

文章编号:1672-9250(2007)01-0026-07

# 喀斯特小流域植被—土壤系统钙的协变关系研究

谢丽萍<sup>1,2</sup>, 王世杰<sup>1\*</sup>, 肖德安<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:**分析和探讨了贵州花江峡谷查尔岩小流域不同生态系统中土壤和植物中总钙与不同存在形态钙的含量及其相互之间的关系。研究区土壤中, 不仅总钙含量(平均 1.8%)高, 而且交换态钙含量(平均占总钙含量的 50.9%)也很高, 与土壤总钙含量显著正相关。植物总钙含量(平均在 1.2%~3.2%之间)高, 且在不同层次间有较大的差别, 灌木层钙含量(平均 2.3%)大于草本层(平均 1.2%)。不同物种间钙含量变化也较大, 在研究区所有物种中构树钙含量最高(平均 3.2%)。植物中三种形态钙(水溶性钙、乙酸溶性钙、盐酸溶性钙)含量以水溶性钙含量最高, 但并不随植物总钙含量的增加而增加, 且在不同植被中含量相差较大。植物、土壤总钙及土壤交换态钙含量, 都随着次生林、草灌、灌草、稀疏灌草的演替有增加的趋势。土壤—植被间钙含量的相关性分析表明, 高钙的土壤环境是导致植物钙生物吸收系数高的主要原因。

**关键词:**土壤钙; 植物钙; 钙形态; 植被演替; 协变关系; 喀斯特小流域

中图分类号: X142

文献标识码: A

喀斯特地区的物质循环以碳、水、钙循环为基本特征。对碳和水循环已有较多的研究工作, 但对于钙循环的工作还处于起步阶段。全国第二次土壤普查工作成果表明, 中国西南岩溶地区土壤中的钙含量达 1%~3%, 是同纬度硅酸盐岩地区土壤的 2~3 倍, 而土壤 pH 值则可高出 1~2 单位<sup>[1]</sup>。岩溶地区土壤富钙、偏碱性的特点将明显地制约着岩溶生态系统的运行机制。

钙作为营养元素, 不仅是植物生长发育所需要的一种大量元素, 也是调节植物代谢系统的重要因子之一。目前对钙在土壤和植物中的存在形态、分布特征等方面有较多的研究, 尤其是钙在植物中的生理作用(抗逆作用)及机理是当今研究的热点<sup>[2-7]</sup>, 但在岩溶地区该方面的工作相当零星和分散, 初步研究结果显示钙在岩溶生态系统的演化中扮演着重要的角色。

Tyler 和 Zohlen<sup>[8]</sup>通过对比研究认为, 与硅酸盐岩地区生长的草本植物相比, 碳酸盐岩地区的相同植物种籽中 Mn、Mg、Zn 和 P 的含量总体偏低, Rb、Co 为 1/2; 植物叶片中的 K、Mn 和 Zn 为 1/3~1/2。国内也有一些研究者分别对热带、亚热带生长在同纬度的硅酸盐岩和碳酸盐岩地区的森林植被的化学组分进行了分析, 后者森林植被的灰分是前者的 1.5~2 倍, Ca 含量可达 2~7 倍, 而 Si 含量仅有 1/2~1/3; 亚热带岩溶区常绿—落叶阔叶森林群落的生物量仅相当于温带地带性针叶林森林群落的生物量<sup>[9-13]</sup>。大多数学者认为, 在 pH 接近中性时, Ca 表现出较强的与其他阳离子竞争有机配位的能力, 影响其他金属离子的活化, 并制约植物对营养元素的吸收, 尤其是 Fe、Mn、Zn、Cu 和 P<sup>[14-17]</sup>。本文选取比较有代表性的贵州花江峡谷区查尔岩小流域为研究对象, 分析和探讨喀斯特山区不同生态系统中土壤和植物中总钙与不同存在形态钙的含量及其相互之间的关系。

## 1 研究区概况及研究方法

### 1.1 研究区自然概况

花江峡谷位于贵州西南部, 关岭县与贞丰县交

收稿日期: 2006-05-29; 修回日期: 2006-11-27

基金项目: 中科院科技支黔工程项目; 中科院知识创新前沿领域项目; 贵州省最高科学成就奖科技匹配项目

第一作者简介: 谢丽萍(1980—), 女, 硕士研究生, 从事生物地球化学研究。

\* 通讯作者: wangshijie@vip.skleg.cn

界的北盘江两岸,属于贵州喀斯特石山区的典型峡谷地貌,面积 50 km<sup>2</sup>,岩石裸露率大于 70%,石漠化现象非常严重。基岩类型主要为中三叠统连续性灰岩,质纯层厚,倾角多在 10°~20°。土壤以黄色石灰土、棕色石灰土和黑色石灰土为主,呈零星分布,在微型台地上分布面积相对较大。植被多生长于石缝、石沟、小土坑、微台地上。

