

文章编号: 1001-4810(2002)03-0153-06

添加有机物料对岩溶系统中碳转移及灰岩溶蚀的影响研究*

周运超¹, 潘根兴¹, 张平究¹, 熊志斌², 冉景丞²

(1. 南京农业大学农业资源与生态环境研究所, 江苏 南京 210095;

2. 茂兰国家级喀斯特森林自然保护区管理局, 贵州 荔波 562600)

摘 要 以贵州茂兰一种灌丛土壤和一种农业用地土壤为研究对象, 设置了添加和不添加有机物料处理, 进行了岩溶作用与土壤碳转移的模拟试验。结果表明, 土壤 CO_2 呼吸排放、土壤淋滤液 HCO_3^- 排泄及灰岩溶蚀均响应于有机物料的添加。对于无机离子 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 来说, 在不添加有机物料情况下, 其淋出过程表现为一个较高的活跃可迁移库的释放过程及随后较低风化淋滤的稳定释放过程。在添加有机物料条件下, 分解释放的 Ca 及 CO_2 产生的 HCO_3^- 的排释滞后于土壤呼吸 15 天以上。添加有机物料下, 灰岩溶蚀量均有一定幅度的提高, 但 Ca (Mg) 及 HCO_3^- 的排释大大增强, 这一方面表明生物可利用性的碳源的加入促进了系统中岩溶作用, 并强烈驱动土壤中可交换 Ca 、 Mg 的排释; 另一方面, 由于土壤中因呼吸增强而形成的高 CO_2 在湿润条件下溶解成为 $\text{HCO}_3^- - \text{C}$ 排泄, 而大大促进土壤碳转移的汇效应。本文的研究结果说明, 自然土壤因植被的破坏或林地转变为农地, 可能使岩溶系统的汇效应减弱。

关键词 添加有机物料 岩溶过程 碳的生物有效性 石灰岩溶蚀 土壤碳转移 汇效应

中图分类号: P599 P642.25

文献标识码: A

岩溶作用是一种与陆地碳循环密切关联的地质作用, 而土壤碳是这种作用的驱动者^[1]。以前的研究显示, 在岩溶作用活跃的季节, 随岩溶水输出的 $\text{HCO}_3^- - \text{C}$ 有 60% 来自土壤 CO_2 ^[2]。岩溶土壤系统水文地球化学动力学过程表明, HCO_3^- 淋出量与可氧化有机质的含量有关^[3]。不同植物凋落物对土壤有机碳淋失的影响及其岩溶效应研究表明, 有机物的多少导致土壤 DOC 淋失差异, 而 DOC 具有对岩溶动力系统的驱动作用^[4]。对黔中岩溶地区农田有机碳土壤呼吸排放 CO_2 的研究表明, 土壤呼吸排放 CO_2 与温度显著正相关, 并与土壤中 DOC 显著负相关^[5]。这些都说明土壤碳库及其动态与土气、土岩界面碳交换密切联系, 从而影响岩溶作用强度与碳循环的调节作用。本文以贵州茂兰地区两种不同植被下岩溶土壤为研究

对象, 通过设置不同的有机物料水平, 探讨外源有机物料对岩溶系统中碳转移及其岩溶作用的影响。

1 材料与方法

1.1 实验材料

土壤 采自贵州省荔波县永康乡拉桥村(茂兰国家级喀斯特森林自然保护区), 成土母岩为古生代石炭纪摆佐组(C_1b)的浅灰色厚层白云岩, 岩石中 CaO 、 MgO 的含量分别为 309.2 g/kg、218.9 g/kg。供试土壤样品一份采自连续种植玉米 30 年以上的耕地, 另一份采自与其相邻的灌丛林地。土壤采样深度均为 20 ~ 50 cm。土壤的理化性状见表 1。新鲜土壤样过 8 mm 筛, 以去除植物根等。

