

# 江西毛竹主产区土壤有效 Cu、Zn、Fe 和 Mn 空间分布特征研究

鲁顺保<sup>1,2</sup> 龚霞<sup>1</sup> 张勇江<sup>1</sup> 郭晓敏<sup>1\*</sup>

(1. 江西农业大学 园林与艺术学院/江西省竹子种质资源与利用重点实验室,江西 南昌 330045; 2. 江西师范大学 生命科学学院 江西 南昌 330022)

**摘要:**对江西 6 个毛竹主产区 8 个林地的土壤有效 Cu、Zn、Fe 和 Mn 含量分布进行研究,结果表明其含量差异变化均较大。0~10、10~30 和 30~50 cm 平均有效 Cu 含量分别为 0.70、0.51 和 0.39 mg/kg,排埠、双峰和官山林地有效 Cu 含量主要分布在 0.5~1.0 mg/kg,分别占全部样地的 77.8%、100% 和 88.9%;除太平山庄外,10~30 cm 和 30~50 cm 土层有效 Cu 含量均低于 0.5 mg/kg。有效 Zn 的平均含量分别为 2.00、1.34、0.86 mg/kg。有效 Fe 的平均含量分别为 19.41、15.93 和 13.56 mg/kg,三爪仑样地 0~10 cm 土壤有效 Fe 含量在 20~25 mg/kg,占全部样地的 88.9%;10~30 cm 在 15~20 mg/kg,占全部样地的 55.6%。土壤有效 Mn 平均含量分别为 16.37、12.13 和 9.20 mg/kg,太平山庄样地 0~10 cm 和 10~30 cm 土壤有效 Mn 含量为 15~20 mg/kg,均占全部样地的 66.7%。方差分析表明,不同样地土壤有效 Cu、Zn、Fe 和 Mn 含量均达极显著差异。相关性分析表明:土壤有机质和有效 Fe 含量之间呈显著正相关,与 Cu 呈负相关,与 10~30 cm 和 30~50 cm 土壤有效 Zn 和 0~10 cm 有效 Mn 呈负相关但不显著。除 0~10 cm 的土壤有效 Fe 和 Zn 含量之间不显著外,其它微量元素之间均达显著差异或极显著差异。

**关键词:**毛竹;微量元素;空间分布

中图分类号: S153.6<sup>+</sup>1 文献标志码: A 文章编号: 1000-2286(2010)04-0752-07

## A Study on Spatial Distribution of Soil Available Cu, Zn, Fe and Mn in Moso Bamboo Stands in Jiangxi Province

LU Shun-bao<sup>1,2</sup>, GONG Xia<sup>1</sup>, ZHANG Yong-jiang<sup>1</sup>, GUO Xiao-min<sup>1\*</sup>

(1. College of Landscape Architecture and Art, Jiangxi Provincial Key Laboratory for Bamboo Germplasm Resources and Utilization, JAU, Nanchang 330045, China; 2. College of Life Science, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China)

**Abstract:** The distribution characteristics of available Cu, Zn, Fe and Mn of soil samples from bamboo forests of 8 sites in 6 main producing bamboo counties in Jiangxi Province were studied. The results showed that the differences of these available microelements in different sites were obvious. The average contents of available Cu in the 0-10 cm, 10-30 cm and 30-50 cm layers were 0.70, 0.51 and 0.39 mg/kg respectively. The available Cu contents were 0.5-1.0 mg/kg in Paibu, Shuangfeng and Guanshan, accounting for 77.8%, 100% and 88.9% respectively. The available Cu contents in the 10-30 cm and 30-50 cm layers except in Taiping Hills were less than 0.5 mg/kg. The average contents of available Zn in the 0-10 cm, 10-30 cm

收稿日期: 2010-03-30 修回日期: 2010-05-20

基金项目: 国际植物营养研究所 IPNI 项目( Jiangxi-18)、国家自然科学基金项目(30860226)、科技部农业科技成果转化资金项目(2008GB2C500149)、江西省教育厅青年基金项目(GJJ10093)、科技部科技支撑项目(2008BAD A9B0802)和江西省科技厅学科带头人项目(030008)

作者简介: 鲁顺保(1976-)男, 博士生, 主要从事毛竹研究; \* 通讯作者: 郭晓敏 教授, 博导 E-mail: gxmjxau@163.com。

and 30–50 cm layers were 2.00, 1.34 and 0.86 mg/kg respectively. The average contents of available Fe in the 0–10 cm, 10–30 cm and 30–50 cm layers were 19.41, 15.93 and 13.56 mg/kg respectively. The available Fe content in the 0–10 cm layer in San Zhualun was 20–25 mg/kg and accounted for 88.9%, 15–20 mg/kg in the 10–30 cm and accounted for 55.6%. The average contents of soil available Mn in the 0–10 cm, 10–30 cm and 30–50 cm layers were 16.37, 12.13 and 9.20 mg/kg respectively. The available Mn contents in the 0–10 cm and 10–30 cm layers in Taiping Hills were 15–20 mg/kg and both accounted for 66.7%. The available soil Cu, Zn, Fe and Mn contents were significantly different among all the forests at the three depths. The correlation analyses showed that there was a significant correlation between soil organic matter (SOM) and available Fe, and a negative correlation between SOM and available Cu. There were no significant differences between soil available Zn in the 10–30 cm and 30–50 cm layers and available Mn in the 0–10 cm, but the correlations were negative. The correlations were significant in different soil layers among these microelements except available Fe and Zn in the 0–10 cm layer.

