailao Mountain and Xishuangbanna evergreen broad-leaved forests of Yunnan, China

土样 Soil samples	pH	含水量 Water content (%)	有机质 Organic carbon (g kg ⁻¹)	全氮 Total N (g kg ⁻¹)	全磷 Total P (g kg ⁻¹)	可交换阳离子 Exchangeable cations			
						Na (mg kg ⁻¹)	K (mg kg ⁻¹)	Mg (mg kg ⁻¹)	Ca (mg kg ⁻¹)
哀牢山腐殖质 Humus of the Ailao Mountain forest	4.5	72	304	18	1.18	0.25	0.96	2.45	5.43
哀牢山表层矿质土 Surface mineral soil of the Ailao Mountain forest	4.2	58	116	7	0.82	0.19	0.22	0.70	0.59
西双版纳表层矿质土 Surface mineral soil of the Xishuangbanna forest	4.5	50	68	1.6	0.26	0.13	0.18	0.25	0.64

从土壤有效磷库来看,哀牢山表层矿质土的阴离子树脂提取有效磷库及 NaHCO_3 提取的有效磷库均大于西双版纳表层矿质土,哀牢山腐殖质的土壤有效磷库大于两类表层矿质土(表 2)。但两类森林土壤的微生物生物量磷库,西双版纳表层矿质土大于哀牢山表层矿质土,且两类矿质土的磷矿化速率(图 1)和森林生产力^[14,15]无明显差异。数据表明仅仅测定土壤磷库的大小不能反映土壤有效磷的供应水平,还必须测定土壤有机磷的潜在矿化和微生物磷的固定速率才能反映土壤有效磷供应水平的高低。

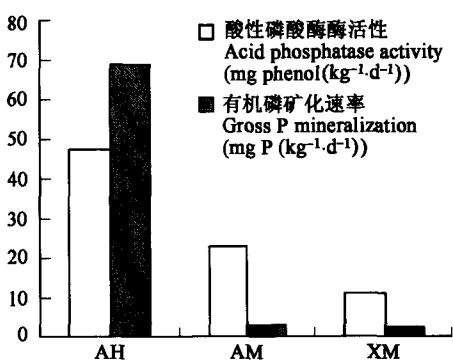


图 2 哀牢山和西双版纳常绿阔叶林土壤腐殖质和表层矿质土酸性磷酸酶活性和有机磷矿化速率关联

Fig. 2 Acid phosphatase activity and gross phosphorus mineralization rate in the Ailao Mountains and Xishuangbanna

AH 哀牢山腐殖质 humus of the Ailao Mountain forest; AM 哀牢山矿质土 surface mineral soil of the Ailao Mountain forest; XM 西双版纳矿质土 surface mineral soil of the Xishuangbanna forest

* 为 2002 年杨效东等测定的数据

表 2 阴离子树脂和碳酸轻钠提取的有效磷(Pi)和碳酸轻钠提取的有机磷(Po)以及微生物生物量磷(Pm)

Table 2 Soil phosphorus Pools: Resin-extractable inorganic P (Pi), NaHCO₃-extractable Pi and organic P (Po), Microbial biomass P (Pm); Standard errors are in the parentheses

土样 Soil samples	阴离子树脂提取无机磷 Resin-extractable Pi (mg kg ⁻¹)	微生物生物量磷 Microbial biomass Pm (mg kg ⁻¹)	碳酸氢钠提取磷 NaHCO ₃ -extractable P	
			Pi(mg kg ⁻¹)	Po(mg kg ⁻¹)
哀牢山森林腐殖质 Humus of the Ailao Mountain forest	15.8(2.4)a	180.9(12.7)a	10.40(0.8)a	130.3(13.9)a
哀牢山表层矿质土 Surface mineral soil of the Ailao Mountain forest	2.4(0.1)b	2.6(2.7)c	2.4(0.5)b	45.3(7.5)b
西双版纳表层矿质土 Surface mineral soil of the Xishuangbanna forest	1.2(0.1)C	5.2(5.5)b	0.8(0.15)c	20.1(1.9)c