* 基金项目 国家自然科学基金(49972087)、国土资源部重点科技项目(2000208)资助

作者简介 周运超(1964-), 男, 汉族, 博士, 副教授, 从事森林土壤碳转移等研究。E-mail: zhouyunchao@21cn.com

收稿日期 2002-08-08

表 1 试验用土壤的理化性状
Tab.1 Properties of the experimental soils

土壤	植被类型	pH	有机碳 g/kg	全氮 g/kg	C/N	土壤质地
玉米土(A)	玉米	7.10±0.04	16.75±0.49	1.522±0.029	11.01	砂质粘壤土
灌丛林土(B)	灌丛	6.52±0.04	16.89±0.25	1.489±0.020	11.34	砂质粘壤土

岩石试片 为泥盆纪融县组(D₃r)纯灰岩,采自桂林七星岩,其主要化学成分为 :CaO 545 g/kg,MgO 13.4 g/kg,酸不溶物 3.8 g/kg。做成直径 3.5cm 的圆形试片,表面磨光,105℃烘干,称重。

有机物料 培养试验用有机物料分别为采自当地玉米秸秆和灌丛植物的叶杆等凋落物,分别洗净,沥干水分,65℃烘干,粉碎,过 1mm 筛,混合均匀装袋备用。有机物料的有关性质见表 2。

表 2 试验用有机物料的有关性质

Tab.2 Properties of organic matter in the experiment

物料	有机碳(g/kg)	全氮(g/kg)	C/N
玉米(A')	510.69	10.77	47.42
灌丛(B')	582.12	16.33	35.65

1. 2 试验装置

模拟试验采用土柱淋溶法^[3]。土柱装置为一高 60cm、内径 10cm 的 PVC 管,管底垫一层玻璃纤维,其上铺石英砂,再覆盖一层玻璃纤维,在其上装土 1cm 后,放置溶蚀试片 1 片,土柱内装土 5.0kg,土层高度为 50cm。土柱顶部为一降水器,底部为一淋滤液收集瓶,收集的土壤淋滤液用以分析 Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻ 及 DOC。

实验设置了 4 种处理 :A 土对照,B 土对照,A 土加物料 B',B 土加物料 A'。

凋落物样品与表层 5cm 土样均匀混合,装入土柱。降雨采用去离子水,模拟茂兰多年平均降雨量,每 6 天降雨一次,以相同速度控制降雨。20℃ 培养。实验时间为 2001 年 10 - 12 月。重复三次。

1.3 分析方法

试验期间分别进行土壤呼吸、土壤淋滤液中 Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻、DOC 的测定。观测周期为每 3 天 1 次。监测、分析方法如下 :

a、土壤呼吸 :采用吸收瓶法,NaOH 吸收 CO₂,加酚酞指示剂,标准浓度 HCl 滴定 ;

b、淋滤液中 HCO₃⁻ 的测定 标准盐酸在电位滴定仪上滴定至终点,计算出 HCO₃⁻ 的含量。

c、Ca²⁺、Mg²⁺ 离子的测定 :原子吸收法测定

Ca²⁺、Mg²⁺ 的含量。

d、滤液中 DOC 的测定 采用 K₂Cr₂O₇ 外加热法测定含碳量 ;

e、试验结束后取出溶蚀试片,洗净,烘干,称重。以差值法计算溶蚀量及元素溶出量。

2 结果与分析

2.1 土壤呼吸排放 CO₂

2.1.1 不同土壤下土壤呼吸排放 CO₂ 动态

土壤呼吸指示了土壤中微生物活性的强弱及有机碳的生物可利用性。图 1A 表示了两种土壤在不加物料下土壤呼吸排放 CO₂ 的动态。两种土壤的呼吸排放动态都表现为振荡涨落,但灌丛林地土壤的振荡幅度大于玉米农地土。这种振荡性与实验过程中干湿交替有一定的关系。从实验过程中土壤呼吸排放量看,灌丛林地土略高于耕地玉米土。