**Key words:** *Moso bamboo*; micronutrient; spatial distribution

土壤作为一种独立的自然体,对水、肥、气、热及林木根系生长空间具有调节功能,同时又受各种环境因素的影响,如土地利用方式的改变会导致土壤基本性质发生显著改变<sup>[1-2]</sup>。Cu、Zn、Fe 和 Mn 是土壤中典型的重金属元素,同时也是植物生长所必需的微量元素,其含量多少不仅影响土壤质量,对植物生长和发育也有较大影响。土壤中微量元素的含量受成土母质和土壤类型以及土壤水分、温度、pH 等条件的影响,因此,不同立地条件对其含量有较大差异<sup>[3-7]</sup>。土壤中的微量元素具有多价态、活性强等特点,在土壤中以多种形态存在,其中只有水溶态的那部分对植物有效<sup>[8]</sup>,对生态系统研究和农业生产具有重要指导意义。

毛竹(*Phyllostachys heterocycla* var. *pubescens*)是一种耗肥量大的大径型竹种,随着毛竹产量和质量提高,从土壤中带走的养分也较多,而且多年来只注重氮磷钾肥料的施用。由于土壤中 Cu、Zn、Fe 和 Mn 等微量元素参与毛竹生理生化过程,并且对毛竹产量和质量发挥重要作用。因此,各国学者对微量元素的作用及其机理研究异常活跃。然而,由于竹林地土壤情况复杂,肥力差异较大,目前尚无对毛竹林地土壤微量元素进行过研究。为提高毛竹产量和质量,摸清江西不同地理分布毛竹林地土壤微量元素的含量及其分布特征,对指导江西毛竹主产区林地施肥进而提高毛竹产量和质量具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验林地概况

试验林地位于江西省赣西北及赣南山区,属中亚热带湿润季风气候,地理位置为 114.31°~115.55°N、25.14°~28.88°E。海拔 200~800 m,土壤为花岗岩母质发育而成的黄红壤,土层厚 60 cm 以上,平均坡度 8°~16°。地形复杂,生境多样,山地、丘陵、盆地、平原均有。气候湿润温和,雨量充沛,日照充足,四季分明。平均气温 16.2~19.7 °C,无霜期长,平均 240~307 d,日平均气温稳定通过 0 °C 的活动积温 5 926~6 478 °C; ≥10 °C 积温为 5 050~5 644 °C,极端最高气温 41.6 °C,极端最低气温 -15.8 °C,平均年降水量为 1 624.9 mm,平均日照时数 1 737.1 h<sup>[9]</sup>。土壤 pH 值在 4.12~5.5,差异不大,水热、土壤和生境条件十分适宜毛竹生长,试验地主要为材用竹,且多为毛竹纯林,部分为与杉木或阔叶树组成的混交林,天然残次林分也有相当比例。调查点为江西靖安县太平山庄(JTPSZ)和三爪仑(JSZL)、奉新金洞(FJD)、铜鼓排埠(TPB)和代溪(TDX)、宜丰双峰(YSF)、永丰官山(YGS)以及崇义阳岭(CYL)等 6 个毛竹主产区县 8 个试验点。

### 1.2 土壤样品采集及测定方法

在各试验区分别设置 4~12 个样地,于 2009 年 2—3 月进行在每个样地选定 3 个样方,每个样方大小为 20 m×20 m。在各样方内以 S 型采 5 个土样,每个土壤采集点分 3 层,分别为 0~10 cm、10~30 cm 和 30~50 cm 样品分成 3 份,将各试验点同层次的土壤组成混合样品,最后用四分法将混合土壤

选出 1 kg 用无菌袋装好,尽快带回实验室进行相关土壤养分分析,各化学性质均参照鲁如坤的《土壤农业化学分析方法》进行<sup>[10]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 毛竹林土壤有效 Cu 的分布特征

