

网络出版时间:2016-07-12 08:45

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2016.08.024

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20160712.0845.048.html

土地利用方式对中亚热带山地土壤 微生物生物量磷的影响

李胜蓝^{a,b},方 晰^{a,b},李 岩^{a,b},项文化^{a,b},张仕吉^c

(中南林业科技大学 a 生命科学与技术学院,b 南方林业生态应用技术国家工程实验室,

c 材料科学与工程学院,湖南 长沙 410004)

[摘 要] 【目的】研究中亚热带山地不同土地利用方式土壤微生物生物量磷(MBP)的含量特征。【方法】在地处中亚热带地区的湖南长沙大山冲选取 6 种土地利用方式(杉木人工林、次生林(马尾松+石栎针阔混交林、南酸枣落叶阔叶林、石栎+青冈常绿阔叶林)、毛竹林和弃荒地)的样地,分别采集其 0~15 cm 和 15~30 cm 土层土壤样品,测定其 MBP、全磷(TP)、有效磷(AP)、有机碳(SOC)、全氮(TN)含量,并测定样地的凋落物量和细根生物量,分析 MBP 与土壤养分(C、N、P)、凋落物量、细根生物量之间的关系。【结果】(1)6 种土地利用方式土壤 MBP 含量均表现为 0~15 cm 土层高于 15~30 cm 土层,不同土地利用方式土壤 MBP 含量差异显著,毛竹林最高,杉木人工林最低。(2)同一土层,不同土地利用方式土壤 TP、AP 含量差异显著,弃荒地、毛竹林较高,杉木人工林最低。(3)不同土地利用方式土壤 MBP 占 TP 含量百分比差异显著,毛竹林最高,其次是次生林、弃荒地,杉木人工林最低。(4)整个研究区土壤 MBP 与 SOC、TN 含量呈极显著正相关,与 TP、AP 不存在显著的相关性,杉木人工林、次生林土壤 MBP 与 SOC、TP、AP 含量呈显著或极显著正相关,但与凋落物量、细根生物量相关性不显著。【结论】不同土地利用方式土壤 TP、SOC、TN 含量的差异是导致土壤 MBP 含量差异的主要因素,人为活动(如施肥、耕作措施)是导致土壤 MBP 含量差异的直接因子之一。

[关键词] 中亚热带;土地利用方式;山地土壤;微生物生物量磷

[中图分类号] S718.5

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2016)08-0162-09

Effect of land use on soil microbial biomass phosphorus in mid-subtropical zone

LI Shenglan^{a,b}, FANG Xi^{a,b}, LI Yan^{a,b}, XIANG Wenhua^{a,b}, ZHANG Shiji^c

(a College of Life Science and Technology, b State Key Laboratory of Ecological Applied Technology in Forest Area of South China, c College of Material Science and Technology,

Central South University of Forestry and Technology, Changsha, Hunan 410004, China)

Abstract: 【Objective】 This research investigated characteristics of microbial biomass phosphorus (MBP) contents with different land use types. 【Method】 Six sample plots with different land use types (*Cunninghamia lanceolata* plantation forest, secondary forests (*Pinus massoniana* + *Lithocarpus glaber* mixed forest, *Choerospondias axillaries* deciduous broad leaved forest, *L. glaber* + *Cyclobalanopsis glauca* evergreen broad-leaved forest), *Phyllostachy edulis* plantation, and wasteland) at Dashanchong forest park

[收稿日期] 2015-01-09

[基金项目] 国家级林业科技推广项目([2012]61 号);国家林业局林业软科学研究项目(2014-R11);中南林业科技大学研究生科技创新基金项目(CX2014B29)

[作者简介] 李胜蓝(1989—),女,湖南长沙人,在读硕士,主要从事森林土壤养分研究。E-mail:lan101918@163.com

[通信作者] 方 晰(1968—),女,广西南宁人,教授,博士,博士生导师,主要从事森林生态系统定位研究。
E-mail:fangxizhang@sina.com

in mid-subtropical zone were selected for collecting soil samples from depths of 0—15 and 15—30 centimeter. Contents of MBP, total phosphorus (TP), available phosphorus (AP), soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), litter fall and fine-root biomass were measured and correlations between MBP and soil nutrients (C, N, P), litter fall, and fine-root biomass were analyzed. 【Result】 (1) MBP contents of six land use types at 0—15 centimeter soil layer were all higher than that at 15—30 centimeter with significant difference among different land use types. The average content was highest in *P. edulis* plantation and lowest in *C. lanceolata* plantation forest. (2) At same soil layer, there were significant differences in TP and AP between different land use types. Contents of TP and AP in *P. edulis* plantation and wasteland were the highest while that in *C. lanceolata* plantation forest were the lowest. (3) The ratios of MBP to TP under six land use types were also significantly different with highest in *P. edulis* plantation, followed by secondary forests and wasteland, and the lowest in *C. lanceolata* plantation forest. (4) MBP contents were significantly correlated with SOC and TN, and were not correlated with TP and AP. MBP contents in *C. lanceolata* plantation forest and secondary forests were significantly correlated with SOC, TP, and AP, but not correlated with litter fall and fine-root biomass. 【Conclusions】 Differences in TP, SOC and TN under different land use types were main factors affecting MBP content and human activities (such as fertilization and cultivation measures) were one direct factor.