2.1.2 不同有机物料处理土壤呼吸动态

图 1B 表明,添加物料下土壤呼吸排放表现为前期的呼吸量较高但很快便快速下降,之后处于稳定状态。第 40 天以后,灌丛林地添加玉米秸秆下土壤呼吸排放速率低于农地玉米土添加灌丛凋落物的处理 ;但灌丛林地土在添加秸秆后土壤呼吸排放在第 15 天前十分强烈。说明林地转变为玉米农地后,作物秸秆更易分解释放 CO₂,而在土气界面逸失。

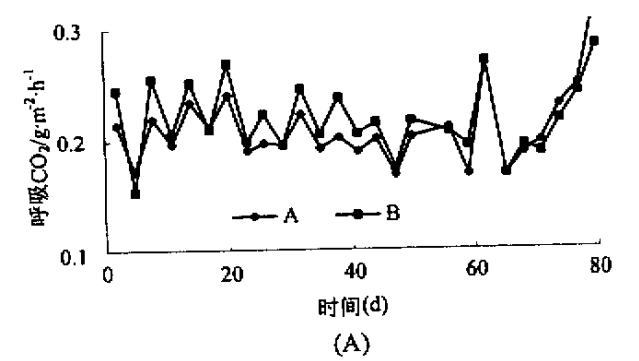


图 1A 不同土壤下土壤呼吸 CO₂ 动态

Fig.1A CO₂ variation of soil respiration between different soils

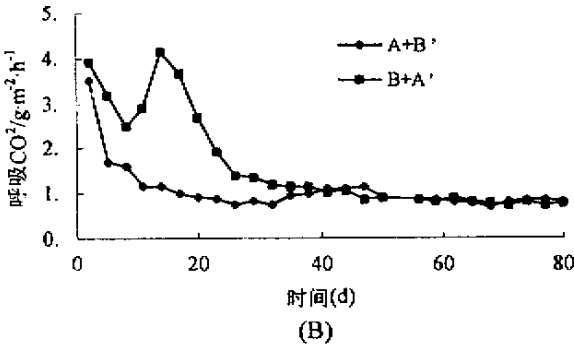


图 1B 不同有机物料下土壤呼吸 CO₂ 动态

Fig.1B CO₂ variation of soil respiration of the soil treated by litter

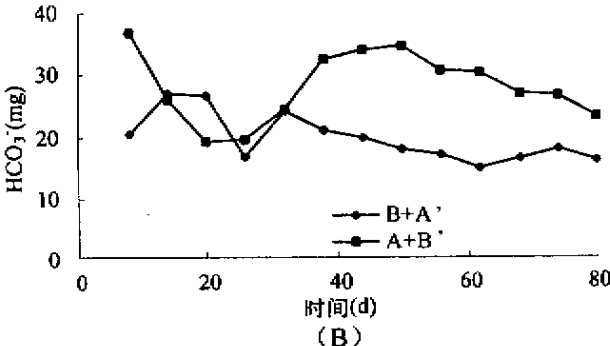


图 2B 不同有机物料处理下 HCO₃⁻ 动态

Fig.2B Variation of HCO₃⁻ leached out from the soil treated by litter

2.2 土壤 HCO₃⁻ 排释动态

2.2.1 不同土壤下 HCO₃⁻ 排释动态

岩溶表层泉水中 HCO₃⁻ 排释量的多少受到温度、降雨、岩性、土壤微生物活动性、土壤利用方式的影响。在野外,泉水 HCO₃⁻ 测定结果反映了补给区诸多因子共同作用下的结果,难于区分单一因子的效应。两种土壤在室内培养条件下, HCO₃⁻ 排泄动态显示出相同的趋势(图 2A),即存在着振荡上升的趋势,并以耕地玉米土的 HCO₃⁻ 排泄量略高于灌丛林地土的 HCO₃⁻ 排泄量。