从表 1 可以看出,江西 6 个毛竹主产县土壤有效 Cu 含量差异变化较大,0~10 cm 土层变异系数最大和最小的分别是铜鼓带溪的(51.42%)和铜鼓排埠的(11.46%);10~30 cm 变异系数最大和最小的分别是铜鼓带溪(73.19%)和崇义阳岭(19.07%);30~50 cm 变异系数为 25.93%~76.73%。0~10 cm、10~30 cm 和 30~50 cm 土壤有效 Cu 含量变化范围分别为 0.21~2.22、0.18~1.99 和 0.11~1.81 mg/kg,均值分别为 0.70、0.51 和 0.39 mg/kg。0~10 cm 土壤有效 Cu 的平均含量以靖安太平山庄最大,为 1.42 mg/kg,靖安三爪仑最小,为 0.42 mg/kg;10~30 cm 土壤有效 Cu 含量最高和最低的是太平山庄和三爪仑,分别为 1.08 mg/kg 和 0.35 mg/kg;30~50 cm 土壤有效 Cu 含量最高和最低分别是太平山庄和奉新金洞,分别为 0.89 mg/kg 和 0.26 mg/kg。从毛竹林土壤有效 Cu 含量的分布来看(图 1A),太平山庄林地 0~10 cm 集中在 1.5 mg/kg 以上,占全部的 50%,含量为 1.0~1.5 mg/kg 占 41.7%。排埠、宜丰双峰和永丰官山林地有效 Cu 含量主要集中在 0.5~1 mg/kg,分别占全部的 77.8%、100% 和 88.9%。10~30 cm 和 30~50 cm 土层有效 Cu 含量除太平山庄外其余均集中分布在 0.5 mg/kg 以下,含量偏小。对不同实验林地土壤微量元素进行方差分析,得出不同样地土壤有效 Cu 含量均达极显著水平( $P < 0.01$ )。对其进行多重比较分析,结果表明太平山庄各层土壤有效 Cu 含量与其他各试验地差异显著。

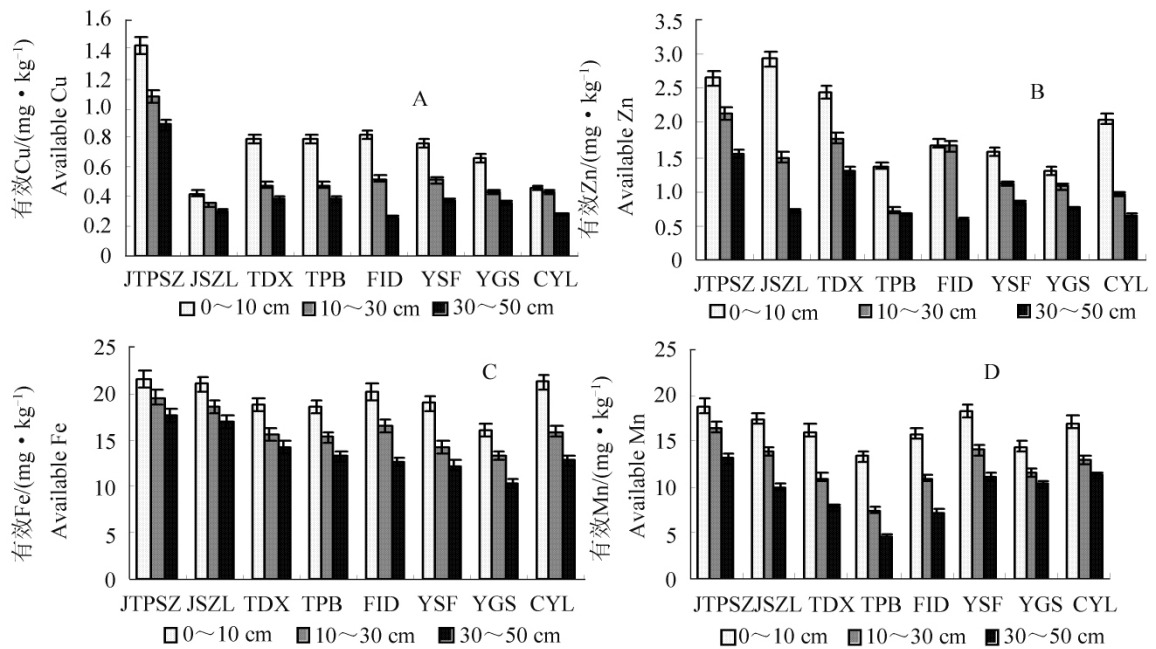


图 1 毛竹林土壤有效 Cu、Zn、Fe 和 Mn 含量分布

Fig. 1 The distribution of soil available Cu, Zn, Fe and Mn content in moso bamboo forest

### 2.2 毛竹林土壤有效 Zn 的分布特征

从表 1 可以看出,毛竹林地土壤有效 Zn 含量存在一定的差异,0~10 cm、10~30 cm 和 30~50 cm 土壤有效 Zn 含量变异系数分别以金洞(52.72%)、排埠(74.67%)和带溪(82.92%)最高;而土壤有效 Zn 含量变化程度以阳岭(10.59%)、金洞(20.72%)和太平山庄(32.46%)最低。土壤有效 Zn 的平均含量分别为 2.00、1.34 和 0.86 mg/kg,变化范围分别为 0.21~4.31、0.22~3.01 和 0.17~3.67 mg/kg。土壤有效 Zn 的平均含量分别以三爪仑(2.94 mg/kg)和太平山庄(2.14 mg/kg)和太平山庄(1.54 mg/kg)为最大,分别以官山(1.29 mg/kg)、排埠(0.72 mg/kg)和金洞(0.58 mg/kg)为最小。从图 1B 可以看出,土壤有效 Zn 含量在 2 mg/kg 以下占多数。但太平山庄土壤 0~10 cm 和 10~30 cm 有效 Zn 含量主