不同英文字母表示差异显著($\alpha = 0.05$) Letters show significant difference among soils ($\alpha = 0.05$)

酸性磷酸酶活性实验过程中缓冲液对土壤 pH 值的改变可能会降低酸性磷酸酶活性和有机磷总矿化速率之间的相关性^[20,21]。但是邹晓明^[3]等认为酸性磷酸酶活性和有机磷总矿化速率之间的相关性改变的关键因素是我们对某些矿化过程的忽略,而缓冲液对土壤 pH 的改变不是主要的因素。哀牢山表层矿质土酸性磷酸酶活性高于西双版纳表层矿质土,但二者的总有机磷矿化速率几乎相同(图 2),而哀牢山腐殖质层的酸性磷酸酶活性和总有机磷矿化速率都高于两类矿质土,表明在腐殖质和矿质土及两类矿质土之间有着催化酸性磷酸酶的不同机制,哀牢山腐殖质层高的有机质含量和酸性磷酸酶活性使得有机磷矿化速率最高,由于有机质的减少,两类矿质土与腐殖质相比有机磷矿化速率和酸性磷酸酶活性不成比例递减。有研究报道磷酸盐对易被土壤胶体吸附的酸性磷酸酶活性的抑制作用砖红壤大于黄棕壤^[22],矿质土可能对酸性磷酸酶活性有抑制作用。从图 2 来看西双版纳表层矿质土的酸性磷酸酶活性较低,但与酶活性较高的哀牢山表层矿质土有相同的总有机磷矿化速率,可能的原因是:(1)有机质活性有差别,作为活性有机磷库的微生物生物量磷库在磷酸酶的催化下极易矿化,而西双版纳表层矿质土的微生物生物量磷大于哀牢山表层矿质土。(2)测定有机磷矿化速率的实验中应用阴离子树脂袋实时吸附 PO₄³⁻,培养瓶中几乎不存在游离的 PO₄³⁻,避免了磷酸盐对矿质土中胶体吸附酸性磷酸酶活性的抑制。(3)有机磷矿化速率实验中西双版纳表层矿质土酸性磷酸酶实际表现活性可能大于酶活性实验测定值。

References:

- [1] Chapin III F S, Matson P A, Mooney H A. Principles of terrestrial ecosystem ecology. New York: Springer, 2002. 215 ~ 219.
- [2] Sun R Y, Li B, Zhu G Y, *et al.* Ecosystem. In: General ecology. Beijing: Higher Education Press, 1993. 221 ~ 241.
- [3] Zou X M, Binkly D, Caldwell B A. Effects of dinitrogen-fixing tree on phosphorus biogeochemical cycling in contrasting forests. Soil Science Society of America Journal, 1995, 59(5):1452 ~ 1458.
- [4] Zhao X R, Lin Q M. The method for quantifying capacity of bacteria in dissolving P compounds. Microbiology, 2001, 28(13), 1 ~ 4.
- [5] Brookes P C, Powlson D S, Jenkinson D S. Phosphorus in the soil microbial biomass. Soil Biology and Biochemistry, 1984, 16: 169 ~ 175.
- [6] Singh J S, Raghubanshi A S, Singh R S, *et al.* Microbial biomass acts a source of plant nutrients in dry tropical forest and savanna. Nature, 1989, 338: 499 ~ 500.
- [7] Srivastava S C, Singh J S. Microbial C, N and P in dry tropical soils: effects of alternate land-uses and nutrient flux. Soil Biology and Biochemistry, 1991, 23(2): 117 ~ 124.
- [8] Srivastava S C. Microbial C, N and P in dry tropical soils: seasonal changes and influence of soil moisture. Soil Biology and Biochemistry, 1992, 24: 711 ~ 714.
- [9] McGill W B, Cole C V. Comparative aspects of cycling of organic C, N, S and P through soil organic matter. Geoderma, 1981, 26: 267 ~ 286.
- [10] Vitousek P M, Farrington H. Nutrient limitation and soil development: Experimental test of a biogeochemical theory. Biogeochemistry, 1997, 37: 63 ~ 75.
- [11] Olander P L, Vitousek P M. Biological and Geochemical Sinks for Phosphorus in Soil from a Wet Tropical Forest. Ecosystem, 2004, 7: 404 ~ 419.
- [12] Olander L P, Vitousek P M. Short-term controls over inorganic phosphorus during soil and ecosystem development. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37: 651 ~ 659.
- [13] Ou Y S, Zhang S R, Yu Q, *et al.* Spatial distribution characteristics of the soil phosphorus in the ecological fragile area in the north of Hengduan Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(10): 2777 ~ 2781.
- [14] Zhang K Y. The characteristic of mountain climate in the north of Ailao Mts. In: Wu Z Y ed. The study of forest ecosystem in Ailao Mountain of Yunnan,