2.2.2 添加有机物料下系统 HCO₃⁻ 排释动态

潘根兴等研究表明,岩溶土壤系统在温湿季节土壤微生物活动受到促进,在增强土壤呼吸排放的同时,增加了 HCO₃⁻ 的排泄^[6]。除了试验起始时的淋出峰外,实验过程中添加物料下 HCO₃⁻ 排泄强度为土对照的 2~3 倍,灌丛凋落物处理稳定于 30mg,与土壤呼吸动态对比,两种处理下 HCO₃⁻ 排泄峰落后于 CO₂ 呼吸排放峰 15 天左右(50cm 厚土壤的碳运移的时间尺度)。有意义的是第 36 天后凋落物处理下 HCO₃⁻ 排释明显强于玉米秸秆处理下(图 2B),而后的 CO₂ 排放强度相近。这可能是由于玉米农地 pH 值较高的缘故^[7]。

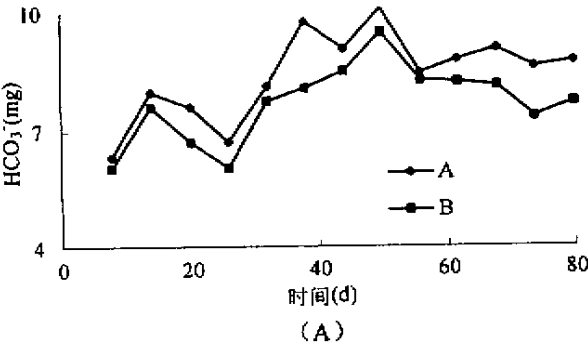


图 2A 不同土壤 HCO₃⁻ 动态

万方数据 Variation of HCO₃⁻ leached out from different soils

2.3 土壤淋滤液中 DOC 的排释动态

已有的研究认识到,不同植被类型下 DOC 库量不同,且土壤 DOC 淋出量的多少与岩溶作用强弱有密切的关系^[4],土壤溶解性有机酸的主要代表柠檬酸与石灰岩颗粒的溶蚀试验结果揭示了有机酸对碳酸盐岩侵蚀的作用^[8],但不同物料添加下 DOC 淋出量与不同土壤间存在何种关系并不清楚。

2.3.1 不同土壤不加物料下 DOC 动态

图 3A 表明,淋出液 DOC 含量在前期振荡变化,后期基本稳定。在前期,因土壤微生物活性增强,有机质不断分解,淋出液 DOC 有增高趋势,而后期淋出量稳定。土壤干湿交替同样使淋出液 DOC 含量不稳定。

2.3.2 不同有机物料处理下 DOC 淋出动态

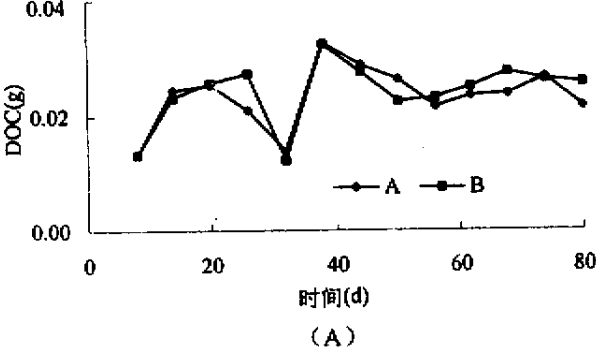


图 3A 不同土壤下 DOC 淋出动态

Fig.3A Variation of DOC leached out from different soils

土壤淋出液 DOC 来源为土壤有机物质的分解迁移,其量的多少与进入土壤中的有机凋落物量、土壤有机质量及有机质的易分解程度有关。两种凋落物进入土壤后,土壤 DOC 淋出量动态由前 15 天的急速上升和后面 65 天的基本稳态组成(图 3B)。因此,有机物源是 DOC 库的供应者。

