

# 不同植被恢复模式下中亚热带黄壤坡地土壤微量元素效应\*

漆良华<sup>1</sup> 张旭东<sup>2\*\*</sup> 彭镇华<sup>1,2</sup> 范少辉<sup>1</sup> 周金星<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 国际竹藤网络中心, 北京 100102; <sup>2</sup> 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091)

**摘要** 以武陵山区女儿寨小流域为例,研究了中亚热带黄壤坡地7种典型植被恢复模式下土壤微量元素有效性及其与土壤有机质、pH值之间的关系。结果表明:0~20 cm土层荒草灌丛的B、Mn含量、油桐人工林Mo、Cu含量、杜仲人工林Zn含量和毛竹-杉木混交林Fe含量最高;20~40 cm土层润楠次生林B、Fe、Mn含量、荒草灌丛模式Mo含量、油桐人工林Zn含量和杜仲人工林Cu含量最高;毛竹-杉木混交林B、Mo、Cu、Mn含量在各层土壤均最低。各元素有效性指数以Mn最高,Cu最低,排序为Mn>Zn>Fe>Mo>B>Cu;土壤微量元素有效性综合指数以荒草灌丛模式最高(12.28),毛竹-杉木混交林最低(2.95),排序为Ⅶ>Ⅴ>Ⅲ>Ⅳ>Ⅰ>Ⅱ>Ⅵ。土壤有机质含量与B、Zn有效态含量之间线性关系显著,二次多项式亦可较好地描述有机质与有效态Mn之间的关系,而有机质与Mo、Fe、Cu之间曲线回归关系不显著。土壤pH值与土壤Zn、Cu呈显著正相关,与Mn、Mo也有较好的相关性,而与B相关性较低,与Fe为弱负相关。

**关键词** 土壤微量元素 植被恢复模式 黄壤坡地 中亚热带

**文章编号** 1001-9332(2008)04-0735-06 **中图分类号** S714.6 **文献标识码** A

**Soil microelements under different vegetation restoration patterns in yellow soil slope region of mid-subtropics.** QI Liang-hua<sup>1</sup>, ZHANG Xu-dong<sup>2</sup>, PENG Zhen-hua<sup>1,2</sup>, FAN Shao-hui<sup>1</sup>, ZHOU Jin-xing<sup>2</sup> (<sup>1</sup>International Center for Bamboo and Rattan, Beijing 100102, China; <sup>2</sup>Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2008, 19(4): 735-740.

**Abstract:** With the Nuerzhai watershed in Wuling Mountain as a case, this paper studied the contents and availabilities of soil microelements and their relationships with soil organic matter and pH value in yellow soil slope region of mid-subtropics under seven typical vegetation restoration patterns, i. e., *Pinus massoniana* natural forest (Ⅰ), *Cunninghamia lanceolata* plantation (Ⅱ), *Eucommia ulmoides* plantation (Ⅲ), *Vernicia fordii* plantation (Ⅳ), *Machilus pingii* secondary forest (Ⅴ), *Phyllostachys edulis* - *C. lanceolata* mixed forest (Ⅵ), and wasteland-shrub community (Ⅶ). It was found that in 0-20 cm soil layer, the contents of B and Mn, Mo and Cu, Zn, and Fe reached the peaks under Ⅶ, Ⅳ, Ⅲ and Ⅵ; while in 20-40 cm soil layer, Ⅲ, Ⅳ, Ⅴ and Ⅶ had the highest contents of Cu, Zn, B, and Fe and Mn, Mo, respectively. In both two soil layers under Ⅵ, the contents of B, Mo, Cu and Mn were the lowest. Mn had the biggest single element available index, while Cu had the smallest one. The biggest and smallest total available index of soil microelements was 12.28 for Ⅶ and 2.95 for Ⅵ, respectively. There existed the regularities of Mn>Zn>Fe>Mo>B>Cu for single microelement available index and Ⅶ>Ⅴ>Ⅲ>Ⅳ>Ⅰ>Ⅱ>Ⅵ for comprehensive microelement available index under different vegetation patterns. A good linear relationship was observed between soil organic matter and B and Zn availabilities, and the relationship of soil organic matter with available Mn could be described by a quadratic equation. Soil pH was highly positively correlated with soil Cu and Zn contents, correlated with soil Mo and Mn contents, slightly correlated with soil B content, and slightly negatively correlated with soil Fe content.

