

# 桂林毛村不同地质背景主要元素迁移特征 及与植物蒸腾作用的相关性<sup>①</sup>

李 为<sup>1</sup>, 刘 彦<sup>1</sup>, 吴 耿<sup>1</sup>, 项 俊<sup>1,2</sup>, 栗茂腾<sup>1</sup>, 余龙江<sup>1\*</sup>

(1 华中科技大学生命科学与技术学院资源生物学与生物技术研究所, 武汉 430074;

2 黄冈师范学院生命科学与工程学院, 湖北黄冈 438000)

**摘 要:** 对桂林毛村不同地质背景(石灰岩、白云岩和砂页岩)土壤中 Ca、Mg、Cu、Fe、Mn、Zn 等主要元素的迁移特征进行了研究, 结果表明母岩的地球化学背景对岩溶土壤系统的元素迁移具有重要影响。同时, 以不同地质背景生长的典型植物黄荆为例, 研究了上述元素的迁聚与植物蒸腾作用的相关性。结果表明, 植物蒸腾作用对土壤中 Ca、Mg、Cu、Fe、Mn、Zn 等主要元素迁聚的影响程度因不同地质背景以及不同元素而有明显差异。植物蒸腾作用对 Mn、Cu 等较难迁移元素的迁移具有一定促进作用。土壤中 Cu、Fe、Mn、Zn 等微量元素的迁聚对植物吸收系数的影响程度因不同地质背景而有显著差异。岩溶山区进行植被恢复时必须考虑不同地质背景的差异, 因地制宜地选择合适的植物品种。

**关键词:** 元素迁移; 蒸腾作用; 不同地质背景; 黄荆; 石灰岩; 白云岩

**中图分类号:** Q945.12

岩溶动力系统中的 CO<sub>2</sub>-水-Ca 循环引起的岩溶作用驱动了岩溶环境元素的迁移, 并制约元素迁移的质和量<sup>[1]</sup>, 同时影响植物所需要的矿质营养元素的全量和有效态, 进而影响岩溶区的植物物种、特性和作物的发育<sup>[2]</sup>。20 世纪 80 年代以前, 土壤学家对石灰土环境矿质营养元素的状态变化进行过详细的研究<sup>[3]</sup>。80 年代以后, 对比土壤和岩石, 开始对一些岩溶区土壤成土过程中的元素迁移系数和规律进行研究, 通过土壤元素的分布和组合关系对岩溶土壤地球化学过程及形成环境进行了探讨<sup>[4-9]</sup>。还有一些研究者结合环境元素状况, 研究某些植物或作物与岩溶地质环境的关系<sup>[10-12]</sup>, 对岩溶贫困山区的农业发展具有指导意义。上述研究都是从地球化学角度来研究元素迁移, 着重于元素本身在环境中的迁移和分异规律, 较少考虑生物的影响。植物对岩溶发育的强大驱动力已被人们所认识<sup>[13-14]</sup>, 岩溶区植物不但能够在土壤环境生长, 而且能够直接生长在裸露岩石上, 形成植物的岩生性。水分是植物生长的重要生态因子, 植物通过蒸腾作用, 不但可以加强水分的吸收, 还可以增加矿质营养元素的吸收和上运<sup>[15-16]</sup>, 故蒸腾作用对岩溶生态系统中的元素迁移会产生影响, 但这方面的研究目前鲜见报道。

李为等<sup>[17]</sup>研究了桂林岩溶试验场石灰岩区不同地貌部位(垭口、坡地、洼地)土壤中主要元素的迁移特征及与优势植物黄荆蒸腾作用的相关性, 在此基础上, 本文研究了桂林毛村不同地质背景(石灰岩、白云岩和砂页岩)土壤中 Ca、Mg、Cu、Fe、Mn、Zn 等主要元素的迁移特征, 并以研究区的典型植物黄荆为例, 分析了主要元素迁移与植物蒸腾作用的相关性, 为深入研究岩溶生态系统元素迁移的规律及其影响因素提供一定的理论依据, 并为岩溶石山地区生态恢复重建中植物的选择与栽种以及岩溶石漠化治理提供一定的科学依据。

## 1 研究区概况

桂林毛村位于桂林市东南约 30 km 的灵川县潮田乡, 为典型的峰丛洼地和峰丛谷地的代表<sup>[12]</sup>, 属于亚热带湿润季风气候区, 受季风活动影响降雨年内分配不均, 夏季湿热多雨, 秋季干旱少雨。雨季一般为每年的 3—8 月, 旱季一般为 9 月至次年 2 月。多年平均降雨量为 1915.2 mm, 多年平均水面蒸发量为 1378.3 mm, 年平均气温为 18℃。

选择毛村 3 个不同地质背景的地点进行比较研

<sup>①</sup>基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(40302034)资助。

\* 通讯作者(yulongjiang@hust.edu.cn)