Key words: mid-subtropical zone; land use types; mountainous soil; microbial biomass phosphorus

磷(P)是植物生长发育不可缺少的营养元素,是地质时代尺度上植物生产力的限制性养分元素,土壤缺P是限制当前农林业产量的重要因素^[1-2]。我国长江以南亚热带山地以酸性红壤为主,土壤淋溶强烈,养分流失严重,土壤全P含量低(0.2~0.3 g/kg),由于土壤对P吸附固定强烈,有效P含量更低,缺P土壤面积超过75%,成为一级缺P区^[2],限制了植物生长发育和生产力,因而土壤P缺乏成了亚热带山地生态恢复和土地资源经营管理面临的首要问题^[3]。尽管土壤微生物生物量磷(Microbial biomass phosphorus, MBP)在土壤中的含量仅占微生物生物量的1.4%~4.7%^[4],但它周转快、极易矿化为有效P,因而是土壤有机P库中最为活跃的部分,是土壤P素的储备库、供给源及P素转化的中转站^[5-6],并在一定程度上反映了土壤的供P水平。此外,土壤MBP对环境变化响应敏感^[7],能及时准确反映环境(气候、土壤类型、地形)改变和人为活动(施肥、耕作等)引起的P固定和周转,对土壤养分的有效性具有重要的指示意义^[7]。研究表明,耕地土壤MBP约占土壤有机P的3%,草地土壤高达19%,草地转变为耕地后,MBP占有机P的比例迅速下降^[8],可能是由于土地利用方式改变后,向土壤输入的凋落物减少,降低了土壤MBP的输入^[9]。水田土壤MBP含量显著高于旱地^[10]。黄敏^[11]的研究发现,在不同土地利用方式中,水田土壤MBP含量最高(32.49 mg/kg),果园和旱地居中(约14.5

mg/kg),而林地最低(7.15 mg/kg)。亚热带地带性植被为常绿阔叶林,但长期以来,由于南方商品林基地建设和山地综合开发,大面积常绿阔叶林转变为人工林、经济林、农用地等,特别是近20年来,随着城市化和社会经济的快速发展,土地利用方式变化更为明显和多样化,显著改变了亚热带山地生态系统的结构、功能和景观格局,影响着土壤环境变化的方向与程度^[12]。目前,国内对土壤MBP的研究主要集中于退化草场和农田^[13-14],国外则倾向于对牧场和天然林土壤的研究^[15],有关不同土地利用方式对土壤MBP含量影响的研究报道仍很少,关于不同生态系统的各种环境因子对土壤P有效性的影响机理仍缺乏深入的探讨^[16]。土地利用方式是否显著改变土壤MBP含量对评价不同土地利用方式土壤P有效性意义重大。本研究以中亚热带地区地域相邻的杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林、不同树种组成的次生林(马尾松(*Pinus massonana*)+石栎(*Lithocarpus glaber*)针阔混交林、南酸枣(*Choerospondias axillaries*)落叶阔叶林、石栎+青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)常绿阔叶林)、毛竹(*Phyllostachys heterocycla*)林、弃荒地对象,探寻不同土地利用方式及不同森林类型土壤MBP含量特征及其与土壤有机碳、全氮、全磷、有效磷含量之间的关系,以期揭示人类经营活动和森林类型对土壤P有效性的影响机制,为寻找有效提高土壤P生物有效性的途径提供科学依据。

1 研究区概况

研究区设在湖南省长沙县路口镇大山冲湖南省森林公园及其附近,位于北纬 28°23′~28°24′,东经 113°17′~113°19′,属于幕阜山余脉的西缘,为典型的低山丘陵区,海拔高度 55~350 m,属于亚热带大陆型季风湿润气候,年平均气温 16.6~17.6℃,最高气温 40℃,最低气温-11℃,相对湿度较大,年降水量为 1 412~1 559 mm。研究区土壤以红壤为主,由板岩和页岩发育而成;地带性植被为亚热带常绿阔叶林;在湖南植被区划上,该地属于湘中湘东山丘盆地栲(*Castanopsis fargesii*)林、马尾松林、毛竹林、油茶(*Camellia oleifera*)林及农田植被区——幕阜、连云山山地丘陵植被小区;土地利用方式主要有弃荒地、农用地(菜地)、次生林地、人工林地、苗圃等。

2 研究方法

2.1 样地设置

在长沙县大山冲湖南省森林公园及其附近,选择杉木人工林、不同树种组成的次生林(马尾松+石栎针阔混交林、南酸枣落叶阔叶林、石栎+青冈常绿阔叶林)、毛竹林、弃荒地(编号分别为 1、2、3、4、5 和 6),分别建立面积各为 1 hm² 的固定样地,并进行样地调查。3 种次生林为天然次生林,没有人为干扰;杉木人工林有长期经营活动,如每年秋冬季清除林下植物和人工整枝,清除林内枯死木等,没有人为施肥;毛竹林每年秋末冬初清除林下植物、凋落物及枯死木,并进行机械耕翻、施加农家肥;弃荒地为休耕农田,具有长期耕作史,休耕 2 年以上。样地基本特征调查结果如表 1 所示。

表 1 样地的基本特征
Table 1 Fundamental characteristics of sample plots

样地编号 Sample plot number	土地利用方式 Land use type	优势树种 Dominant species	坡向 Aspect	坡度/(°) Slope	海拔/m Altitude	林龄/a Age	密度/ (株·hm ⁻²) Density	平均 胸径/cm Average DBH	平均 树高/m Average tree height
1	杉木人工林 <i>C. lanceolata</i> plantation forest	杉木 <i>C. lanceolata</i>	东南 Southeast	24	223~258	53	625	23.54	19.51
2	马尾松+石栎针阔混交林 <i>P. massoniana</i> + <i>L. glaber</i> mixed forest	马尾松 <i>P. massoniana</i> 、石栎 <i>L. glaber</i> 、南酸枣 <i>C. axillaries</i>	西南 Southwest	15	220~262	49	2 492	11.5	10.0
3	南酸枣落叶阔叶林 <i>C. axillaries</i> deciduous broad leaved forest	南酸枣 <i>C. axillaries</i> 、青冈 <i>C. glauca</i> 、马尾松 <i>P. massoniana</i> 、榿木 <i>Sassafras tsumu</i>	西 West	35	245~321	60	1 696	8.8	6.4
4	石栎+青冈常绿阔叶林 <i>L. glaber</i> + <i>C. glauca</i> evergreen broad-leaved forest	石栎 <i>L. glaber</i> 、青冈 <i>C. glauca</i> 、马尾松 <i>P. massoniana</i> 、榿木 <i>Sassafras tsumu</i> 、南酸枣 <i>C. axillaries</i>	西北 Northwest	22	225~254	60	1 340	12.7	10.3
5	毛竹林 <i>P. edulis</i> plantation	毛竹 <i>P. edulis</i>	东南 Southwest	15	210~230	32	8 452	13.54	9.25
6	弃荒地 Wasteland	/	东南 Southwest	5	100~150	/	/	/	/