**Key words:** soil microelement; vegetation restoration pattern; yellow soil slope region; mid-subtropics.

\* 国家“十一五”林业科技支撑项目(2006BAD03A16)和国际竹藤网络中心基本科研业务专项资助项目(06/07-B17)。

\*\* 通讯作者。E-mail: zhxd@forestry.ac.cn

2007-09-12 收稿, 2008-01-23 接受。

微量元素是酶、维生素和生长激素等的重要组成部分,对植物生长发育过程、群落动态演替与生态功能发挥具有关键作用<sup>[1-2]</sup>。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<sup>[3-4]</sup>。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、有机质等理化性质密切相关,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<sup>[2,5]</sup>。植被恢复、土壤养分及其相互关系一直为国内外生态学者所关注<sup>[6-13]</sup>,但有关植被恢复对土壤养分或土壤肥力的影响研究主要集中在对土壤有机质以及 N、P、K 等大量元素的研究上<sup>[7,12-15]</sup>,涉及土壤微量元素有效性、动态变化及影响因子的研究多针对某一特定地区或林分类型<sup>[16-19]</sup>,而对植被恢复过程中土壤微量元素效应及其变化的系统研究少见报道。

中亚热带是我国低山丘陵的集中分布区,自然因素与人为活动的叠加导致黄壤坡地水土流失严重,造成土壤养分空间分布格局变化,从而影响区域退化生态系统植被恢复与重建<sup>[20]</sup>。本文以湘西北武陵山区女儿寨小流域典型植被恢复模式为研究对象,探讨中亚热带黄壤坡地不同植被恢复模式下土壤微量元素 B、Mo、Zn、Fe、Cu、Mn 的含量变化,评价微量元素有效性,研究土壤有机质、pH 值与微量元素之间的关系,以期为坡地水土流失控制、区域人工调控与促进植被演替、加快生态恢复,以及森林植被可持续经营提供科学依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于湖南省张家界市慈利县城关镇两溪村女儿寨小流域(29°30'N, 110°10'E)。流域面积 2.81 km<sup>2</sup>,海拔 210~917.4 m。母岩以板页岩、砂岩为主,土壤主要为山地黄壤。属中亚热带山原型季风性湿润气候,雨量充沛,光热充足,年均日照 1 440 h,年均气温 16℃,年均降水量 1 400 mm,无霜期 216~269 d。自 1993 年实施以封山育林为主、人工促进天然更新的植被恢复重建工程以来,流域生态环境与土地承载力明显改善,典型植被恢复模式有马尾松(*Pinus massoniana*)天然林、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林、杜仲(*Eucommia ulmoides*)人工林、油桐(*Vernicia fordii*)人工林、润楠(*Machilus Pingii*)次生林、毛竹(*Phyllostachys edulis*)-杉木混交林及荒草灌丛等类型<sup>[21]</sup>。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 土样采集与分析** 于 2005 年 9 月 20—22 日采集土样。每一植被类型挖土壤剖面 3 个,详细记录剖面信息;分层(0~20 和 20~40 cm)混合采集土壤样品 1 kg 左右,供室内分析测定土壤有机质、pH 值及各种微量元素有效态含量。采用酸度计法测定 pH 值,重铬酸钾法测定有机质(OM),钾亚胺比色法测定有效硼(B),硫氰酸钾比色法测定有效钼(Mo),原子吸收分光光度法测定有效锌(Zn)、有效铁(Fe)、有效铜(Cu)及有效锰(Mn)<sup>[22-23]</sup>。

**1.2.2 土壤微量元素有效性评价** 参考土壤重金属污染评价标准与方法<sup>[24-25]</sup>,采用单项指数( $E_i$ )和综合指数( $E_c$ )相结合的方法,先计算各元素有效性指数,再采用均方根法计算综合有效性指数,算式为:

$$E_i = \frac{C_i}{S_i}, E_c = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n E_i^2}$$

式中: $C_i$  为土壤微量元素  $i$  含量的实测值; $S_i$  为土壤微量元素  $i$  含量的临界值<sup>[26-27]</sup>。

### 1.3 统计分析

采用 SPSS 统计分析软件进行方差分析、多重比较、曲线回归估计以及 Pearson 相关系数计算。其中,土壤有机质含量与微量元素有效态含量分析测定数据之间的曲线回归估计选取线性模型、二次多项式、三次多项式、复合模型、生长模型、双曲线、对数模型、指数模型、幂指数模型、“S”曲线以及 Logistic 方程等 11 个模型方程进行多模型拟合选优。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同植被恢复模式下土壤微量元素有效态含量

