

南亚热带酸性森林土壤微生物生物量磷测定方法选择^①

李朝英¹, 郑路^{1,2,5*}, 胡刚³, 杨海菊^{4,5}, 刘士玲^{1,2,5}, 闵惠琳^{1,2,5}

(1 中国林业科学研究院热带林业实验中心, 广西凭祥 532600; 2 广西友谊关森林生态系统定位观测研究站, 崇左凭祥友谊关森林生态系统广西野外科学观测研究站, 广西凭祥 532600; 3 南宁师范大学环境与生命科学学院, 南宁 532000; 4 广西壮族自治区生态环境监测中心, 南宁 532000; 5 国家生态质量综合监测站(广西友谊关站), 广西凭祥 532600)

摘要: 本研究对氯仿熏蒸–碳酸氢钠浸提(SB)法、氯仿熏蒸–氟化铵–盐酸浸提(AFHC)法以及氯仿熏蒸–盐酸–硫酸浸提 (HASA)法测定南亚热带酸性土壤中微生物生物量磷(MBP)含量进行系统比较, 旨在为酸性土壤 MBP 磷含量的测定方法优化选择提供依据。结果表明: 上述 3 种方法的无机磷加标回收率分别为 21.62%、27.39%、43.48%, 酸性土壤对无机磷的吸附和固定作用强烈, 3 种方法均未充分提取土壤中的无机磷。SB 法的磷增量显著小于另外两种方法, 磷提取不充分; AFHC 法和 HASA 法的磷增量相当, 磷提取效果良好。3 种方法的测定结果呈显著性差异($P<0.05$)。其中, SB 法的滤液颜色干扰检测, 变异系数(CV)为 17.50%, 精密度显著低于另外两种方法; AFHC 法的 CV 为 8.81%, 精密度良好, 但部分酸性土壤浸提滤液出现浑浊, 影响正常检测; HASA 法的 CV 为 8.76%, 精密度良好, 酸性土壤浸提滤液澄清, 检测干扰少, 检测优势明显, 可用于南亚热带酸性土壤 MBP 含量测定。

关键词: 酸性森林土壤; 微生物生物量磷; 氯仿熏蒸–碳酸氢钠浸提法; 氯仿熏蒸–氟化铵–盐酸浸提法; 氯仿熏蒸–盐酸–硫酸浸提法; 无机磷加标回收率; 磷增量

中图分类号: S151.93 文献标志码: A

Selection of Methods for Determining Microbial Biomass Phosphorus in South Subtropical Acid Forest Soils

LI Zhaoying¹, ZHENG Lu^{1,2,5*}, HU Gang³, YANG Haiju^{4,5}, LIU Shiling^{1,2,5}, MING Huilin^{1,2,5}

(1 Tropical Forestry Experimental Center, Chinese Academy of Forestry Sciences, Pingxiang, Guangxi 532600, China; 2 Guangxi Youyiguan Forest Ecosystem National Observation and Research Station, Youyiguan Forest Ecosystem Observation and Research Station of Guangxi, Pingxiang, Guangxi 532600, China; 3 College of Environment and Life Science, Nanning Normal University, Nanning 532000, China; 4 Guangxi Zhuang Autonomous Region Environmental Monitoring Center, Nanning 532000, China; 5 National Comprehensive Ecological Quality Monitoring Station (Guangxi Youyiguan Station), Pingxiang, Guangxi 532600, China)

Abstract: In order to provide a scientific basis for optimizing the selection of determination methods for microbial biomass phosphorus (MBP) content in acidic soils, this study conducted a systematic comparison of three methods for determining the content of MBP in south subtropical acidic soils: the chloroform fumigation-sodium bicarbonate extraction method (SB method), the chloroform fumigation-ammonium fluoride-hydrochloric acid extraction method (AFHC method), and the chloroform fumigation-hydrochloric acid-sulfuric acid extraction method (HASA method). The results showed that the spiked recovery rates of inorganic phosphorus for the three methods were 21.62%, 27.39%, and 43.48%, respectively. Acidic soils exhibited strong adsorption and fixation of inorganic phosphorus, and none of the three methods fully extracted inorganic phosphorus from the soil. The phosphorus increment of SB method was significantly lower than that of the other two methods, indicating insufficient phosphorus extraction. The phosphorus increments of AFHC and HASA methods were comparable, with good phosphorus extraction efficiency. The determination results of the three methods showed significant differences ($P<0.05$). The filtrate color of SB method interfered with detection, with a coefficient of variation (CV) of 17.50%, and its precision was significantly lower