2.2 样品的采集与分析

在杉木人工林、马尾松+石栎针阔混交林、南酸枣落叶阔叶林、石栎+青冈常绿阔叶林固定样地内,分别于上坡、中上坡、中坡、中下坡、下坡部位设置 1 块 10 m×10 m 的固定样方,构成 5 个重复;毛竹林、弃荒地地势平坦,在其中分别随机设置 5 个 10 m×10 m 的固定样方,构成 5 个重复。每个固定样方随机布置 3 个采样点,于 2014 年 3 月中旬连续晴天 1 周后,每个采样点均按 0~15 cm 及 15~30 cm 分层

采集土壤样品。采样时每个采样点挖 1 个土壤剖面,沿土壤剖面从下至上采集土壤,每个固定样方的 3 个采样点相同土层混合为 1 个土壤样品(约取 2 kg),放入无菌塑料袋,每种土地利用方式分别采集土壤样品 10 个。

在室内,清除植物根系、凋落物和石砾等杂质后,每一个土壤样品分成 2 份:1 份过孔径 2 mm 土壤筛后,装入无菌塑料袋密封,置于冰箱 0~4℃下保存,用于测定 MBP 含量;另 1 份自然风干后,过孔

径 0.15 mm 土壤筛,用于测定全磷(TP)、有效磷(AP)、有机碳(SOC)和全氮(TN)含量。MBP 含量参照吴金水等^[17] 建议的步骤,用氯仿熏蒸、NaHCO₃ 浸提法进行测定;TP 含量用王水酸熔钼锑抗比色法测定;AP 含量用双酸浸提分光光度比色法测定;SOC 含量用重铬酸钾水合加热法测定;TN 含量用半微量凯氏定氮法测定。同时用凋落物直接收集法测定凋落物量^[18];用根钻法采集细根,测定其生物量^[19]。取 5 个固定样方的算术平均值作为每种土地利用方式的最终测定结果。

2.3 数据统计与分析

土壤 MBP 占土壤 TP 百分比的计算公式为:

表 2 中亚热带山地不同土地利用方式下土壤 MBP 的平均含量

Table 2 Concentrations of soil microbial biomass phosphorus under different land use types in mid-subtropical zone

土层深度/cm Soil depth	1 号样地/ (mg · kg ⁻¹) 1 sample plot	2 号样地/ (mg · kg ⁻¹) 2 sample plot	3 号样地/ (mg · kg ⁻¹) 3 sample plot	4 号样地/ (mg · kg ⁻¹) 4 sample plot
0~15	5.72±2.26 Aa	13.71±7.74 ABDa	20.73±7.00 BDa	10.60±3.37 Aa
15~30	3.83±1.92 Aa	11.58±5.81 BCa	17.61±6.70 Ca	5.53±2.45 ABDb
土层深度/cm Soil depth	5 号样地/ (mg · kg ⁻¹) 5 sample plot	6 号样地/ (mg · kg ⁻¹) 6 sample plot	平均/(mg · kg ⁻¹) Mean	变异系数/% CV
0~15	37.13±7.98 Ca	21.10±9.56 Da	18.16	65.91
15~30	16.69±4.72 Cb	8.57±4.20 ABb	10.63	63.64

注:样本数 $n=5$ 。同行数据后标不同大写字母表示样地之间差异显著($P<0.05$),同列数据后标不同小写字母表示不同土层之间差异显著($P<0.05$),下表同。

Note:Sample number $n=5$. Different capital letters in each row indicate significant differences among sample plots ($P<0.05$),different lowercase letters in each column indicate significant differences between two soil depths ($P<0.05$). The same below.

由表 2 可知,中亚热带 6 种土地利用方式土壤 MBP 含量均表现为 0~15 cm 土层高于 15~30 cm 土层,其中,4、5、6 号样地两土层之间差异显著($P<0.05$),而其他样地两土层之间差异均不显著($P>0.05$)。0~15 cm 土层 MBP 含量在 (5.72±2.26)~(37.13±7.98) mg/kg,平均为 18.16 mg/kg,变异系数为 65.91%;15~30 cm 土层 MBP 含量在 (3.83±1.92)~(16.69±4.72) mg/kg,平均为 10.63 mg/kg,变异系数为 63.64%。同一土层不同土地利用方式 MBP 含量差异显著($P<0.05$),在 0~15 cm 土层,5 号样地 MBP 含量显著高于其他样地($P<0.05$),6、3 号样地显著高于 1、4 号样地($P<0.05$),其他样地两两之间差异均不显著($P>0.05$);在 15~30 cm 土层,3、5 号样地土壤 MBP 含量显著高于 1、4、6 号样地($P<0.05$),2 号样地显著高于 1 号样地($P<0.05$),但与 4、6 号样地差异不显著($P>0.05$)。

3.2 不同土地利用方式土壤的 TP、AP 含量

由表 3 可知,不同样地土壤 TP 平均含量也随

土壤 MBP 占 TP 百分比= $\frac{\text{土壤 MBP 含量}}{\text{土壤 TP 含量}}\times 100\%$ 。

应用 Excel 2010、SPSS19.0 软件包中的均数比较分析、单因素方差分析比较不同土地利用方式之间土壤 MBP、TP、AP 及 MBP 占 TP 百分比的差异显著性,用回归分析方法分析土壤 MBP 与 TP、AP、SOC、TN、凋落物量、细根生物量之间的相关性。