研究区查尔岩小流域位于峡谷区内,海拔 823~1 038 m,流域长 1.9 km,高差 200 m,面积 1.2 km<sup>2</sup>,地貌类型为喀斯特峰丛谷地。该流域属北盘江谷坡上的干谷系之一,呈西南向东北方向延伸,泉点出露多沿槽谷底部分布。地表破碎,坡度大,石漠化以中强度为主,多分布于坡面。气候冬春温暖干旱,夏秋湿热,热量资源丰富,年均温 18.4 °C,≥10 °C 积温 6 542 °C,年均降水量 1 100 mm,年均降雨量时空分布不均,5~10 月降雨量占全年总降雨量的 83%。由于人为的破坏,现存原生植物以耐旱耐浅土的先锋树种为主,乔灌层次不明显,具有明显的人为干扰所带来的次生性质,自然植被主要分布在山顶、陡坡、岩石裸露率极大而无开垦价值的地点。是贵州比较有代表性的退化喀斯特山地生态系统<sup>[18]</sup>。

## 1.2 研究方法

本文采取以广泛调查为基础,在流域的上、中、下及侧边,选择了四套比较有代表性的样地(A、B、C、D)。其中在每套样地中根据相似的立地条件(坡向、坡度、海拔、土厚等),不同的植被类型、盖度划分出 4 组样地:其中,第一组(用 1 表示)为次生林地且植被盖度>80%;第二组(用 2 表示)植被类型以草灌为主,盖度在 50%~80%;第三组(用 3 表示)以灌草为主,盖度在 30%~50%;第四组(用 4 表示)以稀疏灌草为主,盖度<30%。样地编号分别为 A1、A2、A3、A4;B1、B2、B3、B4;C1、C2、C3、C4;D1、D2、D3、D4,共 16 块。在次生林地中(A1、B1、C1、D1)主要以乔木为主,根据生态学中乔木研究需要最小面积为 10 m×10 m,考虑到样地代表性将样地面积放大到 20 m×20 m;草灌(A2、B2、C2、D2)、灌草(A3、B3、C3、D3)、稀疏灌草(A4、B4、C3、D4)样地面积都设置为 10 m×10 m。

在植被调查的基础上,将样地灌木的叶、草本各自按照其在样地的优势度混合成 2 个样品,同时为了便于物种间的比较及物种代表性,采集样地优势种和流域常见种(粗糠柴、肾蕨、构树、毛麻楝等)。

考虑到喀斯特小生境的高度异质性,为促进喀斯特山区土壤退化研究中数据之间的可比性,关于样地代表性土样的采集问题,本文采用王世杰等建议的以土壤面积权重确定的小生境土样组成样地代表性土样的方法<sup>[19]</sup>。首先对设置样地划分小生境类型(石面、土面、石土面、石沟、石缝、石坑、石洞),由面积权重确定组成样地土壤代表样的各类小生境土样品量,而各类小生境土样则分别由以面积权重确定的同类小生境样品量混合构成,小生境土样则由多点混合样组成。一般每个土样为同一小生境内 3~5 点表层土(0—15 cm)的混合样,面积和异质性大的小生境则为 5~8 点的混合。

植物、土壤样品中总钙的分析采用酸溶 ICP—OES 测定。水溶性钙、乙酸溶性钙、盐酸溶性钙,采用固液比为 1:10 依次用去离子水、乙酸、盐酸萃取<sup>[20]</sup>,原子吸收(PE5100PC)测定。土壤交换态钙含量用乙酸铵提取,原子吸收测定。碳酸钙含量用气量法测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 植被中钙含量特征

#### 2.1.1 植被总钙含量变化

从表 1 可见,在喀斯特山地生态系统中,各类植物钙含量平均在 1.2%~3.2%之间,且大多数植物钙含量在 2%以上。在我国一般植物叶片中钙含量在 0.5%~2.0%<sup>[21]</sup>,而亚热带酸性土(茂兰酸性土壤区)森林区植物平均钙含量为 1.06%<sup>[10]</sup>,这表明研究区植物钙含量较同纬度其它区域植物高,即喀斯特山区大部分植被具有喜钙性,这和以前的研究结果一致<sup>[22]</sup>。

