

文章编号:1001-4810(2001)02-0231-05

# 岩溶动力系统对典型石灰岩土肥力特征的影响<sup>①</sup>

何子平<sup>1</sup>, 蒋忠诚<sup>2</sup>, 吕维莉<sup>1</sup>, 陈桂芬<sup>1</sup>, 蒙炎成<sup>1</sup>

(1. 广西农科院土壤肥料研究所, 南宁 530007; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所、国土资源部岩溶动力学开放研究实验室, 桂林 541004)

**摘要:**碳酸盐岩(CaCO<sub>3</sub>)—CO<sub>2</sub>(气)—水(H<sub>2</sub>O)三相组成的岩溶动力系统, 通过驱动环境元素的迁移, 可影响土壤的基本性质及营养元素的形态和转化。一方面土壤盐基离子(Ca、Mg、K、Na)的大量淋失, 另一方面岩溶作用产生的富钙环境使土壤体系中盐基获得补充, 形成偏碱的土壤环境, 并因此使石灰岩土的阳离子交换量和有机质含量较高, 但也降低了土壤铁、锰、磷、锌等元素的有效性, 最终对土壤肥力特征及演变产生深远的影响。

**关键词:**岩溶动力; 石灰岩土; 肥力特征

中图分类号:P642.25;S158 文献标识码:A

## 0 引言

土壤是在一定时间和区域地形条件下母质与生物、气候等因素及土体内部, 进行物质与能量交换中发生、发展的。岩溶环境的独特性, 赋予了石灰岩土独特而复杂的成土过程, 虽然成土机理至今尚未完全清楚, 多数人认为石灰岩土是由碳酸盐岩被溶蚀后不溶物残留风化堆积的结果<sup>[1,2]</sup>, 也有人认为是溶蚀交代的结果<sup>[3]</sup>。不管怎样, 岩溶作用对石灰岩土的形成和演变产生了深远的影响已经成为共识。1993年, 袁道先提出了岩溶动力学概念, 其核心内容为碳酸盐岩(CaCO<sub>3</sub>)—CO<sub>2</sub>(气)—水(液)三相的动态平衡过程<sup>[4]</sup>, 岩溶动力系统的运行及与环境因子相互作用下驱动了石灰岩土壤环境元素的迁移<sup>[5]</sup>, 最终影响土壤肥力特征。本文试图通过典型地点的研究, 具体探索岩溶动力、环境因子对石灰岩土肥力特征的影响, 为岩溶区土壤资源的合理开发利用与保护, 重建脆弱的石山生态提供参考。

## 1 研究地点背景和研究方法

本文的研究分别在岩溶地质研究所所属的桂林

试验场和广西马山弄拉两个研究基地内进行。桂林试验场的母岩为泥盆系上统融县组上段(D<sub>3r</sub>)灰岩, 马山弄拉点的母岩为泥盆系中统东岗岭组中段(D<sub>2d</sub>)泥硅质的白云岩。分别于桂林试验场取典型土壤剖面样1个、马山弄拉点取典型土壤剖面样两个: 裸露坡地(下弄拉)和茂密植被下(兰电堂)。采样点的环境状况见表1。土壤类型均属棕色石灰土。本次研究采用野外监测和室内分析相结合的方法, 研究不同母岩、植被、气候环境下岩溶动力过程对土壤肥力特征的影响, 各项目按常规农化分析方法进行分析。

表1 采样点位置及主要岩溶环境状况

Tab. 1 Sampling sites and their main environmental conditions

采样点位置	岩性	年雨量 (mm)	年均温 (°C)	植被	土下20cm 空气CO <sub>2</sub> (%)
桂林试验场	石灰岩	1936	18.3	草灌木	0.8
上弄拉	白云岩	1700	19.8	草灌木	0.6
兰电堂	白云岩	1700	19.8	森林	0.9

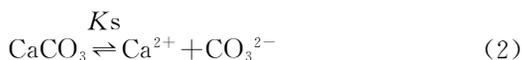
① 基金项目: 国家自然科学基金项目(30060022)、国土资源部科技项目(992029和DKD2002008)和岩溶动力学开放研究实验室资助作者简介: 何子平(1964—), 男, 硕士, 副研究员, 主要从事岩溶山区生态重建技术开发与研究。

