

doi : 10. 16473/j. cnki. xblykx1972. 2019. 01. 008

南亚热带三种典型人工林土壤微量元素全量与有效量特征*

曾青¹, 明乐¹, 李霞¹, 谢明阳¹, 郝中明¹, 李晨曦¹, 覃林²

(1. 广西大学林学院, 广西 南宁 530004; 2. 广西森林生态与保育重点实验室, 广西 南宁 530004)

摘要: 以位于广西凭祥市的中国林业科学研究院热带林业实验中心伏波试验场的外来速生树种桉树、乡土阔叶树种红椎和乡土针叶树种马尾松3个树种的人工林为研究对象, 探讨了土壤微量元素(Cu、Fe、Zn、Mn)全量及有效含量在不同林分类型不同土层深度(0-20cm、20-40cm、40-60cm)间的差异。结果表明, 红椎林、马尾松林和桉树林土壤微量元素全量均与土层没有显著相关性, 且在各土层间的分布没有一致规律。相同土层不同树种人工林间, 4种微量元素全量都大致表现出桉树林高于红椎林和马尾松林的趋势; 除了有效Fe含量表现出马尾松林高于红椎林和桉树林外, 其余3种土壤微量元素有效含量均为桉树林最高。相同林分不同土层间, 3种人工林的4种微量元素有效含量均大致表现出土壤表层>中层>底层的特点。

关键词: 人工林; 微量元素; 全量; 有效量; 南亚热带; 红椎林; 马尾松林; 桉树林

中图分类号: S 714 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-8246 (2019) 01-0042-06

Characteristics of Total and Available Contents of Soil Microelement at Three Typical Plantations in Southern Subtropical China

ZENG Qing¹, MING Le¹, LI Xia¹, XIE Ming-yang¹, HAO Zhong-ming¹, LI Chen-xi¹, QIN Lin²

(1. College of Forestry, Guangxi University, Nanning Guangxi 530004, P. R. China;

2. Guangxi Key Laboratory of Forest Ecology and Conservation, Nanning Guangxi 530004, P. R. China)

Abstract: The total and available contents of soil microelement (Cu, Fe, Zn, Mn) with the topsoil (0-20cm), middle soil layer (20-40cm) and subsoil (40-60cm) in the three monoculture plantations of *Eucalyptus* (an extraneous fast-growing tree species), *Catanopsis hystrix* (a native broadleaved tree species) and *Pinus massoniana* (a native coniferous tree species) from the Experimental Centre at Tropical Forestry of Chinese Academy of Forestry located in Pingxiang, Guangxi Province were studied. The results showed that the four soil microelements in the three plantations had no significant correlation with the soil layer, and no uniform distribution pattern along the soil depth. At the same soil layer, both of the total contents of 4 microelements and the available contents of Cu, Zn and Mn in the *Eucalyptus* plantation were higher than in the two native plantations, but the available content of Fe in *Pinus massoniana* plantation was higher than in the other two broadleaved species plantations. At the same stand, the available contents of Cu, Fe, Zn, Mn in the three plantations were in the order of topsoil > middle soil layer > subsoil.

Key words: planted forest; soil microelement; total content; available content; southern subtropical forest; *Catanopsis hystrix*; *Pinus massoniana*; Eucalyptus

* 收稿日期: 2018-11-21

基金项目: 广西高校大学生创新创业训练计划项目(201710593084), 广西自然科学基金项目(2016JJA130091)。

第一作者简介: 曾青(1997-), 女, 主要从事生态学研究。E-mail: 18277192414@163.com

通讯作者简介: 覃林(1967-), 男, 副教授, 博士, 主要从事森林生态学研究。E-mail: nilniq@163.com

土壤微量元素的研究是土壤学研究的前沿基础领域^[1]。土壤微量元素含量反映了土壤对植物矿物质营养的供给水平，任何一种微量元素缺乏或过量，都会影响植物的生长发育^[2-3]。土壤微量元素的总含量称为全量，根据能否被植物吸收利用而分为“有效态含量”和“固定态含量”，而土壤中微量元素缺乏与否，通常看有效态含量，有些土壤微量元素的全量比较高，有效量却比较低^[4]。已有研究表明，成土母质是土壤中微量元素的主要来源，是决定土壤微量元素含量与分布格局的最主要因素^[5-6]；但在某一区域范围内，相同母质上发育的土壤，其微量元素含量与土壤 pH 值、有机质等性质密切相关，而植被与土壤互为环境因子，是土壤健康及其变化的重要驱动力^[7]。

