

鼎湖山退化马尾松林、混交林和季风常绿阔叶林土壤全磷和有效磷的比较

莫江明

(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)

摘要: 土壤全磷和有效磷浓度的变化随林型和季节不同而异, 总的来说, 其大小顺序为: 季风常绿阔叶林 > 混交林 > 马尾松林(林型); 夏季 > 冬季 > 春季 > 秋季(季节), 有效磷浓度为: 秋季 > 春季 > 冬季 > 夏季(季节)。收割林下层和凋落物这种人为干扰活动对土壤全磷含量的影响不明显, 但对土壤有效磷含量具有显著的影响。在试验开始时(1990年5月), 土壤全磷和有效磷浓度在马尾松林保护样地(停止人为干扰)和处理样地(按当地习惯继续收割林下层和凋落物)间的差异均不显著。经七年多的试验后, 土壤全磷浓度在保护样地和处理样地间仍十分相似, 但土壤有效磷浓度在保护样地显著高于处理样地, 说明保护样地在停止人为干扰后相对于继续受干扰的处理样地其林地条件得到了改善, 从而使土壤有效磷含量也得到提高。只要停止人为干扰, 鼎湖山退化马尾松林土壤有效磷供应力是可以自然恢复到季风常绿阔叶林的水平。

关键词: 全磷; 有效磷; 人为干扰; 退化; 恢复; 南亚热带

中图分类号: Q948.113 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2005)02-0186-07

Phosphorus availability of soils under degraded pine, mixed and monsoon evergreen broadleaf forests of subtropical China

MO Jiang-ming

(*Dinghushan Forest Ecosystem Research Station, South China Botanical Garden, the Chinese Academy of Sciences, Zhaoqing 526070, China*)

Abstract: The mechanisms underlying the low productivity, low biomass, and low nutrient availability observed previously in the degraded site; and the rate of rehabilitation for the degraded forest. In order to achieve the objectives above, an experiment was established in a MAB reserve of subtropical China in May, 1990. The experiment was a paired-plot design, with 20 replicates. Each pair consisted of a treatment (continued harvest) and control (no harvest) plot, 10 m × 10 m in size, and surrounded by a 10 m wide buffer strip. In the treatment plots, local people continued to harvest litter and understory according to local practice (about 2~3 times a year) from the beginning of the experiment in May, 1990. The harvesting according to local practice occurred during the period 1990~1995 after which time it was stopped. Control plots were protected from any harvesting. Each plot of a pair was similar in soil, slope, aspect and elevation to its matched plot.

Total P and available P of the soil varied significantly depending on forest and season. Overall, total P and

收稿日期: 2004-08-02 修订日期: 2004-11-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(30270283); 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研究所所长基金项目 and 广东省自然科学基金项目(021524)。

作者简介: 莫江明(1964-), 男, 广东肇庆人, 博士, 研究员, 主要从事恢复生态学、生态系统生态学等研究。E-mail: mojm@scib.ac.cn

available P concentrations ranked as follows: MEBF > MF > PF (forest); summer > winter > spring > fall (season) for total P, and fall > spring > winter > summer (season) for available P. In addition to significant main effects, interactions of forest and season for total P and available P concentrations were also significant. Harvesting understory and litter had significant effects on soil available P but not on total P of the soil in the pine forest during the studied period of 1990 to 1998. At the beginning of the study (May, 1990), there was no significant difference in soil total P and available P concentrations between treatment (harvesting understory and litter according to practice of local people) and control (no harvest) plots. After treating for 7 years, although there was still no significant difference in soil total P concentrations between treatment and control plots, concentration of available P was significantly higher in control plots than that in treatment plots, indicating that the site fertility in control plots had been enhanced after stopping harvesting. The results of this study also suggested that successful rehabilitation of soil P availability on severely degraded lands was possible, as long as harvesting of understory and litter was removed.

Key words: phosphorus availability; human impact; degradation; restoration; subtropics

近代,由于人类活动诸如收获木材、非持续性的农业生产、过度放牧和过度收获薪炭材等原因,引起了森林生态系统退化的问题日益严重(Daily, 1995; FAO, 1996; Zhang 等, 2000; FAO, 2001)。目前,森林生态系统退化,包括生物量降低、森林片断化以及生物多样性损失等的影响已成为全球性的生态问题(Daily, 1995; Dobson 等, 1997; Hooper 等, 1997; Zhang 等, 2000; FAO, 2001; 胡聃等, 2002; 郭晓敏等, 2002)。退化生态系统的恢复研究已成为当前全球生态学研究的热点内容。其中,人们最关注的是受不同人为干扰条件下森林生态系统结构与功能的响应及其机理。近期研究结果表明,由于人类活动而引起森林数量和质量下降的程度,取决于人类影响森林的方式、程度、持续的时间和森林的抗干扰能力(Brown 等, 1990; Brown 等, 1991; 1995; Daily, 1995; 郭志民等, 2000; 洪利兴等, 2000; FAO, 2001; Mo 等, 2003)。可见,了解人类活动对森林生态系统的影响及其响应,对于制订植被恢复以及森林可持续性管理计划均具有重要的意义。