作者简介: 李为(1969—), 女, 湖南邵东人, 博士, 副教授, 主要从事资源生物技术、地质生态的研究。E-mail: hulwei\_009@163.com

究，分别是代表石灰岩区的毛村口、代表白云岩区的掌山底和代表砂页岩区的师簏。石灰岩区主要由泥盆系融县组石灰岩组成，白云岩区主要由东岗岭组白云岩（夹杂少量石灰岩）组成，砂页岩区主要是由含铁砂页岩组成。3 种基岩中部分元素的含量如表 1 所示<sup>[12]</sup>。不同基岩发育的土壤也不同，石灰岩和白云岩

发育的土壤属棕色石灰土，土壤 pH 为中性偏碱；砂页岩发育的土壤是地带性红壤。3 个地点的植被都保存得较好，石灰土上覆植被为以青冈为主的林地和以黄荆、欒木占优势的灌木林；红壤是以栲树林为主的林地，也有较为集中生长的黄荆等灌木分布。

表 1 毛村 3 种基岩中部分元素的含量<sup>[12]</sup>  
Table 1 Contents of some elements in three kinds of parentrocks in Maocun

| 岩石  | 大量元素含量 (g/kg) |      | 微量元素含量 (mg/kg) |        |        |      |
|-----|---------------|------|----------------|--------|--------|------|
|     | Ca            | Mg   | Zn             | Mn     | Cu     | Fe   |
| 石灰岩 | 184.6         | 28.3 | 1012.50        | 116.25 | 34.50  | 1.33 |
| 白云岩 | 99.8          | 79.6 | 1422.50        | 152.75 | 35.25  | 4.40 |
| 砂页岩 | 3.9           | 3.8  | 89500.00       | 63.25  | 530.00 | 7.33 |

2 研究方法

2.1 植物蒸腾作用的测定

分别在春季（5 月）、夏季（7 月）和秋季（10 月），选取晴朗无风的天气，在毛村口石灰岩区、掌山底白云岩区和师簏砂页岩区 3 个具有不同地质背景的地点，分别选取集中生长、长势较好、周围植物影响小的 3 株黄荆作为标准株，在标准株的树冠中部向阳处各选取 2 片功能叶片作为标准叶片，采用英国产 TPS-1 光合作用测定仪测定黄荆叶片的日蒸腾速率变化，求取日平均蒸腾速率。

2.2 土壤样品采集和方析方法

在测定毛村不同地质背景的 3 个地点的黄荆蒸腾速率日变化的同时，在黄荆标准株的根部附近选取 3 个采样点，用土钻采集自土层腐殖质表面以下至基岩以上的土样，每 10 cm 取样 1 次，将 3 个采样点相同层次的土样混合均匀，进行自然风干，之后研磨过 0.149 mm 的筛备用。采用 PERKIN ELMER 公司的 A-Analyst 300 原子吸收光谱仪测定样品中的 Ca、Mg、Cu、Fe、Mn、Zn 等元素的全态含量，以及 Cu、Fe、Mn、Zn 等元素的有效态含量。测定全态含量的样品处理过程采用微波消解法，测定有效态含量的样品处理过程采用 AB-DTPA 浸提法（石灰土）和盐酸浸提法（红壤）<sup>[18]</sup>。

2.3 植物样品采集和方析方法

在不同地质背景的 3 个地点采集黄荆标准株的叶片，低温烘干备用。采用原子吸收光谱法测定样品中的 Ca、Mg、Cu、Fe、Mn、Zn 等元素的全量，样品处理过程采用微波消解法。

2.4 元素迁移与植物蒸腾作用的相关性分析

元素的迁移和聚积强度可用淋溶值和聚积值表示，按下式计算<sup>[11]</sup>：

$$P = (b-a)/a$$

式中，*P* 为聚积或淋溶值（负值表示淋溶），*b* 为表土层中元素含量，*a* 为母岩中元素含量。计算毛村不同地质背景土层中各种元素的淋溶值或聚积值，采用 SPSS 软件分析其与植物日平均蒸腾速率的相关性，相关系数用绝对值表示。

