

鼎湖山自然保护区不同演替阶段森林 土壤中有效微量元素状况研究

李德军^{1,2}, 莫江明^{1*}, 方运霆¹, 薛璟花¹

(1. 中科院华南植物研究所鼎湖山树园, 广东肇庆 526070; 2. 中科院研究生院, 北京 100039)

摘要: 三种森林表层土壤中有效微量元素的平均含量顺序为: Fe>Zn>Mn>B>Cu>Mo, 马尾松林的含量顺序为: Fe>Zn>Cu>B>Mn>Mo, 混交林和阔叶林与平均含量一致。三种森林有效 Fe 的含量均极高, 表现出富铁状况, 而有效 Mn 含量甚微, 表明该区森林均严重缺 Mn, 有效 Cu 和 Zn 的含量处于中等水平, 均高于其临界值。但处于演替初期阶段的马尾松林还缺 B 和 Mo, 混交林也略缺 Mo。相关分析结果表明, 土壤 pH 值与所考察的所有微量元素有效量之间均呈负相关, 且与有效 B、Cu 和 Fe 相关极显著 ($P<0.01$), 与有效 Mo 相关显著 ($P<0.05$); 有机质与所考察的所有微量元素有效量之间均呈正相关, 且与有效 B 和 Fe 相关极显著, 与有效 Mn 相关显著。

关键词: 鼎湖山; 森林土壤; 有效微量元素

中图分类号: S153.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2004)06-0529-06

Study on availability of micronutrients in soils under three different forests of Dinghushan Nature Reserve

LI De-jun^{1,2}, MO Jiang-ming^{1*}, FANG Yun-ting², XUE Jing-hua³

(1. South China Institute of Botany, the Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China;

2. The Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The order of average content of available micronutrients in upper soils in the three forests was Fe>Zn>Mn>B>Cu>Mo, and that of *Pinus massoniana* forest was Fe>Zn>Cu>B>Mn>Mo, but that of pine-broadleaf mixed forest and monsoon evergreen broadleaf forest was consistent with that of the average. Among all the available micronutrients, Fe was the most abundant, and Mn the most insufficient, indicating that the forests of Dinghushan were rich in Fe and short of Mn. The contents of available Cu and Zn were at a middle level, and were higher than their critical values respectively. Moreover, the soil of *Pinus massoniana* forest was destitute of available B and Mo, and that of pine-broadleaf mixed forest was somewhat insufficient of available Mo. We found that soil pH was negatively correlated with the availability of all the micronutrients discussed here, and was significantly correlated with available B, Cu and Fe at $P=0.01$ level, with Mo at $P=0.05$ level. Soil organic matter was positively correlated with the availability of all the micronutrients, and was significantly correlated with B and Fe at $P=0.01$ level and with Mn at $P=0.05$ level.

Key words: Dinghushan; forest soils; available micronutrients

收稿日期: 2003-07-23 修订日期: 2004-01-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(30270283); 广东省自然科学基金项目(021524); 中国科学院华南植物研究所所长基金和中国科学院知识创新工程领域前沿项目资助。

作者简介: 李德军(1978-), 男, 湖南桂阳人, 博士生, 主要从事环境科学研究。* 通讯作者

了解营养元素在森林生态系统中的分布和循环对于许多方面均具有重要意义(Mo 等,1994)。它可以用来解释森林,尤其是与生产力有关方面的结构、功能和动态,为人们提供不同森林经营方式对土壤肥力和永续利用方面影响的信息。森林营养元素分布和循环的数据还是人们以后用来比较森林变化的基准点,还可用来监测全球变化的效应(Mo 等,1994)。例如,人类活动正在影响着许多植物营养包括二氧化碳、氮、磷、硫及微量元素等的生物地球化学循环的速率(Mo 等,1994;Peterson 等,1985),这些影响的实际效果有待于人们去研究。