为了满足当地居民燃料的需求,广东鼎湖山生物圈保护区自 60 年代初始允许当地居民收割其过渡区退化林地重建起源的马尾松林的凋落物和林下层植物。这些收割活动每年常发生多次(Brown 等, 1995; Mo 等, 1995)。而且,尽管政府部门力图减少或控制这种人为收割活动的强度,但这种收割林下层植物和凋落物活动在我国南方仍然非常普遍(Brown 等, 1995; Mo 等, 1995)。前期我们报道了鼎湖山马尾松林生物量及其养分积累动态,结果发现该松林生物量及其养分贮量均较低,其原因主要是这种人为干扰活动阻碍本已退化的马尾松林恢复

或使其进一步退化(Brown 等, 1995; Mo 等, 1995; 2003; 莫江明等, 2004a; 2004b)。

此外,在热带地区的土壤由于高度风化以及强烈的固磷能力,土壤有效磷含量一般很低,因此磷常被认为是热带森林植物生长的最重要的限制因子(Vitousek, 1984)。前期笔者等曾对鼎湖山南亚热带常绿阔叶林植物营养元素含量分配格局进行了研究,结果也发现磷作为植物细胞结构成分和代谢调节因子参与光合作用等重要的生理过程,它很可能是限制南亚热带常绿阔叶林植物生产力的最重要营养元素(莫江明等, 2000)。

为此,本文选择鼎湖山退化(受人为干扰)马尾松林、混交林和季风常绿阔叶林为对象,通过观测其土壤全磷和有效磷的情况,研究南亚热带森林土壤在不同森林演替阶段和不同季节的磷供应特征;并在此基础上探讨以下两方面的问题:(1)收割林下层和凋落物这种人为干扰活动对土壤磷供应的影响;(2)检验土壤有效磷水平随退化马尾松林的恢复而提高的假设,为进一步了解南亚热带森林植物生产力的影响因素以及该地带森林资源的保护、利用和管理提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 样地概况

本研究在广东鼎湖山生物圈保护区分布的三种主要森林类型进行。这三种林型为马尾松林、马尾松针叶阔叶混交林(简称混交林)和季风常绿阔叶林(简称季风林)。保护区位于广东省中部,112°33'E, 23°10'N,属亚热带季风性气候型。年平均降雨

量为 1 927 mm, 其中 75% 分布在 3~8 月, 而 12~2 月仅占 6%。年平均相对湿度为 80%。年平均温度为 21.4 °C, 最冷月(1 月)和最热月(7 月)的平均温度分别为 12.6 °C 和 28.0 °C(黄展帆等, 1982)。

保护区面积约 1 100 hm², 其中分布在海拔 250~300 m 的季风常绿阔叶林约占 20%, 分布在海拔 200 m 左右的混交林约占 50%, 在 50~200 m 的马尾松林约占 20%(周厚诚等, 1986)。季风常绿阔叶林分布在保护区的核心区, 保存较完好, 已有四百多年的保护历史, 是南亚热带代表性的森林类型。混交林为人工种植的马尾松因一些阔叶树种入侵而自然形成的过渡类型的针叶、阔叶混交林, 林龄约为

70 a。由于混交林分布在保护区缓冲区, 距农村较远, 自 1956 年成立保护区后较少受人为干扰。马尾松林为人工种植于 1930 年左右, 种植后长期受人为活动干扰(主要为收割凋落物和林下层)。因此, 在人为干扰水平、演替阶段、样地条件和种类组成等方面在这三种森林类型中均存在差异(王铸豪等, 1982; Mo 等, 2003)。

季风常绿阔叶林为锥栗(*Castanopsis chinensis*)、荷木(*Schima superba*)、厚壳桂(*Cryptocarya chinensis*)群落。林冠重叠、稠密, 种类丰富, 结构复杂, 垂直结构可分为六层, 即乔木 3 个亚层, 幼树灌木层、草本苗木层, 层间植物层。层间植物主要是木