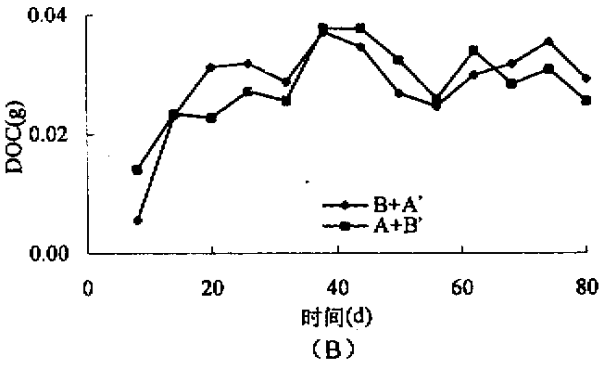


图 3B 不同有机物料处理下 DOC 淋出动态

Fig.3B Variation of DOC leached out from the soil treated by litter

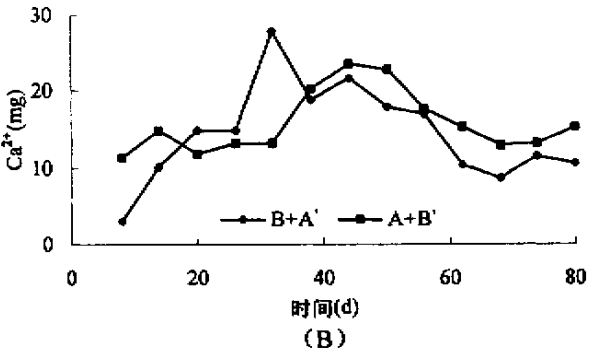


图 4B 不同有机物料处理下淋出液中 Ca²⁺ 动态

Fig.4B Variation of Ca²⁺ leached out from the soil treated by litter

2.4 土壤淋滤液中 Ca²⁺、Mg²⁺ 淋出动态

潘根兴等研究了不同土壤层位淋出液中 Ca²⁺、Mg²⁺ 的淋出动态^[3]。岩溶系统中它们除了来自于岩石外,很大部分来源于土壤,尤其是在岩溶活跃季节。

不同土壤下 Ca²⁺ 淋出动态见图 4A。玉米土下为由高到低的淋出过程,但灌丛林地土下基本稳定,后期略有升高。从图可见,玉米农地土 pH 值较高,交换性 Ca²⁺ 库较大,前期的较强淋出为可交换 Ca 库的释放^[7]。

图 4B 表明,加入有机物料后,淋出液 Ca²⁺、Mg²⁺ 的释放动态格局改变。表现为前期由较低浓度缓慢向一个较高浓度升高,而后又降低。稳定时的排释强度明显高于无添加有机物料的条件下。这是由于有机物料分解,提供了一个除土壤原有 Ca²⁺ 外的可迁移 Ca²⁺ 源,并随分解的进行而逐渐提高,但由于水淋洗的运移过程影响,淋出液 Ca 峰落后于土壤呼吸峰 15 ~ 20 天。Mg²⁺ 的情况与 Ca²⁺ 的相似(图 5A、图 5B)。