①基金项目: 崇左凭祥友谊关森林生态系统广西野外科学观测研究站创新能力建设项目(桂科 AD25069098)和广西林业科技推广示范项目(桂林科研[2022]第 27 号, 2023GXLYK45)资助。

* 通信作者(zhengluli@163.com)

作者简介: 李朝英(1971—)女, 甘肃酒泉人, 本科, 高级实验师, 主要从事实验室检测分析工作。E-mail: lzying1877@sina.com

than that of the other two methods. AFHC method had a CV of 8.81%, indicating good precision, but turbid filtrates occurred in some acidic soil extracts, affecting normal detection. HASA method had a CV of 8.76%, showing good precision, with clear acidic soil extraction filtrates and minimal detection interference, and this method has obvious detection advantages and can be used for the determination of MBP content in south subtropical acidic soils.

Key words: Acid forest soil; Microbial biomass phosphorus; Chloroform fumigation-sodium bicarbonate extraction method; Chloroform fumigation-ammonium fluoride-hydrochloric acid extraction method; Chloroform fumigation-hydrochloric acid-sulfuric acid extraction method; Spike recovery rate of inorganic phosphorus; Phosphorus increment

土壤微生物不仅控制土壤有机质和主要养分的循环过程,其本身还是重要的活性养分库,在土壤养分循环和生物修复等功能中发挥着至关重要的作用^[1-3]。土壤微生物生物量碳、氮、磷含量在一定程度上反映了生态系统物质循环能力、土壤肥力和植物生产力,对环境响应非常敏感,通常被作为土壤质量变化的指示指标。因此,准确测定土壤微生物生物量对全球气候变化背景下碳、氮、磷平衡及其循环机制研究,以及土壤微生物生物量对环境变化响应、对土壤肥力和养分有效性影响等研究具有重要意义^[4-6]。

在前人研究中,土壤微生物生物量磷(MBP)含量测定有多种方法,但存在不确定性。目前,氯仿熏蒸-碳酸氢钠提取法是土壤 MBP 含量测定的主要方法^[7-8],其以熏蒸土壤较对照未熏蒸土壤碳酸氢钠提取液中的全磷增量表征土壤 MBP 含量^[9-10]。该方法消化过程繁琐,且因稀释比例扩大(3 倍~5 倍)而加大了分析误差。特别对于磷固定能力强和 MBP 含量较低的土壤,因熏蒸后提取的磷增量过小,导致测定误差相对更大,测定结果不能使用^[11]。早期 Brookes 等^[12]研究发现,土壤熏蒸处理释放的磷大部分为无机磷,且通过比较 4 种提取剂的提取效果,发现 0.5 mol/L 碳酸氢钠溶液的提取效果最为理想,因此建议用此浓度碳酸氢钠溶液提取土壤 MBP。但之后 Oberson 等^[13]与 Potter 等^[14]研究发现,酸性土壤用碳酸氢钠溶液浸提磷的性能极不稳定,难以获得可靠的 MBP 含量,而 Bray-1 法(0.03 mol/L 氟化铵-0.025 mol/L 盐酸为提取剂)的测定结果较稳定。且一些其他学者也得到了类似的结论^[11, 15-16]。

Kouno 等^[16]指出,在熏蒸-提取过程中,从微生物细胞释放的磷易被土壤吸附和固定。因此,通常需测定无机磷加标回收率以校正测定结果。Wu 等^[11]认为,无机磷回收率低估了土壤 MBP 含量,主张测定培养微生物 MBP 的回收率校正测定结果。但实验室培养的微生物的性质、组成及空间分布与土壤原有微生物很难一致,仍有人为的因素存在^[6]。当前,学界主要推荐采用无机磷加标回收率校正测定结果^[17-19]。因