人工林结构简单，植被种类相对单一，人为因素干扰严重，林木生长过程中对养分需求量大，极易造成林地土壤肥力下降、土壤理化性质退化等土壤质量的变化，从而导致林木生产能力下降等诸多问题^[8]。近年来，许多学者对人工林土壤微量元素的含量特征做了研究，如赵申串等^[3]研究了青海省黄土丘陵区主要林分土壤微量元素丰缺状况，郭东强等^[9]调查了马尾松、巨尾桉及其混交林土壤微量元素含量特征，安玉亭^[10]分析了喀斯特山地不同类型人工林土壤微量元素含量与有效性特征，以及陈宗杰^[11]和冯茂松等^[12]分别探讨了巨桉人工林土壤微量元素变化与养分诊断，Li 等^[2]研究了美国南部酸性土中微量元素 40 年动态变化。然而现有研究绝大多数限于 1 个土层的土壤微量元素含量特征，但是在森林生态系统中，由于凋落物的分解，养分转化及在土壤中的迁移，导致了土壤性质在土壤剖面上存在差异，从而造成土壤微量元素含量具有垂直分布特征。

推进森林资源可持续经营，增加森林总量、提高森林质量、增强生态功能，已成为中国林业可持续发展乃至推进中国生态文明建设和建设美丽中国的战略任务^[13]，因此水热资源相对丰富的亚热带地区是营建人工林的优先发展区域。为了减少桉树 (*Eucalyptus* spp.) 人工林带来的不利生态影响，采用乡土珍优树种，如马尾松 (*Pinus massoniana*)、红椎 (*Castanopsis hystrix*)、西南桦 (*Betula alnoides*)、米老排 (*Mytilaria laosensis*)、火力楠 (*Michelia macclurei*) 等造林已成为该地区人工林经

营的发展趋势。迄今为止，不同学者对该地区不同树种人工林的土壤理化性质、土壤微生物生物量和微生物群落结构及多样性研究较多^[14-19]，而有关土壤微量元素含量的研究报道较少。本文以位于广西凭祥的中国林业科学研究院热带林业实验中心伏波实验场的桉树 (外来速生树种)、红椎 (乡土阔叶树种) 和马尾松 (乡土针叶树种) 3 种人工林为研究对象，分析土壤微量元素 (Cu、Fe、Zn、Mn) 全量、有效含量在 3 种典型人工林同一土层间以及同一林分不同土层间 (0-20cm、20-40cm、40-60cm) 的差异，对于更好地认识、调控和管理人工林土壤微量元素的生物地球化学循环具有重要意义，为该地区人工林营建的树种选择以及人工林可持续经营管理提供参考依据。

1 研究区概况

研究地点位于广西凭祥市的中国林业科学研究院热带林业实验中心伏波试验场 (106°51′-106°53′E, 22°02′-22°04′N)。该地区属于南亚热带季风型半湿润±湿润气候，旱季 (10 月至翌年 3 月) 和雨季 (4-9 月) 明显，年均温 20.5-21.7℃，最冷月 (1 月) 平均气温 13.5℃，最热月 (7 月) 平均气温 27.6℃，年均降雨量 1 200-1 500mm；地貌类型以低山丘陵为主，海拔 430-680m，地带性土壤为花岗岩发育的山地红壤，土层厚度 >80cm，pH 为 4.8-5.5^[19]。