3 结果与讨论

3.1 不同地质背景土壤几种主要元素的迁移特征

蒋忠诚<sup>[1,6]</sup>在研究广西弄拉岩溶环境的元素迁移时发现，岩石的地球化学背景对岩溶动力系统的元素迁移具有重要影响，由于石灰岩（CaCO<sub>3</sub>）和白云岩（CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>）在化学成分上的差异，决定了石灰岩的元素迁移以 Ca 为主，而白云岩的元素迁移以 Ca、Mg 为主，从而造成不同碳酸盐岩的元素迁移存在较大差异。本文研究比较了桂林毛村不同地质背景土壤中 Ca、Mg、Cu、Fe、Mn、Zn 等主要元素的迁移特征，结果亦表明不同母岩发育的土壤中的元素迁移存在较大差异（表 2）。在毛村石灰岩和白云岩发育的土壤剖面中，各层次全态 Ca 和 Mg 在春、夏和秋季均表现为淋溶迁移，且 Ca 的迁移一般都大于 Mg；全态 Cu、Fe、Mn 则都表现为聚积，聚积次序分别为 Fe>Mn>Cu（石灰岩）和 Mn>Fe>Cu（白云岩）。石灰岩土壤的全态 Zn 在春秋表现为聚积，在夏季则出现淋溶迁移。而白云岩土壤的全态 Zn 在春、夏和秋季均表现为淋溶迁移，迁移次序排在 Mg 的后面。砂页岩土壤剖

面元素迁移和聚积情况与石灰岩和白云岩有显著差异,全态 Ca、Fe 和 Zn 在春、夏和秋季均表现为淋溶迁移,迁移次序一般是  $\text{Ca}>\text{Fe}>\text{Zn}$ ;全态 Cu 和 Mn 都表现为聚积,聚积次序为  $\text{Cu}>\text{Mn}$ ;全态 Mg 表现淋溶迁移或聚积的情况因季节和土壤深度而有所不同,一般在夏季聚积、秋季淋溶迁移,春季则一般在表层聚积、深层发生淋溶迁移。比较不同地质背景 0~30 cm

土壤元素的平均迁聚强度可见,Ca 的迁移次序为石灰岩>砂页岩>白云岩;Mg 的迁聚次序为白云岩>石灰岩>砂页岩;Cu 和 Mn 的聚积次序为石灰岩>白云岩>砂页岩;Fe 在砂页岩土壤迁移,在石灰岩和白云岩土壤聚积,聚积次序为石灰岩>白云岩;而 Zn 在石灰岩土壤聚积,在白云岩和砂页岩土壤淋溶迁移,迁移次序为砂页岩>白云岩。

表 2 毛村不同地质背景土壤剖面主要全态元素的淋溶和聚积值

Table 2 Leaching and accumulating values of main total elements in soil profiles under different geological backgrounds in Maocun

| 元素 | 土层<br>(cm) | 石灰岩     |         |         | 白云岩     |         |         | 砂页岩     |         |         |
|----|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|    |            | 春季      | 夏季      | 秋季      | 春季      | 夏季      | 秋季      | 春季      | 夏季      | 秋季      |
| Ca | 0~20       | -0.9783 | -0.9779 | -0.9760 | -0.9677 | -0.9605 | -0.9545 | -0.9644 | -0.9744 | -0.9745 |
|    | 20~50      | -0.9838 | -0.9800 | -0.9776 | -0.9685 | -0.9611 | -0.9761 | -0.9532 | -0.9607 | -0.9687 |
|    | 平均 (0~30)  | -0.9801 | -0.9786 | -0.9765 | -0.9654 | -0.9603 | -0.9600 | -0.9635 | -0.9718 | -0.9721 |
| Mg | 0~20       | -0.6228 | -0.5362 | -0.7467 | -0.8485 | -0.8354 | -0.8684 | 0.0009  | 0.1316  | -0.0457 |
|    | 20~50      | -0.6501 | -0.4417 | -0.7603 | -0.8372 | -0.8193 | -0.8566 | -0.0160 | 0.1480  | -0.5219 |
|    | 平均 (0~30)  | -0.6319 | -0.5047 | -0.7513 | -0.8448 | -0.8308 | -0.8660 | 0.0136  | 0.1557  | -0.1688 |
| Cu | 0~20       | 24.1992 | 37.2519 | 20.3131 | 5.4676  | 3.6136  | 6.6206  | 5.2325  | 5.3643  | 5.1333  |
|    | 20~50      | 39.8758 | 39.1880 | 9.8111  | 6.5641  | 6.2500  | 5.7725  | 5.0100  | 4.4979  | 5.8961  |
|    | 平均 (0~30)  | 28.4293 | 37.8972 | 20.4161 | 4.9463  | 4.5076  | 6.6446  | 5.1711  | 5.0596  | 5.3854  |
| Fe | 0~20       | 50.6819 | 47.1235 | 45.3704 | 27.4139 | 34.5536 | 31.2144 | -0.5162 | -0.7084 | -0.3972 |
|    | 20~50      | 49.0086 | 55.6420 | 50.1111 | 30.2708 | 33.6339 | 33.9736 | -0.6397 | -0.2981 | -0.3006 |
|    | 平均 (0~30)  | 46.1317 | 49.9630 | 46.9506 | 31.4945 | 33.0363 | 33.2472 | -0.5842 | -0.6417 | -0.3650 |
| Mn | 0~20       | 42.1930 | 48.3478 | 37.9130 | 38.8424 | 41.3404 | 40.7731 | 0.6949  | 0.4622  | 0.7028  |
|    | 20~50      | 46.4075 | 42.7681 | 39.6377 | 40.4271 | 38.7636 | 36.9858 | 0.7476  | 0.8050  | 0.8340  |
|    | 平均 (0~30)  | 43.5978 | 46.4879 | 38.4879 | 39.2476 | 40.6076 | 40.1158 | 0.6945  | 0.5912  | 0.7465  |
| Zn | 0~20       | 0.2331  | 0.02581 | 0.2857  | -0.1222 | -0.2998 | -0.1927 | -0.2001 | -0.3597 | -0.2648 |
|    | 20~50      | 0.2710  | -0.0968 | 0.1433  | -0.0520 | -0.2329 | -0.1236 | -0.3362 | -0.2727 | -0.1660 |
|    | 平均 (0~30)  | 0.2586  | -0.0194 | 0.3025  | -0.1310 | -0.2858 | -0.1798 | -0.2362 | -0.3412 | -0.2490 |