表 1 毛竹林土壤有效 Cu、Zn、Fe 和 Mn 含量的统计分析

Tab. 1 Statistic features of Moso bamboo forest soil available Cu, Zn, Fe and Mn content

土层/cm Soil layer	实验点 Site	样本量 No.	Cu/(mg·kg <sup>-1</sup> )		Zn/(mg·kg <sup>-1</sup> )		Fe/(mg·kg <sup>-1</sup> )		Mn/(mg·kg <sup>-1</sup> )	
			变异系数 CV/%	均值 Mean ± SD	变异系数 CV/%	均值 Mean ± SD	变异系数 CV/%	均值 Mean ± SD	变异系数 CV/%	均值 Mean ± SD
0 ~ 10	JTPSZ	36	21.3	1.42 ± 0.30Aa	15.91	2.67 ± 0.42Aac	3.033	21.5 ± 0.7Aa	0.215	18.9 ± 0.0Aa
	JSZL	27	14.52	0.42 ± 0.06Bb	29.97	2.94 ± 0.88Aa	4.338	21.1 ± 0.9Aac	3.806	17.5 ± 0.7ACac
	TDX	21	51.42	0.79 ± 0.41Bc	24.72	2.44 ± 0.60ACac	6.756	18.8 ± 1.3ABbc	14.6	16.2 ± 2.4ADbce
	TPB	27	11.46	0.79 ± 0.09Bbc	32.76	1.37 ± 0.45BCbd	6.966	18.6 ± 1.3ABbce	19.77	13.3 ± 2.6BDd
	FJD	27	45.79	0.82 ± 0.38Bc	52.72	1.69 ± 0.90BCb	10.64	20.2 ± 2.2Aac	7.047	15.8 ± 1.1BCDbc
	YSF	27	28.72	0.76 ± 0.22Bc	17.35	1.58 ± 0.27BDd	13.71	18.9 ± 2.6ABbc	9.544	18.3 ± 1.7ACae
	YGS	27	20.58	0.66 ± 0.14Bbc	30.14	1.29 ± 0.39Bb	15.05	16.0 ± 2.4Bde	20.74	14.5 ± 3.0BDbdf
	CYL	12	35.95	0.46 ± 0.17Bbc	10.59	2.06 ± 0.22ACDbed	13.3	21.3 ± 2.8Abc	3.823	17.1 ± 0.7ADacf
	Sig.			0.000***		0.000***		0.000***		0.000***
10 ~ 30	JTPSZ	36	37.39	1.08 ± 0.40Aa	23.84	2.14 ± 0.51Aa	16.22	19.5 ± 3.2Aa	16.93	16.5 ± 2.8Aa
	JSZL	27	23.34	0.35 ± 0.08Bb	32.18	1.49 ± 0.48Bbc	10.96	18.6 ± 2.1ABac	26.52	13.8 ± 3.7ABac
	TDX	21	73.19	0.48 ± 0.35Bb	41.26	1.78 ± 0.73ACac	15.53	15.7 ± 2.4BCbd	35.73	11.0 ± 3.9BCDbc
	TPB	27	31.9	0.48 ± 0.15Bb	74.67	0.72 ± 0.54Dde	17.19	15.3 ± 2.6BCDbd	48.33	7.5 ± 3.6Cb
	FJD	27	48.9	0.52 ± 0.25Bb	20.72	1.66 ± 0.34BDde	25.45	16.6 ± 4.2ACDbc	24.87	10.9 ± 2.7BCDbc
	YSF	27	53.76	0.51 ± 0.27Bb	23.51	1.10 ± 0.26BDde	12.3	14.2 ± 1.7CDbd	12.84	14.0 ± 1.8ADac
	YGS	27	35.93	0.43 ± 0.15Bb	45.85	1.07 ± 0.49BDde	22.62	13.3 ± 3.0CDd	26.69	11.5 ± 3.1BCDc
	CYL	12	19.07	0.43 ± 0.08Bb	48.29	0.95 ± 0.46BCDbe	4.105	15.9 ± 0.7ACDbed	31.46	13.0 ± 4.1ACac
	Sig.			0.000***		0.000***		0.000***		0.000***
30 ~ 50	JTPSZ	36	33.98	0.89 ± 0.30Aa	32.46	1.54 ± 0.50Aa	17.85	17.8 ± 3.2Aa	22.17	13.1 ± 2.9Aa
	JSZL	27	25.93	0.30 ± 0.08Bb	35.07	0.71 ± 0.25BCb	16.49	17.0 ± 2.8ABb	43.49	10.0 ± 4.3ABbd
	TDX	21	40.26	0.38 ± 0.15Bb	82.92	1.29 ± 1.07ABac	26.52	14.2 ± 3.8ABCbd	50.17	7.7 ± 3.9BCbe
	TPB	27	40.24	0.38 ± 0.15Bb	56.29	0.66 ± 0.37BCb	27.46	13.2 ± 3.6ABCbc	47.94	4.7 ± 2.3Def
	FJD	27	76.73	0.26 ± 0.20Bb	37.64	0.58 ± 0.22Cb	21.51	12.6 ± 2.7BCed	35.49	7.3 ± 2.6BCDbef
	YSF	27	69.89	0.37 ± 0.26Bb	39.47	0.83 ± 0.33BCbc	14.73	12.2 ± 1.8BCed	21.5	11.2 ± 2.4ACad
	YGS	27	26.85	0.36 ± 0.10Bb	45.78	0.76 ± 0.35BCb	29.8	10.3 ± 3.1Ce	27.47	10.3 ± 2.8ACade
	CYL	12	41.49	0.28 ± 0.11Bb	46.47	0.64 ± 0.30BCbc	32.21	12.7 ± 4.1ACbd	36.61	11.3 ± 4.1ACade
	Sig.			0.000***		0.001***		0.001***		0.000***