2017 年 2 月，在伏波实验场选取立地条件相似 (海拔、坡度、坡向、土壤类型) 和经营措施相同 (造林时间、造林密度、间伐时间、间伐强度) 的 2 种乡土树种人工林 (红椎和马尾松) 以及桉树人工林 [巨尾桉 (*Eucalyptus grandis* × *E. urophylla*) 萌芽二代林] 为研究对象。研究所选择的 3 种人工纯林均在杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 人工林采伐迹地上种植。其中，红椎人工林和马尾松人工林于 1983 年 2 月种植 (初植密度 2 500 株/hm²)，分别于 1993 年、2003 年和 2008 年进行了 3 次间伐 (强度约 30%)；桉树林为萌芽二代林，2008 年 3 月种植 (初植密度 2 500 株/hm²)，2014 年 11 月皆伐留桩形成萌芽林。上述 3 种人工林的立地条件和林分特征见表 1。

表1 3种人工林的立地条件和林分特征

Tab.1 Site conditions and stand characteristics of the three studied plantations

指标	海拔/m	坡度/°	坡向	密度/株·hm ⁻²	树高/m	胸径/cm
红椎人工林	550	30	S	340(主林层)	18.8(主林层)	24.7(主林层)
				612(次林层)	8.5(次林层)	10.2(次林层)
马尾松人工林	550	30	SW	435	19.7	27.5
桉树人工林	475	15	S	2 300	4.7	3.5

注: 红椎 (*Castanopsis hystrix*), 马尾松 (*Pinus massoniana*), 巨尾桉 (*Eucalyptus grandis* × *E. urophylla*)。

2 研究方法

2.1 样地设置与取样方法

在每种林分的上、中、下坡各设1块20m×20m样地。在每块样地内的对角线上随机选取3个点,按0-20cm、20-40cm和40-60cm土层用土钻(内径5.0cm)取土壤,然后将同层土壤混合后装入聚乙烯保鲜袋带回实验室;在实验室对混合土壤样品充分混合后按四分法取土壤分析样品,并经自然风干后过0.25mm筛保存。

2.2 样品测试方法

土壤微量元素全Cu、全Fe、全Zn和全Mn含量,采用高温电炉灰化-王水消煮-盐酸提取-原子吸收分光光度法;土壤微量元素有效Cu、有效Fe、有效Zn和有效Mn含量,采用M3浸提-原子吸收分光光度法。

2.3 数据处理与分析

采用双因素方差分析(two-way ANOVA)和

Duncan多重比较方法检验不同林分类型不同土层间土壤微量元素全量、有效量的差异。上述计算由IBM SPSS Statistics 24.0软件完成。

3 结果与分析

3.1 林分类型及土层对土壤微量元素含量的综合影响

双因素方差分析表明(表2),林分类型、土层以及林分类型和土层的交互作用对不同微量元素含量的影响各不相同。林分类型对土壤全Cu、全Mn、有效Cu、有效Fe和有效Mn的含量均有极显著影响($P<0.01$),而对全Fe、全Zn和有效Zn含量没有显著影响($P>0.05$)。土层仅对有效Fe和有效Mn含量有极显著影响($P<0.01$)。林分类型与土层的交互作用仅对有效Mn含量有极显著影响($P<0.01$)。

表2 3种人工林3个土层土壤微量元素含量的双因素方差分析

Tab.2 Two-way ANOVA analysis of the contents of soil microelement at three soil depths in the three planted forests

指标	林分类型		土壤深度		林分类型×土壤深度	
	F	P	F	P	F	P
全Cu	6.293	0.008**	0.318	0.731	0.539	0.709
全Fe	0.816	0.458	1.399	0.273	1.191	0.349
全Zn	1.124	0.347	1.023	0.379	1.342	0.293
全Mn	23.149	<0.001**	0.400	0.676	0.371	0.826
有效Cu	16.406	<0.001**	2.789	0.088	1.209	0.341
有效Fe	8.692	0.002**	18.216	<0.001**	1.533	0.235
有效Zn	2.892	0.081	3.563	0.050	0.221	0.923
有效Mn	28.345	<0.001**	13.664	<0.001**	8.853	<0.001**

