

# 施用农肥对岩溶溶蚀作用的影响 及其生态环境意义

刘长礼 张 云 宋 超 侯宏冰 王秀艳 姜建梅 王晶晶 裴丽欣

(中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061)

**摘要:**土壤下伏碳酸盐岩溶蚀作用研究对岩溶区成土作用及大气中  $\text{CO}_2$  影响意义重大。施肥改变了土壤的生物地球化学场,进而会影响岩溶区的岩溶动力学过程及碳循环。本文在贵州贵阳碳酸盐岩土壤剖面不同深度,埋设白云石、石灰石试片,进行了野外溶蚀试验,观测了试片溶蚀量、土壤  $\text{CO}_2$ 、土壤 pH 及其他如土壤含水量、土壤矿物与化学成分、土壤水化学成分等影响因素。结果表明:(1)施用农家肥降低了碳酸盐岩的溶蚀速率,石灰石的溶蚀速率降低了 10.48%~53.90%,平均 25.51%;白云石的溶蚀速率降低了 25.0%~65.69%,平均 39.45%。同样条件下土壤中石灰石溶蚀量比白云石大。(2)施用农家肥降低了当地的碳酸盐岩成土速度,降低了 35.77%~37.27%。(3)施肥土壤更利于  $\text{CO}_2$  的产生;施肥剖面土壤中  $\text{CO}_2$  浓度比空白剖面  $\text{CO}_2$  浓度高 22.52%~198.87%,平均高 93.94%;施肥剖面地面  $\text{CO}_2$  通量比空白剖面地面  $\text{CO}_2$  通量高 67.64%。(4)施用农家肥减少了土壤对大气  $\text{CO}_2$  的沉降量,在贵州贵阳地区,减少的大气  $\text{CO}_2$  沉降量为 25.50%~39.45%;间接地对岩溶水  $\text{CO}_2$  汇的作用产生了抵消作用,在贵州贵阳地区,抵消作用为 59.41%~62.73%。

**关键词:**施用农肥;溶蚀作用;碳酸盐岩;成土作用; $\text{CO}_2$  汇源关系

**中图分类号:**P66 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2009)06-1395-10

大气  $\text{CO}_2$  浓度的增加,使全球不断变暖,直接威胁着人类生存环境,已成为全球各国政府及学术界日益关注的问题。碳酸盐岩地区石漠化是关系中国岩溶石山地区经济与生态环境可持续发展的重大问题<sup>[1-16]</sup>。开展土壤中  $\text{CO}_2$  气体对岩溶的驱动作用、土壤  $\text{CO}_2$  与大气  $\text{CO}_2$  的源汇关系、碳酸盐岩地区土壤的成因与成土速率等方面的研究,对  $\text{CO}_2$  减排、碳酸盐岩山地石漠化防治及耕地保护等都具有极其重要的意义,近年来,这方面的研究也取得了大量研究成果。但针对人类施肥活动对碳酸盐岩溶蚀作用及其对土壤  $\text{CO}_2$  与大气  $\text{CO}_2$  的源汇关系影响的研究相对欠缺,而这样的成果对于碳酸盐岩地区耕地保护及石漠化预防治理都具有特别重要的意义。本文报道了施用农家肥对土壤下碳酸盐岩溶蚀作用的影响方面的研究成果,并对其生态环境意义进行了

初步探讨。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究地区

位于贵州省贵阳市花溪区,为碳酸盐岩地层,其上发育了厚 0~1.5 m 的碳酸盐岩风化残积土,代表黔中碳酸盐岩地区,年平均气温 14.9℃,年平均降水量 1229 mm,雨量充沛,属于典型亚热带喀斯特地区。

### 1.2 研究方法

采用现场试验观测法。在同一块耕地上分别建立两个相距 50 cm 的观测剖面:一个用于观测土壤施用农家肥后不同深度的碳酸盐岩试片溶蚀及其相关影响因素,另一个用于观测不施用农家肥时不同深度的碳酸盐岩试片溶蚀及其相关影响因素。施用的农家肥料为马粪、牛粪等混合液体,其化学成分如

收稿日期:2009-03-02 改回日期:2009-07-08

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)“西南喀斯特山地石漠化与适应性生态系统调控”(2006CB403200)资助。

作者简介:刘长礼,男,1963年生,博士,研究员,长期从事生态地质环境研究;E-mail:liuchangli@vip.com。

表 1 所示。施用强度与频率与当地农民给农地施肥一致。两个剖面在试验前土层地球化学特性、生物化学特性、土壤性状等完全相同。

1.2.1 试验观测场地

试验场地位于贵阳市花溪区桐木岭贵州省委党校西南角,为农作物(轮种白菜、玉米、辣椒等)种植地。土壤为白云岩风化残积土。土壤剖面土质性状如表 2,土壤化学成分如表 3 所示。

试验前土壤剖面如图 1,从右至左:从上到下第一列红色管子为埋设的土壤 CO<sub>2</sub> 导管,中间一列为土壤水取样器,最左一列为埋设在土壤中试片的标识线。

1.2.2 试验观测项目

(1)试片溶蚀观测

试片为石灰岩与白云岩,其化学成分如表 4 所示,其矿物成分分别为泥晶方解石(含量小于 100%)和细晶白云石(含量等于 100%)。试验前试片规格为

2 cm×1 cm×0.5 cm,在土壤不同深度埋设各 3 片。分别在施用农家肥与未施用农家肥 2 个剖面上 6 个不同深度土壤中埋设作溶蚀观测。试片在埋入前经过 1 小时 85℃烘干,用万分之一精度的天平称重。于 2007 年 8 月埋入,并分别在 2007 年 12 月、2008 年 7 月及 2008 年 12 月 3 次取出。取出后小心清洗干净,并经过 1 小时 85℃烘干,用万分之一精度的天平称重,计算溶蚀量。

(2)土壤孔隙 CO<sub>2</sub> 及地面 CO<sub>2</sub> 通量观测

土壤孔隙 CO<sub>2</sub>、土壤 CO<sub>2</sub> 通量等采用现场观测,根据天气变化情况每月观测一次。土壤孔隙 CO<sub>2</sub> 通过埋设塑料导管,直接用美国生产的 ATX620 气体检测仪测量;土壤 CO<sub>2</sub> 通量用静态气室-碱吸收法测试。

(3)影响因素观测

对溶蚀作用及土壤 CO<sub>2</sub> 影响比较大的因子主要包括土壤 pH、土壤温度、土壤矿物及化学成分、

表 1 农家肥的化学成分

Table 1 Chemical composition of farm manure

总氮(N)/%	氨态氮/%	硝态氮/%	磷(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )含量/%	硫含量/%	有机质含量/%	腐植酸含量/%	pH 值
1.5	0.14	0.17	0.4	0.1	41	13	8.0