3 结果与分析

3.1 不同土地利用方式土壤的 MBP 含量

中亚热带山地不同土地利用方式下土壤 MBP 的平均含量如表 2 所示。

土层深度的增加而下降,0~15 cm 土层 TP 平均含量为 289.48 mg/kg,变异系数为 47.20%,15~30 cm 土层 TP 平均含量为 273.01 mg/kg,变异系数为 44.98%。除了 5 号样地土壤 TP 含量 0~15 cm 土层与 15~30 cm 土层之间差异显著($P<0.05$)外,其他样地两土层间差异均不显著($P>0.05$)。同一土层不同样地 TP 含量差异显著($P<0.05$),且两土层变化趋势基本一致:6 号样地显著高于 1~5 号样地($P<0.05$),5 号样地显著高于 1~4 号样地($P<0.05$),3 号样地显著高于 1、4 号样地($P<0.05$)。

表 3 显示,不同样地土壤 AP 含量也随土层深度的增加而降低,0~15 cm 土层 AP 平均含量为 6.35 mg/kg,变异系数为 159.37%,15~30 cm 土层 AP 平均含量为 4.85 mg/kg,变异系数为 154.01%。除 6 号样地 0~15 cm 土层与 15~30 cm 土层土壤 AP 含量差异显著外($P<0.05$),其他样地两土层之间差异均不显著($P>0.05$)。同一土层不同样地 AP 含量差异显著($P<0.05,n=5$),且两土层的变化趋势基本一致:6 号样地显著高于 1~

5 号样地($P<0.05$),5 号样地显著高于 1~4 号样地($P<0.05$)。

表 3 中亚热带不同土地利用方式下土壤的全磷(TP)、有效磷(AP)含量

Table 3 Concentrations of soil total phosphorus and available phosphorus under different land use types in mid-subtropical zone

P 形态 P forms	土层深度/cm Soil depth	1 号样地/ (mg · kg ⁻¹) 1 sample plot	2 号样地/ (mg · kg ⁻¹) 2 sample plot	3 号样地/ (mg · kg ⁻¹) 3 sample plot	4 号样地/ (mg · kg ⁻¹) 4 sample plot
TP	0~15	200.81±47.12 Aa	227.02±17.22 ABa	255.35±23.13 Ba	182.46±12.07 Aa
	15~30	181.36±29.00 Aa	210.76±3.86 ABa	243.27±21.90 Ba	175.93±13.55 Aa
AP	0~15	1.00±0.34 Aa	1.63±0.30 Aa	2.11±0.34 Aa	1.90±0.53 Aa
	15~30	0.93±0.34 Aa	1.25±0.41 Aa	1.42±0.38 Aa	1.28±0.31 Aa
P 形态 P forms	土层深度/cm Soil depth	5 号样地/ (mg · kg ⁻¹) 5 sample plot	6 号样地/ (mg · kg ⁻¹) 6 sample plot	平均/ (mg · kg ⁻¹) Mean	变异系数/% CV
TP	0~15	312.83±21.87 Ca	590.96±79.98 Da	289.48	47.20
	15~30	313.87±21.82 Cb	512.45±71.45 Da	273.01	44.98
AP	0~15	4.37±1.88 Ba	27.75±3.06 Ca	6.35	159.37
	15~30	2.77±1.53 Ba	20.79±1.44 Cb	4.85	154.01

3.3 不同土地利用方式土壤 MBP 占 TP 的百分比

表 4 表明,不同样地两土层土壤 MBP 含量占其土壤 TP 含量的百分比在(2.10±0.89)%~(11.97±3.00)%,均表现为 0~15 cm 土层高于 15~30 cm 土层,但除 4、5 号样地两土层之间差异显著外($P<0.05$),其他样地两土层之间差异均不显著($P>0.05$)。同一土层不同样地之间差异显著

($P<0.05,n=5$),在 0~15 cm 土层,5 号样地显著高于其他样地($P<0.05$),3 号样地显著高于 1、6 号样地($P<0.05$),其他样地之间差异均不显著($P>0.05$);在 15~30 cm 土层,2、3、5 号样地显著高于 1、6 号样地($P<0.05$),4 号样地显著低于 3 号样地($P<0.05$)。

表 4 中亚热带不同土地利用方式下土壤 MBP 占 TP 的百分比

Table 4 Ratio of soil microbial biomass phosphorus to total phosphorus under different land use types in mid-subtropical zone

土层 深度/cm Soil depth	1 号样地 1 sample plot	2 号样地 2 sample plot	3 号样地 3 sample plot	4 号样地 4 sample plot	5 号样地 5 sample plot	6 号样地 6 sample plot	平均值 mean	变异 系数 CV
0~15	3.04±1.46 Aa	6.06±3.32 ABa	8.03±2.44 Ba	5.75±1.72 ABa	11.97±3.00 Ca	3.95±2.17 Aa	6.35	60.14
15~30	2.10±0.89 Aa	5.49±2.73 BCa	7.20±2.63 Ca	3.22±1.53 ABb	5.29±1.40 BCb	2.24±2.55 Aa	4.66	93.17

3.4 不同土地利用方式土壤 SOC、TN 含量及凋落物量和细根生物量

不同样地土壤 SOC 含量为 11.24~33.26 g/kg,0~15 cm 土层 SOC 含量显著高于 15~30 cm 土层(除 5 号样地外),呈现出明显的表聚性。同一土层不同样地土壤 SOC 含量差异显著($P<0.05$),在 0~15 cm 土层,1 号样地显著低于 2、3、4 号样地($P<0.05$),但与 5、6 号样地差异不显著($P>0.05$),6 号样地显著低于 2、3 号样地($P<0.05$);15~30 cm 土层,4 号样地 SOC 含量最低,与 3、5、6 号样地之间差异显著($P<0.05$),1、2 号样地显著低于 5 号样地($P<0.05$)。不同样地土壤 TN 含量在 0.30~2.35 g/kg,平均含量为 1.21 g/kg,各样地土壤 TN 含量随土层的加深而降低,且 1、2 号样地两土层之间差异显著($P<0.05$)。同一土层不同样地土壤 TN 含量差异显著($P<0.05$)。在 0~15 cm 土层,5 号样地 TN 含量最高,且显著高于 1~4 号