表 1 鼎湖山马尾松林、混交林和季风常绿阔叶林土壤理化性质(平均值, 标准误)¹⁾
Table 1 Soil properties in pine(PF), mixed(MF) and monsoon evergreen broadleaf(MEBF) forests of Dinghushan in subtropical China(mean, SE in parenthesis)¹⁾

| 森林类型 Forest type | 土层深 Soil depth (cm) | 有机质 Organic matter(%) | 全 N Total N (%) | 碳氮比 C/N | pH 值 pH value | 容重 Bulk density (g cm ³) | 含水量 Moisture content(%) |
|---------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------|-------------|------------------|--|-------------------------------|
| 马尾松林 PF | 0~20 | 2.73(0.17) | 0.09(0.01) | 16.79(0.94) | 4.03(0.02) | 1.41(0.04) | 24.90(1.10) |
| 混交林 MF | 0~20 | 3.45(0.35) | 0.10(0.01) | 18.90(0.97) | 3.86(0.02) | 1.30(0.04) | 25.97(0.91) |
| 季风常绿阔叶林 MEBF | 0~20 | 5.35(0.58) | 0.19(0.01) | 15.91(0.86) | 3.79(0.06) | 1.21(0.03) | 38.57(1.19) |

¹⁾ 引自文献 Cited from reference(Mo *et al.*, 2003). MEBF: Monsoon evergreen broadleaf forest 季风常绿阔叶林。

质藤本植物和少量的附生植物。乔木层主要由锥栗、荷木、厚壳桂、黄果厚壳桂(*Cryptocarya concinna*)、和华润楠(*Machilus chinensis*)等树种组成, 其它层树种主要有: 杖枝省藤(*Calamus rhabdocladus*)、罗伞树(*Ardisia quinquegona*)和沙皮蕨(*Hemigramma decurrens*)等(王铸豪等, 1982; Mo 等, 2003)。

混交林群落结构较简单, 仅可分成 4 层。乔木分 2 个亚层, 主要树种有马尾松、荷木、锥栗、黄果厚壳桂、红皮紫陵、山钓樟(*Lindera metcalifiana*)和天料木(*Homalium cochinchinense*)等。灌木 1 层, 以阳性灌木桃金娘(*Rhodomyrtus tomentosa*)占优势。草本及苗木 1 层, 以芒萁(*Dicranopteris linearis* var. *dichotoma*)和黑莎草(*Gahnia tristis*)为主, 极少发现有马尾松幼苗(王铸豪等, 1982; Mo 等, 2003)。

马尾松林主要以马尾松树种为主, 整个林地仅有 3 棵桉树(*Eucalyptus robusta*), 林龄约为 70 a。因长期受人为干扰(收割凋落物和林下层, 每年 2~3 次), 该马尾松林退化较严重, 林分结构简单, 乔木仅一层且林冠稀疏, 但林下层植物(乔木层林冠以下除马尾松和桉树外的灌木、草本以及蕨类植物)较稠

密。林下层树种主要以桃金娘(*Rhodomyrtus tomentosa*)、芒萁(*Dicranopteris linearis*)、毛稔(*Melastoma sanguineum*)、岗松(*Baeckea frutescens*)等为主(王铸豪等, 1982; Mo 等, 2003)。

季风常绿阔叶林样地的母岩为砂页岩, 土壤为赤红壤, 土层较深(60~90 cm)。阔叶林样地的母岩为砂岩, 土壤为砖红壤性红壤, 土层厚薄不均, 一般在 30~60 cm 之间。马尾松林样地的母岩也为砂岩, 土壤也为砖红壤性红壤, 土层较浅, 一般不超过 30 cm(王铸豪等, 1982; Mo 等, 2003)。

1.2 实验设计

为了测定收割林下层和凋落物这种人为干扰活动对土壤磷供应的影响, 在马尾松林样地采用对比样方(paired-plot)设计, 共有 20 对样方, 每对由处理(允许收割凋落物和林下层活动)样地和保护(不进行任何收割活动)样地各一个组成。每个样方的面积为 10 m×10 m, 周围有 10 m 宽的缓冲带。同一对的两个样方在土壤、坡度、外貌和海拔高度等均相类似, 样地坡度的平均值为 30°, 最小和最大分别为 26.5°和 34.5°。自试验之日(1990 年 5 月)开始至 1993 年 5 月, 当地居民在处理样地根据他们的习惯继续进行收割凋落物和林下层活动(每年 2~3

次), 1995 年再收割一次, 此后一直没有任何收割活动。在保护样地则禁止任何人为活动 (Brown 等, 1995; Mo 等, 1995) (图 1, 2)。