不同种类植物中钙含量有较大的差异,如表 1 所示,样地常见种构树、肾蕨、粗糠柴、八角枫、毛麻楝、野桐等物种中,钙含量相差较大,但是同一物种在不同样地间钙含量的变异系数不大,说明植物钙含量很大程度上受物种的影响。表 1 还表明,在所有物种中,钙含量最高的是构树(灌木),通过构树在不同样地间的变异系数可以看出,构树钙含量在多样地间变化很小,说明构树对钙具有较强的吸收能力,基本不随外界环境的变化而发生变化。同时,构树在这一区域生长也较好,表现出对这一区域环境有较强的适应性,并且它有较高的经济价值,它的叶可以提供给牲畜很好的蛋白质及钙养分,是很好的饲料,树皮、茎是优质造纸及人造棉的原料,根叶入

药、清凉解毒。构树属于荨麻目桑科植物,它的生长习性是喜阳、耐旱、耐瘠薄、喜钙、生长迅速,对喀斯特山区环境有很强的适应性。因此,构树很适合作为这一区域退化生态系统植被恢复的先锋种。

在研究区样地中次生林地以乔木层为主,草灌样地以灌木层为主,灌草和稀疏灌草以草本为主,部

分样地中有藤本,针对样地中乔木、灌木、草本和藤本中钙含量变化作比较(表1)得出:藤本>乔木=灌木>草本,说明在不同层次植被中,藤本钙含量最高,而草本中钙含量最低。各层次在不同样地间的变异系数变化不是很大,说明它们在各样地间钙含量的变化较小。

表1 不同植被类型钙含量

Table 1. The total Ca content in various plant species

植被类型	钙含量范围/%	变异系数/%	平均钙含量/%	平均钙含量高低顺序
构树	2.8~3.4	7.7	3.2	构树>毛麻楝>野桐>八角枫=粗糠柴>肾蕨
肾蕨	1.2~2.4	17.4	1.7	
粗糠柴	1.0~3.2	34.3	2.2	
八角枫	2.1~2.3	5.4	2.2	
毛麻楝	2.5~3.5	23.2	3.0	
野桐	1.9~3.6	32.2	2.7	
乔木	1.4~2.9	34.0	2.3	藤本>乔木=灌木>草本
灌木	2.0~2.6	32.5	2.3	
草本	0.8~1.9	24.1	1.2	
藤本	1.9~3.5	22.3	2.7	

由于只在次生林中有乔木层,并且平均钙含量和灌木层相近,而藤本也只是在部分样地里出现,所以在图1中只表示出所有样地中灌木层和草本层钙含量的变化。通过图1可以看出在同一样地中灌木层中钙含量比草本层高,表明了灌木对钙的吸收能力比草本大。在植被恢复过程的选种中,应该根据恢复系统土壤钙含量选择灌木、草本或灌木草本套种,这在一定程度上能够加快植被恢复的速度和增强生态系统的稳定性。

定状态下,植物细胞内离子态钙含量很低,而结合态钙大部分以果胶钙及难溶性草酸钙、磷酸钙、硅酸钙等存在于细胞壁和液泡中<sup>[23]</sup>。磷酸钙的产生可能是由于植物体内钙含量过高,为了消除钙对植物的毒害作用而与磷酸根生成不溶性的磷酸钙。草酸钙是植物为了避免过多草酸对植物的伤害作用而与钙形成草酸钙<sup>[24]</sup>,这两种物质的形成都有利于植物体内高钙的调节作用。但是植物形成的磷酸钙过多,将使磷酸基的能量代谢受阻,而对植物产生危害。水溶性钙包括游离态钙、液泡中部分与磷酸结合态钙(维持细胞内离子平衡)及部分水溶性果胶钙(构成细胞壁,使植物器官有一定的机械强度)。乙酸溶性钙主要是不能被水溶解的无机磷酸钙,盐酸溶性钙主要以草酸钙形态存在的钙<sup>[25]</sup>。在本研究中为探讨喀斯特生态系统中钙在植物体内的存在形态及各形态的含量,分析了水溶性钙、乙酸溶性钙、盐酸溶性钙三种形态的钙,其余部分钙主要是不溶性果胶钙或难溶性硅酸钙。