收稿日期: 2001-07-27

## 2 岩溶动力条件对石灰岩土肥力特征的影响

### 2.1 不同岩溶动力条件对石灰岩土酸碱度、阳离子交换量、有机质的影响

土壤酸碱反应是在成土过程中受生物、气候、地质、水文等因素的综合作用所产生的重要属性。在岩溶环境下,岩溶动力系统对土壤 pH 变化起重要作用,在  $\text{CaCO}_3-\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$  的平衡体系中:



由①、②式可以推算出:

$$2\text{pH} = K + p\text{Ca} + p\text{CO}_2$$

式中:  $K$  为常数,  $K = p \frac{K_a}{K_s}$ 。这里,  $p$  为负对数;  $K_a$  为解离常数;  $K_s$  为溶度积常数。  $K$  的数值在 10~10.5 之间。

非岩溶区土壤,  $\text{CO}_2$  越高, 土壤 pH 值越低<sup>[6]</sup>。但在石灰岩土中, 由于土壤空气中的  $\text{CO}_2$  含量可消耗于  $\text{CaCO}_3$  的溶解, 因而土壤 pH 值往往比非岩溶区要高, 抑制了热带、亚热带土壤的酸性。以广西岩溶区为例,  $\text{CaCO}_3-\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$  三相动态平衡的结果, 岩溶土壤的 pH 值一般介于 6.0~8.0。

土壤有机质含量、阳离子交换量也与 pH 有密切

关系, 表 2 列出了这几项相关性质的结果及其与岩溶作用的关系。不过, 不同时期土壤 pH 的动态变化还有待进一步的研究。

土壤的离子交换现象, 是土壤胶体的属性, 是土壤的重要电化学性质之一, 阳离子交换量的大小, 可以作为评价土壤保水保肥能力的指标。石灰岩土由于有机质含量较高, 粘土矿物以伊利石、蛭石、水云母为主, 脱钾程度较同地带的红壤低, 因而阳离子交换量较高, 且交换性阳离子以  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  占绝对优势。另一方面, 岩溶环境、土壤层次不同, 阳离子交换量也有明显差异, 一般是森林环境高于裸露环境, 土壤表层高于下层。

土壤有机质是土壤肥力的一个重要指标。土壤有机质的分解和累积, 决定于生物气候、母质、地形等因素, 因而土壤有机质含量反映了一定的成土过程。岩溶动力条件下, 形成润湿、富钙的土壤环境, 微生物活动异常活跃, 残落的有机物不断分解形成腐殖质, 并与钙、镁离子络合, 形成高度缩合、稳定的腐殖质钙而获得积累, 因而石灰岩土的土壤腐殖质一般比红壤高, 三个研究点土壤表层的有机质含量分别达到 7.169%、3.511% 和 5.106%。在岩溶环境差异方面, 森林环境的土壤有机质含量明显大于草地(桂林点)的含量, 而草地环境的土壤有机质含量又大于裸露地的含量。在同一剖面, 表层有机质含量明显高于底层。

表 2 不同岩溶动力环境条件下土壤几项基本性质差异

Tab. 2 The differences between the major properties of soil in the different karst dynamic conditions

地点	土壤层次 (cm)	pH 值 (水)	有机质 (%)	阳离子交换量 (cmol/kg)	土壤 $\text{CO}_2$ (%)		泉水 pH 值	
					月份	土下 20cm 土下 50cm		
弄拉森林下	A 0~10	7.70	7.169	30.3	3 月	0.56	1.00	7.46
	AB 10~30	7.90	3.865	20.8	7 月	1.70	3.20	7.14
	B <sub>1</sub> 30~60	7.72	2.954	21.6	12 月	0.45	0.90	7.30
	B <sub>2</sub> 60~95	7.74	2.300	21.5				
弄拉裸露地	A 0~15	6.34	3.511	18.7				
	AB 15~20	6.44	2.807	17.4				
	B <sub>1</sub> 20~85	6.62	2.092	16.9				
	B <sub>2</sub> 85~135	7.01	1.707	16.9				
	B <sub>3</sub> 135~200	6.50	1.506	17.0				
桂林试验场	A 0~20	6.92	5.106	22.4				
	B <sub>1</sub> 20~40	7.06	2.659	19.9	2 月	0.1		7.60
	B <sub>2</sub> 40~60	7.08	1.789	17.4	6 月	1.8		6.80
	B <sub>3</sub> 60~80	6.67	0.819	17.0	12 月	0.5		7.20