元素的全态只有转化为有效态才能被植物吸收利用,表 3 显示了毛村不同地质背景土壤剖面各层次主要有效态元素在不同季节的淋溶和聚积值。从表 3 可知,毛村石灰岩发育的土壤剖面,有效 Fe 和 Zn 在春、夏和秋季均表现为淋溶迁移,迁移次序为  $\text{Zn}>\text{Fe}$  (春夏季)和  $\text{Fe}>\text{Zn}$  (秋季);而有效 Cu 表现为聚积;有效 Mn 在夏季表现为淋溶迁移,在春秋季节却表现为聚积,聚积次序一般为  $\text{Cu}>\text{Mn}$ 。在白云岩发育的土壤剖面,有效 Cu、Fe 和 Zn 在春、夏和秋季均表现为淋溶迁移;而有效 Mn 在夏季表现为淋溶迁移,在春秋季节则表现为聚积,4 种有效态元素的迁移次序一般为  $\text{Fe}>\text{Zn}>\text{Cu}>\text{Mn}$ 。在砂页岩发育的土壤剖面,有效 Cu、Fe、Mn 和 Zn 在春、夏和秋季均表现

为淋溶迁移,迁移次序为  $\text{Fe}>\text{Zn}>\text{Mn}>\text{Cu}$ 。比较不同地质背景 0~30 cm 土壤元素的平均迁聚强度可知,有效 Fe 的迁移次序为砂页岩>白云岩>石灰岩;有效 Zn 的迁移次序为白云岩>石灰岩>砂页岩;有效 Cu 在石灰岩土壤聚积,聚积次序为砂页岩>白云岩;有效 Mn 在砂页岩土壤迁移,迁移次序为白云岩>石灰岩。

3.2 不同地质背景土壤主要元素迁移与植物蒸腾速率的相关性

毛村为典型的峰丛洼地和峰丛谷地的代表,不同地质背景(石灰岩、白云岩和砂页岩)条件下的土壤结构、光照风速条件以及水热条件不同,造成植物的蒸腾作用强度不同,而植物的蒸腾作用强度直接影响

表 3 毛村不同地质背景土壤剖面主要有效态元素的淋溶和聚积值

Table 3 Leaching and accumulation value of main available elements in soil profiles under different geological backgrounds in Maocun

| 元素 | 土层<br>(cm) | 石灰岩     |         |         | 白云岩     |         |         | 砂页岩     |         |         |
|----|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|    |            | 春季      | 夏季      | 秋季      | 春季      | 夏季      | 秋季      | 春季      | 夏季      | 秋季      |
| Cu | 0~20       | 0.7143  | 0.8481  | 0.9534  | -0.8154 | -0.7027 | -0.5721 | -0.7674 | -0.8090 | -0.7674 |
|    | 20~50      | 0.0331  | 0.3105  | 0.5970  | -0.8770 | -0.7514 | -0.7218 | -0.8314 | -0.7336 | -0.8172 |
|    | 平均 (0~30)  | 0.5920  | 0.6689  | 0.8346  | -0.8374 | -0.7166 | -0.6209 | -0.8187 | -0.7987 | -0.7793 |
| Fe | 0~20       | -0.9831 | -0.9888 | -0.9881 | -0.9887 | -0.9930 | -0.9880 | -0.9994 | -0.9998 | -0.9994 |
|    | 20~50      | -0.9836 | -0.9872 | -0.9686 | -0.9893 | -0.9954 | -0.9906 | -0.9995 | -0.9995 | -0.9995 |
|    | 平均 (0~30)  | -0.9821 | -0.9882 | -0.9816 | -0.9893 | -0.9940 | -0.9888 | -0.9995 | -0.9996 | -0.9995 |
| Mn | 0~20       | 0.2672  | -0.0876 | 0.2035  | 0.5211  | -0.0628 | 0.4077  | -0.8098 | -0.8714 | -0.8112 |
|    | 20~50      | 0.6510  | -0.6319 | 0.6899  | 0.2925  | -0.2275 | 0.2503  | -0.9089 | -0.8439 | -0.8523 |
|    | 平均 (0~30)  | 0.3952  | -0.2690 | 0.3656  | 0.5119  | -0.1602 | 0.3594  | -0.8465 | -0.8610 | -0.8213 |
| Zn | 0~20       | -0.9877 | -0.9926 | -0.9783 | -0.9819 | -0.9928 | -0.9869 | -0.9348 | -0.9642 | -0.9595 |
|    | 20~50      | -0.9914 | -0.9959 | -0.9696 | -0.9833 | -0.9948 | -0.9896 | -0.9415 | -0.9604 | -0.9624 |
|    | 平均 (0~30)  | -0.9885 | -0.9937 | -0.9754 | -0.9817 | -0.9934 | -0.9873 | -0.9368 | -0.9638 | -0.9623 |