此,确定无机磷加标回收率和熏蒸与未熏蒸土壤提取磷的差值(即磷增量)均是测定土壤 MBP 含量的重要组成,也是方法研究的重点。

目前,国内针对不同方法测定酸性土壤 MBP 含量的比较分析仍少有报道,导致对于相关情况的认知十分有限,酸性土壤 MBP 含量测定的方法选择依据尚显不足。为了更加准确地检测,避免因方法选择不当导致测定结果出现较大误差,有必要对不同方法的测定结果进行系统比较分析,验证酸性土壤 MBP 含量测定的适宜方法,为酸性土壤 MBP 测定方法的选择提供参考。因此,本研究选择南亚热带酸性土壤为试验土壤,系统比较氯仿熏蒸后分别采用碳酸氢钠浸提法、氟化铵-盐酸浸提法以及盐酸-硫酸浸提法^[20-21]测定的 MBP 含量及其差异,为酸性土壤 MBP 测定的标准化提供支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土样包括采自广西友谊关森林生态系统定位观测研究站的 18 个土样和采自广西大明山自然保护区的 6 个土样,共 24 个样品,依次编号 1~24。采集的土样过 2 mm 筛,分成两份:一份保存于 4℃冰箱用于土壤 MBP 的测定;一份风干后测定土壤 pH、有机碳、全磷、有效磷等指标^[18,22-23]。供试土样基本性质如表 1 所示。

1.2 测定方法比较试验

24 个土壤鲜样调节含水量后于 25℃ 密闭培养 7 d,之后每个土样各称取 9 份,每份 3.0 g。其中,3 份同时放入有氯仿的干燥器中,抽真空至氯仿暴沸 2~3 min,再在暗处放置 24 h 后,开盖除尽氯仿,分别作为氯仿熏蒸-碳酸氢钠浸提(SB)法、氯仿熏蒸-氟化铵-盐酸浸提(AFHC)法和氯仿熏蒸-盐酸-硫酸浸提(HASA)法 3 种方法的熏蒸土样;3 份未熏蒸的土样分别作 3 种方法的对照土样;3 份未熏蒸的土样分别用于测定 3 种方法的无机磷加标回收率。各样采用上述 3 种方法重复试验 3 次。

表 1 土壤样品基本性质
Table 1 Basic properties of soil samples

样品编号	pH _{H2O}	有机碳 (g/kg)	全磷 (g/kg)	有效磷 (mg/kg)	样品编号	pH _{H2O}	有机碳 (g/kg)	全磷 (g/kg)	有效磷 (mg/kg)
1	4.04	34.05	0.37	1.78	13	4.36	31.86	0.26	1.01
2	3.99	15.65	0.33	0.81	14	4.40	10.82	0.21	0.38
3	4.06	15.30	0.32	0.78	15	4.42	6.19	0.19	0.27
4	4.15	19.57	0.26	1.03	16	4.34	29.26	0.31	0.53
5	4.28	14.77	0.26	1.01	17	4.46	11.32	0.26	0.30
6	4.29	10.01	0.21	0.47	18	4.56	10.25	0.27	0.22
7	4.17	23.96	0.42	1.26	19	4.19	67.12	0.43	1.68
8	4.28	14.17	0.41	0.90	20	4.78	14.06	0.29	0.33
9	4.33	11.91	0.35	0.83	21	4.79	12.37	0.27	0.25
10	4.24	41.01	0.30	1.42	22	4.48	28.10	0.70	1.98
11	4.32	19.42	0.25	0.58	23	4.93	11.32	0.31	0.47
12	4.34	15.37	0.21	0.45	24	4.90	8.25	0.28	0.41