样地($P<0.05$),2 号样地最低,且显著低于 5、6 号样地。15~30 cm 土层,6 号样地 TN 含量最高,且与 1~4 号样地之间差异显著,2 号样地最低,与 1、4~6 号样地之间均差异显著($P<0.05$)。由于经营措施的原因,5、6 号样地没有测定凋落物量和细根生物量,1~4 号样地凋落物量在 5.11~69.63 g/(m² · a),平均为 30.93 g/(m² · a);2 号样地凋落物量最高,1 号样地最低,且两者差异显著($P<0.05$),3、4 号样地与 1、2 号样地之间差异不显著($P>0.05$)。1~4 号样地细根生物量在 69.87~269.98 g/m²,平均为 149.68 g/m²。4 号样地细根生物量最高,1 号样地最低,但 2、3 号样地与 1、4 号样地之间差异均不显著($P>0.05$)。

3.5 土壤 MBP 含量与养分含量、凋落物量、细根生物量的相关性

对 6 种样地土壤 MBP 含量与土壤养分含量、凋落物量、细根生物量进行相关性分析,由于经营措施

的原因,没有分析 5、6 号样地土壤 MBP 含量与凋落物量、细根生物量的相关性。结果(表 5)表明,整个研究区土壤 MBP 含量与土壤 SOC、TN 之间呈极显著正相关($P<0.01$),但与 TP、AP 不存在相关性($P>0.05$)。森林区(1~4 号样地)土壤 MBP 与 TP 呈极显著正相关($P<0.01$),与土壤 AP、SOC 呈显著正相关($P<0.05$),与土壤 TN、凋落物量、细

根生物量不存在相关性($P>0.05$)。各样地土壤 MBP 与土壤 TP、凋落物量、细根生物量之间不存在显著相关性($P>0.05$),3 号样地土壤 MBP 与土壤 AP 相关性极显著($P<0.01$),5 号样地土壤 MBP 与土壤 SOC 呈极显著正相关($P<0.01$),1 号样地土壤 MBP 与土壤 TN 呈显著正相关($P<0.05$)。

表 5 中亚热带土壤 MBP 含量与土壤养分、凋落物量、细根生物量之间的相关系数

Table 5 Coefficients between soil microbial biomass phosphorus and soil nutrients, litter, fine root biomass in mid-subtropical zone								
项目 Item	研究区 Research region (n=60)	森林区 Forest region (n=40)	1 号样地 1 sample plot (n=10)	2 号样地 2 sample plot (n=10)	3 号样地 3 sample plot (n=10)	4 号样地 4 sample plot (n=10)	5 号样地 5 sample plot (n=10)	6 号样地 6 sample plot (n=10)
TP	0.238	0.565 **	0.269	0.111	0.502	0.231	0.185	0.186
AP	0.061	0.362 *	0.494	0.199	0.865 **	0.138	-0.151	0.310
SOC	0.423 **	0.335 *	0.575	0.403	0.319	0.594	0.823 **	0.398
TN	0.395 **	0.185	0.657 *	0.064	0.433	0.204	0.604	0.027
凋落物量 Litter	—	-0.041	0.334	-0.363	-0.272	0.269	—	—
细根生物量 Fine root biomass	—	-0.278	0.338	0.201	-0.441	-0.227	—	—

注:森林区包括杉木人工林和次生林(马尾松+石栎阔混交林、南酸枣落叶阔叶林及石栎+青冈常绿阔叶林);n 为样本数,* 表示相关性显著($P<0.05$),** 表示相关性极显著($P<0.01$)。
Note:The forest region includes *C. lanceolata* plantation forest,secondary forests (i. e. ,*P. massoniana*+*L. glaber* mixed forest,*C. axillaries* deciduous broad leaved forest,*L. glaber*+*C. glauca* evergreen broad-leaved forest);n is sample number, * significant at 0.05 level ($P<0.05$), ** significant at 0.01 level ($P<0.01$).

4 讨论与结论

P 以沉积形式存在和贮存土壤中,而且在土壤中具有特定的化学行为,利用率很低^[20]。研究表明,人类活动尤其是施肥对土壤 P 含量的增加具有重要意义^[21],阔叶林凋落物量较高,土壤有机质积累速度快^[22],因而土壤 TP、AP 含量高,针叶林 AP 含量最低是由于其对 AP 的消耗很大^[23],凋落物较难分解。由于亚热带地区的气候特点及土壤性质,土壤 TP、AP 含量极低。本研究中,不同样地土壤 TP、AP 均呈现出表聚性,这可能是由于植被根系从深层土壤吸收养分,通过枯枝落叶等形式将部分养分归还土壤时养分首先聚集在土壤表层所致^[24]。由于 5 号样地每年施肥,土壤 TP、AP 含量均高于 4 种林地;6 号样地停止耕种后,在自然恢复过程中生长的一年生草本植物腐烂分解后,可增加土壤养分含量^[25],因此 6 号样地土壤 TP、AP 含量也较高。而 1~4 号样地土壤 TP、AP 含量差异总体均不显著,表明土壤 TP 含量主要受土壤母质及成土作用的影响,森林植被类型对土壤 TP、AP 含量影响不大^[26]。