着植物的生理活动，包括水分运移和矿质营养元素的吸收及运移<sup>[19]</sup>，从而会影响植物所在土壤中元素的迁移。图 1 显示了毛村不同地质背景典型植物黄荆在不同季节的日平均蒸腾速率，将其与相应地质背景土壤中元素的聚积或淋溶值进行相关分析，结果如表 4 所示。从表 4 可以看出，石灰岩发育的土壤中 Ca、Mg、Cu、Mn 和 Zn 等全态元素的迁聚与植物的日平均蒸腾速率显著相关，其中 Ca、Mg 和 Mn 元素达到极显著相关，Fe 则处于微弱相关；在白云岩发育的土壤中，Ca、Mg、Cu、Fe、Mn、Zn 等全态元素的迁聚与植物的日平均蒸腾速率均呈显著相关，其中 Mn、Zn 元素达到极显著相关；在砂页岩发育的土壤中，Mg、Cu、Fe、Mn、Zn 等全态元素的迁聚与植物的日平均蒸腾速率呈极显著相关，而 Ca 则处于微弱相关。

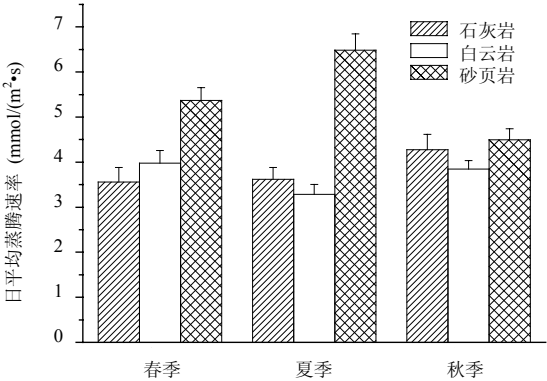


图 1 毛村不同地质背景黄荆的日平均蒸腾速率

Fig. 1 Mean daily transpiration rates of *Vitex negundo* under different geological backgrounds in Maocun

表 4 土壤中主要元素淋溶或聚积值与植物日平均蒸腾速率的相关性

Table 4 Correlation between leaching or accumulating value of main elements in soil and plant mean daily transpiration rate

| 形态  | 元素 | 石灰岩      | 白云岩      | 砂页岩      |
|-----|----|----------|----------|----------|
| 全态  | Ca | 0.9399** | 0.6122*  | 0.0414   |
|     | Mg | 0.8157** | 0.6810*  | 0.9900** |
|     | Cu | 0.7982*  | 0.5119*  | 0.9690** |
|     | Fe | 0.2419   | 0.5605*  | 0.9230** |
|     | Mn | 0.9049** | 0.8775** | 0.9930** |
|     | Zn | 0.5436*  | 0.9914** | 0.8442** |
| 有效态 | Cu | 0.9712** | 0.2463   | 0.4294   |
|     | Fe | 0.4973   | 0.9639** | 0.9516*  |
|     | Mn | 0.3980   | 0.9993** | 0.9750** |
|     | Zn | 0.9376** | 0.9501** | 0.1063   |

注：\* p<0.05; \*\* p<0.01 (下同)。

对于土壤有效态元素，石灰岩发育的土壤中 Cu 和 Zn 元素的迁聚与植物的日平均蒸腾速率呈极显著相关，Fe 和 Mn 则处于低度相关；在白云岩发育的土壤中，Fe、Mn 和 Zn 元素的迁聚与植物的日平均蒸腾速率呈极显著相关，Cu 则处于微弱相关；在砂页岩发育的土壤中，Fe 和 Mn 元素的迁聚与植物的日平均蒸腾速率呈极显著相关，Cu 则处于低度相关，Zn 是微弱相关。