SB 法：取 1 份熏蒸土样、1 份对照土样和 1 份已加 100 mg/L 磷标准溶液 0.2 mL 的未熏蒸土样，分别依次加入 60 mL 0.5 mol/L 碳酸氢钠溶液、1 g 活性炭，振荡 30 min，过滤，抽取适量滤液，加入适量去离子水，加入 1~2 滴 2 g/L 溴酚蓝指示剂，用 0.5 mol/L 硫酸调节 pH 至溶液恰呈黄色，按钼锑抗比色法显色，在 UV765 紫外分光光度计波长 700 nm 处测定磷含量。

AFHC 法：取 1 份熏蒸土样、1 份对照土样和 1 份已加 100 mg/L 磷标准溶液 0.2 mL 的未熏蒸土样，分别加入 30 mL 0.03 mol/L 氟化铵-0.025 mol/L 盐酸溶液，振荡 5 min，过滤(浑浊滤液采用 0.45 μm 滤膜过滤后检测)，抽取适量滤液，加入适量去离子水，加入 1~2 滴 2 g/L 2,4 二硝基酚指示剂，用 0.06 mol/L 硼酸和 2 mol/L 氨水将溶液 pH 调节至溶液恰呈黄色，按钼锑抗比色法显色，在 UV765 紫外分光光度计波长 700 nm 处测定磷含量。

HASA 法：取 1 份熏蒸土样、1 份对照土样和 1 份已加 100 mg/L 磷标准溶液 0.2 mL 的未熏蒸土样，分别加入 15 mL 0.05 mol/L 盐酸-0.025 mol/L 硫酸溶液，振荡 15 min，过滤，抽取适量滤液，加入适量去离子水，加入 1~2 滴 2 g/L 2,4 二硝基酚指示剂，用 0.5 mol/L 硫酸调 pH 至溶液恰呈黄色，按钼锑抗比色法显色，在 UV765 紫外分光光度计波长 700 nm 处测定磷含量。

按照公式(1)、公式(2)计算 MBP 和无机磷加标回收率(R_{pi})。

$$MBP = \frac{E_{pi}}{K_p \cdot R_{pi}} \tag{1}$$

$$R_{pi} = \frac{(\text{外加磷标溶液土壤磷测定值} - \text{未熏蒸土壤磷测定值})}{\text{外加磷量}} \times 100\% \tag{2}$$

式中： E_{pi} 为熏蒸与未熏蒸土壤磷含量测定结果差值； K_p 为转换系数，取值 0.4。

1.3 测定方法精密度试验

称取 1~4、19~20 号土样各 3 份，每份 3.0 g，分别按上述 3 种方法测定 MBP 含量。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2007 软件进行数据统计、绘图。采用 SPSS 18.0 软件构建混合效应模型，分析 3 种测定方法的差异，并采用 Duncan 法开展多重比较，采用 Pearson 相关系数法进行相关性分析。

2 结果与讨论

2.1 3 种方法的无机磷加标回收率及磷增量比较

3 种方法的无机磷加标回收率和磷增量结果见表 2。3 种方法中，24 个土样的无机磷加标回收率均不超过 44%。这表明 3 种方法在浸提过程中均未充分提取加入的无机磷，土壤对磷的吸附与固定作用广泛存在，且作用程度在不同浸提液中呈现一定差异。这与以往研究提出的酸性土壤对磷有较强的吸附和固定作用^[16]相契合。3 种方法的无机磷加标回收率两两差异显著 ($P<0.05$)。无机磷加标回收率大小依次为：AFHC 法>HASA 法>SB 法。表明采用 SB 法和 HASA 法测定时，土壤对磷吸附和固定作用更强烈，导致磷提取难度更大；采用 AFHC 法测定时，土壤对磷吸附和固定作用相对较弱，磷提取难度有所降低。

表 2 3 种浸提法的无机磷加标回收率和磷增量多重比较
Table 2 Multiple comparisons of inorganic phosphorus standard addition recovery rate and phosphorus increment of three extraction methods

方法	无机磷加标回收率(%)	磷增量均值(mg/kg)
SB	21.62±4.81c	0.68±0.49b
AFHC	43.48±11.46a	2.28±1.96a
HASA	27.39±6.38b	2.34±1.23a