表 2 试验场土壤剖面的土质性状

Table 2 Soil properties of the soil profile at the experiment site

深度/cm	土壤质地	容重/g·cm <sup>-3</sup>	含水量/%	pH	备注
0~50	黑棕色耕作土,较疏松 黄褐色粘土,土中含有极少量直径 2~	1.20	67.31	7.18	在同一土壤剖面设 2 个观测剖面。其中一个剖面保持原来土壤不变,作为耕地
50~75	10 mm 的易碎石块(碎后成白色粉末), 微裂隙不发育,比较致密 黄色粘土,土中含有较多直径 2~20	1.32	65.56	5.46	施肥观测用;另一个剖面则将原来上部 0~50 cm 的耕作土全部用附近林地中未耕作的表层土置换掉,整个剖面不施
75~125	mm 的易碎石块(碎后成白色粉末),微 裂隙比上层发育,比较致密	1.40	64.21	4.76	肥,以供对比观测用
125~140	白云岩风化层				140cm 以下为白云岩基岩

表 3 空白土壤化学成分

Table 3 Chemical composition of soil in the control profile

深度 cm	有机 质(%)	NH <sub>4</sub> -N (mg/l)	NO <sub>3</sub> -N (mg/l)	P (mg/l)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	S (mg/l)	Fe (mg/l)
20	0.66	4.1	24	1.9	137.7	1787.8	458.3	124.5	20.9
36	1.37	5.8	52.8	8.8	76	2924.3	800.1	47.6	40.1
50	0.98	6.1	19.1	1.7	52.5	2235.4	589.4	145.6	29.8
70	0.89	5.6	50.9	2.1	51.8	1251.1	354.7	231	35
90	0.93	5.8	111.8	1.9	44.7	885.8	256	92	40
105	0.86	6.1	69.6	2.4	52.6	774.2	233.1	92.6	33.4

土壤孔隙水化学成分、土层的物理力学指标、肥料组分及其 pH 等。

土壤 pH 和土壤温度等现场观测, 土壤 pH 每月测试一次。土壤温度每季度观测一次(每次分早、中、晚观测)。土壤 pH 用美国生产的土壤原位 pH 计(型号:IQ Ph6IQ)测量, 土壤温度用地温仪观测。土壤矿物及化学成分、土层的物理力学指标、土壤孔隙水化学成分、肥料组分等分别送往具有测试资质的分析机构测试, 保证测试数据准确性, 每季度测试一次。

试片重量、试片埋设、观测深度及土壤 pH 值等情况详见图 1 与表 5。

## 2 试验观测结果与分析

### 2.1 试验观测结果

对试验观测数据进行整理、分析与计算, 得到如表 6 及图 2~7 所示的结果与规律。

### 2.2 试验观测结果揭示的规律

(1)土壤空白剖面溶蚀量明显大于施肥剖面, 表明施肥抑制了碳酸盐岩的溶蚀作用

从表 5 及图 2~3 可看出, 同一剖面上, 相同深度的石灰石溶蚀量比白云石大; 施肥与空白剖面对比,

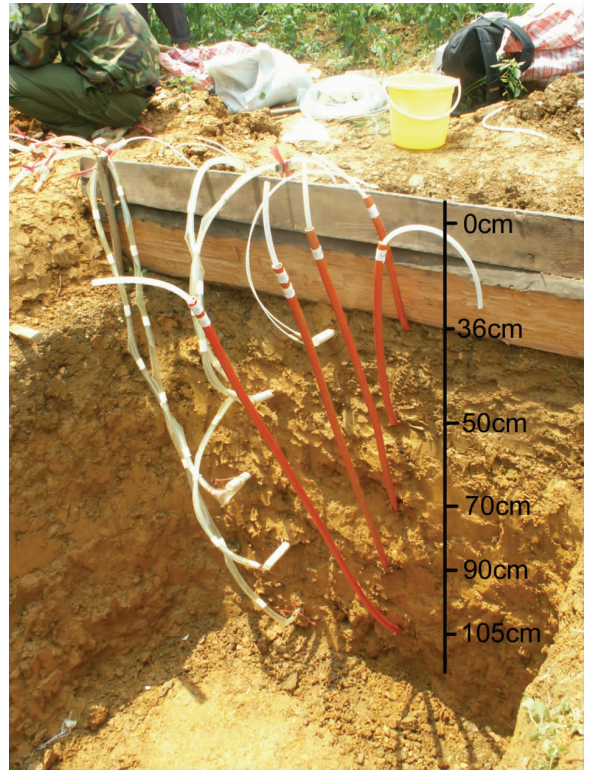


图 1 剖面土质及其影响因素观测  
Fig.1 Observation of profile soil property and its affecting factors

表 4 岩石试片化学成分(%)

Table 4 Chemical composition of rock tablets (%)

岩样	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	灼失量	总和
石灰岩	2.00	0.08	0.03	0.01	0.24	53.96	0.61	0.23	0.22	0.006	0.01	0.43	0.14	41.88	99.28
白云岩	1.58	0.53	0.01	0.06	0.10	31.59	19.73	0.08	0.12	0.011	0.00	0.38	0.08	45.56	99.37

表 5 试片及其影响因素在土壤剖面的埋设与观测情况

Table 5 The burial and observation situation of rock tablet and its affecting factors in soil profile

埋设深度/cm	土壤 CO <sub>2</sub> 导管埋深/cm	土壤水取样器埋深/cm	试片原始平均重量/g		年平均含水量/%		平均 pH 值	
			石灰石	白云石	未施肥剖面	施肥剖面	未施肥剖面	施肥剖面
20	20	20	2.7725	2.9052	64.25	62.21	7.09	7.46
36	36	36	2.8316	2.9724	69.92	68.44	7.06	7.52
50	50	50	2.7129	2.8781	71.04	67.63	7.42	7.61
70	70	70	2.6902	2.8937	62.27	62.68	5.09	7.06
90	90	90	2.8009	2.9330	64.05	64.67	5.02	7.03
105	105	105	2.7363	2.9079	64.44	65.49	4.78	5.54

表 6 试片 1 年溶蚀量及其影响因素在土壤剖面的观测结果

Table 6 The observation of annual dissolution amount of limestone and dolomite tablets and soil CO<sub>2</sub>