由表 1 可以看出,0~20 cm 土层中,荒草灌丛中 B、Mn 含量、油桐人工林 Mo、Cu 含量、杜仲人工林 Zn 含量和毛竹-杉木混交林 Fe 含量最高,马尾松天然林 Zn 含量和杉木人工林 Fe 含量最低;20~40 cm 土层中,润楠次生林 B、Fe、Mn 含量、荒草灌丛模式 Mo 含量、油桐人工林 Zn 含量和杜仲人工林 Cu 含量最高,杉木人工林 Zn 含量和杜仲人工林 Fe 含量最低。毛竹-杉木混交林因经营时间长,地力消耗较严重,B、Mo、Cu、Mn 含量在各层土壤均最低。经方差分析及多重比较,不同模式 0~20 cm 土层土壤 Zn、Fe、Cu、Mn 含量存在极显著差异( $P < 0.01$ ),B 含量差异显著( $P < 0.1$ ),而 Mo 含量差异不显著( $P > 0.1$ )。20~40 cm 土层土壤 Mo、Fe、Cu、Mn 含量存

表 1 不同植被恢复模式下土壤有效微量元素含量、方差分析及多重比较

Tab.1 Contents ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), ANOVA and ANOVA-LSD of soil available microelements under different vegetation restoration patterns

| 模式<br>Pattern | 0~20 cm 土层 Soil layer of 0 to 20 cm |        |            |           |           |            | 20~40 cm 土层 Soil layer of 20 to 40 cm |           |           |             |            |           |
|---------------|-------------------------------------|--------|------------|-----------|-----------|------------|---------------------------------------|-----------|-----------|-------------|------------|-----------|
|               | B                                   | Mo     | Zn         | Fe        | Cu        | Mn         | B                                     | Mo        | Zn        | Fe          | Cu         | Mn        |
| I             | 0.43aA                              | 0.09aA | 5.43aA     | 23.55aA   | 0.89aA    | 172.88aA   | 0.34aA                                | 0.03aA    | 7.97aA    | 28.05aA     | 0.70aA     | 4.43aA    |
| II            | 0.40aA                              | 0.06aA | 14.12abA   | 13.58bB   | 0.85abAB  | 100.20bB   | 0.33abAB                              | 0.04bB    | 5.43abAB  | 22.37abAB   | 1.23abAB   | 55.07bAB  |
| III           | 0.39aAB                             | 0.37aA | 15.45abA   | 20.75bB   | 0.98bcBC  | 195.93bBC  | 0.29abAB                              | 0.12cC    | 5.75bcAB  | 17.28abcAB  | 1.40abABC  | 144.11cBC |
| IV            | 0.38aAB                             | 0.42aA | 13.02abAB  | 19.23bBC  | 1.40cdBC  | 165.00bcBC | 0.31abcAB                             | 0.09dD    | 11.87bcAB | 31.05abcABC | 1.07abcABC | 158.17dC  |
| V             | 0.43abAB                            | 0.07aA | 12.50bcABC | 18.33bcBC | 0.75cdBC  | 183.80cC   | 0.36bcAB                              | 0.06eDE   | 8.80bcB   | 34.90bcdABC | 1.00bcABC  | 191.33eD  |
| VI            | 0.33abAB                            | 0.03aA | 6.20cdBC   | 28.92bcBC | 0.63cdC   | 4.00dD     | 0.26bcAB                              | 0.02fEF   | 6.12bcB   | 24.03cdBC   | 0.55cdBC   | 2.27fE    |
| VII           | 0.44bB                              | 0.13aA | 10.23dC    | 21.73cC   | 1.23dC    | 233.32eE   | 0.30cB                                | 0.14fF    | 7.53cB    | 30.28dC     | 0.96dC     | 171.07fE  |
| F             | 2.4760                              | 0.9420 | 6.0530     | 8.5320    | 9.1860    | 134.7480   | 2.8410                                | 139.7360  | 4.5730    | 4.5660      | 5.1530     | 259.1270  |
| P             | 0.0761 *                            | 0.4966 | 0.0027 **  | 0.0005 ** | 0.0003 ** | 0.0001 **  | 0.0504 *                              | 0.0001 ** | 0.0090    | 0.0091 **   | 0.0055 **  | 0.0001 ** |