注: *表 $P<0.05$ 水平显著性; **表 $P<0.01$ 水平显著性。

3.2 林分类型及土层的土壤微量元素全量特征

方差分析已表明各人工林土壤微量元素全量在不同土层间的差异不显著(表2),但相同土层不同林分间土壤全Cu和全Mn含量的多重比较分析

结果表明(表3),3种人工林在土壤全Cu含量上的差异依土层而异。在0-20cm土层,桉树林土壤全Cu含量显著高于红椎林($P<0.05$),而马尾松林全Cu含量与桉树林和红椎林的差异均不显著

($P>0.05$)；在 20–40cm 和 40–60cm 土层，3 种人工林间的全 Cu 含量差异均未达显著水平，但呈现出桉树林>马尾松林>红椎林的趋势。3 种人工林间

的全 Mn 含量在各土层都表现为桉树林>马尾松林>红椎林，且桉树林的全 Mn 含量显著高于马尾松林和红椎林 ($P<0.05$)。

表 3 3 种林分不同土层微量元素全量和有效量

Tab. 3 Total and available contents of soil microelement at different soil depths in the three studied plantations

指标	土壤深度/cm	红椎人工林	马尾松人工林	桉树人工林
全 Cu /mg·kg ⁻¹	0–20	11.13±1.67Aa	18.98±4.03Aab	22.59±7.68Ab
	20–40	11.80±1.50Aa	14.54±2.57Aa	21.38±4.14Aa
	40–60	14.12±1.98Aa	13.48±8.31Aa	18.19±4.87Aa
全 Fe /g·kg ⁻¹	0–20	11.18±2.67Aa	9.37±2.52Aa	11.57±2.73Aa
	20–40	11.32±2.76Aa	7.73±1.52Ab	8.41±1.03Ab
	40–60	9.73±2.60Aa	11.16±2.77Aa	11.63±2.74Aa
全 Zn /mg·kg ⁻¹	0–20	126.83±48.66Aa	117.36±55.85Aa	170.82±41.79Aa
	20–40	166.53±60.88Aa	127.00±25.78Aa	129.16±21.73Aa
	40–60	123.56±40.30Aa	173.44±66.42Aa	208.67±71.31Aa
全 Mn /mg·kg ⁻¹	0–20	89.51±35.68Aa	93.49±32.76Aa	525.30±60.23Ab
	20–40	76.94±41.99Aa	98.33±47.43Aa	477.63±69.95Ab
	40–60	72.80±32.54Aa	108.39±35.61Aa	483.13±45.07Ab
有效 Cu /mg·kg ⁻¹	0–20	0.40±0.10Aa	0.20±0.05Aa	0.64±0.16Ab
	20–40	0.36±0.03Aab	0.13±0.02Aa	0.41±0.22Ab
	40–60	0.39±0.10Aa	0.15±0.08Ab	0.36±0.16Aab
有效 Fe /mg·kg ⁻¹	0–20	127.96±4.36Aa	181.59±31.75Ab	106.26±15.89Aa
	20–40	84.46±3.55Aa	127.32±22.37Ba	87.85±19.63Aa
	40–60	66.18±3.02Ba	80.61±19.97Ba	67.78±11.19Aa
有效 Zn /mg·kg ⁻¹	0–20	1.79±0.75Aa	1.83±0.75Aa	2.62±0.33Aa
	20–40	1.26±0.59Aa	1.52±1.13Aa	1.79±0.50Aa
	40–60	0.83±0.72Aa	1.12±0.48Aa	1.69±0.54Aa
有效 Mn /mg·kg ⁻¹	0–20	3.75±0.18Aa	3.07±0.79Aa	14.08±2.94Ab
	20–40	3.21±0.07Ba	2.30±0.34Aa	6.39±3.66Ba
	40–60	3.09±0.19Ba	2.23±0.44Aa	3.68±1.52Ba