土壤 MBP 含量在一定程度上能反映土壤的供

P 水平,但受土壤性状、肥力水平、种植管理措施及有机物种类等因素的影响,土壤 MBP 含量变异较大^[5,27]。本研究中,6 种样地土壤 MBP 平均含量为 14.40 mg/kg,主要分布区间为 3.00~32.00 mg/kg (85.0%),与林启美^[27]的研究结果基本一致。5 号样地土壤 MBP 含量最高,这可能与 5 号样地每年翻耕、施肥有关。耕作不但影响土壤理化性质,还影响土壤生物化学特征^[6],免耕和少耕有利于土壤 MBP 的增加,与传统农业耕作方式相比能提高表层(0~5 cm)土壤微生物生物量和有机质含量^[28];施肥可显著提高土壤 MBP 含量^[6,29-30]。施用 P 肥,土壤 AP 含量增加,更多的无机 P 被同化结合到微生物体内,当土壤 AP 被植物耗竭时,微生物将被迫释放出来供植物吸收利用^[4,31]。

天然次生林由于树种丰富、多样性高、凋落物量大,土壤微生物生物量要高于杉木人工林^[32]。此外,不同森林由于组成树种不同,树种根系分布特征及其细根分布也不同,从而对土壤 MBP 含量产生很大影响^[33],添加凋落物的土壤微生物生物量显著高于未添加的土壤^[34]。本研究中,1~4 号样地土壤 MBP 与凋落物量、细根生物量之间不存在显著相关性,表明凋落物量、细根生物量不是影响森林土壤

MBP 含量的主要因素;森林区(1~4 号样地)土壤 MBP 含量与 TP 含量呈极显著正相关,这与现有的研究结果^[33,35-36]一致,可能是 3 号样地 MBP 含量高于 1、2、4 号样地的原因之一,表明土壤 TP 有利于促进土壤微生物对 P 的固定^[33],在养分缺乏土壤中,在保证其他养分(如 N、K)供给的前提下,可通过施加 P 肥来提高土壤的 TP 含量,从而增加土壤 MBP 含量,促进土壤 P 的周转及循环,提高 P 的有效性,以满足植物生长的需要。

土壤 MBP 是土壤 AP 的重要来源,且与土壤 AP 直接平衡^[37],两者之间呈显著或极显著正相关关系^[10,36,38-39]。本研究中,研究区土壤 MBP 与土壤 AP 不存在显著相关性,这可能是由于 5、6 号样地受人类活动(如施肥、耕翻)干扰较大所致。森林区(1~4 号样地)土壤 MBP 与 AP 呈显著正相关关系,表明森林土壤 MBP 含量主要与土壤中 P 含量及其有效性有关^[38]。另外,中亚热带山地红壤 P 的利用率普遍偏低,为提高土壤 P 的利用率,可通过刺激微生物生长,促进微生物对 P 的转化利用,提高 MBP 含量,从而增加土壤 AP 含量,以满足植物生长所需^[39]。研究区土壤 MBP 含量与土壤 SOC、TN 含量呈极显著正相关,与刘守龙等^[40]、李玥等^[33]的研究结果一致,表明土壤 SOC、TN 含量也是影响土壤 MBP 含量的重要因素。

土壤 MBP 含量随着土层深度的增加而降低,这一方面是因为表层土壤通气状况良好,温度较高,有利于土壤微生物的活动及繁殖^[41];另一方面是由于土壤微生物大多属于异养型,动植物残体的分解、根系分泌物及土壤有机物质、无机物质量均随着土层深度的增加而减少,微生物获得的营养物质减少,深层土壤微生物也减慢其自身的合成代谢,从而导致 MBP 含量降低^[42]。不同土壤 MBP 占 TP 的百分比差异很大^[6,43]。本研究中,1~4 号样地土壤 MBP 含量占其土壤 TP 含量的百分比主要分布在 1.15%~6.43%(70%),其中 3 号样地最高,表明 3 号样地维持土壤微生物生物量的能力及土壤 P 的积累强度高于 1、2、4 号样地。5 号样地土壤 MBP 含量占 TP 含量的百分比主要在 3.42%~10.89%(80%),6 号样地主要为 0.89%~2.79%(70%),表明施肥及耕作措施可能是提高土壤 P 积累的一种途径,撂荒处理可能导致土壤有效 P 组分的流失,土壤 P 积累强度降低。土壤 MBP 含量占土壤 TP 含量的百分比随土层深度的增加而下降,表明表层土壤 P 积累强度高于深层土壤。

[参考文献]

- [1] Wissuwa M. How do plants achieve tolerance to phosphorus deficiency? Small causes with big effects [J]. *Plant Physiology*, 2003, 133: 1947-1958.
- [2] 张福锁,崔振岭,王激清,等. 中国土壤和植物养分管理现状与改进策略 [J]. *植物学通报*, 2007, 24(6): 687-694.
Zhang F S, Cui Z L, Wang J Q, et al. Current status of soil and plant nutrient management in China and improvement strategies [J]. *Chin Bull Bot*, 2007, 24(6): 687-694.
- [3] 詹书侠,陈伏生,胡小飞,等. 中亚热带丘陵红壤区森林演替典型阶段土壤氮磷有效性 [J]. *生态学报*, 2009, 29(9): 4673-4680.
Zhan S X, Chen F S, Hu X F, et al. Soil nitrogen and phosphorus availability in forest ecosystems at different stages of succession in the central subtropical region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(9): 4673-4680.
- [4] Jenkinson D S, Ladd J N. Microbial biomass in soil measurement and turnover [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1981 (5): 451-471.
- [5] 黄敏,吴金水,黄巧云,等. 土壤磷素微生物作用的研究进展 [J]. *生态环境*, 2003, 12(3): 366-370.
Huang M, Wu J S, Huang Q Y, et al. Process in research on microbiological action of soil phosphorus [J]. *Ecology of Environment*, 2003, 12(3): 366-370.
- [6] 徐阳春,沈其荣,冉伟. 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响 [J]. *土壤学报*, 2002, 39(1): 89-96.
Xu Y C, Shen Q R, Ran W. Effects of zero-tillage and application of manure on soil microbial biomass C, N and P after sixteen years of cropping [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(1): 89-96.
- [7] Frank W S. The phosphate uptake mechanism [J]. *Plant and Soil*, 2002, 245(221): 105-114.
- [8] Brookes P C, Mcgrath S P. Effects of metal toxicity on the size of the soil microbial biomass [J]. *J of Soil Sci*, 1984, 35: 341-346.
- [9] Collins H P, Rasmussen P E. Crop rotation and residue management effects on soil carbon and microbial dynamics [J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1992, 56(4): 783-788.
- [10] 彭佩钦,吴金水,黄道友,等. 洞庭湖区不同利用方式对土壤微生物生物量碳氮磷的影响 [J]. *生态学报*, 2006, 26(7): 2261-2267.
Peng P Q, Wu J S, Huang D Y, et al. Microbial biomass C, N, P of farmland soils in different land uses and cropping systems in Dongting Lake region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(7): 2261-2267.
- [11] 黄敏. 亚热带丘陵区土壤有机碳、磷变异特征及驱动因子研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2005.
Huang M. Variation characteristics and driving factors of soil organic carbon and phosphorus in hilly regions of subtropical China [D]. Wuhan: Huazhong Agriculture University, 2005.
- [12] 李灵. 南方红壤丘陵区不同土地利用的土壤生态效应研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2010.