I: 马尾松天然林 *P. massoniana* natural forest; II: 杉木人工林 *C. lanceolata* plantation; III: 杜仲人工林 *E. ulmoides* plantation; IV: 油桐人工林 *V. fordii* plantation; V: 润楠次生林 *M. Pingii* secondary forest; VI: 毛竹-杉木混交林 *P. edulis* - *C. lanceolata* mixed forest; VII: 荒草灌丛 Wasteland-shrub. 不同大、小写字母分别表示差异达 0.1 和 0.05 显著水平 Different small and capital letters meant significant difference at 0.05 and 0.1 level, respectively. \*  $P < 0.1$ ; \*\*  $P < 0.01$ . 下同 The same below.

在极显著差异 ( $P < 0.01$ ), B 含量存在显著差异 ( $P < 0.1$ ), 仅 Zn 含量差异不显著 ( $P > 0.1$ ). 7 种植被恢复模式的 0~20 cm 土层土壤有效微量元素含量总体高于 20~40 cm 土层. 这主要是由于林下枯枝落叶物的分解, 养分的释放与回归补充了土壤有效微量元素, 同时也反映下层土壤淋溶淀积作用较弱.

## 2.2 不同植被恢复模式下土壤微量元素有效性

不同植被恢复模式 0~40 cm 土层土壤微量元素有效态含量平均值及全国土壤缺素的临界值含量统计于表 2. 根据土壤微量元素有效性评价计算公

表 2 土壤微量元素有效态含量平均值与临界值

Tab.2 Average values and critical values of soil available microelements ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

| 模式<br>Pattern | B    | Mo   | Zn    | Fe    | Cu   | Mn     |
|---------------|------|------|-------|-------|------|--------|
| I             | 0.39 | 0.06 | 6.70  | 25.80 | 0.80 | 88.66  |
| II            | 0.37 | 0.05 | 9.78  | 17.98 | 1.04 | 77.64  |
| III           | 0.34 | 0.25 | 10.60 | 19.02 | 1.19 | 170.02 |
| IV            | 0.35 | 0.26 | 12.45 | 25.14 | 1.24 | 161.59 |
| V             | 0.40 | 0.07 | 10.65 | 26.62 | 0.88 | 187.57 |
| VI            | 0.30 | 0.03 | 6.16  | 26.48 | 0.59 | 3.14   |
| VII           | 0.37 | 0.14 | 8.88  | 26.01 | 1.10 | 202.20 |
| $S_i$         | 0.50 | 0.15 | 1.50  | 4.50  | 2.00 | 7.00   |

$S_i$ : 土壤微量元素  $i$  含量的临界值 The critical value of soil microelement  $i$ .

表 3 土壤微量元素有效性指数

Tab.3 Available indices ( $E_i$ ) for soil microelements

| 模式<br>Pattern | $E_i$ |      |      |      |      |       | $E_i$ |
|---------------|-------|------|------|------|------|-------|-------|
|               | B     | Mo   | Zn   | Fe   | Cu   | Mn    |       |
| I             | 0.78  | 0.40 | 4.47 | 5.73 | 0.40 | 12.67 | 5.97  |
| II            | 0.74  | 0.33 | 6.52 | 4.00 | 0.52 | 11.09 | 5.51  |
| III           | 0.68  | 1.67 | 7.07 | 4.23 | 0.60 | 24.29 | 10.50 |
| IV            | 0.70  | 1.73 | 8.30 | 5.59 | 0.62 | 23.08 | 10.30 |
| V             | 0.80  | 0.47 | 7.10 | 5.92 | 0.44 | 26.80 | 11.58 |
| VI            | 0.60  | 0.20 | 4.11 | 5.88 | 0.30 | 0.45  | 2.95  |
| VII           | 0.74  | 0.93 | 5.92 | 5.78 | 0.55 | 28.89 | 12.28 |

式, 得到 6 种元素的有效性指数 ( $E_i$ ) 及各植被恢复模式下土壤微量元素有效性综合指数 ( $E_c$ ), 结果见表 3.