多重比较采用 Duncan's 新复极差法; 纵向比较字母相同者为差异不显著, 不同字母为差异显著; 大写字母为 0.01 水平, 小写字母为 0.05 水平; \* 为 0.05 水平显著, \*\* 为 0.01 水平显著, \*\*\* 为 0.001 水平显著; n = 204。

Duncan's new multiple range method was used as multiple comparisons. The same letters within columns indicated no significant differences, and the differences were significant when the letters were different. The mean difference is significant at the 0.01 level in capital letter and at the 0.05 level in small letter. \*, \*\*, and \*\*\* represented significances at the 0.05, 0.01 and 0.001 level, respectively n = 204.

要集中在 2 ~ 3 mg/kg, 分别占全部的 75% 和 66.7%; 30 ~ 50 cm 主要集中在 1 ~ 2 mg/kg, 占全部的 58.3%。双峰和官山两地 3 层土壤有效 Zn 含量均未超过 2 mg/kg, 而且三爪仑、带溪、金洞和阳岭等林地土壤下 2 层有效 Zn 含量均在 2 mg/kg 以下。对不同试验地进行方差分析(表 1) 得出各地不同层次的土壤有效 Zn 含量均达极显著差异(P < 0.01), 多重比较分析也表明三爪仑 0 ~ 10 cm 土壤有效 Zn 含量与太平山庄、带溪差异不显著, 其他各试验点之间也无显著差异。太平山庄试验点 10 ~ 30 cm 和 30 ~ 50 cm 的土壤有效 Zn 与带溪差异不显著, 其他之间也均未达显著水平。

### 2.3 毛竹林土壤有效 Fe 含量分布特征

从表 1 可以看出 0 ~ 10 cm、10 ~ 30 cm 和 30 ~ 50 cm 的土壤有效 Fe 含量变异系数分别为 3.03% ~ 15.05%, 4.11% ~ 25.45% 和 14.73% ~ 32.21%, 其 0 ~ 10 cm 变异系数最大是官山林场, 最小是太平山庄; 10 ~ 30 cm 变异系数最大是金洞, 最小是阳岭; 30 ~ 50 cm 变异系数最大是阳岭, 最小是双峰。土壤有效 Fe 含量均值分别为 19.41, 15.93 和 13.56 mg/kg, 各试验点的变化差异比有效 Cu 和 Zn 含量要小。各样地从上往下各土层有效 Fe 含量均值最大均出现在太平山庄毛竹林地, 分别为 21.5, 19.5 和 17.8 mg/kg; 而不同土壤层次有效 Fe 含量最小的均出现在官山样地, 分别为 16.0, 13.3 和 10.3 mg/kg。

从不同竹林地土壤有效 Fe 含量的分布来看(图 1C),太平山庄 0~10 cm 有效 Fe 主要集中在 20~25 mg/kg,占全部的 66.7%;10~30 cm 和 30~50 cm 均占全部的 50%。三爪仑 0~10 cm 土壤有效 Fe 含量在 20~25 mg/kg,占 88.9%;10~30 cm 在 15~20 mg/kg,占 55.6%;永丰官山各层土壤以及带溪、双峰和阳岭下两层土壤有效 Fe 含量均在 20 mg/kg。这主要是由于赤红壤是试验林区的主要土壤类型,土壤中含有丰富的 Fe 元素,加之这些毛竹林区土壤 pH 值在 4.12~5.5,这样更有利于有效 Fe 在土壤中的溶出,因而土壤有效 Fe 含量较高。方差分析表明,各地不同层次的土壤有效 Fe 含量均达差异极显著水平( $P < 0.001$ )。多重比较分析也表明,太平山庄 0~10 cm 土壤有效 Fe 含量与三爪仑、金洞无显著差异,而其他试验点之间也均未达显著水平,30~50 cm 土层太平山庄与其他均无显著性差异。