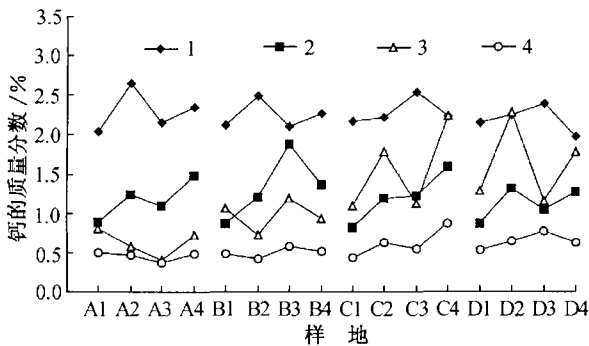


图1 灌木、草本总钙及土壤总钙、交换态钙含量变化

Fig. 1. The correlation of total Ca content in shrub and herbage with soil and exchangeable Ca contents.

(注:1. 灌木层中总钙含量; 2. 草本层中总钙含量; 3. 土壤总钙含量; 4. 土壤交换态钙含量)

### 2.1.2 不同形态钙在植被中的含量变化

依据钙在植物体内是否与配体结合,钙的存在形态分为自由离子态(Ca<sup>2+</sup>)和结合态两种。在稳

如表2所示,植物中三种形态钙,以水溶性钙含量最高,盐酸溶性钙和乙酸溶性钙含量相对较低。水溶性钙含量高,这在一定程度上提高了喀斯特山区植被中钙的可利用性及开发的可行性。现今世界上很多国家人均每日钙摄入量普遍较低,这一问题在中国尤其突出,同时不同钙源在人体中的吸收率有差异,而当今市场上的补钙剂都是单独的补钙,不易被人体吸收,但是膳食中的钙由于同时含有其它

有益元素易于被吸收,这在一定程度上提高了喀斯特山区植物食品开发的前景。如果充分利用这一地域优势,种植适合这一区域生长的富钙经济作物,不仅能够加快退化喀斯特生态系统的恢复速度,而且可部分地解决喀斯特山区人—地矛盾及贫困问题。盐酸溶性钙(草酸钙)含量随着植物总钙含量的增加而呈现增加的趋势,可能的原因是,在钙含量高的植物中,植物的代谢能力较强,形成的有机酸性物质较多,即草酸含量较高,而为了结合过多的草酸形成了较多的草酸钙。乙酸溶性钙(磷酸钙)含量随着物种的变化发生较大的变化,说明乙酸溶性钙含量受植被物种的影响很大。

不同植被类型中三种形态钙含量有较大的差别,在总钙含量较低的草本植物中:水溶性钙>乙酸溶性钙>盐酸溶性钙。而总钙含量较高的灌木、粗糠柴中:水溶性钙>盐酸溶性钙>乙酸溶性钙。但是三种形态钙在所有植被中,水溶性钙含量都是最高的,只是盐酸溶性钙与乙酸溶性钙含量高低不一样。

同一种形态钙在不同植被中含量有较大的变化(表2)。水溶性钙含量在各植被类型中从高到低的顺序为:藤本>构树>肾蕨>草本>灌木>粗糠柴;乙酸溶性钙高低顺序为:构树>藤本>肾蕨>粗糠柴>灌木>草本;盐酸溶性钙含量高低顺序为:粗糠柴>构树>灌木>藤本>肾蕨>草本。可以看出,并不是总钙含量高的植物,水溶性钙含量就高,在对钙的利用上应该选择水溶性钙含量高的物种,而不仅根据植物总钙含量高低来选择。在样地所有植被中构树的水溶性钙、植物总钙的含量都高,适合作为退化喀斯特生态系统恢复的首选物种。

表2 不同植被中三种不同形态钙含量

Table 2. Three chemical forms of Ca in various

植物类型	plant species		
	水溶性钙	乙酸溶性钙	盐酸溶性钙
肾蕨	4 392.3	431.5	242.3
草本层	3 139.5	280.1	205.7
藤本层	5 871.3	490.5	467.1
构树	5 137.0	783.8	645.7
灌木层	3 124.7	324.1	569.9
粗糠柴	2 845.8	325.3	714.1