在石灰岩和白云岩发育的石灰土中，Mn、Cu 等较难溶解的元素在土壤中属于较难迁移的元素，它们在石灰土中的迁移能力顺序一般排在 Ca、Mg 元素的

后面。在毛村不同母岩发育的石灰土中 Mn 一般较 Cu 相对富集,这与在其他岩溶区土壤中的研究结果基本一致<sup>[6]</sup>。本研究中,Mn、Cu 元素的淋溶值或聚积值与植物的日平均蒸腾速率均呈一定的相关性,这显示了植物蒸腾作用对 Mn、Cu 等较难迁移元素的迁移具有一定的促进作用,这与作者在桂林岩溶试验场石灰岩区研究的结果基本一致<sup>[17]</sup>。

综合上述分析可知,岩溶区与非岩溶区土壤中一些元素的迁移与植物的蒸腾作用关系密切,且对于不同的地质背景以及不同的元素,蒸腾作用的影响程度不同。

3.3 不同地质背景生长的黄荆对几种主要元素的吸收及与土壤元素迁移的相关性

生物吸收系数可用来表征植物对化学元素的吸收和积蓄能力,研究某一地区的生物吸收系数将能更好地说明地区性的地球化学特征。不同地质背景条件下生长的黄荆对几种主要元素的吸收系数见表 5。从表 5 可知,不同地质背景条件下生长的黄荆对 Ca、Mg、Cu、Fe、Mn、Zn 等元素的吸收系数存在明显差异,尤其是岩溶区(石灰岩和白云岩)石灰土与非岩溶区(砂页岩)红壤之间差异较显著。对于 Ca、Mg 等大

量元素,黄荆在石灰土上的吸收系数明显小于红壤;对于 Cu、Fe、Mn 和 Zn 等微量元素,除 Cu 元素之外,其余 3 种元素的生物吸收系数都是岩溶区石灰土小于非岩溶区红壤。虽然岩溶区石灰土中的 Zn 元素全量高于砂页岩发育的红壤,但有效态含量却比较低,而植物对微量元素的吸收一般取决于有效态含量,故造成同种植物在石灰岩和白云岩发育的石灰土上对微量元素生物吸收系数一般低于砂页岩发育的红壤。上述这些结果与卢枚桂等<sup>[12]</sup>的研究结果基本一致。

虽然同属岩溶区,石灰岩与白云岩发育土壤的生物吸收系数亦存在一些差异,白云岩发育土壤对 Cu、Fe、Mn、Zn 等 4 种微量元素的生物吸收系数大于石灰岩发育的土壤,这与白云岩中这 4 种微量元素含量高于石灰岩相对应,也说明白云岩发育土壤的微量元素供应状况较好,更有利于植物的吸收和生长。野外观察白云岩发育土壤上的黄荆生长状况要好于石灰岩发育的土壤,恰与上述结果相对应。本研究结果与蒋忠诚<sup>[1]</sup>对广西弄拉岩溶环境元素迁移的研究结果相一致,即碳酸盐岩中微量元素的背景值含量对元素迁移有影响,可造成植物矿质营养元素含量的差异,这对于生态的发展具有重要意义。

表 5 不同地质背景的黄荆对土壤几种主要元素的吸收系数  
Table 5 Absorption coefficients of main elements in *Vitex negundo* under different geological backgrounds in Maocun

| 元素 | 石灰岩    |        |        | 白云岩    |        |        | 砂页岩     |         |         |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
|    | 春季     | 夏季     | 秋季     | 春季     | 夏季     | 秋季     | 春季      | 夏季      | 秋季      |
| Ca | 3.5639 | 3.3245 | 2.8914 | 3.4975 | 2.8195 | 3.1875 | 15.9003 | 17.4029 | 18.8751 |
| Mg | 0.3844 | 0.2828 | 0.3844 | 0.3345 | 0.3089 | 0.3597 | 0.9486  | 0.8440  | 1.2481  |
| Cu | 0.0335 | 0.0317 | 0.0335 | 0.0452 | 0.0533 | 0.0536 | 0.0076  | 0.0088  | 0.0083  |
| Fe | 0.0089 | 0.0085 | 0.0089 | 0.0103 | 0.0098 | 0.0067 | 0.0151  | 0.0113  | 0.0061  |
| Mn | 0.0224 | 0.0278 | 0.0224 | 0.0286 | 0.0363 | 0.0349 | 0.5591  | 0.5707  | 0.5241  |
| Zn | 0.1641 | 0.2017 | 0.1641 | 0.1969 | 0.2338 | 0.1938 | 0.4762  | 0.5082  | 0.3728  |