弄拉点土壤  $\text{CO}_2$ 、泉水 pH 是 1998 年观测结果, 桂林点土壤  $\text{CO}_2$ 、泉水 pH 值据蒋忠诚(1999)结果整理。

## 2.2 岩溶动力系统对主要土壤养分特征的影响

由于独特的岩溶作用,赋予了石灰岩土特别的土壤养分特征。富钙环境一方面给植物提供了充足的 Ca、Mg 营养元素,促生了许多喜钙物种,另一方面也对其它养分元素迁移、积累产生了不同的影响,进而影响到土壤的肥力特性。

### 2.2.1 对氮、磷、钾养分的影响

氮是植物需要较多的必需营养元素,土壤中的氮含量与有机质含量呈明显的正相关,由于石灰岩土有机质一般含量较丰富,因而土壤中的氮含量也较高(表 3),其环境、剖面层次分异与有机质含量相一致。此外,由于有机质主要以稳定的腐殖质钙形式存在,易被养化部分较少,碳氮比值(C/N 比值)明显低于其它土壤。速效氮含量变化与全氮具有相同的规律。

磷是受岩溶作用影响非常明显的元素之一,富钙环境下,磷很容易转化成稳定的磷酸钙类化合物(如磷酸八钙、磷灰石等)而沉淀下来,此外,富铁铝化过程也很容易形成稳定的磷酸铁、磷酸铝化合物。因此,磷的迁移率很小,不易从剖面上层淋滤下移,一方面

形成剖面上层磷含量高于下层的分布特征(表 3),另一方面,尽管土壤全磷含量相对较高,但有效性却很低。从表 3 结果可以看出,所有样品的速效磷含量都在 5mg/kg 缺磷临界值以下。

碳酸盐岩是含钾很低的母岩,因此由岩溶作用形成的土壤含钾也很低,但由于钾的相对迁移能力(1.25)低于钙(3.00)和镁(1.30)<sup>[7]</sup>,加上在岩溶动力运行过程中易被植物吸收和粘土矿物的吸附,属于弱移动元素,使其在土壤中得以富集,比较表 3 中母岩和土壤的全钾含量可以看出这一点。至于弄拉裸露地的土壤全钾量明显高于弄拉森林下土壤的全钾含量,这可能与裸露地土壤的粘粒含量远高于森林下的有关。钾是植物需要量最大的元素之一,岩溶环境含钾量相对较低,生物大量吸收,粘土矿物的固定,使得石灰岩土的有效钾含量较低。从表 3 的结果可以看出,除弄拉森林下的表土速效钾含量(91.1mg/kg)高于 60mg/kg 的缺素临界值外,其余样品速效钾含量全部低于该临界值,缓效钾的含量也全部低于 300mg 的缺乏临界值。

表 3 不同环境土壤氮磷钾养分特征

Tab. 3 The contents of N, P and K in soil in different environment

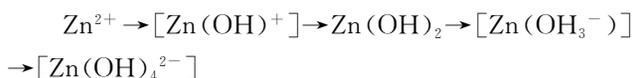
地点	层次 (cm)	氮		磷		钾		
		全氮 (%)	速效氮 (mg/kg)	全磷 (%)	速效磷 (mg/kg)	全钾 (%)	速效钾 (mg/kg)	缓效钾 (mg/kg)
弄拉森林下	A 0~10	0.489	256	0.072	4.8	0.88	91.1	92
	AB 10~30	0.317	151	0.057	2.1	0.86	44.2	102
	B <sub>1</sub> 30~60	0.273	114	0.048	1.4	0.88	35.2	193
	B <sub>2</sub> 60~95	0.253	92.8	0.049	1.4	1.05	36.3	197
	母岩(白云岩)			0.0031		0.020		
弄拉裸露地	A 0~15	0.252	126	0.066	1.7	1.86	49.6	137
	AB 15~20	0.234	95.2	0.062	1.6	1.86	40.9	128
	B <sub>1</sub> 20~85	0.198	69.0	0.055	1.4	1.95	43.4	123
	B <sub>2</sub> 85~135	0.178	55.0	0.050	1.9	1.97	48.6	130
	B <sub>3</sub> 135~200	0.178	47.6	0.044	1.0	2.04	47.7	89
	母岩(白云岩)			0.0031		0.020		
桂林试验场	A 0~20	0.278	189	0.050	1.6	1.04	43.1	133
	B <sub>1</sub> 20~40	0.188	98.4	0.042	2.6	1.16	31.4	121
	B <sub>2</sub> 40~60	0.191	63.4	0.032	2.1	1.26	34.2	122
	B <sub>3</sub> 60~80	0.121	58.2	0.030	2.5	1.42	37.9	128
	母岩(灰岩)			0.0044		/		