微量元素是植物生长代谢正常进行所必不可少的元素,如 Fe 是许多氧化还原酶的重要组成成分和合成叶绿素所必需的, Mn 是许多酶的活化剂和叶绿体的结构成分。一般而言,植物所需的微量元素主要由土壤供应。评价森林生态系统土壤微量元素状况是深入研究森林养分循环所不可缺少的。国内已有学者对中亚热带北部(张焕朝等,1995;俞元春等,1998b)、中亚热带南部(俞元春等,1998a)和北亚热带(俞元春等,1998a;俞元春等,1998b;Zeng 等,2002)的一些森林土壤有效态微量元素含量状况进行过研究,但对南亚热带森林的研究则还未见报道。鼎湖山自然保护区的森林是我国南亚热带代表性的森林类型之一,其林下土壤是南亚热带较为典型的赤红壤和红壤等土类。前期的研究涉及土壤形

成、土壤类型及分布、土壤物理性质以及土壤大量养分含量状况(何宜庚,1983;张秉刚等,1985;何金海等,1982;张秉刚,1990;夏汉平等,1997),本文就该区三种处于不同演替阶段的代表性森林土壤中的微量元素状况进行报道。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

鼎湖山自然保护区位于广东省中部,东经 112°33',北纬 23°10',属亚热带季风性气候。年平均降雨量为 1 927 mm,其中 75%集中在 3 月到 8 月,而 12 月到次年 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)。土壤由泥盆纪厚层变质砂岩、砂页岩发育形成,主要土壤类型有赤红壤、红壤等(何宜庚,1983)。

本文所研究的三种森林为马尾松林(*Pinus massoniana* forest, PMF)、针阔混交林(Pine and broadleaf mixed forest, PBMF)和季风常绿阔叶林(Monsoon evergreen broadleaf forest, MEBf),它们均为鼎湖山代表性的森林类型,三者分别处在不同的演替阶段,林下土壤为赤红壤(其中季风常绿阔叶林的土壤为水化赤红壤),土壤母质均为砂页岩。土

表 1 三种森林表层土壤(0~20 cm)性质比较

Table 1 Properties of upper soils (0~20 cm) in three forests(Mo *et al.*, 2003)

林型 Forest type	有机质(%) Organic matter	总 N (%) Total N	C/N	pH	土壤容重(g. cm ⁻³) Bulk density	含水量(%) Moisture content
PMF	2.73(0.17)	0.09(0.01)	16.79(0.94)	4.03(0.02)	1.41(0.02)	24.90(1.10)
PBMF	3.45(0.35)	0.10(0.01)	18.90(0.97)	3.86(0.02)	1.30(0.04)	25.97(0.91)
MEBF	5.35(0.58)	0.19(0.01)	15.91(0.86)	3.79(0.06)	1.21(0.03)	38.57(1.19)

PMF-马尾松林 *Pinus massoniana* forest; PBMF-针阔混交林 Pine and broadleaf mixed forest; MEBF-季风常绿阔叶林 Monsoon evergreen broadleaf forest; 以下同 The same below; 括号里为标准差 S. E. in parenthesis, n=10 for all samples.

壤的一些基本性质见表 1。

马尾松林样地位于保护区东南角过渡区,建于 1990 年,林龄 60 a,是演替初期的森林类型。乔木层(马尾松)盖度 50%,林下灌木层盖度达 95%以上,主要以桃金娘(*Rhodomytus tomentosa*)、芒萁(*Dicranopteris linearis*)等为主。坡向南,坡度 10°~20°,海拔 30~80 m。

针阔混交林(简称混交林)样地位于保护区南部二宝峰山腰的过渡区,建于 1978 年,林龄约 60 a,为演替中期的森林类型。郁蔽度 85%~95%,坡向东

北,坡度 20°~35°。海拔 320~380 m。乔木层主要优势树种有马尾松,荷木(*Schima superba*),锥栗(*Castanopsis chinensis*)等。

季风常绿阔叶林(简称阔叶林)样地位于保护区核心区,建于 1978 年,坡度 15°~30°,坡向东北,森林有 400 多年的历史,为地带性顶极群落,郁蔽度 95%~99%,海拔高度 300~360 m。主要的优势树种有锥栗,荷木,厚壳桂(*Cryptocarya chinensis*),黄果厚壳桂(*C. concinna*),鼎湖钓樟(*Lindera chunni*)等。