埋设深度 /cm	试片 1 年溶蚀量平均值/g				白云石试片溶蚀量差及百分比		石灰石试片溶蚀量差及百分比		土壤 CO <sub>2</sub> 浓度平均值/ μmol/mol			
	空白剖面		施肥剖面		施肥后减少溶蚀量/g	减少百分比/%	施肥后减少溶蚀量/g	减少百分比/%	空白剖面	施肥剖面	施肥后增加量	
	白云石	石灰石	白云石	石灰石							增加量	增加百分比/%
20	0.0239	0.0629	0.0082	0.0290	0.0157	65.69	0.0339	53.90	707	2113	1406	198.87
36	0.0116	0.0354	0.0087	0.0250	0.0029	25.00	0.0104	29.38	1883	3685	1802	95.70
50	0.0123	0.0271	0.0079	0.0170	0.0044	35.77	0.0101	37.27	1447	3063	1616	111.68
70	0.0610	0.0886	0.0273	0.0690	0.0337	55.25	0.0196	22.12	1363	1670	307	22.52
90	0.0526	0.1031	0.0369	0.0923	0.0157	29.85	0.0108	10.48	1153	2300	1147	99.48
105	0.0763	0.1457	0.0549	0.1125	0.0214	28.05	0.0332	22.79	2030	3850	1820	89.66
平均	0.03962	0.07713	0.02398	0.05747	0.01563	39.45	0.01967	25.51	1667	3233	1566	93.94

注: 测量的大气 CO<sub>2</sub> 浓度为 190 μmol/mol。

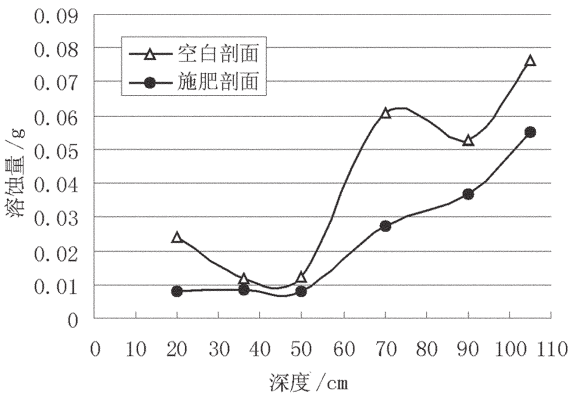


图 2 施肥与空白剖面白云石溶蚀量对比

Fig.2 A comparison of the dolomite dissolution in manure profile with that in control profile

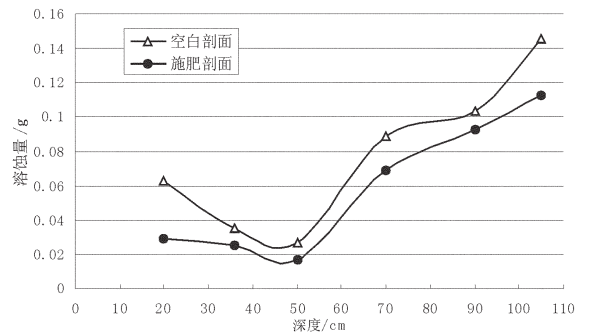


图 3 施肥与空白剖面石灰石溶蚀量对比

Fig.3 A comparison of the limestone dissolution in manure profile with that in control profile

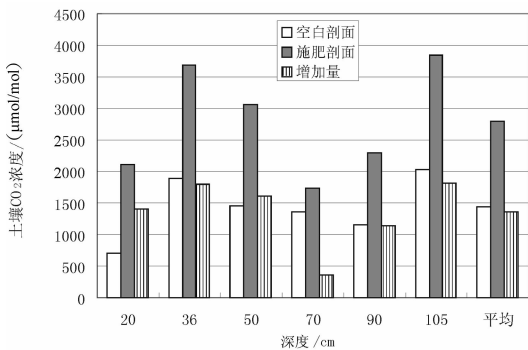


图 4 施肥与空白剖面土壤 CO<sub>2</sub> 浓度及其对比

Fig.4 A comparison of the CO<sub>2</sub> concentration in manure profile with that in control profile

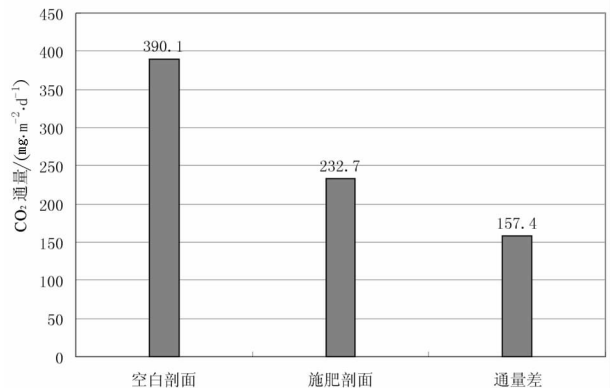


图 5 施肥与空白剖面地面 CO<sub>2</sub> 通量对比

Fig.5 A comparison of the CO<sub>2</sub> flux in manure profile with that in control profile

表 7 施肥剖面土壤化学成分

Table 7 Chemical composition of soil in manure profile

深度 cm	有机质 (%)	NH <sub>4</sub> -N (mg/l)	NO <sub>3</sub> -N (mg/l)	P (mg/l)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	S (mg/l)	Fe (mg/l)
20	1.53	7.1	90.5	19.9	220.6	2869.9	585.7	41.1	41.5
36	1.53	5.6	54.4	12.2	147.6	2436.4	706.7	31.8	44
50	1.09	5.1	8.1	0.6	51	2428.6	601.3	49.3	29.3
70	1.1	4.1	3.5	0.4	46.1	1762.1	543.8	91.2	27.7
90	0.86	4.6	4.4	1.6	53.9	1723.8	595.7	101.8	26.4
105	1.12	3.1	16.4	1.1	43.2	1401.3	443.9	169.3	32

空白剖面上石灰石或白云石的溶蚀量都比施肥剖面相应岩石在相应深度的溶蚀量大,石灰石大 10.48%~53.89%,平均 25.51%;白云石大 25.0%~65.69%,平均 39.45%。

(2) 施肥土壤更利于 CO<sub>2</sub> 的产生

表 5 数据、图 4~5 表明,施肥剖面土壤中 CO<sub>2</sub> 浓度及地面 CO<sub>2</sub> 通量明显大于空白剖面 CO<sub>2</sub> 浓度及地面 CO<sub>2</sub> 通量,施肥土壤剖面不同深度 CO<sub>2</sub> 浓度大于相应深度空白剖面的 CO<sub>2</sub> 浓度,一般大 22.52%~198.87%,平均 93.94%。施肥剖面地面 CO<sub>2</sub> 通量明显比空白剖面地面 CO<sub>2</sub> 通量大 67.64%。