- Li L. Study on soil ecological effects of different land use in red soil hilly region of southern China [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2010.
- [13] 张乃丽,郭继勋. 松嫩草甸寸草苔群落土壤微生物量磷的初步研究 [J]. 草业学报, 2006, 15(5): 19-24.
- Zhang N L, Guo J X. Research on soil microbial biomass phosphorus in a *Carex duriuscula* community of Songnen meadow [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2006, 15(5): 19-24.
- [14] 冯瑞章,周万海,龙瑞军,等. 江河源区不同建植期人工草地土壤养分及微生物量磷和磷酸酶活性研究 [J]. 草业学报, 2007, 16(6): 1-6.
- Feng R Z, Zhou W H, Long R J, et al. Study on the changes of soil nutrients, microbial biomass P and neutral phosphatase activity of artificial grassland sown in different years in the headwaters of Yangtze and Yellow Rivers [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2007, 16(6): 1-6.
- [15] Katarzyna H, Chritel B, Peter L. Mycorrhizal community structure, microbial biomass P and phosphatase activities under *Salix polaris* as influenced by nutrient availability [J]. Soil Biology, 2009, 45: 168-175.
- [16] 崔纪超,毛艳玲,杨智杰,等. 土壤微生物生物量磷研究进展 [J]. 亚热带资源与环境学报, 2008, 3(4): 80-89.
- Cui J C, Mao Y L, Yang Z J, et al. Advances in soil microbial biomass phosphorus [J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2008, 3(4): 80-89.
- [17] 吴金水,肖和艾,陈桂秋,等. 旱地土壤微生物磷测定方法研究 [J]. 土壤学报, 2003, 40(1): 70-78.
- Wu J S, Xiao H A, Chen G Q, et al. Measurement of microbial biomass-P in upland soils in China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(1): 70-78.
- [18] 郭婧,喻林华,方晰,等. 中亚热带4种森林凋落物量、组成、动态及其周转期 [J]. 生态学报, 2015, 35(14): 1-14.
- Guo J, Yu L H, Fang X, et al. Litter production and turnover in four types of subtropical forests in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(14): 1-14.
- [19] 刘聪,项文化,田大伦,等. 中亚热带森林植物多样性增加导致细根生物量“超产” [J]. 植物生态学报, 2011, 35(5): 539-550.
- Liu C, Xiang W H, Tian D L, et al. Overyielding of fine root biomass as increasing plant species richness in subtropical in central southern China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(5): 539-550.
- [20] 沈善敏. 中国土壤肥力 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1997.
- Shen S M. Soil fertility in China [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1997.
- [21] 刘志鹏. 黄土高原地区土壤养分的空间分布及其影响因素 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- Liu Z P. Spatial distribution of soil nutrients and the impact factors across the loess plateau of China [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [22] 刘鸿雁,黄建国. 缙云山森林群落次生演替中土壤理化性质的动态变化 [J]. 应用生态学报, 2005, 16(11): 2041-2046.
- Liu H Y, Huang J G. Dynamics of soil properties under secondary succession forest communities in Mt. Jiyun [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(11): 2041-2046.
- [23] 刘西军,黄庆丰,聂昌伟,等. 肖坑不同森林类型土壤氮、磷含量研究 [J]. 安徽农业大学学报, 2008, 35(1): 124-127.
- Liu X J, Huang Q F, Nie C W, et al. Research on nitrogen and phosphorus content in soil of different forest types in Xiaokeng [J]. Journal of Anhui Agriculture University, 2008, 35(1): 124-127.
- [24] 满秀玲,刘斌,李奕. 小兴安岭草本泥炭沼泽土壤有机碳、氮和磷分布特征 [J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(6): 48-53.
- Man X L, Liu B, Li Y. Distribution characteristics of organic carbon, nitrogen and phosphorus in the soils of herbaceous peat swamps in the Xiaoxing'an Mountains [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2010, 32(6): 48-53.
- [25] 巩杰,陈利顶,傅伯杰,等. 黄土丘陵区小流域植被恢复的土壤养分效应研究 [J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 93-96.
- Gong J, Chen L D, Fu B J, et al. Effects of vegetation restoration on soil nutrient in a small catchment in hilly loess area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(1): 93-96.
- [26] 李明治,姜红梅. 祁连山东段典型植被演替过程中的土壤养分效应: 以天祝县为例 [EB/OL]. 北京: 中国科技论文在线, [2011-02-25] [http://www. paper. edu. cn/releasepaper/content/201102-755](http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201102-755).
- Li M Z, Jiang H M. Effects of soil nutrient in the succession of typical vegetation in the eastern Qilian mountains; focus on Tianzhu County [EB/OL]. Beijing: Science Paper Online, [2011-02-25] <http://www. paper. edu. cn/releasepaper/content/201102-755>.
- [27] 林启美. 土壤可溶性无机磷对微生物生物量磷测定的干扰 [J]. 生态学报, 2001, 21(6): 993-996.
- Lin Q M. Interference of soil soluble inorganic P in measurement of soil microbial biomass P [J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(6): 993-996.
- [28] 王岩,沈其荣,史瑞和,等. 土壤微生物量及其生态效应 [J]. 南京农业大学学报, 1996, 19(4): 45-51.
- Wang Y, Shen Q R, Shi R H, et al. Soil microbial biomass and its ecological effects [J]. Journal of Nanjing Agriculture University, 1996, 19(4): 45-51.
- [29] 来璐,郝明德,王永功. 黄土高原旱地长期轮作与施肥土壤微生物量磷的变化 [J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(5): 546-549.
- Lai L, Hao M D, Wang Y G. Changes of long-term rotation and fertilization on soil microbial phosphorus under dryland in loess plateau [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(5): 546-549.
- [30] Kandeler E, Palli S, Stemmer M, et al. Tillage changes microbial biomass and enzyme activities in particle-size fractions of a Haplic Chernozem [J]. Soil Biol Biochem, 1999, 31: 1253-1264.
- [31] Kouno K, Wu J S, Brookes P C. Turnover period of biomass C