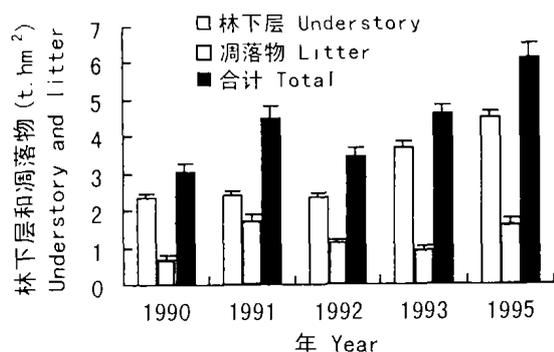


图 1 1990~1995 年期间处理样地林下层和凋落物收获动态¹⁾

Fig. 1 Dynamic of understory and litter harvested in the treatment plots during 1990~1995¹⁾

¹⁾引自文献莫江明等, 2004a. Cited from Mo *et al.* 2004a.

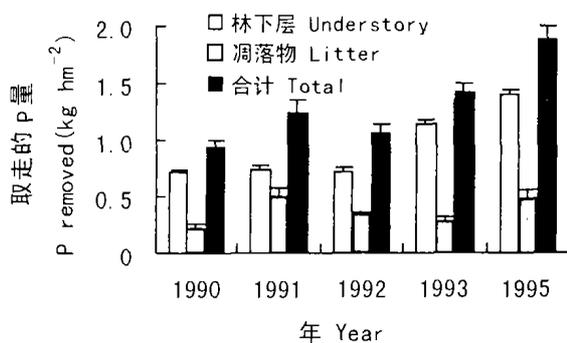


图 2 1990~1995 年期间处理样地因收获林下层和凋落物而被取走的 P 量¹⁾

Fig. 2 Dynamic of P removed by harvesting understory and litter in the treatment plots during 1990~1995¹⁾

¹⁾引自文献莫江明等, 2004b. Cited from Mo *et al.* 2004b.

1.3 样品采集和处理

1990 年 5 月, 在马尾松林研究样地的每个样方中选择五个取样点 (其中一点在样方中间, 其余的则在四个样方角)。在选择好的取样点, 用钻取 3 钻土壤 (土深 0~10 cm), 组成 1 个样品, 每个样方取 5 个样品 (20 对样方共 200 个样品)。分别于 1997 年 6 月、9 月、12 月和 1998 年 3 月, 在马尾松林样地重复以上取样 (但取样深度为 0~20 cm); 在预先选择好的混交林和季风常绿阔叶林样地也以同样的方法进行取样, 即每次在每个样地取 200 个样品 (取样深度为 0~20 cm)。这里需要指出的是, 虽然两次取样深度不一致, 但对本研究目的没有任何影响。这

是因为本研究的目的是检验保护和处理样地之间的差异, 而非绝对值。

所有土壤样品在采集后, 立即在 40 °C 下恒温箱烘至恒重。磨碎、过 2 mm 孔径的网筛和装瓶, 以供化学分析 (Anderson 等, 1989)。然后, 每个样品在分析前分开两部分, 其中一部分在 105 °C 烘至恒重, 用来计算重量换算率 (40/105 °C); 另一部分作营养分析。氮的分析用凯氏法消煮后, 用维氏卡分析仪定氮 (Scott 等, 1989)。样品磷的浓度用比色法 (Luh Huang 等, 1985)。有机质和 pH 用南京土壤研究所《土壤理化分析》所描述的常规方法测定 (南京土壤研究所, 1978)。测定方法: pH 值为 5:1 的水土比, KCL 浸提, 电极测定; 有效 P 用 H₄F-HCl 浸提, 钼锑抗比色测定。本研究的全部结果以 105 °C 恒重为基准。

1.4 统计分析

采用方差分析法 (ANOVA) 检验不同林型间和季节间差异显著性, 以及林型和季节交互作用效应的显著性。然后, 利用 SPSS 软件以 Duncan 多重检验法检验保护和处理样地间, 以及其它不同林分间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质

表 1 可见, 土壤有机质和全氮含量在各样地中的大小顺序为: 季风常绿阔叶林 > 混交林 > 保护样地 (马尾松林) > 处理样地 (马尾松林), pH 值则与之相反, 表现为处理样地 (马尾松林) > 保护样地 (马尾松林) > 混交林 > 季风常绿阔叶林; 碳氮比则以混交林最高, 其次为马尾松林的保护样地, 最低为季风常绿阔叶林。