### 2.1.3 次生林地与相对退化样地中不同层次植被钙含量变化

在喀斯特山区次生林地中钙含量与相对退化的

草灌、灌草、稀疏灌草样地中植物钙含量有较大的差别,在四套序列中都表现出次生林样地植物中钙含量比其它三种类型植被样地平均值低。如图2所示,四套系列中(A、B、C、D),次生林样地植物(A1、B1、C1、D1)中钙含量与其它三种类型植被在草本层、灌木层钙平均含量的变化可以看出:草本、灌木层中钙含量在4组样地中都呈现出次生林样地各层次植物总钙含量<退化样地(草灌、灌草、稀疏灌草)各层次植物平均总钙含量,说明随着喀斯特生态系统的退化植物中钙含量在增加。同时在图1中也反应出这样的趋势:随着次生林、草灌、灌草、稀疏灌草的演替序列,草本、灌木中钙含量有增加的趋势,但存在一定的波动。因此,在退化喀斯特系统的恢复过程中应该针对不同退化程度的生态系统,选择不同的恢复树种。在轻度退化下应该种植生长速度快、经济效益好的物种,而在退化严重的区域应该种植对喀斯特环境适应好、耐高钙浓度的物种,确保植物的成活率,以此提高植被恢复的速度和质量。

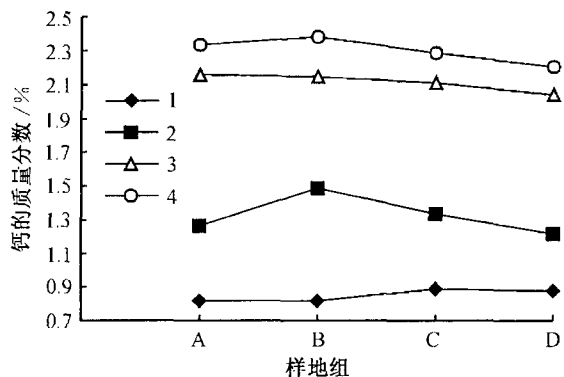


图2 次生林样地与相对退化样地灌、草中总钙含量

Fig. 2. The total Ca contents in shrub, herbage and degenerated arbor trees.

(注:1.每套系列中次生林样地草本钙含量;2.每套系列中草灌、灌草、稀疏灌草样地草本平均钙含量;3.每套系列中次生林样地灌木钙含量;4.每套系列中草灌、灌草、稀疏灌草样地灌木平均钙含量)

## 2.2 土壤中钙含量

研究区土壤总钙含量高,且变化较大,0.56%~3.2%,平均1.8%(以CaO计),我国南方红黄壤中总钙含量在0.5%以下<sup>[26]</sup>,可以看出研究区土壤总钙含量差不多是其3倍。这表明喀斯特生态系统中土壤由于受成土母质(碳酸盐岩)、气候、地形、生物、人为作用等因子综合作用,使喀斯特山区土壤发育较年轻,较多的保持了母质钙含量高的性质。土壤中碳酸钙含量(以CaCO<sub>3</sub>计)0.18%~1.0%,平均

0.52%；交换态钙（以 Ca 计）含量在 0.4%~0.86%，平均 0.56%，碳酸钙、交换态钙与土壤总钙

的相关性显著（图 3），尤其是交换态钙与总钙的相关性达到极显著（ $R^2=0.77$ ）程度。

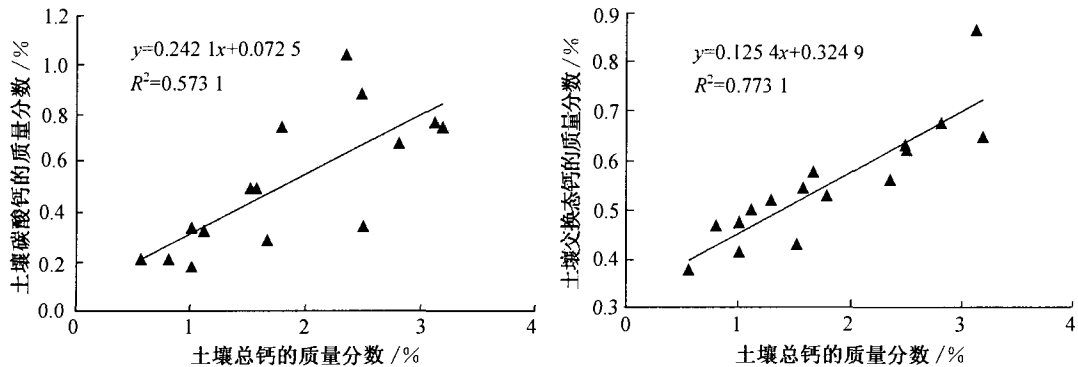


图 3 土壤碳酸钙、交换态钙与土壤总钙的相关性

Fig. 3. Correlation of carbonate bounded Ca, exchangeable Ca and total Ca contents in soil.