注：每种方法包含 24 份土壤样品，每份样品设置 3 次重复，每种方法共 72 组测定数据；表中数据为均值±标准差；同列数据后不同小写字母表示不同方法间差异显著($P<0.05$)；下同。

磷增量作为土壤 MBP 含量测定的核心指标，不仅能够直接反映不同土壤 MBP 含量差异^[1]，还能体现不同方法提取磷的效果，是评估土壤 MBP 测定方法的关键依据。本研究(表 2)中，AFHC 法、HASA 法磷增量无显著差异，二者均显著高于 SB 法($P<0.05$)。说明 SB 法提取磷能力显著不足，SB 法用于测定酸性土壤 MBP 含量易产生较大误差。HASA 法和 AFHC 法对土壤中磷提取相对更充分，更适用于酸性土壤 MBP 含量测定。

HASA 法测定过程中，土壤对磷吸附固定作用强烈，磷提取难度大(无机磷加标回收率仅为 27.39%)，但仍获得较大磷增量(2.34 mg/kg)，体现了良好的磷提取效果。其原因可能是 HASA 法较强的酸性环境使熏蒸后的土壤微生物释放的磷溶解量增加，提高了熏蒸样的磷含量，从而使得磷增量增大。此外，本研究结果还表明，HASA 法的磷提取效果可能不适宜以无机磷加标回收率衡量，无机磷加标回收率用于校正 MBP 的合理性有待进一步探讨。

2.2 3 种方法测定结果比较

Wu 等^[1]研究指出，在酸性(pH_{KCl} 3.6~5.9)和有有机质含量高的土壤中，SB 法不能获得可靠的 MBP 测定结果。本研究中，供试亚热带 24 个土壤样品有机碳含量为 6~70 g/kg，包含高、中、低 3 个等级，土壤 $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 3.9~5.0，呈酸性和强酸性，按李朝英等^[22]提出的 $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}(Y)$ 与 $\text{pH}_{\text{KCl}}(X)$ 的转化公式 $Y=1.230X+0.130$ 计算，供试土壤 pH_{KCl} 为 3.1~4.4，供试土壤拓展了已有方法研究中酸性土壤 pH 区间的下限。

3 种方法所测土壤 MBP 含量见表 3。可见，3 种方法的测定均值存在显著差异($P<0.05$)，整体 MBP 含量表现为 HASA 法(22.93 mg/kg)>AFHC 法(12.88 mg/kg)>SB 法(8.38 mg/kg)。SB 法无机磷加标回收率与磷增量均显著低于其余两种方法($P<0.05$)，经校正，所得 MBP 含量均值仍最低，说明 SB 法提取 MBP 的能力有限，测定结果代表性较差。AFHC 法

无机磷加标回收率最优，磷增量与 HASA 法无显著差异($P>0.05$)，但整体 MBP 含量显著低于 HASA 法，该差异主要由两种方法无机磷加标回收率不同导致。

表 3 3 种方法所测土壤 MBP 含量
Table 3 Soil MBP contents measured by three methods

方法	MBP(mg/kg)
SB	8.38±6.78c
AFHC	12.88±10.36b
HASA	22.93±14.15a

2.3 3 种方法测定结果的相关性

3 种方法测得的 MBP 含量的相关性结果见表 4。SB 法与 AFHC 法所测结果的相关系数为 0.182 9，两者呈极显著弱相关($P<0.01$)，与 HASA 法所测结果的相关系数为 0.526 5，两者呈极显著强相关($P<0.01$)；AFHC 法和 HASA 法所测结果的相关系数为 0.773 9，两者呈极显著强相关($P<0.01$)。

表 4 3 种方法测得的 MBP 含量的相关性
Table 4 Correlations of MBP content determined by three methods

	AFHC	HASA	SB
AFHC	1.0000		
HASA	0.773 9**	1.0000	
SB	0.182 9**	0.526 5**	1.0000

注：*、**分别表示在 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 水平显著相关。

2.4 3 种方法的精密度及影响因素

3 种方法精密度及影响因素比较见表 5。可见，SB 法、AFHC 法、HASA 法测定 MBP 含量的变异系数(CV)依次为 17.50%、8.81%、8.76%，表明 HASA 法与 AFHC 法的精密度良好，均显著优于 SB 法。