2.2 原因分析

(1) 施肥后土壤 pH 升高是碳酸盐岩溶蚀作用受到抑制的主要原因。

本研究结果(表 5 及图 6~7)显示,土壤中 CO<sub>2</sub> 含

量增加并不意味着溶蚀性增大,原因是土壤空隙中的 CO<sub>2</sub> 只有溶于水才能对溶蚀起作用,因此,土壤 CO<sub>2</sub> 的绝对浓度并不直接决定碳酸盐岩的溶蚀速率,相关研究也得出同样的结论<sup>[2,12]</sup>。

表 5 数据表明,土壤施肥后相应深度的 pH 值升高,这可能是由于土壤施肥后磷的升高(如表 3 和表 7 所示),致使磷酸阴离子与矿物表面 OH<sup>-</sup>基交换产生 OH<sup>-</sup>离子(如方程式(1)(2)所示),从而提高 pH<sup>[13]</sup>。碳酸盐岩溶蚀机理表明<sup>[14]</sup>,pH 升高,会使 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 的活度升高,碳酸盐岩的溶解度降低。

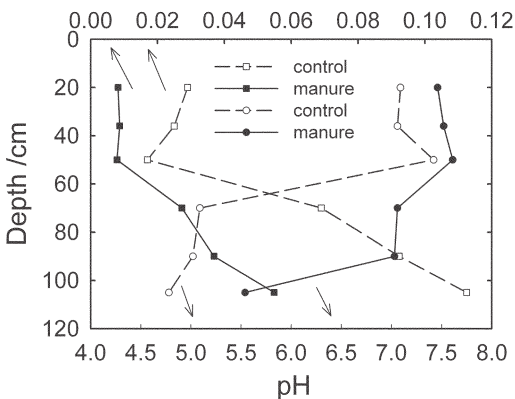
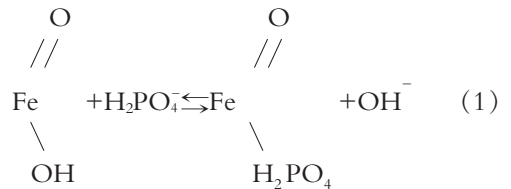


图 6 石灰岩年溶蚀量与 pH 的关系图

Fig.6 The relationship between the dissolution of limestone and soil pH

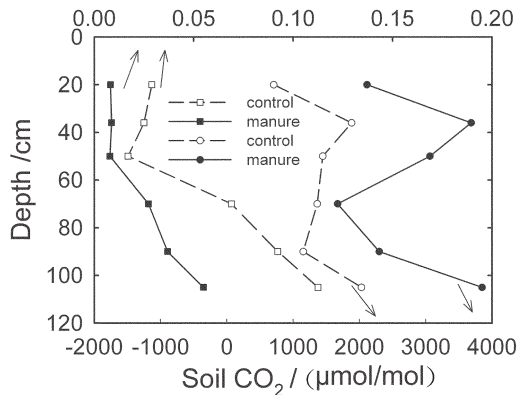
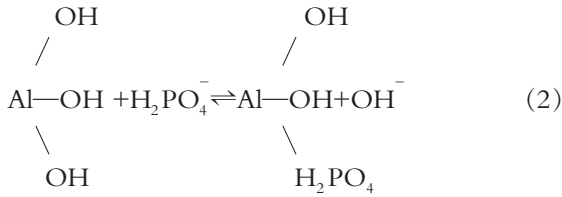
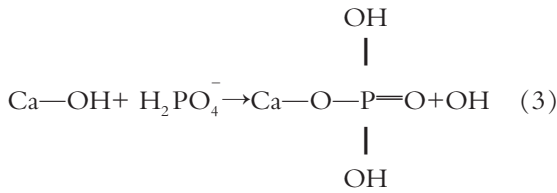


图 7 石灰岩溶蚀量与土壤 CO<sub>2</sub> 浓度的关系

Fig.7 The relationship between the dissolution of limestone and soil CO<sub>2</sub>



此外,石灰土对磷酸阴离子的吸附也很常见,吸附方程式如(3)所示,磷酸根先吸附在碳酸盐岩表面,形成磷酸钙镁化合物,沉淀于碳酸盐岩试片表面<sup>[13]</sup>。这也可能是施肥抑制碳酸盐岩溶蚀作用的原因之一。



因此,施肥致使土壤 pH 升高以及磷酸盐的抑制作用可能是碳酸盐岩溶蚀作用受到抑制的主要原因,其深层次的机理还有待进一步的研究。

(2)土壤施肥后有机质增多,有机碳含量增高,经微生物降解后使土壤 CO<sub>2</sub> 浓度增大;土壤空隙中 CO<sub>2</sub> 越多,释放到地面的 CO<sub>2</sub> 通量也越多。

### 3 土壤施用农家肥对溶蚀作用影响的生态环境研究意义

#### 3.1 可用于研究施用农家肥对碳酸盐岩地区成土作用的影响,便于耕地保护与石漠化预防措施制定

##### 3.1.1 碳酸盐岩成土速率极其缓慢

中国是全球碳酸盐岩分布面积最大的碳酸盐岩分布区,仅南方 8 省市碳酸盐岩出露面积就达 51.9 km<sup>2</sup><sup>[15]</sup>,形成碳酸盐岩石灰土壤耕地面积 1 4053.2 万亩<sup>[16]</sup>。碳酸盐岩地区石漠化与碳酸盐岩成土作用是关系当地经济与生态环境持续发展的两个重大问题,而碳酸盐岩成土作用直接与碳酸盐岩地区石漠化调控密切相关。因此,碳酸盐岩成土作用多年来受到许多学者的关注<sup>[3-11,17-21]</sup>。

目前大多数学者普遍赞同溶蚀——原地残积说<sup>[3-11,17,20]</sup>,认为喀斯特地区的土壤主要是由于碳酸盐岩经溶蚀后酸不溶物残留堆积而成。近 20 年来研究成果表明,碳酸盐岩成土速度是极其缓慢的,在纯度较高的碳酸盐岩出露的喀斯特地区研究结果<sup>[7,17,20,26]</sup>表明,岩石中酸不溶物的含量较少,一般在 10%以