碳酸钙、交换态钙分别占土壤总钙的百分比为：7.8%~23.3%（平均 15.8%）、33.1%~90.8%（平均为 50.9%），可以看出土壤中钙含量主要以作物有效性好的交换态形式存在，与一般土壤中交换态钙占全钙量 20%~30%相比<sup>[27]</sup>，研究区土壤的交换态钙含量高。即喀斯特山区土壤中钙的有效性高，这与以前的研究结果一致<sup>[28]</sup>。

在草灌、灌草、稀疏灌草生态系统与次生林生态系统中，土壤总钙、交换态钙含量变化较大。如图 4 所示，在 A、B 组中变化不明显，C、D 组表现出明显的次生林地土壤总钙、交换态钙含量 < 草灌、灌草、稀疏灌草样地土壤总钙、交换态钙平均含量。图 1 也有相似的趋势：即随着喀斯特生态系统退化，土壤中总钙、交换态钙含量相对增加了，但有一定的波动。交换态钙是植物易于利用部分钙，这可能在一程度增加土壤-植物系统中钙含量，对于退化生态系统的恢复应该注意土壤中高的有效态钙，及由于高钙而引起其它元素缺乏，使植被生长受阻等阻碍因子。

### 3 土壤-植被间钙的迁移

由于不同植物具有不同的生物学特征，即不同植物对钙的吸收能力不一样，即使同一植物在不同土壤条件下也可能具有不同的吸收能力。本文用生物吸收系数<sup>[29]</sup>（钙生物吸收系数 = 植物中钙含量 / 土壤中钙含量）来表示植被对钙的吸收能力。从表 3 可以看出，同一物种钙生物吸收系数在不同样地间的变异系数很大，比不同物种在相同样地里钙生物吸收系数的变异系数要大，即在喀斯特山地生态系统中物种间引起的植物钙生物吸收系数的变化较

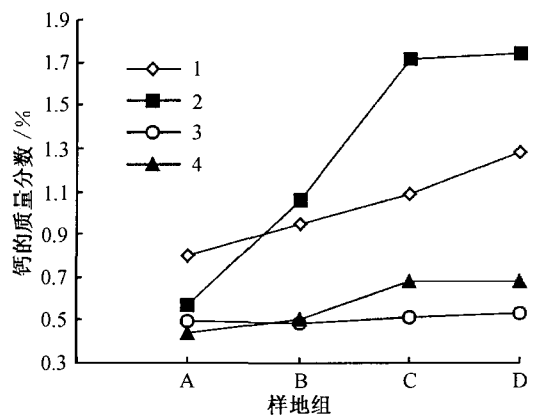


图 4 不同植被类型中土壤交换态钙、总钙含量

Fig. 4. Exchangeable Ca and total Ca contents in various plant species.

（注：1. 每套系列中次生林样地土壤总钙；2. 每套系列中草灌、灌草、稀疏灌草样地土壤总钙的平均值；3. 每套系列中次生林样地土壤交换态钙；4. 代表每套系列中草灌、灌草、稀疏灌草样地土壤交换态钙的平均值）

土壤环境差异引起的钙生物吸收系数变化小。这也间接地说明了生物吸收系数主要受土壤钙含量的影响。

图 5 为植物钙生物吸收系数与土壤、植物总钙含量的相关性，可以看出钙生物吸收系数与土壤总钙含量达到显著负相关性，而与植物总钙含量相关性较低。总的来说，土壤总钙含量对植物的钙生物吸收系数影响较大，而表现出负相关是由于土壤总钙在不同样地间的变化比植物中总钙的变化大，所以导致负相关。即在喀斯特生态系统中，土壤富钙的背景是影响植物钙吸收系数的主要因素。

表3 种间、种内植物钙生物吸收系数

Table 3. The Ca bio-absorption coefficients in various and homologous species

样号	肾蕨	粗糠柴	草本	灌木	变异系数
A1	2.2	—	1	2.7	—
A2	1.7	5.6	2.1	4.6	54.2
A3	—	6.2	2.7	5.4	—
A4	—	1.5	2	3.3	—
B1	3	—	0.8	1.9	—
B2	—	3.6	1.7	3.5	—
B3	—	1.6	1.6	1.8	—
B4	0.7	1.1	0.5	0.8	31.6
C1	—	—	0.7	1.7	—
C2	1.2	1.4	0.7	1.2	26.5
C3	1.2	1.9	1.1	2.3	35.3
C4	0.6	1.1	0.7	1	28
D1	1.4	—	0.6	1.6	—
D2	0.6	0.5	0.6	1	32.8
D3	0.8	1.7	0.7	1.1	41.9
D4	—	—	0.3	0.8	—
变异系数	58.1	80.1	61.8	64.5	—