试验过程中，供试森林土壤加入活性炭脱色，因土壤有机物的作用^[24-25]，SB 法浸提液仍呈浅褐色或褐色等。在调节酸碱度时，用溴酚蓝代替 2,4-二硝基酚作酸碱指示剂^[26]，颜色突变明显，解决了指示剂颜色被掩蔽的问题。但部分有色滤液在检测波长 700 nm 处产生背景吸收，吸光度约 0.050，降低了测定结果的准确性及稳定性。

部分土壤经 AFHC 法浸提后，滤液浑浊，仅通过离心处理难以获得澄清溶液，需采用 0.45 μm 滤膜过滤才能满足比色要求(滤液背景吸光度趋近于 0)。该过程操作繁琐费时，明显降低检测效率。AFHC 法被认为是测定酸性土壤 MBP 含量的适宜方法^[13-14]。但受离子交换、电解质浓度、土壤胶体性质等多因素影响，土壤胶体凝聚能力减弱，导致部分酸性土壤浸提液经滤纸过滤后仍存在浑浊现象^[27-28]。本研究中，供试强

酸性土壤滤液浑浊问题突出，影响正常检测。综上，AFHC 法用于酸性土壤 MBP 检测存在一定局限性。

HASA 法提取液酸性强于 AFHC 法提取液，在浸提过程中对土壤胶体的凝聚性影响更小，滤液均呈无色或浅黄色澄清状态，背景吸光度趋近 0，且用 2,4-二硝基酚调节酸碱度的颜色变化清晰，检测准确度和精密度更高。该方法的浸提效果及适用性优于另外两种方法。

表 5 3 种方法精密度及测定影响因素比较($n=3$)
Table 5 Comparison of precision and determination influencing factors of three methods

方法	样品编号	浸提液外观	滤液吸光度	MBP 含量 (mg/kg)				CV (%)	CV 均值 (%)
				平行 1	平行 2	平行 3	均值		
SB	1	褐色	0~0.047	13.91	11.54	8.62	11.36±2.65	23.33	17.50±4.09a
	2	褐色		7.10	5.10	6.57	6.26±1.04	16.56	
	3	浅褐色		14.11	18.19	15.6	15.97±2.06	12.93	
	4	浅褐色		28.77	23.25	30.34	27.45±3.72	13.56	
	19	褐色		1.96	2.27	2.95	2.39±0.51	21.16	
	20	褐色		3.64	2.79	3.97	3.47±0.61	17.56	
AFHC	1	淡黄浑浊	0~0.005(过滤后)	20.24	18.51	17.96	18.90±1.19	6.29	8.81±5.07b
	2	淡黄澄清		8.03	6.99	7.60	7.54±0.52	6.93	
	3	澄清		6.95	5.90	6.11	6.32±0.56	8.79	
	4	澄清		21.54	23.25	19.14	21.31±2.06	9.69	
	19	淡黄浑浊		11.12	10.45	10.80	10.79±0.34	3.11	
	20	澄清		1.90	1.43	2.05	1.79±0.52	18.04	
HASA	1	淡黄澄清	0~0.005	36.31	34.07	33.76	34.71±1.39	4.01	8.76±3.39b
	2	淡黄澄清		20.98	25.32	24.22	23.51±2.26	9.60	
	3	澄清		27.61	26.39	24.31	26.10±1.67	6.39	
	4	澄清		56.26	68.31	61.22	61.93±6.06	9.78	
	19	澄清		15.12	18.02	16.95	16.70±1.47	8.78	
	20	澄清		7.17	8.26	6.24	7.22±1.01	14.00	

3 结论

SB 法的无机磷加标回收率低，磷提取不充分，磷增量偏小，导致所测 MBP 含量偏低；滤液颜色易造成检测误差，精密度差，检测不稳定。AFHC 法的无机磷加标回收率显著高于前者，磷提取效率高，磷增量大，精密度良好，但部分酸性土壤浸提液滤液浑浊，影响检测，适用范围受限。HASA 法的无机磷加标回收率低，但磷增量与 AFHC 法接近，磷提取效率高，且不受土壤有机物及胶体浑浊的影响，滤液澄清，方法准确性和精密度高，适用范围广，推荐用于南亚热带酸性森林土壤 MBP 含量检测。

参考文献：

[1] 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.