下,有的甚至不到 1%,平均为 3.9%;在地处亚热带的广西贵县,每形成 1 m 厚的土壤,需要剥蚀掉约 25 m 厚的碳酸盐岩;杨明德等<sup>[18]</sup>研究显示,喀斯特地区碳酸盐岩的平均风化速率为 61.8 mm/ka,成土速率为 0.31~2.47 mm/ka;万国江等<sup>[19]</sup>在黔中喀斯特地区的研究发现,碳酸盐岩土层的物理侵蚀速率为 0.003g/(cm<sup>2</sup>·a)(约 11.1 mm/ka),而风化残余物的生成速率却小于 0.001 g/(cm<sup>2</sup>·a)(约 3.7 mm/ka)。王世杰等<sup>[20]</sup>在黔中、黔北、黔西、湘西 5 个代表性剖面研究表明,泥质含量较高的灰岩酸不溶物含量为 11%~39%,形成 1 m 厚的残积土,仅需要溶蚀 2~5 m 碳酸盐岩,所需时间为 28~84 ka。泥质含量分别为 0.625%及 4%的白云岩,形成 1 m 残积土所需溶蚀的碳酸盐岩层厚度和时间分别为 79 m 和 790 ka 及 13 m 和 220 ka。

##### 3.1.2 土壤施用农家肥抑制碳酸盐岩溶蚀,可用减少的溶蚀量估算对成土作用的影响

由上可知,碳酸盐岩风化成土是一个极其缓慢的过程,成土速率与气候、碳酸盐岩岩石性质、碳酸盐岩可溶物含量直接相关。那么,碳酸盐岩成土与人类耕作的施肥有无关系,施用农家肥料对碳酸盐岩成土有多大的影响呢?本研究成果能回答一些问题。

施用农家肥料对碳酸盐岩成土作用的影响程度可用单位时间“施肥后碳酸盐岩单位面积上减少的成土量”除以单位时间“未施肥单位面积上的成土量”来计算,用 β 来表示。经推导,β 可用下式计算:

$$\beta = (G_0 - G_1) / G_0 \times 100\% \quad (1)$$

式中, G<sub>0</sub>——未施肥剖面碳酸盐岩单位面积上溶蚀量, g/cm<sup>2</sup>; G<sub>1</sub>——施肥剖面碳酸盐岩单位面积上溶蚀量, g/cm<sup>2</sup>。

利用剖面上不同深度的观测数据及上述公式(1),可以估算不同覆盖厚度地区土壤施用农家肥对碳酸盐岩成土作用影响程度,结果如表 7。

施用农家肥对碳酸盐岩成土作用影响,不仅受到土壤 pH 影响,还受到土层性状、含水量、渗透性等因素的制约。从表 7 可看出,施用农家肥对碳酸盐岩成土作用影响较大,岩性不同影响程度不一样。施肥后白云岩的成土速率降低了 25%~65.7%,石灰岩成土速率降低了 10.48%~53.89%。

在西南碳酸盐岩地区,绝大部分地区土壤厚度 50 cm 以内<sup>[11,18]</sup>,这也是耕作层的厚度。因此对 50 cm

处白云岩与石灰岩成土的影响度分别为 35.77%、37.27%,这两个数据具有区域性代表性。或许可以认为,在一般西南碳酸盐岩出露耕作地区,施用农家肥会使碳酸盐岩成土作用降低 35.77%~37.27%。

因此施用农家肥对碳酸盐岩成土作用影响较大。调整耕作与施肥方式也许是使土壤保持活力及调控生态的选择之一。

### 3.2 可用于揭示施肥对土壤 CO<sub>2</sub> 与大气 CO<sub>2</sub> 源汇关系的影响,为制定措施削减 CO<sub>2</sub> 排放提供依据

#### 3.2.1 施肥土壤中碳酸盐岩溶蚀与大气中 CO<sub>2</sub> 的源汇关系

岩溶过程是地球表面消耗大气 CO<sub>2</sub> 的过程<sup>[21-22]</sup>,对于研究全球碳循环及气候变化具有极其重要的意义<sup>[23-25]</sup>。中国许多岩溶学者对土壤中 CO<sub>2</sub> 气体对岩溶的驱动作用及土壤 CO<sub>2</sub> 与大气 CO<sub>2</sub> 的源汇关系进行了大量探索<sup>[26-32]</sup>,但施用农肥土壤中碳酸盐岩溶蚀与大气中 CO<sub>2</sub> 源汇关系影响还未见到。

碳同位素示踪研究表明,在碳酸盐岩地区土壤系统中,大气 CO<sub>2</sub> 对土壤 CO<sub>2</sub> 具有较大贡献<sup>[31]</sup>,相当部分大气 CO<sub>2</sub> 会进入土壤与土壤交换 CO<sub>2</sub>。由于土壤中的 CO<sub>2</sub> 是大气中的数十倍甚至近百倍<sup>[26]</sup>,本次试验场测试结果表明,土壤中 CO<sub>2</sub> 为 707~3850 μmol/mol,是大气 CO<sub>2</sub> 的 4~20 倍(大气 CO<sub>2</sub> 为 190 μmol/mol),因此总体上是土壤 CO<sub>2</sub> 溢出地表进入大气。土壤中高浓度 CO<sub>2</sub> 会有部分进入土壤水中使土壤水的 pH 下降,从而使更多的碳酸盐岩被溶蚀,因此,碳酸盐岩通过溶蚀作用吸收 CO<sub>2</sub>,使土壤系统中逃逸出地表的 CO<sub>2</sub> 减少,碳酸盐岩是大气 CO<sub>2</sub> 一个重要的汇。

当土壤条件发生改变(如施用农家肥)使土壤水的 pH 升高,降低了土壤中碳酸盐岩溶蚀作用,减少了碳酸盐岩溶蚀量,从而减少对土壤 CO<sub>2</sub> 的消耗,使更多的 CO<sub>2</sub> 逃逸出地表进入大气。

因此,施用农家肥降低了碳酸盐岩对大气 CO<sub>2</sub> 的汇。

#### 3.2.2 可利用施用农肥所抑制的溶蚀量来计算碳酸盐岩对大气 CO<sub>2</sub> 减少的吸收量

施用农肥抑制了土壤系统中碳酸盐岩的溶蚀量,也就减少了对大气 CO<sub>2</sub> 的吸收量,这个量可用表 6 的数据,结合下列碳酸盐岩溶蚀作用化学方程所反映的量的关系,采用野外溶蚀试验法来估算。估算结果如表 8。

碳酸盐岩溶蚀作用的化学方程为<sup>[12,33]</sup>:  

$$\text{MeCO}_3(\text{s}) + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2(\text{g}) = 2\text{HCO}_3^-(\text{aq}) + \text{Me}^{2+}(\text{aq})$$

MeCO<sub>3</sub> 代表实际溶蚀过程中的 CaCO<sub>3</sub>、MgCO<sub>3</sub> 及其他可能存在的碳酸盐岩组分。

经换算得到,白云石与石灰石由于施肥后减少的 CO<sub>2</sub> 的吸收量分别为 1.1704 × 10<sup>4</sup> kg/km<sup>2</sup> 及 1.2358 × 10<sup>4</sup> kg /km<sup>2</sup>。