## 4 小 结

通过对花江查尔岩小流域不同生态系统中土壤—植被间各种形态钙含量比较研究,得出如下结论:

(1)喀斯特山区植物钙含量高,且在不同层次间有较大的差别,灌木层大于草本层钙含量。物种间变化也较大,在研究区所有物种中构树钙含量最高,生长也相对好,表明构树对这一区域环境的适应能力强,并且也具有较好的经济利用价值,适合作为这一区域植被恢复的先锋种。

(2)植物中水溶性钙、乙酸溶性钙、盐酸溶性钙含量,以水溶性钙含量最高,但是水溶性钙含量并不随总钙含量的增加而增加,在不同植被中水溶性钙含量相差较大。在退化生态系统植被恢复的物种选择过程中,应该注意植物水溶性钙含量,不能仅看植物总钙含量的高低。

(3)在喀斯特山区土壤中,不仅总钙含量高,而且交换态钙含量也很高,即土壤钙有效性较高,土壤碳酸钙、交换态钙与土壤总钙含量显著正相关。

(4)植物、土壤总钙及土壤交换态钙含量,都随着次生林、草灌、灌草、稀疏灌草的演替有增加的趋势,即在时间上,随着生态系统退化的发展,钙的含量有一定的增加,这表明在恢复过程中,应该根据土壤的退化程度,选择不同的恢复过程及方法。

(5)在喀斯特生态系统中植被具有较高的钙生物吸收系数,但主要受土壤钙含量影响,即高钙的土壤环境是导致植物钙生物吸收系数高的主要原因。

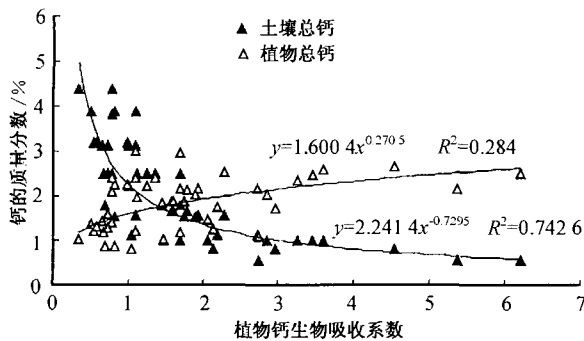


图5 样地植物、土壤总钙含量与钙生物吸收系数相关性

Fig. 5 Correlation of Ca bio-absorption coefficients with total Ca contents in plant and soil.

## 参 考 文 献

- [1] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [2] 叶盛, 汪东风, 丁凌志, 等. 植物体内钙的存在形式研究进展[J]. 安徽农业大学学报, 2000, 27(4): 417—421
- [3] 许仙菊, 陈明昌, 张强, 等. 土壤与植物中钙营养的研究进展[J]. 山西农业科学, 2004, 32(1): 33—38
- [4] 蒋廷惠, 占新华, 徐阳春, 等. 钙对植物抗逆能力的影响及其生态学意义[J]. 应用生态学报, 2005, 16(5): 971—976
- [5] 龚云池, 徐季娥, 吕端江. 梨果实中不同形态钙的含量及其变化的研究[J]. 园艺学报, 1992, 19(2): 129—134
- [6] 宗会, 李明启. 钙信使在植物适应非生物逆境中的作用[J]. 植物生理学通讯, 2001, 37(4): 330—335
- [7] Pooviah A S, Ready A S N. Calcium and signal transduction in plants[J]. Crit. Rev. Plant Sci., 1993, 12: 185—211
- [8] Tyler G, Zohlen A. Plant seeds as mineral nutrient resource for seedlings—a comparison of plants from calcareous and silicate soils[J]. Annals of Botany, 1998, 81(3): 455—459
- [9] 韦启藩, 陈鸿昭, 吴志东. 广西弄港自然保护区石灰土的地球化学特征[J]. 土壤学报, 1983, 20(1): 30—41
- [10] 张明, 张风海. 茂兰喀斯特森林下的土壤[A]. 周正贤. 茂兰喀斯特森林考察集[M]. 贵阳: 贵州人民出版社, 1987: 111—123
- [11] 蒋有绪, 卢俊培. 中国海南岛尖峰岭热带林生态系统[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [12] 杨汉奎, 程仕泽. 贵州茂兰喀斯特森林群落生物量研究[J]. 生态学报, 1991, 11(4): 307—311