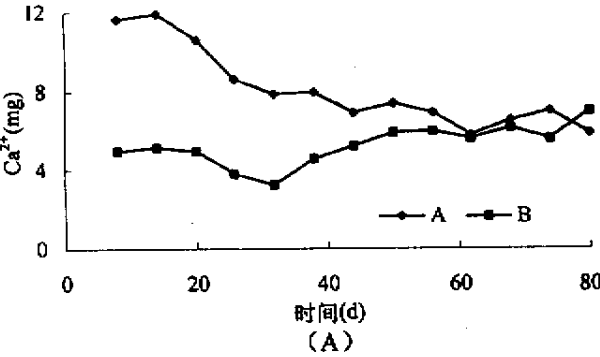


图 4A 不同土壤下淋出液中 Ca²⁺ 动态

Fig.4A Variation of Ca²⁺ leached out from different soils

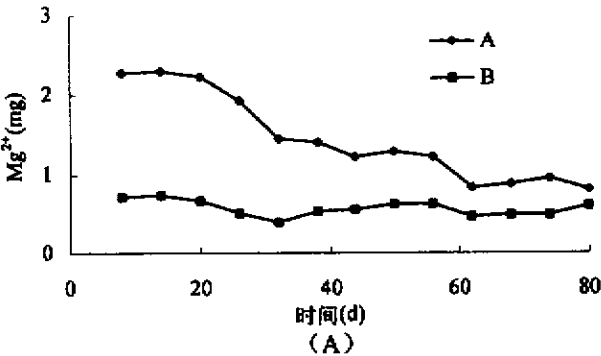


图 5A 不同土壤下淋出液 Mg²⁺ 动态

Fig.5A Variation of Mg²⁺ leached out from different soils

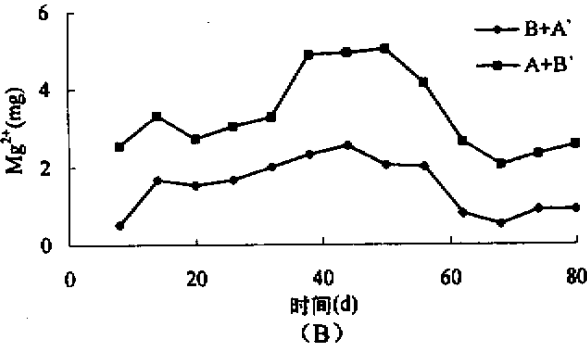


图 5B 不同有机物料处理下淋出液 Mg²⁺ 动态

Fig.5B Variation of Mg²⁺ leached out from the soil treated by litter

2.5 灰岩溶蚀量

2.5.1 不同土壤下的灰岩溶蚀量

未加有机物料两种土壤下溶蚀量不同,灌丛林地土壤下溶蚀量显著高于玉米地土壤(图 6A),这可能与林地 pH 值较低,且生物可利用碳较丰富(20 ~ 50cm 深度为根系分布深度)有关。

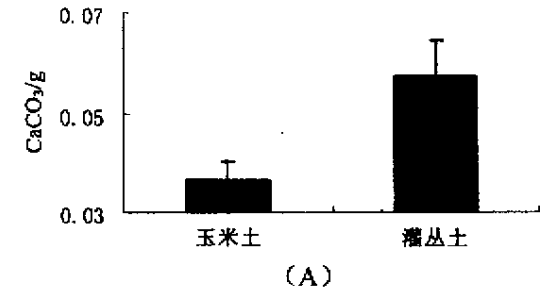


图 6A 不同土壤下岩溶系统岩石溶蚀量

Fig.6A Erosion rates of limestone tablets under different soils

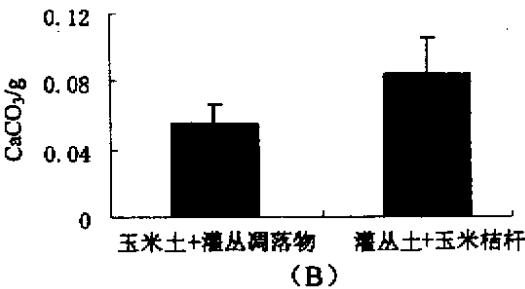


图 6B 不同有机物料处理下岩溶系统岩石溶蚀量

Fig.6B Erosion rates of limestone tablets under the soil treated by litter

2.5.2 有机物料处理下的灰岩溶蚀量

不同凋落物处理下岩溶系统的岩溶作用也有较大的差异(图 6B),玉米土 + 灌丛凋落物处理下的岩溶作用低于灌丛林地土 + 玉米秸秆处理下的岩溶作用,这表明凋落物促进了岩溶作用,同时又保持了土壤下的岩溶作用特点,显示出土壤化学场对岩溶作用的制约^[7]。

3 讨论

3.1 有机物料对岩溶土壤中碳转移的影响

未加有机物料下,灌丛林地土呼吸排放较玉米农地土高,而 HCO₃⁻ 排释量以玉米农地土较强(表 3),但这些出项与原有有机碳的总量之比基本相似。在添加物料下,农地玉米土 HCO₃⁻ 排泄项增大,即汇效应增加,而土壤呼吸排释项减小,所以,pH 较高的玉米地土壤有利于岩溶系统的汇效应发展。同时,说明易分解有机碳存在向土-气、土-水界面的运移,尽管前者的迁移占绝对优势,但较高的 pH 有利于将呼吸 CO₂ 吸收于水系统而排泄^[9]。