施肥后碳酸盐岩溶蚀减少对 CO<sub>2</sub> 的吸收量百分比,白云石和石灰石分别为 39.45%、25.50%。一般碳酸盐岩地区,土壤施用农家肥后碳酸盐岩溶蚀减少的 CO<sub>2</sub> 的吸收量则为 25.50%~39.45%。

#### 3.2.3 可估算施用农肥对岩溶水 CO<sub>2</sub> 汇的抵消量

研究表明,碳酸盐岩地层中岩溶水是 CO<sub>2</sub> 的一个巨大的汇,按碳酸盐岩分布面积计,中国岩溶水吸收的 CO<sub>2</sub> 为 47.18 × 10<sup>9</sup> kg · a<sup>-1</sup><sup>[34]</sup>。由于碳酸盐岩地区施用农家肥,减少了溶蚀,从而减少了 CO<sub>2</sub> 的汇,将抵

表 8 土壤施用农家肥对碳酸盐岩成土作用影响度的估算结果

Table 8 The influencing intensity of farm manure utilization on the pedogenesis of carbonate rock

土层厚度/cm	20	36	50	70	90	105
对白云岩成土的影响度/%	65.69	25.00	35.77	55.25	29.85	28.05
对石灰岩成土的影响度/%	53.89	29.38	37.27	22.12	10.48	22.79

表 9 土壤施用农肥所减少的 CO<sub>2</sub> 吸收量

Table 9 The calculated results of the decrease of CO<sub>2</sub> uptake by carbonate rock weathering due to farm manure utilization for 1 year

白云石		石灰石		减少百分比/%	
未施肥溶蚀对 CO <sub>2</sub> 吸收量/(mg · cm <sup>-2</sup> )	施肥后溶蚀减少的 CO <sub>2</sub> 吸收量/(mg · cm <sup>-2</sup> )	未施肥溶蚀对 CO <sub>2</sub> 吸收量/(mg · cm <sup>-2</sup> )	施肥后溶蚀减少的 CO <sub>2</sub> 吸收量/(mg · cm <sup>-2</sup> )	白云石	石灰石
39.6202	1.1704	77.1301	1.2358	39.45%	25.50%

消碳酸盐岩地区部分岩溶水 CO<sub>2</sub> 的汇的作用。这个抵消作用有多大呢?可以本试验研究结果进行估算。

已有资料<sup>[4]</sup>表明,贵州贵阳地区岩溶水对大气 CO<sub>2</sub> 的吸收量(吸碳模数)约为  $1.97037 \times 10^4 \text{ kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{a}^{-1})$ ,且本研究得到白云石与石灰石由于施肥后减少的 CO<sub>2</sub> 的吸收量分别为  $1.1704 \times 10^4 \text{ kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{a}^{-1})$  及  $1.2358 \times 10^4 \text{ kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{a}^{-1})$ 。据此计算,由于土壤施用农家肥减少的 CO<sub>2</sub> 的吸收量所占百分比,白云岩地区为 59.41%,石灰岩地区为 62.73%。

在一般石灰岩与白云岩混合地区,由于施用农家肥料对岩溶水 CO<sub>2</sub> 汇的抵消作用为 59.41%~62.73%。

3.2.4 可估算施肥后土壤增加的 CO<sub>2</sub> 量,对估算进入大气中的 CO<sub>2</sub> 量有重要意义

如上所述,施肥剖面土壤中 CO<sub>2</sub> 浓度一般比空白剖面的 CO<sub>2</sub> 浓度大 22.52%~198.87%,平均大 93.94%。施肥剖面地面释放 CO<sub>2</sub> 通量比空白剖面地面释放 CO<sub>2</sub> 通量多 67.64%。对这个参数的估算也是过去没有的。

## 4 结论与建议

(1)施用农家肥降低了碳酸盐岩的溶蚀速率:石灰石的溶蚀速率降低了 10.48%~53.89%,平均 25.51%;白云石的溶蚀速率降低了 25.0%~65.69%,平均 39.45%。同样条件下土壤中石灰石溶蚀量比白云石大。

(2)施肥土壤更利于 CO<sub>2</sub> 的产生:施肥剖面土壤中 CO<sub>2</sub> 浓度比空白剖面 CO<sub>2</sub> 浓度高 22.52%~198.87%,平均高 93.94%;施肥剖面地面 CO<sub>2</sub> 通量比空白剖面地面 CO<sub>2</sub> 通量高 67.64%。

(3)利用施肥后所抑制的土壤对碳酸盐岩溶蚀量可估算成土作用影响度及温室气体 CO<sub>2</sub> 及其变化值等:

I. 估算表明,在贵州贵阳碳酸盐岩出露地区,施用农肥降低当地的碳酸盐岩成土速率,降低了 35.77%~37.27%。

II. 可用于揭示施肥对土壤 CO<sub>2</sub> 与大气 CO<sub>2</sub> 源汇关系的影响:①可利用施用农肥所抑制的溶蚀量来计算溶蚀对 CO<sub>2</sub> 减少的吸收量,本例结果为:白云石和石灰石分别为 39.45%、25.50%,一般碳酸盐岩地区为 25.50%~39.45%。②可估算施用农肥抑制的碳酸盐岩溶蚀对岩溶水 CO<sub>2</sub> 汇的抵消量,在贵州贵

阳地区,抵消作用为 59.41%~62.73%。

本研究涉及影响大气变化的温室气体及碳酸盐岩岩溶蚀与成土作用,对解决全球气候变化及岩溶石山地区耕地保护和生态环境调控问题具有非常重要的意义。但本观测研究仅在贵阳开展,且才进行了 1 个水文年,结果是初步的。要取得区域性的试验观测数据,尚需进一步工作。建议在广西、云南、四川、重庆、湖南及北方典型地区开展更加深入的研究。