此外,将不同地质背景条件下生长的黄荆对 Ca、Mg、Cu、Fe、Mn、Zn 等元素的吸收系数与相应地质背景土壤中上述元素的迁聚值进行相关分析,结果如表 6 所示。从表 6 可以看出,对于石灰岩发育的土壤,黄荆对 Ca、Mg、Cu、Zn 等元素的吸收系数与土壤中这几种元素的迁聚值呈极显著相关;对于白云岩发育的土壤,黄荆对 Ca、Mg、Fe、Mn、Zn 等元素的吸收系数与土壤中这几种元素的迁聚值呈显著相关,其中 Ca、Mg、Mn、Zn 等元素达到极显著相关;对于砂页岩发育的土壤,黄荆对 Ca、Mg、Fe、Mn、Zn 等元素

的吸收系数亦与土壤中这几种元素的迁聚值呈显著相关,其中 Ca、Mg、Fe、Mn 等元素达到极显著相关。综上分析可知,在一定母岩发育的土壤上,各元素的迁聚值与植物吸收系数间存在一定的相关性,但达到显著或极显著相关的元素因岩性而有所不同,这些结果说明植物蒸腾作用对 Ca、Mg、Cu、Fe、Mn、Zn 等元素的迁移确实具有一定的促进作用,同时也证明了蒸腾作用可以增加植物对矿质营养元素的吸收<sup>[16]</sup>,该结果亦与作者在桂林岩溶试验场石灰岩区研究的结果基本一致<sup>[17]</sup>。

表 6 黄荆对几种主要元素的吸收系数与土壤中这些元素淋溶值或聚集值的相关性

Table 6 Correlation between absorption coefficient of main elements in *Vitex negundo* and leaching or accumulating values of the elements in soils

| 岩石  | Ca       | Mg       | Cu       | Fe       | Mn       | Zn       |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 石灰岩 | 0.8892** | 0.9873** | 0.8732** | 0.1366   | 0.4396   | 0.8545** |
| 白云岩 | 0.8141** | 0.9928** | 0.3512   | 0.6935*  | 0.9822** | 0.9279** |
| 砂页岩 | 0.8826** | 0.9655** | 0.1840   | 0.8052** | 0.8920** | 0.5970*  |

4 结论

(1) 母岩的地球化学背景对岩溶土壤系统的元素迁移具有重要影响。在毛村石灰岩发育的土壤中，全态 Ca、Mg 表现为淋溶迁移，全态 Cu、Fe、Mn、Zn 一般表现为聚积；有效态 Fe、Zn 表现为淋溶迁移，有效态 Cu、Mn 一般表现为聚积；在白云岩发育的土壤中，全态 Ca、Mg、Zn 表现为淋溶迁移，全态 Cu、Fe 和 Mn 表现为聚积；有效态 Cu、Fe 和 Zn 表现为淋溶迁移，有效态 Mn 一般表现为聚积。在砂页岩发育的土壤中，全态 Ca、Fe 和 Zn 表现为淋溶迁移，全态 Mn 和 Cu 表现为聚积，全态 Mg 的迁聚情况因季节和土壤深度而有所不同；有效态 Cu、Fe、Mn 和 Zn 均表现为淋溶迁移。元素的迁聚序列因不同地质背景也有所不同。

(2) 植物蒸腾作用对土壤中 Ca、Mg、Cu、Fe、Mn、Zn 等主要元素迁聚的影响程度因不同地质背景以及不同元素而有明显差异。植物蒸腾作用对 Mn、Cu 等较难迁移元素的迁移具有一定促进作用。所以，在研究岩溶地区的元素迁移时，既要考虑不同地质背景的差异，也要重视植物蒸腾作用的影响。

(3) 毛村不同地质背景条件下生长的同种植物对各种元素的吸收系数存在明显差异，白云岩发育土壤对 Cu、Fe、Mn、Zn 等微量元素的生物吸收系数大于石灰岩发育的土壤。土壤中 Cu、Fe、Mn、Zn 等微量元素元素的迁聚对植物吸收系数的影响程度因不同的地质背景而有显著差异。