- [13] 周运超,潘根兴. 茂兰森林生态系统对岩溶环境的适应与调节[J]. 中国岩溶, 2001, 20(1): 47-52
- [14] 张福锁. 环境胁迫与植物营养[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1993: 373-401
- [15] Meifang Zhou, Yuncong Li. Phosphorous-sorption characteristics of calcareous soils and limestone from the Southern Everglades and adjacent farmlands[J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63(2): 362-368
- [16] Ma Y B, Liu J F. Adsorption kinetics of zinc in a calcareous soil as affected by pH and temperature[J]. Communications in soil science and plant analysis, 1997, 28(13-14): 1117-1126
- [17] 蒋忠诚. 岩溶动力系统中的元素迁移[J]. 地理学报, 1999, 54(5): 438-444
- [18] 李阳兵, 王世杰, 李瑞玲. 不同地质背景下岩溶生态系统的自然特征差异——以茂兰和花江为例[J]. 地球与环境, 2004, 32(1): 9-16
- [19] 王世杰, 周运超, 卢红梅, 等. 茂兰喀斯特原始森林土壤有机碳的空间变异性与代表性土样采集方法[J]. 土壤学报, 2004, 32(1): 9-16
- [20] Fink S. The micromorphological distribution of bound calcium in needles of Norway spruce [*Picea abies* (L.) karst.]. New Phytologist, 1991, 119: 33-40.
- [21] 沈作奎, 刘永清. 我国森林群落建群种营养元素含量的区域特征[J]. 湖北民族学院学报(自然科学版), 1998, 16(6): 30-33
- [22] 周运超. 贵州喀斯特植被主要营养元素含量分析[J]. 贵州农学院学报, 1997, 16(1): 11-16
- [23] Trewavas A. Le Calcium, C'est la vie: Calcium makes waves[J]. Plant physiology, 1999, 120: 1-6
- [24] Kinzel H. Calcium in the vacuoles and cell walls of plant tissue[J]. Flora, 1989, 182: 99-125
- [25] Mehne-Jakobs B, Gupan M. Influences of different nitrate to ammonium ratios on chlorosis, cation concentration and the binding forms of Mg and Ca in needle of Mg-deficient Norway Spruce [J]. Plant and Soil, 1997, 188: 267-277
- [26] 袁可能. 植物营养元素的土壤化学[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 222-260
- [27] 周卫, 林葆. 土壤中钙的化学行为与生物有效性研究进展[J]. 土壤肥料, 1996, 5: 19-23
- [28] 曹建华, 袁道先, 章程, 等. 受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统[M]. 北京: 地质出版社, 2005: 16-22
- [29] 郑颖吾. 木论喀斯特林区概论[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 124-127

## Ca COVARIANT RELATION IN PLANT-SOIL SYSTEM IN A SMALL KARST CATCHMENT

XIE Li-ping<sup>1,2</sup>, WANG Shi-jie<sup>1</sup>, XIAO De-an<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Environment Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002; 2. The Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

### Abstract

Total and different forms of Ca contents and their relationships with soil and plant in different ecosystem of Chaeryan catchment was studied in Guizhou Huajiang gorge area. The results elucidated that both total Ca content (average 1.8%) was high and the exchangeable Ca content (average 50.9% of total Ca content) were high with significant positive correlation. The total Ca content (average 1.2% to 3.2%) in plant was high but existed relatively distinction among different layers. The total Ca content (average 2.3%) in shrub was higher than that in herbage (average 1.2%). The variation of total Ca content was evidently different among plant species, and the total Ca content in common papermulberry was the highest. The water soluble Ca content was higher than those in acetic acid and hydrochloric acid soluble Ca in plant. The water soluble content of Ca had no correlation with total Ca in plant. The total and exchangeable Ca in soil and the total Ca in plant increased with the plant succession from arbor trees, herbage-shrubs, shrubs-herbage to sparse shrub-herbage. The correlation analysis of total Ca content in soil and plant elucidated that high Ca bio-absorption coefficient in plant resulted from high Ca content in soil.

**Keywords:** Ca content in soil; Ca content in plant; chemical forms of Ca; plant succession; covariant relationship; karst catchment