**致谢:** 本项研究得到卢耀如院士的关怀和帮助,在此深表谢意!

## 参考文献(References):

- [1] 袁道先. 岩溶石漠化问题的全球视野和我国的治理对策与经验[J]. 草业科学, 2008, 25(9):19-25.  
Yuan Daoxian. Global view on karst rock desertification and integrating control measures and experiences of China[J]. Pratacultural Science, 2008, 25(9):19-25(in Chinese with English abstract).
- [2] 杨平恒, 章程, 孙玉川, 等. 土壤环境因子对土下岩溶溶蚀速率的影响——以重庆金佛山国家自然保护区为例[J]. 中国地质, 2007, 34(5):920-926.  
Yang Pingheng, Zhang Cheng, Sun Yuchuan, et al. Effects of soil environmental factors on the dissolution rate of karst in soils—a case study of the state Jionfo mountain nature reserve, Chongqing [J]. Geology in China, 2007, 24(5):920-926(in Chinese with English abstract).
- [3] Isphording W C. Mineralogical and physical properties of Gulf coast limestone soils. Transactions—Gulf Coast Association of Geological Societies, 1978, 18(1):201-214.
- [4] Danin A, Gerson E, Marton K, et al. Patterns of limestone and dolomite weathering by lichens and blue green algae and their palaeoclimatic significance[J]. Palaeogeogr, Palaeolimatol, Palaeoecol, 1982, 37(7):221-233.
- [5] 秦刚, 廖义玲. 母岩成分对残积红土形成及分带的影响 [J]. 贵州科学, 1994, 12(3):33-39.  
Qing Gang, Liao Yiling. The influence of original composition on the formation and zone of the residual laterite [J]. Guizhou Science, 1994, 12(3):33-39(in Chinese with English abstract).
- [6] 冯志刚, 王世杰, 周德全, 等. 黔北新蒲红色风化壳剖面的粒度分布特征——兼论岩溶区上覆土层的物质来源[J]. 地质科学, 2004, 39(3):440-451.  
Feng Zhigang, Wang Shijie, Zhou Dequan, et al. Grain size distribution characters of the red weathering crust at Xinpu, north Guizhou: discussion on provenance of overlying weathering crusts in karst areas[J]. Chinese Journal of Geology, 2004, 39(3):440-451 (in Chinese with English abstract).
- [7] 李景阳, 朱立军, 梁凤. 碳酸盐岩红土风化壳主要特征及红土成因探讨——以贵州典型剖面为例 [J]. 水文地质工程地质, 2001, 28(5):7-16.  
Li Jingyan, Zhu Lijun, Liang Feng. Major characteristics of laterite



- weathering crust of carbonate rock and its genesis—a case study of Guizhou profile [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2001, 28(5):7–16(in Chinese with English abstract).
- [8] 李景阳, 王朝富, 樊廷章, 等. 碳酸盐岩残积红土的结构、构造特征及其成因研究[J]. 中国岩溶, 1995, 14(1):31–39.
- Li Jingyan, Wang Chaofu, Fan Tingzhang, et al. The characteristics of structure and texture of residual laterite and their genesis[J]. Carsologica Sinica, 1995, 14(1):31–39(in Chinese with English abstract).
- [9] 李景阳, 朱立军, 王朝富, 等. 碳酸盐岩风化壳及喀斯特成土作用研究[J]. 贵州地质, 1996, 13(2):139–145.
- Li Jingyan, Zhu Lijun, Wang Chaofu, et al. Weathering crust of carbonate rocks and process of karst soil formation [J]. Guizhou Geology, 1996, 13(2):139–145(in Chinese, with English abstract).
- [10] 朱立军, 李景阳. 碳酸盐岩红色风化壳中的氧化铁矿物[J]. 地质科学, 2001, 36(4):395–401.
- Zhu Lijun, Li Jingyang. Iron oxide minerals in red weathering crust of carbonate rocks [J]. Chinese Journal of Geology, 2001, 36(4):395–401(in Chinese with English abstract).
- [11] 孙承兴, 王世杰, 周德全, 等. 碳酸盐岩酸不溶物作为贵州岩溶区红色风化壳主要物质来源的证据 [J]. 矿物学报, 2002, 22(3):235–242.
- Sun Chengxing, Wang Shijie, Zhou Dequan, et al. Insoluble residues of carbonate rocks as source material for red weathering crusts in karst regions of Guizhou Province, China [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2002, 22(3):235–242(in Chinese with English abstract).
- [12] 徐胜友. 岩溶作用与大气 CO<sub>2</sub> 的源汇关系[C]//袁道先. 中国岩溶动力系统. 北京:地质出版社, 2002. 113–117.
- Xu Shengyou. The relationship between the action of karst and the atmospheric CO<sub>2</sub> source/sink [C]//Yuan Daoxian, et al. Karst Dynamic Systems of China. Beijing:Geological Publishing House, 2002. 113–117(in Chinese).
- [13] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京:中国农业出版社, 2000:199–202.
- Huang Changyong. Agrology[M]. Beijing:China Agriculture Press, 2000:199–202(in Chinese).
- [14] 刘再华, Wolfgang, Dreybrodt. 岩溶作用动力学与环境 [M]. 北京:地质出版社, 2007:1–236.
- Liu Zaihua, Wolfgang, Dreybrodt. Karstification Dynamics and Environment [M]. Beijing:Geological Publishing House, 2007:1–236(in Chinese).
- [15] 李大通, 罗雁. 中国碳酸盐岩分布面积测量 [J]. 中国岩溶, 1983, 2(3):147–150.
- Li Datong, Luo Yan. Measurement of carbonate rocks distribution area in China[J]. Carsologica Sinica, 1983, 2(3):147–150(in Chinese).
- [16] 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[J]. 地球与环境, 2004, 32(1):1–8.
- Cao Jianhua, Yuan Daoxian, Zhang Cheng, et al. Karst ecosystem constrained by geological condition in southwest China[J]. Earth and Environment, 2004, 32(1):1–8(in Chinese with English abstract).
- [17] 袁道先, 蔡桂鸿. 岩溶环境学[M]. 重庆:重庆出版社, 1989:56–59.
- Yuan Daoxian, Cai Guihong. The Science of Karst Environment [M]. Chongqing: Chongqing Publishing House, 1989:56–59 (in Chinese).
- [18] 杨明德. 论喀斯特环境的脆弱性[J]. 云南地理环境研究, 1990, 2(1):21.
- Yang Mingde. Discussion on the vulnerability of karst environment [J]. Yunnan Geographic Environment Research, 1990, 2(1):21(in Chinese with English abstract).
- [19] 万国江, 白占国. 论碳酸盐岩侵蚀与环境变化—以黔中地区为例[J]. 第四纪研究, 1998, 18(3):279–279.
- Wan Guojiang, Bai Zhanguo. Discussion on relationship between carbonate rock corrosion and environmental changes—In case of central section area in Guizhou [J]. Quaternary Sciences, 1998, 18(3):279–279(in Chinese with English abstract).
- [20] 王世杰, 季宏兵, 欧阳自远, 等. 碳酸盐岩风化成土作用的初步研究[J]. 中国科学(D辑), 1999, 29(5):441–449.
- Wang Shijie, Ji Hongbing, Ouyang Ziyuan, et al. Preliminary study on weathering and pedogenesis of carbonate rock [J]. Science in China(D), 1999, 29(5):441–449(in Chinese).
- [21] 杨明德. 贵州喀斯特环境研究 [M]. 贵阳:贵州人民出版社, 1988:86.
- Yang Mingde. Discussion on the Area Structure of Karst Landform and its Environmental Effect [M]. Guiyang:Guizhou People's Publishing house, 1988:86(in Chinese).
- [22] 袁道先. 碳循环与全球岩溶[J]. 第四纪研究, 1993, 14(1):1–6.
- Yuan Daoxian. Carbon cycle and global karst [J]. Quaternary Sciences, 1993, 14(1):1–6(in Chinese with English abstract).
- [23] Brown M. Examples of recent IGBP research: Introduction [J]. Nature & Resources, 1994. 30(3&4):8–30.
- [24] 袁道先. 中国岩溶[M]. 北京:地质出版社, 1993:1–67.
- Yuan Daoxian. Karst of China [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1993:1–67(in Chinese).
- [25] 潘根兴, 孙玉华, 何师意, 等. 湿润亚热带峰丛洼地岩溶土壤系统中碳分布及其转移[J]. 应用生态学报, 2000, 11(1):69–72.
- Pan Genxing, Sun Yuhua, He Shiyi, et al. Distribution and transferring of carbon in karst soil system of peak forest depression in humid subtropical region [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(1):69–72(in Chinese with English abstract).
- [26] 万国江. 碳酸盐岩与环境 (卷一)[M]. 北京:地震出版社, 1995:205–211.
- Wan Guojiang. Carbonate Rocks and Environment. (vol.1).[M]. Beijing: Seismological Press, 1995:205–211(in Chinese).
- [27] 袁道先. 现代岩溶学与全球变化研究 [J]. 地学前缘, 1997, 4(1/2):17–25.
- Yuan Daoxian. Modern karstology and global change study [J]. Earth Science Frontiers, 1997, 4(1/2):17–25(in Chinese with English abstract).
- [28] Li Bin, Yuan Daoxian. Relationship between carbon cycle in karst areas and CO<sub>2</sub> source-sink of atmosphere—Case of Guizhou karst[J]. Carsologica Sinica, 1996, 15(1–2):41–49.
- [29] 徐胜友, 何师意. 碳酸盐岩土壤 CO<sub>2</sub> 的动态特征及其对岩溶作用的驱动[J]. 中国岩溶, 1996, 15(1/2):50–57.