3.2 外源有机物料对灰岩溶蚀的影响

从表 4 的综合结果可以看出,在无外源有机物料添加下,灌丛林地土的灰岩溶蚀量大于玉米农地土。这两者的有机质含量相近,但玉米地 pH 较高,溶蚀量较低,这与我们以前的模拟试验结果^[7]相符。但玉米农地土总 Ca²⁺、Mg²⁺ 和 HCO₃⁻ 淋出量却高于灌丛土,说明在有土壤覆盖下岩溶水化学资料并不能说明灰岩溶蚀强度,因为土壤中有较高的可交换 Ca²⁺、Mg²⁺ 库和溶解呼吸释放 CO₂(见前述)的能力,这再

表 3 不同处理下土壤碳转移特征 gC

Tab.3 Soil carbon transfer features of the soils under different treatments in the system

处理类型	土壤碳	有机碳加入	土壤呼吸	DOC	HCO ₃ ⁻	土壤呼吸/总碳(%)	HCO ₃ ⁻ /总碳(%)
玉米土对照	33.67		0.89	0.30	0.017	2.64	0.05
灌丛土对照	35.80		0.93	0.31	0.013	2.60	0.04
玉米土 + 灌丛凋落物	33.67	29.11	4.65	0.37	0.065	7.41	0.10
灌丛土 + 玉米秸秆	35.80	25.53	7.00	0.37	0.040	11.41	0.07

表 4 不同处理下的灰岩溶蚀效应 mg

Tab.4 Effect of limestone dissolution under different treatments

处理类型	试片失重	总淋出量			来源于岩石			溶蚀量 /SOC	总 Ca ²⁺ / 总 Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻ / 溶蚀量	HCO ₃ ⁻ /CaCO ₃ 量(当量比)
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻				
玉米农地土	36.57	105.13	18.87	109.10	14.24	0.3	22.02	1.09	5.57	2.98	4.89
灌丛林地土	57.60	68.43	7.37	99.68	22.44	0.47	34.69	1.61	9.28	1.73	2.84
玉米土地 + 物料	55.57	205.88	43.33	365.54	21.64	0.45	33.47	1.65	4.75	6.58	10.78
灌丛林地土 + 物料	84.97	187.97	19.28	256.12	33.1	0.69	50.17	2.37	9.75	3.01	4.94

次支持了岩溶作用首先涉及土壤中可移动离子库的消耗^[7]。在加入外源有机物料下,两种土壤下溶蚀量均大致升高了 40%,尤其是玉米地土壤中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 淋出量提高了 2~3 倍。从各项比值可以看出,两种土壤下的 Ca/Mg 比在不同处理下没有变化,但添加有机物料下有机碳对灰岩溶蚀的贡献明显增强,尤其是在林地土加入玉米秸秆后,单位有机碳可驱动 2.4 单位的灰岩溶蚀。同时,尽管 HCO_3^- 淋出量是 pH 较高的玉米地土壤高于灌丛林地土,但在有机物料处理下,单位灰岩溶蚀量所伴随的 HCO_3^- 排泄量提高了,特别是玉米地土壤有机物料添加下,一个当量的溶蚀量相当于 11 当量的 HCO_3^- 排泄量,即在生物可利用性碳源增加的情况下,土壤 CO_2 呼吸排放增强,在高 pH 条件下,促进 $\text{CO}_2 - \text{C}$ 因溶解吸收而成为 $\text{HCO}_3^- - \text{C}$ 排泄。灌丛土下 $\text{HCO}_3^-/\text{CaCO}_3$ 溶蚀量的当量比也提高到将近 2 倍,都说明了有机物源增加供应下,同样水文条件下使土壤碳转移向着汇效应方向增强。因此,在生物循环活跃,自然有机物归还量大的生态系统中,土壤碳转移的汇效应将明显提高。从这种意义上说,植被退化和林地农垦因土壤有机碳库的消退而削弱了岩溶系统的汇效应。