2.2 土壤全磷

林型和季节对土壤全磷浓度的变化均具有显著的影响 ($p < 0.001$, 图 3, 4)。不同森林比较, 土壤全磷浓度以季风常绿阔叶林最高 (257.96 ± 10.61 mg/kg), 其次是混交林 (166.93 ± 5.52 mg/kg), 最低为马尾松林 (140.16 ± 4.42 mg/kg), 且它们的差异均达显著水平 ($p < 0.001$, 图 3)。季节间比较, 各季节土壤全磷浓度基本上呈如下大小变化顺序: 夏季 > 冬季 > 春季 > 秋季 (图 4)。对各林型单独进行的方差分析结果表明, 季节对所有森林土壤全磷浓度均存在显著的影响 ($p < 0.01$)。

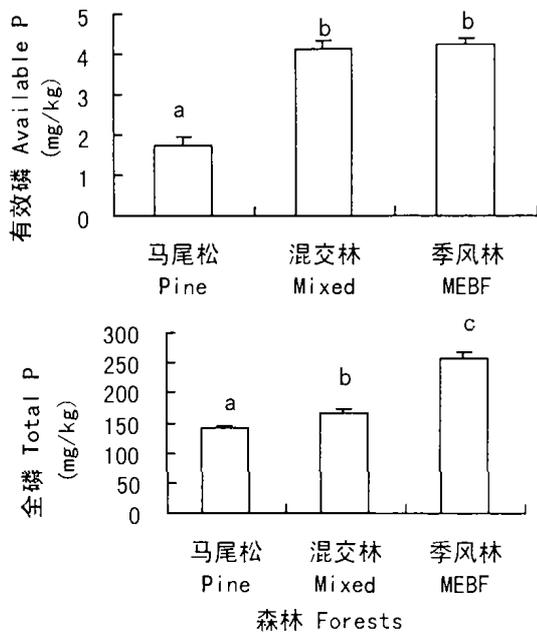


图 3 马尾松林、混交林和季风常绿阔叶林(季风林)土壤全磷和有效磷比较(平均值±标准误)
Fig. 3 Comparison of soil total P and available P among pine, mixed and mosoon evergreen broadleaf (MEBF) forests (Mean±SE)

不同字母分别表示不同森林间差异显著 Different letters above the columns indicate significant difference among forests (Duncan's multiple range test; $p < 0.01$)

此外,林型和季节对土壤全磷浓度的影响还具有显著的交互作用($p=0.036$,图4),即林型对土壤全磷浓度的影响根据季节不同而异;或季节对土壤全磷浓度的影响随林型不同而变化。例如,尽管在各季节均表现为季风常绿叶林>混交林>马尾松林(图3),但在春季这三种林型土壤全磷浓度的比值依次为:1.80、1.17和1.00,在冬季则为:2.05、1.23和1.00(林型×季节);在季风常绿阔叶林为:冬季>夏季>春季>秋季,但在混交林为:夏季>冬季>春季>秋季(季节×林型);在差异显著性方面,除季风常绿阔叶林在夏季与冬季、夏季与春季、春季与冬季以及混交林在冬季和春季之间无显著差异外,其余所有季节间均存在显著的差异($p < 0.001$,图4)。

2.3 土壤有效磷

与全磷浓度的变化既有相似的地方但也有其本身特点,林型和季节对土壤有效磷浓度的变化也具有显著的影响($p < 0.001$,图3,4)。不同森林比较,土壤有效磷浓度同样以季风常绿阔叶林最高(4.22 ± 0.16 mg/kg,图3),其次是混交林(4.09 ± 0.22 mg/kg),最低为马尾松林(1.75 ± 0.19 mg/kg)。

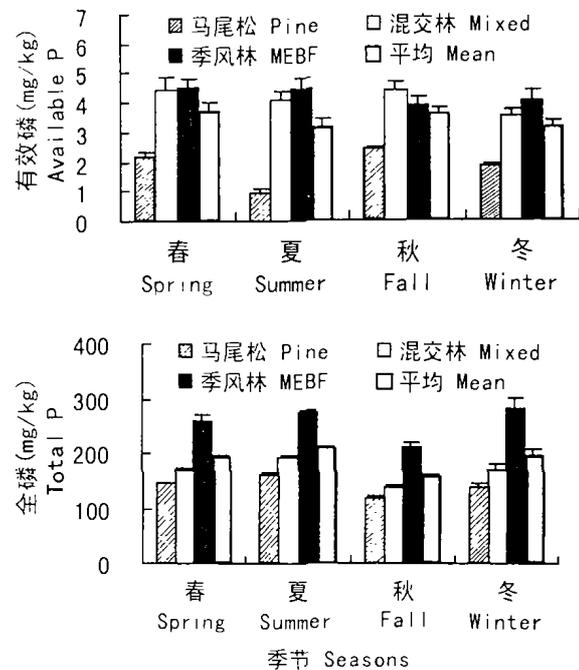


图 4 马尾松林、混交林和季风常绿阔叶林(季风林)土壤全磷和有效磷的季节性变化(平均值±标准误)
Fig. 4 Comparison of soil total P and available P among different seasons for pine, mixed and mosoon evergreen broadleaf (MEBF) forests (Mean±SE)