(4) 岩溶山区不同地质背景由于生境条件的差异造成同种植物生长状况的差异，故在进行植被恢复时，必须考虑不同地质背景的特点，因地制宜地选择合适的植物品种。

**致谢：**国土资源部岩溶动力学重点实验室的曹建华研究员在野外试验和采样中给予了热情帮助，在此表示诚挚的感谢！

参考文献：

[1] 蒋忠诚. 岩溶动力系统中的元素迁移. 地理学报, 1999, 54(5): 438-444

[2] 蒋忠诚. 中国南方表层岩溶系统的碳循环及其生态效应. 第四纪研究, 2000, 20(4): 315-324

[3] 马斯纳 H. 著 (曹一平等译). 高等植物的矿质营养. 北京: 北京农业大学出版社, 1985

[4] 韦启藩, 陈鸿昭, 吴志东, 黄钺, 教剑英. 广西弄岗自然保护区石灰土的地球化学特征. 土壤学报, 1983, 20(1): 30-42

[5] 温琰茂, 曾水泉, 潘树荣, 罗毓珍. 中国东部石灰岩土壤元素含量分异规律研究. 地理科学, 1994, 14(1): 16-21

[6] 蒋忠诚. 广西弄拉白云岩环境元素的岩溶地球化学迁移. 中国岩溶, 1997, 16(4): 304-312

[7] 季宏兵, 欧阳自远, 王世杰, 周德全. 白云岩风化剖面的元素地球化学特征及其对上陆壳平均化学组成的意义——以黔北新蒲剖面为例. 中国科学(D辑), 1999, 29(6): 504-513

[8] Ji HB, Wang SJ, Ouyang ZY, Zhang S, Sun CX, Liu XM. Zhou DQ. Geochemistry of red residua underlying dolomites in karst terrains of Yunnan-Guizhou Plateau I. The formation of the Pingba profile. Chemical Geology, 2004, 203: 1-27

[9] Ji HB, Wang SJ, Ouyang ZY, Zhang S, Sun CX, Liu XM. Zhou DQ. Geochemistry of red residua underlying dolomites in karst terrains of Yunnan-Guizhou Plateau II. The mobility of rare earth elements during weathering. Chemical Geology, 2004, 203: 29-50

[10] 曾群望, 杨双兰, 高宏光等著. 云南生物地质环境研究. 昆明: 云南科技出版社, 2001

[11] 卫迦, 杨立铮, 孙晋玉, 刘齐军. 碳酸盐岩成土的元素迁移及其对烤烟的影响. 中国岩溶, 1997, 16(1): 49-56

[12] 卢玫桂, 曹建华, 何寻阳. 桂林毛村石灰土和红壤元素生物地球化学特征研究. 广西科学, 2006, 13(1): 58-64

[13] Song LH, Liang FY. Distribution of CO<sub>2</sub> in soil air affected by vegetation in the Shilin National Park. Acta Geologica Sinica, 2001, 75(3): 288-293

[14] 姚长宏, 蒋忠诚, 袁道先. 西南岩溶地区植被喀斯特效应. 地球学报, 2001, 22(2): 159-164

[15] 梁宗锁, 唐绍忠. 作物水分代谢及其调节. 西北植物学报, 1996, 16(6): 73-78

[16] Novak V, Vidovic J. Transpiration and nutrient uptake dynamics in maize (*Zea mays* L.). Ecological Modelling, 2003, 166: 99-107

[17] 李为, 刘彦, 余龙江, 吴耿, 申泰铭, 栗茂腾. 桂林岩溶试验场不同地貌部位主要元素迁移特征及与植物蒸腾作用的相关

- 性. 华中农业大学学报, 2007, 26(1): 55-58
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 576-579
- [19] 潘瑞炽, 董愚得. 植物生理学. 北京: 高等教育出版社, 1995: 16-17

## Characteristics of Main Elements Migration in Soils under Different Geological Backgrounds and Their Correlation to Plant Transpiration in Maocun, Guilin

LI Wei<sup>1</sup>, LIU Yan<sup>1</sup>, WU Geng<sup>1</sup>, XIANG Jun<sup>1,2</sup>, LI Mao-teng<sup>1</sup>, YU Long-jiang<sup>1</sup>

( 1 Institute of Resource Biology and Biotechnology, College of Life Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2 College of Life Science and Engineering, Huanggang Normal University, Huanggang, Hubei 438000, China )

**Abstract:** Characteristics of migration of main elements including Ca, Mg, Cu, Fe, Mn and Zn in soils under different geological backgrounds (limestone, dolomite, sandshale) in Maocun, Guilin, were studied. The results showed that the geochemical backgrounds of parent rocks had important effects on element migration in Karst soil systems. On the other hand, the correlation between the migration of above elements and plant transpiration were studied, exemplified by a typical plant *Vitex negundo* grown under different geological backgrounds. The results showed that the influence extent of plant transpiration on the migration and accumulation of these main elements varied with different geological backgrounds and different elements. Plant transpiration could promote the migration of the elements to some extent, such as Mn and Cu, which were more difficult to transfer in soils. Moreover, the influence extent of migration and accumulation of these microelements on plant absorption coefficient, varied significantly with different geological backgrounds. In karst mountain areas, the differences among different geological backgrounds should be considered when conducting vegetation restoration, and suitable plant species should be chosen according to the local conditions.

**Key words:** Element migration, Transpiration, Geological background, *Vitex negundo*, Limestone, Dolomite