2.4 毛竹林土壤有效 Mn 的分布特征

从表 1 可以看出,各林地 0~10 cm,10~30 cm 和 30~50 cm 的土壤有效 Mn 变异系数分别为 0.215%~20.74%,12.84%~48.33% 和 21.5%~50.17%,土壤有效 Mn 含量差异变化较小。0~10 cm、10~30 cm 和 30~50 cm 的土壤有效 Mn 变化范围为 13.3~18.3,7.5~15.3 和 4.7~12.2 mg/kg,其平均含量分别为 16.37,12.13 和 9.20 mg/kg,从竹林地土壤有效 Mn 含量的分布来看(图 1D),太平山庄 0~10 cm 土壤有效 Mn 含量在 15~20 mg/kg,占全部的 66.7%;含量在 20 mg/kg 以上的占 33.3%;10~30 cm 含量在 15~20 mg/kg 的占 66.7%。三爪仑、带溪、排埠、金洞、官山和阳岭等林地的土壤有效 Mn 含量均在 15 mg/kg 以下,并且下 2 层主要集中在 10~15 mg/kg,其 0~10 cm 土壤有效 Mn 含量分别占全部的 100%,14.6%,77.8%,77.8%,66.7% 和 100%;10~30 cm 土壤有效 Mn 含量在 10 mg/kg 以下的分别占全部的 55.6%,100%,77.8%,88.9%,88.9% 和 50%;30~50 cm 土壤有效 Mn 含量在 10 mg/kg 以下的分别占全部的 88.9%,100%,88.9%,88.9%,100% 和 75%。方差分析表明(表 1),各地不同层次的土壤有效 Mn 含量均达极显著水平( $P < 0.01$ )。多重比较分析也表明,0~10 cm 土壤太平山庄、三爪仑和阳岭之间无显著差异,其他之间差异则达到显著性水平;在 10~30 cm 的土层中,太平山庄、三爪仑双峰和阳岭之间两两无显著差异,其他之间也无显著差异;在 30~50 cm 的土壤中,太平山庄、双峰、官山和阳岭之间无显著性差异,太平山庄、三爪仑和排埠两两之间差异显著。

2.5 有机质对土壤 Fe、Mn、Cu 和 Zn 有效性的影响

研究表明,有机质对土壤微量元素有效性之间存在重要的影响<sup>[6]</sup>。本研究针对江西毛竹林地土壤有机质对微量元素有效性的影响进行分析,结果表明(表 2),有机质和有效 Fe 之间呈显著正相关( $P < 0.05$ ),

表 2 毛竹林土壤有机质与 Cu、Zn、Fe 和 Mn 含量之间的相关性

Tab.2 Correlation of available Cu、Zn、Fe and Mn and organic matters in moso bamboo forest soil

土壤成分 Soil composition	土层 Soil layer/cm	有机质 SOM	Cu	Zn	Fe	Mn
有机质 SOM	0~10	1				
	10~30	1				
	30~50	1				
Cu	0~10	-0.415**	1			
	10~30	-0.234	1			
	30~50	-0.267*	1			
Zn	0~10	0.078	0.129	1		
	10~30	-0.146	0.459**	1		
	30~50	-0.012	0.496**	1		
Fe	0~10	0.260*	0.097	0.322**	1	
	10~30	0.251*	0.269*	0.319**	1	
	30~50	0.243*	0.400**	0.309*	1	
Mn	0~10	-0.058	0.253*	0.394**	0.296*	1
	10~30	0.057	0.430**	0.555**	0.312**	1
	30~50	0.052	0.413**	0.427**	0.261*	1

\* 和 \*\* 分别表示 0.05 和 0.01 水平显著; n = 204。

\* and \*\* indicated significance at  $P < 0.05$  and  $P < 0.01$ , respectively; n = 204.

与 Cu 呈负相关,并且与 0~10 cm 和 30~50 cm 含量差异显著或极显著;与 0~10 cm 土壤有效 Zn 和 10~30 cm 和 30~50 cm 土壤有效 Mn 呈无显著的正相关;而与 10~30 cm 和 30~50 cm 土壤有效 Zn 和 0~10 cm 有效 Mn 呈负相关。从表 2 还可以看出,除 0~10 cm 的土壤有效 Fe 和 Zn 含量之间不显著外,其它各土层的土壤微量元素之间均达显著或极显著差异,说明各微量元素之间的相互关系比较紧密。