然而,季风常绿阔叶林与混交林间差异不显著,但它们均显著高于马尾松林($p < 0.001$)。不同季节比较,总体上土壤有效磷浓度的大小变化顺序与全磷浓度的相反,基本上为:秋季>春季>冬季>夏季(图4)。

对这三种林型单独进行方差分析表明,季风常绿阔叶林和混交林两林分的土壤有效磷浓度的季节性变化均不显著(两林型的 p 值分别为 0.452 和 0.156),但马尾松林地土壤有效磷浓度则具有显著的季节性变化特点,且除秋季与春季之间无显著差异外($p > 0.199$),其余所有季节间均存在显著的差异($p < 0.001$),其大小变化顺序为:秋季>春季>冬季>夏季(图4)。

林型和季节对土壤有效磷浓度变化的影响也具有显著的交互作用($p < 0.001$,图4),即林型对土壤有效磷浓度的影响根据季节不同而异;或季节对土壤有效磷的影响随林型不同而变化。例如,在冬季土壤有效磷浓度在三种林型的大小分布顺序为:季风常绿阔叶林>混交林>马尾松林,然而,在秋季则为:混交林>季风常绿阔叶林>马尾松林(季节×林型);在马尾松林为:秋季>春季>冬季>夏季,但在混交林为:春季≈秋季>夏季>冬季(林型×季节)。

2.4 收割林下层和凋落物活动对马尾松林土壤有效磷的影响

在试验开始时(1990年5月),土壤全磷和有效磷浓度在保护和处理样地间的差异均不显著(全磷 $p=0.558$;有效磷 $p=0.911$,图5)。经七年多的试验后,保护样地所有季节的土壤全磷浓度和处理样地的全磷浓度之间仍十分相似,未发现任何显著差异(春、夏、秋和冬的显著差异概率(p)分别为:0.883、0.079、0.974和0.573,总体为0.856),然而,土壤有效磷浓度在所有季节均表现为保护样地高于处理样地,且在春、冬两个季节其差异还达到显著水平(夏秋两个季节的 p 值分别为0.187、0.125,春冬则均为 $p<0.01$,全年为 $p<0.01$,图5)。这种现象表明,保护样地在停止人为干扰后相对于继续受干扰的处理样地其林地条件得到了改善,从而使土壤有效磷水平得到提高。

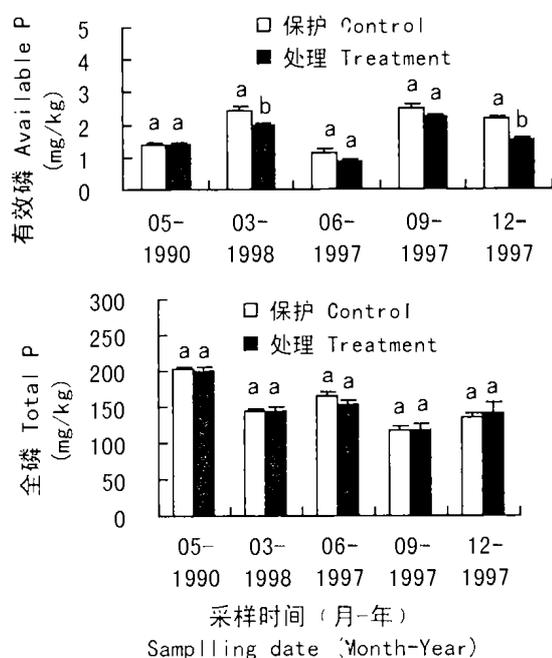


图5 马尾松林保护和处理样地间土壤全磷和有效磷的比较(平均值±标准误)

Fig. 5 Comparison of soil total P and available P between control and treatment plots of pine forest (Mean±SE)

不同字母分别表示不同处理间差异显著 Different letters above the columns indicate significant difference among treatments (Duncan's multiple range test; $p < 0.01$)