不同微量元素之间有效性差异明显, 大小顺序为  $\text{Mn} > \text{Zn} > \text{Fe} > \text{Mo} > \text{B} > \text{Cu}$ , 其中, Mn 有效性指数最高, 达 28.89, B、Cu 有效态含量均低于临界值, 有效性指数均  $< 1$ , 表明该区域这两种微量元素有效含量非常缺乏; Mo 有效态含量及有效性也较低, 仅杜仲人工林与油桐人工林因采取施肥经营措施而高于临界值. 这说明马尾松天然林、杉木人工林、润楠次生林、荒草灌丛缺乏 B、Mo、Cu, 杜仲人工林、油桐人工林缺乏 B、Cu, 杉木-毛竹混交林缺乏 B、Mo、Cu、Mn. 土壤微量元素有效性综合指数以荒草灌丛模式最高 (12.28), 杉木毛竹混交林最低 (2.95), 杜仲人工林、油桐人工林及润楠次生林模式相近, 在 10.30~11.58 之间, 马尾松天然林与杉木人工林相近, 分别为 5.97、5.51. 不同植被恢复模式的排序为: VII  $>$  V  $>$  III  $>$  IV  $>$  I  $>$  II  $>$  VI.

## 2.3 有机质和 pH 值对土壤微量元素有效性的影响

**2.3.1 有机质** 由图 1 可以看出, 不同植被恢复模式的土壤有机质含量在  $5.88 \sim 35.23 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 0~20 cm 土层有机质含量明显高于 20~40 cm 土层, 表明土壤有机质分布表聚效应明显. 0~20 cm 土层有机质含量高低顺序依次为: V  $>$  VI  $>$  III  $>$  IV  $>$  I  $>$  VII  $>$  II; 20~40 cm 土层为: VI  $>$  V  $>$  IV  $>$  II  $>$  I  $>$  III  $>$  VII.

由表 4 可以看出, 有机质与 B、Zn 之间分别达到极显著 ( $P = 0.004$ ) 和显著相关 ( $P = 0.098$ ), Be、Zn 含量随有机质的增加而增加; 有机质与有效态

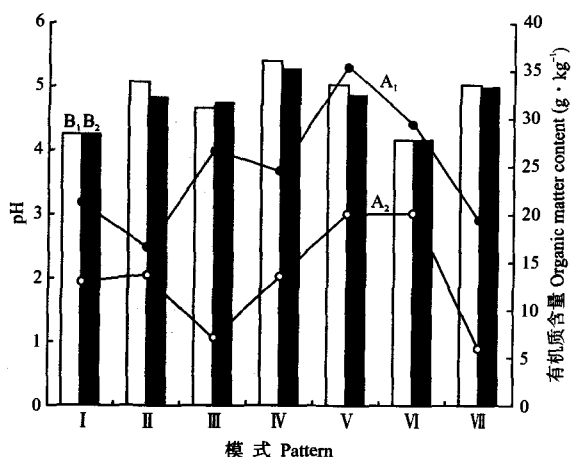


图1 不同植被恢复模式下土壤有机质含量(A)和pH值(B)

Fig. 1 Soil organic matters (A) and pH values (B) under different vegetation restoration patterns.

1) 0~20 cm; 2) 20~40 cm.

表4 土壤有机质(x)与微量元素(y)回归估计

Tab. 4 Regressive estimation of soil organic matter (x) and microelements (y)

| 回归模型<br>Regressive model                 | $R^2$ | F 检验 F-test |      |       |
|------------------------------------------|-------|-------------|------|-------|
|                                          |       | df          | F    | P     |
| $y_B = 0.3091 + 0.0023x$                 | 0.791 | 40          | 9.44 | 0.004 |
| $y_{Mo} = e^{-2.8016 + 2.3894/W}$        | 0.026 | 40          | 1.08 | 0.304 |
| $y_{Zn} = 7.5726 + 0.0855x$              | 0.667 | 40          | 2.87 | 0.098 |
| $y_{Fe} = 26.0023 - 0.1051x$             | 0.034 | 40          | 1.43 | 0.239 |
| $y_{Cu} = 1.2712 - 0.0278x + 0.0005x^2$  | 0.101 | 39          | 2.18 | 0.127 |
| $y_{Mn} = 148.385 - 3.9274x + 0.1065x^2$ | 0.677 | 39          | 2.59 | 0.088 |