### 3 结论与讨论

江西 6 个毛竹主产区 8 个实验点的土壤有效 Cu、Zn、Fe、Mn 含量差异变化较大,变异系数 0~10 cm、10~30 cm 和 30~50 cm 的含量变化分别为在 0.215%~52.72%、4.11%~74.67% 和 14.73%~82.92%,并且随土壤加深其含量均有下降的趋势。原因可能是试验点土壤 pH 值在 4.12~5.5,尤其是 0~10 cm 土壤呈现较强的酸性,对金属元素 Cu、Zn、Fe 和 Mn 的溶解度有一定影响。如 0~10 cm 微生物以及一些草本灌木等生物因素引起的土壤酸性偏强,因此在一定程度上也提高了这些养分的有效性<sup>[11-16]</sup>,各地不同层次的土壤 4 种微量元素含量均达极显著水平。土壤有效 Cu 从上往下各层平均含量分别为 0.70、0.51、0.39 mg/kg。太平山庄林地 0~10 cm 有效 Cu 含量集中在 1.5 mg/kg 以上;排埠、双峰和永丰官山林地有效 Cu 含量主要集中在 0.5~1 mg/kg。10~30 cm 和 30~50 cm 土层有效 Cu 含量除太平山庄外其余均集中分布在 0.5 mg/kg 以下,含量偏小,太平山庄各层土壤有效 Cu 含量与其他各试验地均达显著差异。土壤有效 Zn 的平均含量从上往下各层分别为 2.00、1.34、0.86 mg/kg,变异系数分别以金洞(52.72%)、排埠(74.67%)和带溪(82.92%)最高,而土壤有效 Zn 含量变化程度以崇义阳岭(10.59%)、金洞(20.72%)和太平山庄(32.46%)最低。从上往下各层土壤有效 Fe 的变化分别为 7.7~27.6、4.4~25.3、1.5~21.6 mg/kg,各试验点的变化差异比有效 Cu 和 Zn 要小。其原因可能是由于红壤是试验林区的主要土壤类型,土壤中含有丰富的 Fe 元素,加之这些毛竹林区土壤呈酸性,这样更有利于有效 Fe 在土壤中的溶出,因而土壤有效 Fe 含量较高。土壤有效 Mn 的含量差异变化较小,0~10 cm 变异最大的是官山,最小的是太平山庄;10~30 cm 变异最大的是排埠;30~50 cm 变异最大的是带溪,最小的是双峰。太平山庄 0~10 cm 土壤有效 Mn 含量在 15~20 mg/kg。三爪仑、带溪、排埠、金洞、官山和阳岭等林地的土壤有效 Mn 含量均在 15 mg/kg 以下,并且下 2 层主要集中在 10~15 mg/kg;0~10 cm 土壤太平山庄、三爪仑和阳岭之间无显著差异,其他之间差异达到显著性水平;在 30~50 cm 的土壤中,太平山庄、双峰、官山和阳岭之间无显著性差异,太平山庄、三爪仑和排埠两两之间差异显著。

影响土壤微量元素含量的因子很多,如土壤元素全量、土壤 pH、土壤类型及利用、成土母质以及土壤结构等,但这些因子在不同地方所起作用不尽相同。土壤有机质与有效 Cu、有效 Zn、有效 Fe 和有效 Mn 均有一定的正相关性<sup>[7,17-18]</sup>。陆继龙等<sup>[19]</sup>认为 DTPA 提取的有效锌与土壤有机质含量有高度的正相关性,其 60% 可溶态锌是与富里酸络合的;在温带森林植被条件下形成的土壤中,铁的迁移是与有机质的螯合作用联系在一起;土壤溶液中 98% 的铜存在于有机复合体中,与富里酸形成的有机铜是可溶性的,与胡敏酸形成不溶的络合物而降低了铜的活性;土壤中加入有机质后,土壤交换态锰和植物锰含量均有所提高。有机质与微量元素之间的相关性可以反映它们之间相互作用和相互影响的情况,其相关性的强弱反映了有机质对各微量元素有效性影响力的大小<sup>[20]</sup>。本研究有机质与 4 种微量元素相互关系也表明,有机质与有效 Cu 和 Fe 之间存在着重要的影响,其中与 Fe 呈显著正相关,与 Cu 呈负相关,并且 0~10 cm 和 30~50 cm 达显著水平。4 种微量元素之间除 0~10 cm 的土壤有效 Cu 和 Zn 含量之间不显著外,其它微量元素之间均达显著或极显著差异,说明各微量元素之间的相互关系紧密。

#### 参考文献:

- [1]邵玉琴,赵吉,杨勋.恢复草地和退化草地土壤微生物类群数量的分布特征[J].中国沙漠,2004,24(2):223-226.
- [2]焦如珍,杨承栋,屠星南,等.杉木人工林不同发育阶段林下植被、土壤微生物、酶活性及养分的变化[J].林业科学研究,1997,10(4):373-379.
- [3]袁可能.土壤化学[M].北京:科学出版社,1990:159-162.
- [4]高美荣,朱波,蒋明富.石灰性紫色土中锌的形态分布及其影响因素[J].应用生态学报,1999,10(4):415-418.