- and P in soil following in corporation of glucose of ryegrass [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34(5): 617-622.
- [32] 杨玉盛,何宗明,邹双全,等. 格氏栲天然林与人工林根际土壤微生物及其生化特性的研究 [J]. 生态学报, 1998, 18(2): 198-202.
- Yang Y S, He Z M, Zou S Q, et al. A study on the soil microbes and biochemistry of rhizospheric and total soil in natural forest and plantation of *Castanopsis Kauakamii* [J]. Acta Ecologica Sinica, 1998, 18(2): 198-202.
- [33] 李 玥,张金池,潘士华,等. 上海市沿海防护林土壤微生物生物量磷的研究 [J]. 林业科技开发, 2010, 24(2): 65-70.
- Li Y, Zhang J C, Pan S H, et al. Study on the soil microbial biomass P of coastal protective forest in Shanghai [J]. China Forestry Science and Technology, 2010, 24(2): 65-70.
- [34] 王清奎,汪思龙,于小军,等. 杉木与阔叶树叶凋落物混合分解对土壤活性有机质的影响 [J]. 应用生态学报, 2007, 18(6): 1203-1207.
- Wang Q K, Wang S L, Yu X J, et al. Effects of *Cunninghamia lanceolata*-broadleaved tree species mixed leaf litters on active soil organic matter [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(6): 1203-1207.
- [35] 张成娥,王栓全. 作物秸秆腐解过程中土壤微生物量的研究 [J]. 水土保持学报, 2000, 14(3): 96-99.
- Zhang C E, Wang S Q. Study on soil microbial biomass during decomposition of crop straws [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 14(3): 96-99.
- [36] 刘恩科,梅旭荣,赵秉强,等. 长期不同施肥制度对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响 [J]. 中国农业大学学报, 2009, 14(3): 63-68.
- Liu E K, Mei X R, Zhao B Q, et al. Long-term effects of different fertilizer management on microbial biomass C, N and P in a Fluvo-aquic soil [J]. Journal of China Agriculture University, 2009, 14(3): 63-68.
- [37] 张世熔,黄元仿,李保国,等. 黄淮海冲积平原区土壤速效磷、钾的时空变异特征 [J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(1): 3-8.
- Zhang S R, Huang Y F, Li B G, et al. Temporal-spatial variability of soil available phosphorus and potassium in the alluvial region of the Huang-Huai-Hai plain [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2003, 9(1): 3-8.
- [38] 王国兵,郝岩松,王 兵,等. 土地利用方式的改变对土壤呼吸及土壤微生物生物量的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(S2): 73-79.
- Wang G B, Hao Y S, Wang B, et al. Influence of land-use change on soil respiration and soil microbial biomass [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(S2): 73-79.
- [39] 陈国潮,何振立,黄昌勇. 红壤微生物量磷与土壤磷之间的相关性研究 [J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 1999, 25(5): 513-516.
- Chen G C, He Z L, Huang C Y. Study on relationship between microbial biomass phosphorus and soil phosphorus in red soils [J]. Journal of Zhejiang University(Agric & Lise Sci), 1999, 25(5): 513-516.
- [40] 刘守龙,肖和艾,童成立,等. 亚热带稻田土壤微生物生物量碳、氮、磷状况及其对施肥的反应特点 [J]. 农业现代化研究, 2003, 24(4): 278-283.
- Liu S L, Xiao H A, Tong C L, et al. Microbial biomass C, N and P and their responses to application of inorganic and organic fertilizers in subtropical paddy soils [J]. Research of Agriculture Modernization, 2003, 24(4): 278-283.
- [41] 谢龙莲,陈秋波,王真辉,等. 环境变化对土壤微生物的影响 [J]. 热带农业科学, 2004, 24(3): 39-47.
- Xie L L, Chen Q B, Wang Z H, et al. A review of effects of soil environmental changes on soil microbe [J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2004, 24(3): 39-47.
- [42] 漆良华,张旭东,周金星,等. 湘西北小流域不同植被恢复区土壤微生物数量、生物量碳氮及其分形特征 [J]. 林业科学, 2009, 45(8): 14-20.
- Qi L H, Zhang X D, Zhou J X, et al. Soil microbe quantities, microbial carbon and nitrogen and fractal characteristics under different vegetation restoration patterns in watershed, north-west Hunan [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(8): 14-20.
- [43] 李春越,王 益,Philip B,等. pH 对土壤微生物 C/P 比的影响 [J]. 中国农业科学, 2013, 46(13): 2709-2716.
- Li C Y, Wang Y, Philip B, et al. Effect of soil pH on soil microbial carbon phosphorus ratio [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(13): 2709-2716.