Mn 的回归关系可用二次多项式描述,并且具有统计学意义( $P=0.088$ );而有机质与 Mo、Fe、Cu 之间没有较好的曲线回归关系。

**2.3.2 pH 值** 由图1可以看出,不同植被恢复模式的0~20 cm 层土壤pH值在4.17~5.37区间,20~40 cm 土层在4.13~5.27之间变化。其土壤pH值大小排序为:IV(5.32) > VII(5.00) > II、V(4.93) > III(4.68) > I(4.23) > VI(4.15)。20~40 cm 土层为植物根系集中分布区,根际周围的有机酸较多,故土壤pH值略低于0~20 cm 土层,但方差分析结果表明两者差异不显著( $P>0.1$ )。

由表5可以看出,pH值与土壤Zn、Cu呈显著正相关,与Mn和Mo也有较好的相关性。这主要是由于pH值的降低促进了Zn、Cu、Mn、Mo等微量元素化合物溶解度的增加,从而提高其有效含量。而土壤中B的主要来源是电气石、硬硼钙石等含硼矿物<sup>[28]</sup>,受pH值影响较小,故相关性也较低。随着pH

表5 土壤pH值与土壤有效微量元素的Pearson相关系数  
Tab. 5 Pearson coefficients of soil pH values and available microelements

| 因子<br>Factor | pH      | B      | Mo      | Zn      | Fe     | Cu    | Mn    |
|--------------|---------|--------|---------|---------|--------|-------|-------|
| pH           | 1.000   |        |         |         |        |       |       |
| B            | 0.324   | 1.000  |         |         |        |       |       |
| Mo           | 0.564   | -0.149 | 1.000   |         |        |       |       |
| Zn           | 0.898 * | 0.236  | 0.719   | 1.000   |        |       |       |
| Fe           | -0.165  | 0.078  | -0.226  | 0.310   | 1.000  |       |       |
| Cu           | 0.815 * | 0.192  | 0.838 * | 0.836 * | -0.469 | 1.000 |       |
| Mn           | 0.712   | 0.529  | 0.614   | 0.693   | 0.035  | 0.724 | 1.000 |

\*  $P < 0.05$ .

值升高,土壤中可溶态铁减少,不溶性的氢氧化铁增加,故表现出土壤pH值与有效铁呈弱负相关关系。此外,Cu与Mo、Zn之间也达到显著相关水平,与它们对土壤pH值的响应结果相吻合。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 不同植被恢复模式对土壤微量元素有效态含量的影响

在0~20 cm 土层,荒草灌丛模式B、Mn含量,油桐人工林Mo、Cu含量,杜仲人工林Zn含量和毛竹-杉木混交林Fe含量最高。20~40 cm 土层中,润楠次生林B、Fe、Mn含量,荒草灌丛模式Mo含量,油桐人工林Zn含量和杜仲人工林Cu含量最高;毛竹-杉木混交林B、Mo、Cu、Mn含量在各层土壤均最低。说明女儿寨小流域黄壤坡地不同植被恢复模式0~20 cm 土层土壤有效微量元素含量总体高于20~40 cm 土层,主要是由于林下枯落物的分解、养分释放与回归的作用。

#### 3.2 不同植被恢复模式对土壤微量元素有效性的影响

不同植被恢复模式下土壤中各元素有效性指数排序为:Mn > Zn > Fe > Mo > B > Cu。Mn是土壤中含量最高的微量元素,其有效性指数也最高,表明不同模式可供植物吸收利用的水溶态、交换态的二价锰和易还原的三价锰等活性锰含量极为丰富。土壤中所有的有机物及生物残体均含有Zn,且有机物分解过程中会产生酸性物质,使锌化合物溶解度增加。不同植被恢复模式的土壤均为酸性土壤,可溶态Fe的存在能够满足植物生长发育的需求<sup>[29]</sup>,因而Fe有效性指数也较高。由于亚热带地区降雨量大,7种模式所处坡度陡,受雨水冲刷、淋失及有机络合等因素的影响,B、Cu有效性指数很低,表明该区域这两种微量元素有效含量非常缺乏。黄土母质发育的土壤

一般含 Mo 较低,且对植物的有效性不足 10%,加之 Mo 在酸性土壤条件下易产生沉淀<sup>[30]</sup>,故其有效性也较低。不同植被恢复模式的土壤微量元素有效性综合指数排序为:Ⅶ>Ⅴ>Ⅲ>Ⅳ>Ⅰ>Ⅱ>Ⅵ,其中荒草灌丛模式最高,而杉木-毛竹林最低。这可能是由于荒草灌丛养分消耗少,杉木-毛竹混交林因经营强度大,地力衰退严重所致。