1.2 样品采集与处理

样品于 1997 年 7 月采集, 每个样地采样 20 个, 采样深度为 0~20 cm, 土样风干, 磨碎, 装瓶供分析。

1.3 微量元素测定方法

有效微量元素的测定方法参考国家标准局 1987 年发布的《森林土壤养分分析》(中华人民共和国国家标准局, 1987)。有效 Fe 采用 DTPA 浸提, 原子吸收分光光度法测定; 有效 Cu 和有效 Zn 采用盐酸浸提, 原子吸收分光光度法测定; 有效 Mo 采用草酸-草酸铵浸提, 硫氰酸钾比色法测定; 有效 B 采用沸水浸提, 甲亚胺比色法测定; 有效 Mn 采用乙酸-对苯二酚浸提, 原子吸收分光光度法测定。所有结果以 105 °C 恒重为基准。

2 结果与分析

2.1 不同元素含量的比较

同种森林, 不同微量元素含量的比较。马尾松林有效 B、Mo、Cu、Zn、Fe 和 Mn 的含量分别为 0.431、0.09、0.531、1.446、31.007 和 0.297 mg · kg⁻¹(图 1), 其大小顺序为: Fe > Zn > Cu > B > Mn > Mo, 其中, 最高(Fe)为最低(Mo)的 344 倍。在混交林的含量分别为: 0.726、0.112、0.671、1.105、106.569 和 1.072, 其大小顺序为: Fe > Zn > Mn > B > Cu > Mo, 最高(Fe)为最低(Mo)的 951 倍。阔叶林上述元素的含量分别为: 0.865、0.188、0.681、1.902、140.103 和 1.381, 大小顺序为: Fe > Zn > Mn > B > Cu > Mo, 最高(Fe)为最低(Mo)的 745 倍。可见, 三种森林土壤微量元素含量均以 Fe 元素最高, 其次是 Zn 元素, 最低为 Mo 元素。

变异系数表现了有效态微量元素在空间分布的均匀程度, 比较同一森林不同微量元素的变异系数有利于了解不同微量元素在同一森林内分布的均匀程度。由表 2 可知, 马尾松林各微量元素的变异系数大小顺序为: Mn > B > Zn > Mo > Fe > Cu; 混交林为: Mn > Mo > Fe > B > Zn > Cu; 阔叶林为: Mn > B > Mo > Zn > Fe > Cu。可见, Mn 在三种森林中的变异系数均为最大, 而 Cu 在三种森林中的变异系数均为最小, 反映了有效 Mn 的分布最不均匀, 而有效 Cu 的分布则最均匀。

2.2 三种森林之间的差异性比较

从表 2 可以看出, 三种不同演替阶段的森林之间表层土壤中有效微量元素的差异依元素种类不同

而异。如有效 Mn 的含量在三种森林之间差异最大, 阔叶林是马尾松林的 4.6 倍, 混交林是马尾松林的 3.6 倍; 其次为有效 Fe, 其在阔叶林中的含量是马尾松林的 4.5 倍, 混交林是马尾松林的 3.4 倍。有效 Cu 的含量在三种森林之间差异最小, 如阔叶林和混交林差异不明显, 但均与马尾松林差异显著 ($P < 0.05$), 阔叶林是马尾松林的 1.28 倍, 混交林是马尾松林的 1.26 倍。

随着演替进程, 三种森林表层土壤中有效微量元素的差异逐渐明显, 所有元素均为阔叶林含量最高, 除有效 Zn 的含量大小顺序为阔叶林 > 马尾松林 > 混交林外, 其余元素均表现为阔叶林 > 混交林 > 马尾松林, 并且有效 Mo、Zn、Mn 和 Fe 的含量在三类森林之间差异均极显著 ($P < 0.01$)。

比较同一微量元素在不同森林之间的变异系数有利于了解同一微量元素在不同森林之间分布的均匀程度。如 B 的变异系数大小顺序为: 阔叶林 > 马尾松林 > 混交林(表 2), 反映了有效 B 在阔叶林的分布最均匀, 在混交林的分布则最不均匀。

3 讨论

3.1 鼎湖山自然保护区三种森林土壤有效态微量元素含量评价

目前, 对土壤微量元素含量进行评价的普遍标准有二个, 即 1985 年在西安召开的微量元素肥料工作会议制定的“全国农业系统的土壤速效微量元素丰缺指标”和 1989 年中国科学院在南京召开的微量元素工作会议制定的“中国科学院微量元素组的土壤有效态微量元素评价标准”。本文主要采用 1989 年中国科学院所制定的标准, 并结合 1985 年的标准(表 3)。