### 2.2.2 对微量元素的影响

石灰土土壤中的微量元素主要来自母岩<sup>[8]</sup>。高温多雨环境下产生的土壤富铁铝化作用,使土壤的铁锰含量和有效性都较高,植物很少出现缺铁、锰现象,所以平常生产上很少予以考虑。但在岩溶动力作用所产生的富钙环境影响下,铁、锰的有效性要比其它土壤低得多,且吸收后仍可受植物体内丰富的重碳酸钙影响而降低其活性,从而有可能发生缺 Fe、Mn 症状,因此,pH 值较高的石灰岩土,尽管铁锰含量较高,植物仍很有可能发生缺 Fe、Mn 现象。表 4 的结果也表明,尽管土壤中的全铁含量很高,但有效铁的含量却很低,几乎都在 20mg/kg 以下。锰也有相似的趋势。

弄拉、桂林的三剖面的全锌含量在 218 ~

310mg/kg 之间(表 4),远大于全国土壤锌背景值(68.0mg/kg)。但从表 4 的结果看,由于岩溶动力作用对其有效性具有明显的影响,除弄拉森林下土壤表层有效锌含量(1.82mg/kg)达到中等水平外,其余各样品的有效锌含量都在 0.5mg/kg 这一铁锌临界水平以下。这是由于 Zn 的活度受 pH 严重制约的结果。当溶液 pH 由酸变碱时,Zn 形态也不断变化<sup>[9]</sup>为:



当 pH=3~4 时,主要为  $\text{Zn}^{2+}$ ;

pH=6~8 时,以低溶解度的  $\text{Zn}(\text{OH})$  存在;

pH>10 时,Zn 以络合态的阴离子形式出现。

表 4 不同环境土壤的主要微量元素养分(mg/kg)

Tab. 4 The content of trace elements in soil in different environment

地点	层次 (cm)	铜		锌		铁		锰	
		全量	速效	全量	速效	全量	速效	全量	速效
弄拉森林下	A 0~10	19.4	0.68	263	1.82	7.898	19.1	1143	52.5
	AB 10~30	20.1	0.49	284	0.49	8.697	15.0	1100	23.6
	B <sub>1</sub> 30~60	21.3	0.39	292	0.28	9.249	14.6	1045	18.3
	B <sub>2</sub> 60~95	23.3	0.34	286	0.25	9.062	12.6	904	11.9
	母岩(白云岩)	1.1		14.6		0.0975		29	
弄拉裸露地	A 0~15	26.6	0.58	293	0.48	8.516	21.6	801	47.5
	AB 15~20	28.4	0.33	303	0.18	9.702	19.4	624	15.9
	B <sub>1</sub> 20~85	29.7	0.21	258	0.12	10.24	16.2	588	6.8
	B <sub>2</sub> 85~135	31.7	0.30	305	0.30	10.047	12.2	594	14.9
	B <sub>3</sub> 135~200	34.7	0.34	310	0.27	9.957	12.4	632	13.8
母岩(白云岩)	1.1		14.6		0.0975		29		
桂林试验场	A 0~20	22.8	0.28	218	0.12	5.965	11.5	957	34.2
	B <sub>1</sub> 20~40	21.7	0.20	222	0.10	6.003	9.3	794	16.9
	B <sub>2</sub> 40~60	23.4	0.18	225	0.09	6.460	9.8	757	18.3
	B <sub>3</sub> 60~80	26.1	0.10	241	0.10	7.680	8.2	1179	33
	母岩(灰岩)	10.0		100		0.0500		100	

在岩溶动力作用下,土壤的 pH 值多在 6~8 之间,进入土壤溶液的 Zn 很容易形成氢氧化锌沉淀,并易分解为氧化锌,形成碳酸锌、硅酸锌等难溶化合物<sup>[10]</sup>,这也是为什么石灰岩土尽管全锌含量不低,却容易出现缺锌的原因。有关石灰岩土的锌形态及有效性方面问题将作后续研究。