注：数值为平均值±标准差；表中同列不同大写字母表示土层间差异显著 ($P<0.05$)，同行不同小写字母表示林分间差异显著 ($P<0.05$)。

3.3 林分类型及土层的土壤微量元素有效量特征

多重比较分析表明 (表 3)，3 种人工林间在土壤有效 Cu、有效 Fe 和有效 Mn 含量的差异主要表现在 0–20cm 土层，而在 20–40cm 和 40–60cm 土层则无显著差异 ($P<0.05$)，而土壤有效 Cu 在 3 个土层均有显著差异 ($P<0.05$)。在 0–20cm 土层，桉树林土壤有效 Cu 和有效 Mn 含量显著高于红椎林和马尾松林 ($P<0.05$)，而红椎林土壤有效 Cu 和有效 Mn 含量与马尾松林均不显著 ($P>0.05$)；同时马尾松林土壤有效 Fe 含量显著高于桉树林和红椎林，但后 2 种人工林间的土壤有效 Fe 含量差异不显著。就相同林分不同土层而言，3

种林分的土壤有效 Cu、有效 Zn、有效 Mn 和有效 Fe 含量均大致呈现随土壤深度增加而逐渐减少趋势，仅有马尾松林土壤有效 Fe 含量以及桉树林和红椎林土壤有效 Mn 含量在 0–20cm 土层显著高于各自其余 2 个土层 ($P<0.05$) (表 3)。

4 结论与讨论

4.1 结论

(1) 红椎林、马尾松林和桉树林土壤微量元素 (Cu、Fe、Zn、Mn) 全量均与土层没有显著相关，且在各土层间的分布没有一致规律。相同土层

不同树种人工林间, 4种微量元素全量都大致表现出桉树林高于红椎林和马尾松的趋势。

(2) 相同土层不同树种人工林间, 除了有效 Fe 含量表现出马尾松林高于红椎林和桉树林外以及桉树林 40–60cm 土层有效 Cu 含量低于红椎林外, 其余 3 种土壤微量元素有效含量均为桉树林最高。同时, 3 种研究人工林的 4 个微量元素有效含量均大致表现为土壤表层>中层>底层的特点。

(3) 研究地区人工林土壤微量元素 Fe 的含量极为丰富, 而 Cu、Zn 和 Mn 含量相对缺乏, 因而在人工林经营措施中适当增加缺乏微量元素的施用量, 这对实现人工林的可持续经营具有重要作用。

4.2 讨论

(1) 林分类型及土层对土壤微量元素全量的影响 微量元素在植物体内有着无法代替的重要作用, 如 Fe 是许多氧化还原酶的重要组成部分和合成叶绿素所必须的元素, Zn 与生长素的合成、光合作用以及干物质的积累有关, Cu 是多种酶的组成成分并参与呼吸作用与氧化还原过程, Mn 是许多酶的活化剂和叶绿体的结构成分^[20]。土壤微量元素的全量主要与成土母质有关, 同时受成土过程中的淋洗、风化以及植物吸收富集、归还等因素影响^[21]。本研究发现, 仅 0–20cm 土层的全 Cu 含量和全 Fe 含量是桉树林显著高于马尾松林和红椎林 ($P<0.05$), 20–40cm 土层的全 Fe 含量红椎林显著高于桉树林和马尾松林 ($P<0.05$), 全 Mn 在桉树林 3 个土层都显著高于其他林分, 其余土层的 4 个微量元素全量在不同林分间的差异未达显著水平, 但总体呈现桉树林在各土层的微量元素全量高于其他 2 种乡土树种人工林的趋势 (表 3)。有研究表明桉树人工林种植导致地力下降^[22], 但也有研究表明桉树对地力有改善作用^[23], 而微量元素也是土壤养分的一个重要表征^[24], 因此不能一概而论桉树人工林种植会造成土壤肥力和土地生产力的下降。另外, 本研究中的桉树人工林是 2014 年 12 月采伐留桩形成萌芽林, 采伐遗留林地的枯落物分解速率大, 养分归还的速率快^[9], 可能导致桉树林土壤微量元素全量大致高于其他 2 种乡土树种人工林, 因为研究表明凋落物是森林土壤微量元素的重要来源^[25]。