### 3.3 有机质、pH 值对土壤微量元素有效性的影响

有机质与有效态 B、Zn 之间线性关系显著。这主要是由于土壤有效态 B、Zn 的 60%~80% 来自于土壤有机质的分解<sup>[30]</sup>,与有效态 Mn 的回归关系可用二次多项式描述。而风化、淋溶、淀积、生物富集、有机络合等过程的共同作用,导致 Mo、Fe、Cu 在土壤中含量与分布格局的不确定性,与有机质的回归关系还有待于深入研究。

pH 值影响土壤微量元素的存在形态和转化速率<sup>[31]</sup>。本研究中,pH 值与 Zn(0.898)、Cu(0.815)呈显著正相关,与 Mn(0.712)、Mo(0.564)也有较好的相关性,而与 B 相关性较低(0.324),与 Fe 为弱负相关(-0.165)。此外,Cu 与 Mo、Zn 之间的相关性也达到显著水平。

### 参考文献

- [1] Julie EK, Nancy CJ, Covington WW. Slash pile burning effects on soil biotic and chemical properties and plant establishment: Recommendations for amelioration. *Restoration Ecology*, 2004, **12**(1): 52-62
- [2] Lu J-L (陆继龙), Zhou Y-C (周永昶), Zhou Y-X (周云轩). Environmental geochemical characteristics of some microelements in the black soil of Jilin Province. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2002, **33**(5): 365-368 (in Chinese)
- [3] Smith RS, Shiel RS, Bardgett RD, et al. Soil microbial community, fertility, vegetation and diversity as targets in the restoration management of a meadow grassland. *Journal of Applied Ecology*, 2003, **40**(1): 51-64
- [4] Tao S (陶澍), Cao J (曹军), Li B-G (李本纲), et al. Distribution pattern of trace elements in soil from Shenzhen area. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2001, **38**(2): 248-255 (in Chinese)
- [5] Qi L-H (漆良华), Zhang X-D (张旭东), Sun Q-X (孙启祥), et al. Soil vegetation system and its influences on the soil health. *World Forestry Research* (世界林业研究), 2007, **20**(3): 1-8 (in Chinese)
- [6] An S-S (安韶山), Liu M-Y (刘梦云), Li B-C (李壁成), et al. Effect of different vegetation restoration on soil nutrient changes in Southern Ningxia mountain region. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica* (西北植物学报), 2003, **23**(8): 1429-1432 (in Chinese)
- [7] A S-Z (阿守珍), Bu Y-J (卜耀军), Wen Z-M (温仲明), et al. Research on effect of different types of vegetation on nutrient changes in Loess hilly region—Taking Zhifanggou watershed in Ansai as an example. *Journal of Northwest Forestry University* (西北林学院学报), 2006, **21**(6): 58-62 (in Chinese)
- [8] Gong J (巩杰), Chen L-D (陈利顶), Fu B-J (傅伯杰), et al. Effects of vegetation restoration on soil nutrient in a small catchment in hilly loess area. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2005, **19**(1): 93-96 (in Chinese)
- [9] Jiang P-K (姜培坤), Zhou G-M (周国模), Qian X-B (钱新标). Changes in soil nutrients and physical properties under erosion red soil by vegetation recovery. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2004, **18**(1): 12-14 (in Chinese)
- [10] Lu D, Moran E, Mausel P. Linking Amazon secondary succession forest growth to soil properties. *Land Degradation & Development*, 2002, **13**: 331-343
- [11] Patricia M. Holmes shrubland restoration following woody alien invasion and mining: Effects of topsoil depth, seed source, and fertilizer addition. *Restoration Ecology*, 2000, **9**(1): 71-84
- [12] Potthoff M, Jackson LE. Soil biological and chemical properties in restored perennial grassland in California. *Restoration Ecology*, 2005, **13**(1): 61-73
- [13] Wen Z-M (温仲明), Jiao F (焦峰), Liu B-Y (刘宝元), et al. Natural vegetation restoration and soil nutrient dynamics of abandoned farmlands in forest-steppe zone on Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(11): 2025-2029 (in Chinese)
- [14] Lessandra Z, Gislene G. Restoration of araucaria forest: The role of perches, pioneer vegetation, and soil fertility. *Restoration Ecology*, 2005, **13**(3): 507-514
- [15] Mitchell RJ, Marrs RH, Leduc MG, et al. A study of the restoration of heathland on successional sites: Changes in vegetation and soil chemical properties. *Journal of Applied Ecology*, 1999, **36**(5): 770-783
- [16] Liao J-F (廖金凤). The contents and geographic distributions of trace elements in zonal soils of Hainan Province. *Areal Research and Development* (地域研究与开发), 2003, **22**(6): 66-69 (in Chinese)
- [17] Ma Y (马媛), Shi Q-D (师庆东), Yang J-J (杨建军), et al. Spatial variability of characters of soil trace elements in a watershed of arid area. *Arid Land Geography* (干旱区地理), 2006, **29**(5): 682-687 (in Chinese)