[2] 赵雯钰, 苗润, 程诚, 等. 实验增温对土壤微生物的影响: 基于 Meta 分析[J]. 土壤学报, 2025, 62(3): 870–880.

[3] 康小虎, 刘鑫, 刘姗姗, 等. 不同时空尺度下土壤微生物群落分布及驱动因素研究进展[J]. 土壤, 2024, 56(4): 689–696.

[4] 付浩, 曾歆花, 宋志琳, 等. 三种城市景观竹土壤微生物群落结构特征[J]. 土壤, 2022, 54(6): 1165–1174.

[5] 张美曼, 范少辉, 官凤英, 等. 竹阔混交林土壤微生物生物量及酶活性特征研究[J]. 土壤, 2020, 52(1): 97–105.

[6] 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.

[7] 付瑞桐, 万翔宇, 杨馨逸, 等. 两种母岩发育森林土壤微生物生物量碳代谢的差异性[J]. 土壤学报, 2024, 61(5): 1432–1443.

[8] 张冠华, 牛俊, 易亮, 等. 不同植茶年限土壤-微生物生物量碳氮磷化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2023, 34(4): 969–976.

[9] Hedley M J, Stewart J W B. Method to measure microbial phosphate in soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1982, 14(4): 377–385.

[10] McLaughlin M J, Alston A M. The relative contribution of plant residues and fertilizer to the phosphorus nutrition of wheat in a pasture/cereal system[J]. Australian Journal of Soil Research, 1986, 24: 517–526.

- [11] Wu J, He Z L, Wei W X, et al. Quantifying microbial biomass phosphorus in acid soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 32(6): 500–507.
- [12] Brookes P C, Powlson D S, Jenkinson D S. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1982, 14(4): 319–329.
- [13] Oberson A, Friesen D K, Morel C, et al. Determination of phosphorus released by chloroform fumigation from microbial biomass in high P sorbing tropical soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1997, 29(9/10): 1579–1583.
- [14] Potter R L, Jordan C F, Guedes R M, et al. Assessment of a phosphorus fractionation method for soils: Problems for further investigation[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1991, 34(1/2/3/4): 453–463.
- [15] Chen G C, He Z L. Determination of soil microbial biomass phosphorus in acid red soils from Southern China[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2004, 39(6): 446–451.
- [16] Kouno K, Tuchiya Y, Ando T. Measurement of soil microbial biomass phosphorus by an anion exchange membrane method[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27(10): 1353–1357.
- [17] 黄巧云, 林启美, 徐建明. 土壤生物化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015.
- [18] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [19] 林先贵. 土壤微生物研究原理与方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [20] 中华人民共和国农业部. 土壤检测 第 7 部分: 土壤有效磷的测定: NY/T 1121.7—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [21] 国家林业局. 森林土壤磷的测定: LY/T 1232—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [22] 李朝英, 郑路. 土壤 pH 测定的影响因素探讨[J]. *上海农业学报*, 2021, 37(1): 47–52.
- [23] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [24] 方玉凤, 刘文环, 崔琳, 等. 弱酸性森林土壤有效磷的测定方法比较[J]. *东北林业大学学报*, 2018, 46(12): 71–75, 86.
- [25] 张翔, 赵琼, 魏丽漫, 等. 森林土壤有效磷测定过程中 3 种脱色剂的效果比较[J]. *安徽农业大学学报*, 2021, 48(2): 273–278.
- [26] 于汀汀, 朱云, 郭琳. 溴酚蓝作酸碱指示剂分光光度法测定土壤中有效磷[J]. *岩矿测试*, 2023, 42(1): 213–219.
- [27] 李学垣. 土壤化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [28] 黄昌勇, 徐建明. 土壤学[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2010.

(责任编辑: 于 飞)