参考文献:

- [1] 潘根兴,曹建华,何师意等.土壤碳作为表层岩溶系统的动力机制:系统碳库及碳转移特征[J].南京农业大学学报,1999,27(3):48-56.
- [2] 潘根兴,孙玉华,滕永忠,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.
- [3] 潘根兴,滕永忠.土壤-灰岩岩溶系统中水文地球化学动力学过程模拟及其意义[J].地球化学,2000,29(3):272-276.
- [4] 曹建华,潘根兴,袁道先.不同植物凋落物对土壤有机碳淋失的影响及岩溶效应[J].第四纪研究,2000,20(4):359-366.
- [5] 朴河春,洪业汤,袁芷云.土壤表层 CO_2 的释放与土壤水分波动.矿物岩石地球化学通报[J].1999,18(3):151-154.
- [6] 潘根兴,曹建华,何师意,等.桂林 Y 吉村岩溶试验场岩溶土壤碳转移与水排碳作用[J].自然科学进展,2001,11(7):704-709.
- [7] 潘根兴,滕永忠,陶于祥,等.土壤化学场对桂林地区表层岩溶的影响——野外监测与实验室模拟[J].土壤,2000,32(4):173-177.
- [8] 曹建华,潘根兴,袁道先等.降雨对土壤 CO_2 动态的影响及岩溶效应模拟研究[J].西南师范大学学报(自然科学版),2001,26(专辑),13-19.
- [9] 曹建华,潘根兴,袁道先.柠檬酸对石灰岩溶蚀动力模拟及岩溶意义[J].中国岩溶,2001,20(1):1-4.
- [10] 潘根兴,曹建华,何师意,等.岩溶土壤系统对空气 CO_2 的吸收及其对陆地系统碳汇的意义——以桂林 Y 吉村岩溶试验场的野外观测和模拟实验为例[J].地学前缘,2000,7(4):580-587.

STUDY ON THE EFFECT OF LIMESTONE DISSOLUTION AND CARBON TRANSFER IN KARST SYSTEM AFFECTED BY ORGANIC AMENDMENT

ZHOU Yun-chao¹, PAN Gen-xing¹, ZHANG Ping-jiu¹, XIONG Zhi-bin², RAN Jing-cheng²

(1. Institute of Resources, Ecosystem and Environment for Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210095, China;

2. The Management Bureau of Maolan National Karst Reserve, Libo County Guizhou Province 562600, China)

Abstract: Soils under bush vegetation and under corn field are the objects being studied in this paper. The soils being studied are treated by adding organic matter or not in the study. Simulating experiment for karstification and carbon transfer is done in the study. It is proved that soil respiration emission of CO_2 , HCO_3^- discharge and limestone dissolution acts a prompt response to added organic amendments. The leaching dynamics of Ca^{2+} , Mg^{2+} is characterized by a release stage of easily mobile cations from soil followed by a slow releasing stage of Ca of non easily exchangeable from limestone dissolution under no addition of organic amendments. However, under addition of organic amendments, the release of Ca or HCO_3^- discharge, which was enhanced by the decomposition of added organic matters, lag behind the enhanced production for 15 days or longer. While the limestone dissolution is raised prominently, the Ca release or HCO_3^- discharge showed a great increase under addition of organic amendments. This shows, in one hand, the addition of bioactive carbon have driven the limestone dissolution and drastic release of soil pools of exchangeable Ca, on another hand, the added organic matter stimulates soil CO_2 production, which in turn forced the dissolution of CO_2 for enhancing discharge of HCO_3^- in the leach process. the leach process conducts a strong sink effect for air CO_2 . This study may explain the deforestation or shift of forest to arable land reduces the soil carbon transfer through $\text{CO}_2 - \text{HCO}_3^-$ pathway, thus diminishing the sink effect of karst system for air CO_2 .

Key words: Organic amendment; Karst process; C bio-availability; Limestone dissolution; Soil carbon transfer; Sink effect