由表 3 可知, 马尾松林表层土壤中有效 B 的含量偏低, 小于临界值(0.5 mg · kg⁻¹), 而混交林和季风常绿阔叶林含量处于中等水平, 均高于临界值。有效 Mo 的含量, 马尾松林为临界值(0.15 mg · kg⁻¹)的 3/5, 处于极低水平; 混交林不到临界值的 4/5, 偏低; 阔叶林则处于中等水平, 高于临界值。三种森林有效 Cu 和有效 Zn 的含量都处于中等水平, 均高于临界值。有效 Mn 含量均处于极低水平, 其中马尾松林不到临界值的 1/33, 混交林不到临界值的 1/9, 阔叶林不到临界值的 1/7, 平均含量不到临界值(10 mg · kg⁻¹)的 1/10, 处于极度缺乏状况。三种森林有效 Fe 的含量则都极高, 如, 马尾松林的含

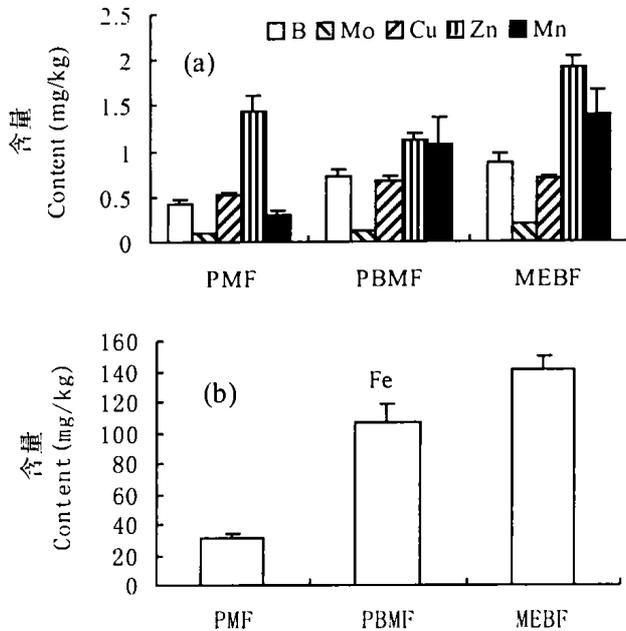


图 1 三种林型表层土壤中有效微量元素含量比较
Fig. 1 Comparison of available micronutrient content in upper soils(0~20 cm)among three different forests(n=20)

量是临界值的 4.4 倍,混交林是临界值的 15 倍,阔叶林是临界值的 20 倍。

与国内其他研究相比,本研究地既有相似之处,也有明显的差别。张焕朝等(1995)、俞元春等(1998a,b)和 Zeng 等(2002)曾对中亚热带南部、北部及北亚热带的一些森林土壤的有效态微量元素状况进行过研究。这些研究地均位于亚热带季风性气候区,土壤类型从准黄壤至红壤不等,且都为酸性土壤。所有林地表层土壤中有有效 Fe 的含量均极高,远远超过其临界值,鼎湖山自然保护区三种森林有效 Fe 的平均含量除了比皖南低山丘陵低外,远远高于其他研究地森林含量。有效 Cu 和有效 Zn 的含量都在临界值以上,有效 Mo 含量除了皖南低山丘陵区高于临界值外,其余均低于临界值,有效 B 含量除鼎湖山自然保护区高于临界值外,其余均低于临界值,表明大多数森林 B、Mo 供应不足。本研究的三种森林表现出有效 Mn 严重亏缺,远远低于其他研究地,如是含量最高的枫树山林场的 1/179,是含量较低的皖南低山丘陵的 1/24。这也表明鼎湖

表 2 三种林型表层土壤中有效态微量元素差异显著性的比较

Table 2 Comparison of available micronutrients in upper soils under three forests