China. Kunming: Science and Technology Press of Yunnan, 1983, 20 ~ 25.

- [15] Shi J P, Zhu H. A community ecology study on the tropical montane monsoonal evergreen broad-leaved forest in Xishuangbanna. *Acta Botanica Yunnanica*, 2003, 25(5): 513 ~ 520.
- [16] Zou X M, Binkley D, Duxtader K G. A new method for estimating gross phosphorus mineralization and immobilization rates in soils. *Plant and Soil*, 1992, 147: 243 ~ 250.
- [17] Brookes P C, Powlson D S and Jenkinson D S. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 1982, 14: 319 ~ 329.
- [18] Zhou L K. *Soil enzymology*. Beijing: Science Press, 1987. 133 ~ 135
- [19] Qiu X Z, Xie S C. *Studies on the forest ecosystem in Ailao Mountains Yunnan, China*. Kunming: Science and Technology Press of Yunnan, 1998. 84 ~ 88.
- [20] Rojo M J, Carcedo S G, Mateos M P. Distribution and characterization of phosphatase and organic phosphorus in soil fractions. *Soil Biology and Biochemistry*, 1990, 22: 169 ~ 174.
- [21] Antibus R K, Sinsabaugh R L, Linkins A E. Phosphatase activities and phosphorus uptake from inositol phosphate by ectomycorrhizal fungi. *Canadian Journal of Botany-Revue Canadienne De Botanique*, 1992, 70: 794 ~ 801.
- [22] Zhao Z H, Huang Q Y, Li X Y, *et al.* Effect of phosphate on adsorption of acid phosphatase to the surface of soil colloids and minerals. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(3): 353 ~ 359.

参考文献:

- [2] 孙儒泳, 李博, 诸葛阳, 等. 生态系统. 见: 普通生态学. 北京: 高等教育出版社, 1993. 221 ~ 241.
- [4] 赵小蓉, 林启美. 细菌解磷能力测定方法的研究. *微生物学通报*, 2001, 28(13): 1 ~ 4.
- [13] 欧勇胜, 张世熔, 余琼. 横断山北部生态脆弱区土壤磷素空间分布特征. *生态学报*, 2005, 25(10): 2777 ~ 2781.
- [14] 吴征镒. 云南哀牢山森林生态系统研究. 云南: 云南科技出版社, 1983. 20 ~ 25.
- [15] 施济普, 朱华. 西双版纳热带山地季风常绿阔叶林的群落生态学研究. *云南植物研究*, 2003, 25(5): 513 ~ 520.
- [18] 周礼恺. *土壤酶学*. 北京: 科学出版社, 1987. 133 ~ 135.
- [19] 邱学忠, 谢寿昌. 哀牢山森林生态系统研究. 云南: 云南科技出版社, 1998. 84 ~ 88.
- [22] 赵振华, 黄巧云, 李学垣, 等. 磷酸盐对土壤胶体和矿物表面吸附酸性磷酸酶的影响. *土壤学报*, 2003, 40(3): 353 ~ 359.