弄拉、桂林三剖面的土壤全铜含量在 19.4 ~ 34.7mg/kg 之间,略高于全国平均值 20.7mg/kg。与锌相比,pH 对铜有效性的影响要小,通常当 pH 在

5.0~7.0 之间时,铜的有效性较高,因而岩溶动力作用引起缺铜的可能性要小得多。从表 4 的结果可以看出,除桂林点的底层土壤有效铜较低外,其余各样品的土壤有效铜均在 0.2mg/kg 的缺铜临界值以上。

### 3 结 论

(1) 由碳酸盐岩(CaCO<sub>3</sub>)—CO<sub>2</sub>(气)—水(H<sub>2</sub>O)三相组成的岩溶动力系统的运行构成岩溶环境成土

过程的重要组成部分,对石灰岩土的肥力特征及演变产生显著而独特的影响。岩溶动力系统的运行,一方面土壤盐基离子(Ca、Mg、K、Na)的大量淋失,另一方面岩溶作用产生的富钙环境使土壤体系中盐基获得补充,形成富钙偏碱的土壤环境。

(2)不同岩溶动力条件对土壤基本性质、元素迁移及营养元素的有效性的影响程度具有显著的差异。岩溶动力作用大大降低了土壤铁、锰、磷、锌的有效性,尤其是磷、锌,尽管这两种元素在土壤中的含量相对都较高,但有效含量很低,均处于缺素的临界水平以下。

(3)岩溶动力作用影响土壤pH值的变化,且有较强的缓冲性,使土壤pH值多在6~8之间变化。岩溶作用产生的富钙环境,使石灰岩土的阳离子交换量较高,且腐殖质与钙、镁离子络合形成高度缩合、稳定的腐殖质钙而获得积累,形成较高的土壤有机质含量。

岩溶动力作用对营养元素迁移、转化的时间、空间的动态变化的影响以及如何提高元素的有效性还

有待今后的进一步的深入研究。

#### 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] 广西土壤肥料工作站编著. 广西土壤[M]. 南宁: 广西科技出版社, 1994.
- [3] 李景阳等. 试论碳酸盐岩风化壳与喀斯特成土作用[J]. 中国岩溶, 1991, 10(1): 29—37.
- [4] 袁道先. 碳循环与全球岩溶[J]. 第四纪研究, 1993, (1): 1—6.
- [5] 蒋忠诚. 岩溶动力系统中的元素迁移[J]. 地理学报, 1999, 54(5): 438—443.
- [6] 朱祖祥. 土壤学[M]. 北京: 农业出版社, 1983.
- [7] 王云等. 土壤环境元素化学[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1995.
- [8] 蒋忠诚. 广西弄拉的云岩环境元素的岩溶地球化学迁移[J]. 中国岩溶, 1997, 16(4): 304—311.
- [9] 卢锁富. 土壤中的锌及其化学行为[J]. 土壤学进展, 1990, 18(2): 1—6.
- [10] 刘武定主编. 微量元素营养与微肥施用[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995.

## EFFECT OF KARST DYNAMIC SYSTEM ON FERTILITY OF TYPICAL CALCAREOUS SOILS

HE Zi-ping<sup>1</sup>, JIANG Zhong-cheng<sup>2</sup>, LU Wei-li<sup>1</sup>, CHEN Gui-fen<sup>1</sup>, MENG Yan-cheng<sup>1</sup>

(1. Institute of Soil and Fertilizer, GAAS, Nanning 530007, China; 2. Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin 541004, China)

**Abstract:** Element migration in a karst dynamic system in the cycling process of CO<sub>2</sub>(gas) -Water (liquid) -Carbonate rock (solid) three phases has a profound impact on soil fertility and the state and transformation of nutrient elements. On the one hand, some salt base ions in soil, such as Ca, Mg, K, Na, are leached largely. On the other hand, the Calcium-rich environment, formed in karst processes, makes salt base ions in the soil system replenish frequently and result in alkaline soil, which not only leads to higher quantity of cation exchange and large content of organic materials in soil, but also reduces the validity of the elements, such as Fe, P, Zn and so on. Therefore, the karst dynamic system plays an important role in the fertility and evolution of soil.

**Key words:** Karst dynamic system; Calcareous soil; Soil fertility