	B	Mo	Cu	Zn	Mn	Fe
元素含量 (mg · kg ⁻¹)						
MEBF	0.865(0.108)a	0.188(0.020)A	0.681(0.042)A	1.902(0.129)A	1.381(0.268)A	140.103(8.920)A
PBMF	0.726(0.078)a	0.112(0.020)B	0.671(0.036)A	1.105(0.094)C	1.072(0.278)B	106.569(11.897)B
PMF	0.431(0.051)b	0.090(0.009)C	0.531(0.023)B	1.446(0.157)B	0.297(0.044)C	31.007(2.968)C
变异系数 C. V. (%)						
MEBF	12.4	10.5	6.2	6.8	19.4	6.4
PBMF	10.7	18.1	5.4	8.5	26.1	11.2
PMF	11.7	9.9	4.2	10.9	14.9	9.6

同一列中,A 和 a 分别表示在 P=0.01 和 0.05 水平上显著;括号内为标准误,n=20。

Values followed by different letters within an available microelement are different by analysis of variance and Fisher's protected least significant difference test, and A, a mean statistical difference at P=0.01 and P=0.05 level respectively. S. E. in parenthesis, n=20.

表 3 土壤有效态微量元素评价标准¹⁾

Table 3 Appraisal criteria for soil available micronutrients¹⁾

	极低 Terribly low	低 Low	中 Medium	高 High	极高 Very high	临界值 Critical value
有效 B available B	<0.25	0.25~0.50	0.51~1.0	1.1~2.0	>2.0	0.5
有效 Mo available Mo	<0.1	0.1~0.15	0.16~0.20	0.21~0.30	>0.30	0.15
有效 Cu available Cu	<0.1	0.1~0.2	0.21~1.0	1.1~1.8	>1.8	0.2
有效 Zn available Zn	<0.5	0.5~1.0	1.1~2.0	2.1~5.0	>5.0	1
有效 Mn ²⁾ available Mn ²⁾	<5.0	5.0~10.0	10.0~20.0	20.0~30.0	>30.0	10
有效 Fe available Fe	<5.0	5.0~7.0	7.1~10.0	10.1~15.0	>15.0	7

¹⁾引自 1989 年南京微量元素肥料工作会议资料 Data from micronutrient fertilizer meeting in Nanjing,1989. ²⁾引自 1985 年西安召开的微量元素肥料工作会议资料 Data from micronutrient fertilizer meeting in Xi'an,1985.

山自然保护区森林与大多数研究地不一致,因为前人的研究认为我国南方的酸性土壤大多是 Fe 和

Mn 富集(袁可能,1990)。

可见,鼎湖山自然保护区三种代表性森林土壤

中有效 Fe 的供应充足,表现出富 Fe 的状况,有效 Cu 和 Zn 的供应良好,但均严重缺 Mn,马尾松林土壤还严重缺乏 B、Mo,混交林土壤的 Mo 供应也略显不足。

3.2 pH 值和有机质对微量元素有效性的影响

前人的研究认为土壤类型、地形、土地利用、母质、土壤结构、pH 值、有机质和有效 P 等都会影响土壤微量元素的含量,但在不同地方起主要作用的因素不一(袁可能,1990;黄建辉,2000;高美荣等,1999;刘全友等,2000)。本文主要讨论 pH 值和有机质对微量元素有效性的影响及微量元素之间的相

互影响。

由于养分之间的相关性反映了它们之间相互作用和相互影响的情况,因此,pH 值和有机质与各微量元素之间相关性的大小反映了两者的各微量元素有效性影响力的大小。由表 4 可知,pH 值与考察的所有微量元素有效量之间均呈负相关,其中与有效 B、Cu 和 Fe 相关达极显著水平($P < 0.01$),与有效 Mo 达显著水平($P < 0.05$),相关性大小顺序为 $B > Fe > Cu > Mo > Zn > Mn$ 。有机质与考察的所有微量元素有效量之间均呈正相关,其中与 B 和 Fe 呈极显著相关,与 Mn 呈显著相关,相关性大小顺序

表 4 三种林型下表层土壤中有效微量元素及土壤理化参数相关矩阵

Table 4 Correlation coefficients matrix of available micronutrients and pH and organic matters in soils under three forests

pH	OM	B	Mo	Cu	Zn	Fe	Mn	
pH	1							
OM	-0.382**	1						
B	-0.597**	0.381**	1					
Mo	-0.318*	0.223	0.259*	1				
Cu	-0.338**	0.065	0.214	0.291*	1			
Zn	-0.224	0.208	0.501**	0.274*	0.2	1		
Fe	-0.554**	0.595**	0.370**	0.381**	0.212	0.167	1	
Mn	-0.196	0.272*	0.373**	0.141	0.271*	0.335**	0.23	1

*表示相关达 5% 的显著水平 Correlation is significant at the 0.05 level; **表示相关达 1% 的极显著水平 Correlation is significant at the 0.01 level; n=60.