- [18] Yin X-Q (殷秀琴), Li J-X (李金霞), Dong W-H (董炜华). Microelement contents of litter, soil fauna and soil in *Pinus koraiensis* and broad-leaved mixed forest. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(2): 35-37 (in Chinese)
- [19] Yu Y-C (俞元春), Zeng S-C (曾曙才), Zhang H-C (张焕朝), et al. Contents and dynamics of microelements in soils under main forest stands in the hilly regions of southern Jiangsu Province. *Journal of Central South Forestry University* (中南林学院学报), 1998, **18**(1): 20-26 (in Chinese)
- [20] Qi L-H (漆良华), Peng Z-H (彭镇华), Zhang X-D (张旭东), et al. Species diversity and biomass allocation of vegetation restoration communities on degraded lands. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2007, **26**(11): 1697-1702 (in Chinese)
- [21] Qi L-H (漆良华), Zhang X-D (张旭东), Zhou J-X (周金星), et al. Soil water holding capacities and infiltration characteristics of typical vegetation restoration communities in watershed, northwest Hunan. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2007, **43**(4): 1-8 (in Chinese)
- [22] State Forestry Administration (国家林业局). Forestry Profession Standard of the People's Republic of China: A Handbook of Analysis Methods for Forest Soils. Beijing: State Forestry Administration, 1999 (in Chinese)
- [23] Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences (中国科学院南京土壤研究所). A handbook to the Analysis for Soil Physical and Chemical Properties. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978 (in Chinese)
- [24] Jian M-F (简敏菲), Gong X-F (弓晓峰), You H (游海), et al. Assessment of pollution of heavy metals in water sediments and aquatic plants in Poyang Lake basins. *Resources and Environment in the Yangtze Basin* (长江流域资源与环境), 2004, **13**(6): 589-593 (in Chinese)
- [25] Zhang X-F (张孝飞), Lin Y-S (林玉锁), Yu F (俞飞), et al. Pollution of heavy metals in urban soils of typical industrial and surrounding residential area in Nanjing City. *Resources and Environment in the Yangtze Basin* (长江流域资源与环境), 2005, **14**(4): 512-515 (in Chinese)
- [26] Hong S (洪松), Zhen Z-H (郑泽厚), Chen J-C (陈俊生). Environmental geochemical characteristics of some microelements in the yellow brown soil of Hubei Province. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2001, **38**(1): 89-95 (in Chinese)
- [27] Zhang Y-E (张永娥), Wang R-L (王瑞良), Jin S-J (靳绍菊). Research on the content of soil micronutrients and affecting factors. *Soil Fertilizers* (土壤肥料), 2005(5): 35-37 (in Chinese)
- [28] Zhao S-P (赵淑苹), Chen L-X (陈立新), Bao X-L (包雪丽). Availability of soil microelements in larch plantation. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), 2005, **33**(3): 26-28 (in Chinese)
- [29] Shenker M, Chen Y. Increasing iron availability to crops: Fertilizers, organo-fertilizers, and biological approaches. *Soil Science & Plant Nutrition*, 2005, **51**(1): 1-17
- [30] Wang D-X (王德宣), Fu D-Y (富德义). Availability evaluation of soil microelements in western Jilin Province. *Soils* (土壤), 2002(2): 86-93 (in Chinese)
- [31] Tyler G, Olsson T. Concentrations of 60 elements in the soil solution as related to the soil acidity. *European Journal of Soil Science*, 2001, **52**(1): 151-165

作者简介 漆良华,男,1976年生,博士,助理研究员.主要从事植被恢复与林业生态工程研究,发表论文20余篇. E-mail: qilianghua2008@yahoo.com.cn

责任编辑 李凤琴