- [5]黄建辉 陈灵芝 韩兴国. 几种常微量元素在辽东栎枝条分解过程中的变化特征[J]. 生态学报 2000 20(2): 229 - 234.
- [6]郭家文 张跃彬 刘少春. 滇西南6县蔗区的土壤有效 Fe、Mn、Cu、Zn 的分布特征研究[J]. 土壤通报 2009 40(1): 179 - 183.
- [7]史文娇 汪景宽 魏丹 等. 黑龙江省南部黑土区土壤微量元素空间变异及影响因子——以双城市为例[J]. 土壤学报 2009 46(2): 342 - 347.
- [8]北京农业大学. 农业化学(总论) [M]. 北京: 农业出版社, 1998: 12 - 14, 173 - 176.
- [9]江西森林编委会. 江西森林[M]. 北京: 中国林业出版社, 1986.
- [10]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.
- [11]张福锁 曹一平. 根际动态过程与植物营养[J]. 土壤学报, 1992 29(8): 239 - 250.
- [12]Jones D L. Organic acids in the rhizosphere: A critical review[J]. Plant and Soil, 1998 205(1): 25 - 44.
- [13]Lynch J M, Whipps J M. Substrate flow in the rhizosphere[J]. Plant and Soil, 1990 129(1): 1 - 10.
- [14]Mench M, Martin E. Mobilization of cadmium and other metals from two soils by root exudates of *Zea mays* L. *Nicotiana tabacum* L. and *Nicotiana rustical* [J]. Plant and Soil, 1991 132(2): 187 - 196.
- [15]Merckx R, Vanginkel J H, Sinnaeve J, et al. Plant - induced changes in the rhizosphere of maize and wheat ( II ): Complexation of cobalt zinc and manganese in the rhizosphere of maize and wheat [J]. Plant and Soil, 1986 96(1): 95 - 107.
- [16]曾清如 周细红 廖柏寒 等. 低分子有机酸对茶园土壤中 Al、F、P、Cu、Zn、Fe、Mn 的活化效应[J]. 茶叶科学 2001 21(1): 48 - 52.
- [17]张树人 赵协哲 宋钢 等. 吉林省土壤微量元素含量与分布规律研究——土壤中的铜和锌[J]. 吉林农业科学, 1987, 12(3): 50 - 57.
- [18]张树人 赵协哲 宋钢 等. 吉林省土壤微量元素含量与分布规律研究——土壤中的铁和锰[J]. 吉林农业科学, 1988, 13(2): 51 - 57.
- [19]陆继龙 周永昶 周永轩. 吉林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.
- [20]李德军 莫江明 方运霆 等. 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[J]. 广西植物, 2004 24(6): 529 - 53, 182.

(上接第742页)

- [7]Kurt S P, Eugenie S E. Carbon cycling and storage in world forests: Biome patterns related to forest age [J]. Global Change Biology 2004 10: 2052 - 2077.
- [8]Houghton R A. Land - use change and the carbon cycle [J]. Global Change Biology, 1995 1: 275 - 287.
- [9]Detwiler R P, Hall C S. Tropical forests and the global carbon cycle [J]. Science, 1988 239: 426 - 471.
- [10]Winjum J K, Schroeder P E. Forest plantations of the world: Their extent, ecological attributes, and carbon storage [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1997 84: 153 - 167.
- [11]王效科 冯宗炜. 中国森林生态系统中植物固定大气碳的潜力 [J]. 生态学杂志 2000 19(4): 72 - 74.
- [12]李意德 曾庆波. 尖峰岭热带山地雨林 C 素库及皆伐影响的初步研究 [J]. 应用生态学报, 1998 9(4): 341 - 344.
- [13]陈楚莹 廖利平 汪思龙 等. 杉木人工林生态系统碳素分配与贮量的研究 [J]. 应用生态学报 2000 11: 175 - 178.
- [14]方晰 田大伦 项文化. 速生阶段杉木人工林碳素密度、贮量和分布 [J]. 林业科学 2002 38(3): 14 - 19.
- [15]延晓冬 赵士洞. 温带针阔混交林分碳贮量动态的模拟模型 [J]. 生态学杂志, 1995 14(2): 6 - 12.
- [16]叶绍明 郑小贤 杨梅 等. 尾叶桉马占相思人工复层林生物量及生产力研究 [J]. 北京林业大学学报, 2008 30(5): 37 - 43.
- [17]Post W M, Emanuel W R, Zinke P, et al. Soil carbon pools and world life zones [J]. Nature, 1982 298(8): 156 - 159.
- [18]方晰 田大伦 项文化 等. 不同密度湿地松人工林中碳的积累和分配 [J]. 浙江林学院学报 2003 20(4): 374 - 379.
- [19]冯瑞芳 杨万勤 张健. 人工林经营与全球变化减缓 [J]. 生态学报 2006 26(11): 3870 - 3877.
- [21]黄从德 张国庆. 人工林碳储量影响因素 [J]. 世界林业研究 2009 22(2): 34 - 38.