为 $Fe > B > Mn > Mo > Zn > Cu$ 。

以往农业上的研究认为,在酸性条件下有效 B 会随有机质的增加而提高(熊毅和李庆逵,1987),这与本研究结果一致,但农业上的研究发现有机质与土壤中的有效 Zn 含量呈负相关,如有机质含量高的水稻土易发生缺 Zn 现象(周鸣铮,1985),这与本研究结果相反。俞元春等(1998a)通过对江南几处丘陵森林的研究后,认为有机质与 B 和 Fe 的有效量呈负相关,这与本研究结果刚好相反,但有机质与其他微量元素的相关性与本研究一致,呈正相关。

此外,以往农业上的研究还认为 pH 值与有效 Mo 呈正相关(周鸣铮,1985),这与本研究的结果相反,但本研究与俞元春等(1998a)的研究结果一致,即 pH 值与有效 Mo 呈负相关。

产生以上不一致的原因,可能与 pH 值和有机质在不同地方所起的作用不一样有关。pH 值既可以直接影响微量元素在土壤中的活性以及微量元素在土壤剖面的纵向移动能力,也可以通过影响微量元素的存在形态,从而间接改变其迁移活性

(Lonegran, 1981)。土壤有机质与微量元素的关系也非常密切,因为它既能作为易溶络合剂促进微量元素的淋失,又能固定微量元素(Perrott 和 Smith, 1976)。当前一种作用占主导时,有机质含量与有效态微量元素成负相关;当后一种作用占优势时,有机质含量与有效态微量元素成正相关。

在有效态微量元素之间的相关性上,B 和 Mo 与其他成分的相关性最高。如 B 除与 Cu 的相关性不明显外,与其他成分的相关性均达显著($Mo, P < 0.05$)和极显著水平($P < 0.01$);Mo 除与 Mn 相关性较小外,与其他成分的相关均达显著($P < 0.05$)和极显著水平($Fe, P < 0.01$,表 4)。

4 结 语

(1)鼎湖山自然保护区三种不同演替阶段的森林表层土壤中有效微量元素的平均含量顺序为: $Fe > Zn > Mn > B > Cu > Mo$,且均表现为阔叶林含量最高,除有效 Zn 是混交林最低之外,其余元素均以

马尾松林含量最低。

(2)鼎湖山自然保护区三种代表性森林土壤中有效 Fe 的供应充足,表现出富 Fe 的状况,有效 Cu 和 Zn 的供应良好,但均严重缺 Mn,马尾松林土壤还严重缺乏 B、Mo,混交林土壤的 Mo 供应也略显不足。

(3)土壤 pH 值与考察的所有微量元素有效量之间均呈负相关,且与有效 B、Cu 和 Fe 相关极显著($P < 0.01$),与有效 Mo 相关显著($P < 0.05$);有机质与考察的所有微量元素有效量之间均呈正相关,且与有效 B 和 Fe 相关极显著,与有效 Mn 相关显著,表明二者对土壤微量元素的有效量有重要影响。

本研究得到郝梦德副研究员协助样品分析,张佑昌协助野外采样,在此一并致谢。

参考文献:

- 熊毅,李庆逵. 1987. 中国土壤(第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 517—536.
- 袁可能. 1990. 土壤化学[M]. 北京: 科学出版社, 159—162.
- 中华人民共和国国家标准局. 1987. 森林土壤分析方法(第三分册)[M]. 北京: 国家标准局.
- 周鸣铮. 1985. 土壤肥力学概论[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 291—299.
- Gao MR(高美荣), Zhu B(朱波), Jiang MF(蒋明富). 1999. Distribution of zinc forms and its influence factors in calcareous purple soils(石灰性紫色土中锌的形态分布及其影响因素)[J]. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), 10(4): 415—418.
- He JH(何金海), Cheng ZQ(陈兆其). 1982. Soils of Dinghushan Nature Reserve (鼎湖山自然保护区之土壤)[J]. *Trop Subtrop For Ecosys*(热带亚热带森林生态系统研究), 1: 25—31.
- He YG(何宜庚). 1983. Soils of Dinghushan Nature Reserve of Guangdong Province (广东省鼎湖山自然保护区的土壤)[J]. *J South China Normal Univ*(华南师范大学学报), 1983, (1): 87—97.
- Huang JH(黄建辉), Cheng LZ(陈灵芝), Han XG(韩兴国). 2000. Changes of some major and micro-nutrients during the decomposition process of oak twigs(几种常微量元素在辽东栎枝条分解过程中的变化特征)[J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报), 20(2): 229—234.
- Huang ZF(黄展帆), Fan ZG(范征广). 1982. Climate of Dinghushan(鼎湖山的气候)[J]. *Trop Subtrop For Ecosys*(热带亚热带森林生态系统研究), 1: 11—16.
- Liu QY(刘全友), Tong YP(童依平), Li JY(李继云), et al. 2000. Factors influencing the availability of nutrients in the soil of Duolun county in mixed area of agriculture and pasturing (多伦县土壤营养元素有效态含量的影响因素研究)[J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报), 20(6): 1 034—1 037.
- Xia HP(夏汉平), Yu QF(余清发), Zhang DQ(张德强). 1997. The soil acidity and nutrient contents, and their characteristics of seasonal dynamic changes under 3 different forests of Dinghushan Nature Reserve(鼎湖山 3 种不同林型下的土壤酸度和养分含量差异及其季节动态变化特征)[J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报), 1997, 17(6): 645—653.
- Yu YC(俞元春), Zeng SC(曾曙才), Luo RY(罗汝英). 1998a. Contents and distribution of microelements in soils of hilly forest area in the South of Yangzi River(江南丘陵林区森林土壤微量元素的含量与分布)[J]. *J Anhui Agric Univ*(安徽农业大学学报), 1998, 25(2): 167—173.
- Yu YC(俞元春), Zeng SC(曾曙才), Zhang HC(张焕朝), et al. 1998b. Contents and dynamics of microelements in soils under main forest stands in the hilly regions of Southern Jiangsu Province(苏南丘陵主要森林类型土壤微量元素含量及其动态特征)[J]. *J Central South For Univ*(中南林学院学报), 18(1): 20—26.
- Zhang BG(张秉刚). 1990. A study on soil thermal regime under different types of subtropical monsoon evergreen forest in Dinghushan(鼎湖山土壤的活性铁铝与土壤水分关系探讨)[J]. *Trop Subtrop For Ecosys*(热带亚热带森林生态系统研究), 6: 97—101.
- Zhang BG(张秉刚), Zhou MN(卓慕宁). 1985. The physical properties of soil under different forest types in Dinghushan biosphere Reserve(鼎湖山自然保护区不同林型下土壤的物理性质)[J]. *Trop Subtrop For Ecosys*(热带亚热带森林生态系统研究), 3: 1—10.
- Zhang HC(张焕朝), Yu YC(俞元春). 1995. Micromutrient status of soils under chinese fir, sassafras and weeping cypress stands(杉木、檫木、柏木等林分下土壤微量元素状况)[J]. *J Nanjing Forest Univ*(南京林业大学学报), 19(2): 6—12.
- Mo JM, Brown S, Ding MM, Zhang ZP. 1994. Nitrogen distribution in vegetation of a subtropical monsoon evergreen broadleaf forest in China[J]. *Tropics*, 3(2): 143—153.
- Mo JM, Brown S, Peng SL, Kong GH. 2003. Nitrogen availability in disturbed rehabilitated and mature forests of tropical China[J]. *Forest Ecology and Management*, 175: 573—583.
- Perrott KW, Smith BFL. 1976. The reaction of fluoride with soils and soil minerals[J]. *J Soil Sci*, 27: 58.
- Peterson BJ, Melillo JM. 1985. The potential storage of carbon caused by eutrophication of the biosphere[J]. *Tellus*, 37B: 117—127.
- Lonegran. 1981. Copper in Soil and Plants[M]. New York: Academic Press, 69—95.
- Zeng SC, Xie ZS, Yu YC, et al. 2002. Available microelements in soils under different stands in Northern Subtropics of China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 22(12): 2 141—2 146.