- Xu Shengyou, He Shiyi. The CO<sub>2</sub> regime of soil profile and its drive to dissolution of carbonate rock [J]. *Carsologica Sinica*, 1996, 15(1/2):50–57(in Chinese with English abstract).
- [30] 徐胜友, 蒋忠诚. 我国岩溶作用与大气温室气体 CO<sub>2</sub> 源汇关系的初步估算[J]. *科学通报*, 1997, 44(2):953–956.
- Xu Shengyou, Jiang Zhongcheng. Primary estimate of the relationship between the action of karst and the atmospheric CO<sub>2</sub> source/sink in China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(9): 953–956(in Chinese with English abstract).
- [31] 郑乐平. 黔中岩溶地区土壤 CO<sub>2</sub> 的稳定碳同位素组成研究[J]. *中国科学(D 辑)*, 1999, 29(6):514–518.
- Zheng Leping. The stable carbon isotopic composition of soil CO<sub>2</sub> in the karst, the middle parts of Guizhou Province [J]. *Science in China(D)*, 1999, 29(6):514–518(in Chinese).
- [32] 曹建华. 岩溶地区土壤溶解有机碳的季节动态及环境效应[J]. *生态环境*, 2005, 14(2):224–229.
- Cao Jianhua, et al. Seasonal changes of soil dissolved organic carbon and its environmental implication [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2005, 14(2):224–229(in Chinese with English abstract).
- [33] 袁道先, 刘再华, 曹建华, 等. 中国岩溶动力系统[M]. 北京:地质出版社, 2002:126–128
- Yuan Daoxian, Liu Zaihua, Cao Jianhua, et al. *Karst Dynamic Systems of China*[M]. Beijing:Geological Publishing House, 2002. 126–128(in Chinese).
- [34] 杨立铮. 我国南方 6 省岩溶系统碳循环及其环境效应[C]//袁道先等. 中国岩溶动力系统. 北京:地质出版社, 2002:121–131.
- Yang Lizheng. Carbon cycle of karst system in six provinces South China and their environmental impacts [C]//Daoxian Yuan, et al. *Karst Dynamic Systems of China*. Beijing:Geological Publishing House, 2002:121–131(in Chinese).

## The effect of farm manure on the dissolution of carbonate rocks and its eco–environmental impact

LIU Chang–li, ZHANG Yun, SONG Chao, HOU Hong–bing,  
WANG Xiu–yan, JIANG Jian–mei, WANG Jing–jing, PEI Li–xin

(*Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang, 050061, Hebei, China*)

**Abstract:** Research on the effect of farm manure on carbonate rock dissolution is important for pedogenesis of carbonate rocks and source/sink of atmospheric CO<sub>2</sub>. In this study, dolomite and limestone tablets were buried in different depths of the soil profile in the karst area of Guiyang City, Guizhou Province and, at the same time, the dissolution amounts of tablets, soil CO<sub>2</sub>, soil pH, soil water content, soil minerals and chemical composition and soil water chemistry were monitored. The results show that manure application decreases the dissolution rate of carbonate rocks, with the dissolution amount of limestone and dolomite decreasing by 11.7%–116.9% (averagely 34.2%) and 25.0%–65.69% (averagely 39.45%), respectively, and the dissolution rate of limestone higher than that of dolomite under the same condition. Using these values, the decrease of the pedogenesis rate of carbonate rocks was estimated to be up to 35.77%–37.23% due to the application of manure. The results also suggest that manure accelerates the generation of soil CO<sub>2</sub>, and that soil CO<sub>2</sub> concentration in the manure profile increases by 22.52%–198.87% (averagely 93.94%) and the CO<sub>2</sub> flux increases by 67.64% as compared with the control profile. The data also indicate that manure decreases CO<sub>2</sub> uptake by 25.50%–39.45% due to the dissolution of carbonate rocks in Guiyang City, and that it brings indirectly a 59.41%–62.72% counteraction to CO<sub>2</sub> uptake in karst water of Guiyang area.

**Key words:** farm manure; dissolution; carbonate rocks; pedogenesis; CO<sub>2</sub> source/sink

**About the first author:** LIU Chang–li, male, born in 1963, doctor and senior researcher, mainly engages in the study of geological environment; E–mail: liuchangli@vip.163.com.