微量元素全量在土层中的分布随地区、林分类型和元素种类而异, 不存在一致的规律性^[21]。本

文研究结果也表明, 同一微量元素全量在土层中的分布格局因林分类型而异, 如全 Cu 含量在红椎林是土壤底层 (40–60cm) > 中层 (20–40cm) > 表层 (0–20cm), 而在马尾松林和桉树林则是土壤表层>中层>底层 (表 3)。有研究表明, 在土壤剖面上, 微量元素的迁移积累是生物富集上迁和淋溶下移淀积的共同作用^[22]。本研究位于南亚热带湿润地区, 树木生长发育旺盛, 具备生物富集和淋溶淀积的条件, 这可能是微量元素全量在不同土层分布特征各异的原因。

(2) 林分类型及土层对土壤微量元素有效量的影响 土壤微量元素有效量反映了土壤对植物矿物质营养的供给水平, 任何一种微量元素缺乏或过量, 都会影响植物的生长发育^[3], 比如 Islam 等^[26]对孟加拉国不同土地利用方式下的土壤微量元素含量研究表明, 微量元素有效量过高对林木生长有较大的负面作用, 是导致植物代谢功能失调的主要原因。研究发现, 3 种人工林各土层的有效 Fe 含量相比于其他 3 种微量元素有效量极为丰富, 主要原因是研究区的地带性土壤为花岗岩发育的山地红壤 (pH 为 4.8–5.5), 一般酸性土壤中 Fe 含量较高, 土壤酸化可以使铁活化, 故 Fe 的有效含量相对较高^[27]。郭东强等^[9]对南亚热带地区桉树、马尾松人工林土壤微量元素特征进行研究, 同样发现 Fe 的含量极为丰富。

不同林分类型中土壤微量元素有效量, 由于受到成土母质、地形、地貌、土壤理化性质的影响, 以及气候条件不同所引起的土壤、生物和植物中矿物的分解速率不同^[3], 导致土壤中微量元素有效量存在差异。本研究中, 除了有效 Fe 含量表现出各土层均是马尾松林高于其他 2 种人工林的趋势外, 其余 3 种微量元素有效量在各土层均为桉树林最高, 这与其全量特征在林分类型上的表现趋势较为一致。至于马尾松林土壤的有效 Fe 含量高于红椎林和桉树林的原因, 还有待深入分析。

3 种研究林分微量元素有效量在土层中的分布呈现出比较明显的“表聚效应”, 这主要是由于林地枯落物的分解、养分的释放与归还补充土壤有效态微量元素^[28–31], 而且这种释放与归还作用明显作用于土壤表层, 同时也可以反映下层土壤淋溶淀积作用较弱。赵串串等^[3]研究发现土壤有机质对微量元素有效性影响较大, 土壤有机质较高时有利于土壤微量元素活化。

参考文献:

- [1] 张昱, 刘春瑾. 土壤微量研究进展[J]. 甘肃科技, 2009, 25(20): 90-92.
- [2] Li J W, Richter D, Mendoza A, *et al.* Four-decade responses of soil trace elements to an aggrading old-field forest: B, Mn, Zn, Cu and Fe[J]. *Ecology*, 2008, 89(10): 2911-2923.
- [3] 赵申申, 王媛, 高瑞梅. 青海省黄土丘陵区主要林分土壤微量元素丰缺状况研究[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(3): 130-135.
- [4] 马扶林, 宋理明, 王建民. 土壤微量元素的研究概述[J]. 青海科技, 2009, 16(3): 32-36.
- [5] 陶澎, 林春野, 冯泉. 我国北部草原系列土壤中成土作用对微量元素含量影响的经向分异[J]. 土壤学报, 1995, 32(2): 126-131.
- [6] Yamasaki S, Takeda A, Nunohara K, *et al.* Red soils derived from limestone contain higher amount of trace elements than those derived from various other parent materials[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2013, 59(5): 692-699.
- [7] 陆继龙, 周永昶, 周云轩. 吉林省黑土某些微量元素环境地球化学特征[J]. 土壤通报, 2002, 33(5): 365-368.
- [8] 闫德仁, 赵丽. 华北落叶松、兴安杨树人工林对土壤养分变化的影响[J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(1): 27-31.
- [9] 郭东强, 黄晓露, 颜权, 等. 马尾松、巨尾桉及其混交林土壤微量元素调查[J]. 广西林业科学, 2016, 45(1): 24-29.
- [10] 安玉亭. 喀斯特山地不同人工林微量元素特征及影响因素研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2013.
- [11] 陈宗杰. 闽南山地巨桉人工林土壤微量元素变化初探[J]. 林业调查规划, 2011, 36(6): 26-28.
- [12] 冯茂松, 杨万勤, 钟宇, 等. 四川巨桉人工林微量元素养分诊断[J]. 林业科学, 2010, 46(9): 20-27.
- [13] 刘世荣, 杨予静, 王晖. 中国人工林经营发展战略与对策: 从追求木材产量的单一目标经营转向提升生态系统服务质量和效益的多目标经营[J]. 生态学报, 2018, 38(1): 1-10.
- [14] Cao Y, Fu S, Zou X, *et al.* Soil microbial community composition under Eucalyptus plantations of different age in subtropical China[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2010, 46: 128-135.
- [15] 王卫霞, 史作民, 罗达, 等. 亚热带3种人工林土壤微生物生物量和微生物群落结构特征[J]. 应用生态学报, 2013, 24(7): 1784-1792.
- [16] 谭玲, 何友均, 覃林, 等. 亚热带红椎、马尾松纯林及其混交林土壤理化性质比较[J]. 西部林业科学, 2014, 43(2): 35-41.
- [17] Huang X, Liu S, Wang H, *et al.* Changes of soil microbial biomass carbon and community composition through mixing nitrogen-fixing species with Eucalyptus urophylla in subtropical China[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 7: 42-48.
- [18] 陈超凡, 吴水荣, 覃林, 等. 亚热带典型乡土阔叶人工林土壤微生物碳源利用及功能多样性[J]. 生态学杂志, 2016, 35(5): 1132-1139.
- [19] 覃林, 马雪珍, 吴水荣, 等. 亚热带典型乡土阔叶人工林与桉树人工林土壤微生物量氮及可溶性氮特征[J]. 应用与环境生物学报, 2017, 23(4): 678-684.
- [20] 王凌晖, 何斌. 南宁马占相思人工林微量元素分布与生物循环[J]. 林业科学, 2009, 45(5): 27-33.
- [21] 俞元春, 曾曙才, 罗汝英. 江南丘陵林区森林土壤微量元素的含量与分布[J]. 安徽林业大学学报, 1998, 25(2): 167-173.
- [22] 袁颖红, 樊后保, 黄荣珍, 等. 连续年龄序列桉树人工林土壤微量元素含量及其影响因素[J]. 生态环境学报, 2009, 18(1): 268-273.
- [23] 梁卿雅, 王旭. 不同林龄桉树人工林的土壤理化性质及脲酶活性[J]. 热带作物学报, 2017, 38(3): 450-455.
- [24] 曹汉洋. 杉木、马尾松、木荷纯林及其混交林的土壤养分状况[J]. 南京林业大学学报, 1998, 22(2): 47-50.
- [25] 竹万宽, 陈少雄. 不同林龄尾巨桉人工林凋落物和土壤C、N、P化学计量特征[J]. 热带亚热带植物学报, 2017, 25(2): 127-135.
- [26] Islam S, Ahmed K, Raknuzzaman M, *et al.* Trace elements in different land use soils of bangladesh and potential ecological risk[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187(9): 1-11.
- [27] 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, 1999.
- [28] 董宁宁, 李哲, 侯琳, 等. 秦岭山地华山松和锐齿栎典型林分化学计量特征分析[J]. 西南林业大学学报, 2017, 37(3): 81-87.
- [29] 安玉亭, 薛建辉, 吴永波, 等. 喀斯特山地不同类型人工林土壤微量元素含量与有效性特征[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2013, 37(3): 65-70.
- [30] 王卓敏, 刘小川, 薛立, 等. 广州南沙园林植物叶片与土壤养分及化学计量特征研究[J]. 西南林业大学学报, 2017, 37(2): 95-102.
- [31] 欧阳丽婷, 颜刚刚, 谢军, 等. 野生欧洲李原生分布地土壤养分分布特征[J]. 经济林研究, 2018(3): 120-126, 181.