3 讨论

3.1 人为干扰对马尾松林土壤磷供应的影响

一般认为,与温带森林不同,热带森林生产力通

常受土壤磷供应限制,然而,对于热带尤其是受人为干扰的森林土壤有效磷状况的研究报道极少(莫江明等,2000)。与森林皆伐的效果比较,仅收获林下层和凋落物这种森林利用方式从林地中取走较少的养分,但是,前期研究结果显示,此种人为干扰活动不仅直接从林地中取走大量的养分,而且还对林地肥力产生间接的负面影响。这种间接影响主要是通过提高土壤有效 N 水平,同时降低林地(取走林下层和凋落物和减少土壤微生物量)对养分吸收和固持能力,增加生态系统养分的流失潜力,进而影响生态系统的生物地球化学正常循环,使土壤氮素养分出现负增长以及使生态系统的生物地球化学循环失衡(莫江明等,1997;Mo 等,2003;莫江明等,2004a, b)。其结果不仅使马尾松林生物量及其养分贮量降低(莫江明等,2004a, b),而且还降低凋落物产量及其养分归还量(莫江明等,2001)。从本研究结果看,经七年多的试验后,保护样地所有季节的土壤全磷浓度和处理样地的全磷浓度之间仍十分相似,未发现任何显著差异,然而土壤有效磷浓度在所有季节均表现为保护样地高于处理样地,而且在春、冬两个季节其差异还达到显著水平(图4)。由此可以推断,这种人为干扰活动同样降低了土壤有效磷的供应能力。

3.2 退化马尾松林土壤有效磷可恢复性

前面已讨论了收割凋落物和林下层这种人为干扰活动对土壤有效磷的影响。由于这种人为干扰活动已有数十年之久,该马尾松林地已严重退化(Brown 等,1995;Mo 等,1995)。如本研究结果显示,马尾松林土壤全氮和有机质含量仅相当于季风常绿阔叶林土壤的1/2(表1)。那么,随着本退化马尾松林的恢复其土壤有效磷水平是否可以自然恢复?为了回答这个问题我们首先比较退化马尾松林处理和保护样地的情况,然后对退化马尾松林、混交林和季风常绿阔叶林的土壤磷情况进行比较。如前面结果显示,在停止人为干扰七年后,尽管土壤全磷含量在保护与处理样地之间无显著差异,但保护样地土壤有效磷浓度明显增加(图5),说明只要停止人为干扰,本退化马尾松林土壤有效磷是可以自然恢复的。从本研究不同类型森林土壤有效磷含量的比较结果也进一步证明了以上推论(图3)。虽然,混交林的林龄与退化马尾松林相当,且它们的土壤类型相同,但混交林土壤有效磷浓度(4.09 ± 0.22 mg/kg)为马尾松林(1.75 ± 0.19 mg/kg)的2.3倍,

同时,混交林土壤有效磷浓度几乎相当于季风常绿阔叶林土壤的有效磷浓度($4.22 \pm 0.16 \text{ mg/kg}$)。

参考文献:

- 南京土壤研究所, Academia Sinica. 1978. 土壤理化分析 [M]. 上海: 上海科学出版社.
- Anderson JM, Ingram JSI. 1989. Tropical soil biology and fertility: a handbook of methods. CAB International, Wallingford, Oxford, England.
- Brown S, Gillespie AJR, Lugo AE. 1991. Biomass of tropical forests in South and Southeast Asia[J]. *Canadian J Fore Res*, **21**: 276-289.
- Brown S, Lenart M, Mo JM, et al. 1995. Structure and organic matter dynamics of a human-impacted pine forest in a MAB Reserve of subtropical China[J]. *Biotropica*, **27**: 276-289.
- Brown S, Lugo AE. 1990. Tropical secondary forests[J]. *J Trop Ecology*, **6**: 1-32.
- Daily GC. 1995. Restoring value to the worlds degraded lands [J]. *Science*, **269**: 350-354.
- Dobson AP, Bradshaw AD, Baker AJM. 1997. Hopes for the future: restoration ecology and conservation biology [J]. *Science*, **277**: 515-522.
- FAO. 1996. Forest resources assessment 1990: survey of tropical forest cover and study of change processes. Rome, Italy: FAO Forestry Paper 130.
- FAO. 2001. Global forest resources assessment 2000 (FRA 2000). Results as of April 10 I. Available from www.fao.org/forestry/fo/fra/index.jsp.
- Guo XM(郭晓敏), Niu DK(牛德奎), Liu YQ(刘苑秋), et al. 2002. The vegetation restoration and reconstruction of different types of degraded barren ecosystems in Jiangxi(江西省不同类型退化荒山生态系统植被恢复与重建措施)[J]. *Acta Ecol Sin(生态学报)*, **22**: 878-884.
- Guo ZM(郭志民). 2001. Study on the ways of recover and restoration for degraded community of *Pinus massoniana*(退化马尾松群落恢复与重建途径的研究)[J]. *J Zhejiang Fore Sci & Tech(浙江林业科技)*, **25**: 1-3.
- Hong LX(洪利兴), Wang Y(王泳), Du GJ(杜国坚), et al. 2000. Restrograde characteristics of ecosystem of *Pinus massoniana* forest and its transformation countermeasures(我国南方马尾松林生态系统的退化特征和改造对策研究)[J]. *J Zhejiang Fore Sci & Tech(浙江林业科技)*, **20**: 1-9.
- Hooper DU, Vitousek PM. 1997. The effects of plant composition and diversity on ecosystem processes [J]. *Science*, **277**: 1302-1305.
- Hu D(胡聃), Xi ZJ(奚增均). 2002. A theoretical approach to integration principles of ecological restoration engineering(生态恢复工程系统集成原理的一些理论分析)[J]. *Acta Ecol Sin(生态学报)*, **22**: 866-877.
- Huang ZF(黄展帆), Fan ZG(范征广). 1982. The climate of Ding Hu Shan(鼎湖山的气候)[J]. *Trop and Subtrop Fore Ecosystem(热带亚热带森林生态系统研究)*, **1**: 11-13.
- Luh Huang CY, Schulte EE. 1985. Digestion of plant tissue for analysis by ICP emission spectroscopy[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **16**: 943-958.
- Mo JM(莫江明), Kong GH(孔国辉), Brown S, et al. 2001. Litterfall response to human impacts in a Dinghushan pine forest(鼎湖山马尾松林凋落物及其对人类干扰反响的研究)[J]. *Acta Phytoecol Sin(植物生态学报)*, **25**: 656-664.
- Mo JM(莫江明), Peng SL(彭少麟), Brown S, et al. 2004a. Response of biomass production to human impacts in a pine forest in subtropical China(鼎湖山马尾松林群落生物量生产对人为干扰的响应)[J]. *Acta Ecol Sin(生态学报)*, **24**(2): 193-200.
- Mo JM(莫江明), Peng SL(彭少麟), Brown S, et al. 2004b. Nutrient accumulation dynamics and its responses to human impacts of plants in a pine forest of subtropical China(鼎湖山马尾松林植物养分积累动态及其对人为干扰的响应)[J]. *Acta Phytoecol Sin(植物生态学报)*, **28**(6): 810-822.
- Mo JM(莫江明), Zhang DQ(张德强), Huang ZL(黄忠良), et al. 2000. Distribution pattern of nutrient elements in plants of Dinghushan lower subtropical evergreen broadleaf forest(鼎湖山南亚热带常绿阔叶林植物营养元素含量分配格局研究)[J]. *J Trop and Subtrop Bot(热带亚热带植物学报)*, **8**(3): 198-206.
- Mo JM, Brown S, Lenart M, et al. 1995. Nutrient dynamics of a human-impacted pine forest in a MAB Reserve of subtropical China[J]. *Biotropica*, **27**: 290-304.
- Mo JM, Brown S, Peng SL, et al. 2003. Nitrogen availability in disturbed, rehabilitated and mature forests of tropical China [J]. *Forest Ecology and Management*, **175**: 573-583.
- Scott TJ, Mitchell MJ, Santos A, et al. 1989. Comparison of two methods for measuring ammonium in solution samples [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **20**: 1131-1144.
- Vitousek PM. 1984. Litterfall, nutrient cycling, and nutrient limitation in tropical forests [J]. *Ecology*, **65**(1): 285-298.
- Wang ZH(王铸豪), He S(何少颐), Song S(宋绍墩), et al. 1982. The vegetation of Ding Hu Shan Biosphere Reserve(鼎湖山自然保护区植被)[J]. *Trop and Subtrop Fore Ecosystem(热带亚热带森林生态系统研究)*, **1**: 77-141.
- Zhang PC, Shao GF, Zhao G, et al. 2000. China's forest policy for the 21st century [J]. *Science*, **288**: 2135-2136.
- Zhou HC(周厚诚), Li MJ(李明佳), Zhou YR(周远瑞), et al. 1986. The vegetation map of Dinghushan Biosphere Reserve with reference to its illustration(鼎湖山自然保护区植被图及说明书)[J]. *Trop and Subtrop Fore Ecosystem(热带亚热带森林生态系统研究)*, **4**: 13-52.