

刘九缠,孙玉川,沈立成,等.石漠化治理对土壤中  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  变化特征及碳汇效应的影响[J].中国岩溶,2018,37(5):733-741.  
DOI:10.11932/karst20180511

## 石漠化治理对土壤中 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 变化特征及碳汇效应的影响

刘九缠<sup>1</sup>,孙玉川<sup>1,2</sup>,沈立成<sup>1</sup>,唐廉<sup>1</sup>,刘宁坤<sup>1</sup>,游贤慧<sup>1</sup>

(1. 西南大学地理科学学院,岩溶环境开放实验室,重庆 400715;

2. 中国地质科学院岩溶地质研究所,国土资源部、广西岩溶动力学重点实验室,桂林 541004)

**摘 要:**为探究石漠化治理对土壤中  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  变化特征及碳汇效应的影响,采用气相色谱法对重庆市南川石漠化治理示范区土壤中  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  浓度进行观测,结合土壤温度、土壤含水率、土壤容重和土壤有机碳对石漠化治理区(试验区)和对比区(未经过石漠化治理的荒草地)进行研究,并用溶蚀量数据估算岩溶区碳汇量。结果显示:土壤中  $\text{CO}_2$  浓度随土壤深度的增加先增加后减小,变化范围为  $393 \sim 7\,400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;而土壤中  $\text{CH}_4$  浓度随土壤深度的增加先减小后增大,变化范围为  $1.13 \sim 3.42 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。试验区土壤中  $\text{CO}_2$  浓度均值为  $2\,131 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , $\text{CH}_4$  浓度均值为  $1.94 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;而对比区土壤中  $\text{CO}_2$  浓度均值为  $2\,338 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , $\text{CH}_4$  浓度均值为  $2.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。土壤温度、土壤有机碳与土壤中  $\text{CO}_2$  浓度变化趋势呈显著正相关关系,而与土壤中  $\text{CH}_4$  变化趋势呈显著负相关关系,说明土壤温度和土壤有机碳是影响土壤中  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  浓度的主要因素;土壤温度与土壤中  $\text{CO}_2$  浓度呈正相关关系且相关性随石漠化治理而变弱,说明经过石漠化治理土壤温度对土壤中  $\text{CO}_2$  浓度的影响减弱。试验区岩溶试片溶蚀速率大于对比区,且经过石漠化治理,由岩溶作用产生的碳汇可提高  $0.66 \sim 9.42 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ;说明石漠化治理对于岩溶区碳汇起到了促进作用。

**关键词:**石漠化治理;土壤中  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ ;岩溶试片;岩溶碳汇

**中图分类号:**P642.25;X171

**文献标识码:**A

**文章编号:**1001-4810(2018)05-0733-09

### 0 引 言

中国西南地区是世界上面积最大、最集中连片的岩溶区<sup>[1]</sup>。目前,以岩溶石漠化为主的一系列生态环境问题已经成为中国西南岩溶石山地区迫切需要解决的、严重威胁到区域社会经济可持续发展、并对区域气候产生一定影响的重大环境问题<sup>[2]</sup>。在过去的几十年中,大气中的  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  浓度分别以 0.5% 和 0.8% 的速度增长<sup>[3]</sup>。在岩溶地区,关于  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  的研究多集中在对土壤中  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  浓度、运移特征及其变化规律地探讨,或是采用静态暗箱法研究地表  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  浓度变化规律。刘芳等<sup>[4]</sup>研究发现土壤中

$\text{CO}_2$  浓度随土壤深度的增加先增加后减小,且与同点位  $\text{CH}_4$  浓度呈负相关;房彬等<sup>[5]</sup>研究发现地表  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  通量具有明显的季节变化;程建中等<sup>[6]</sup>采用气象色谱法研究了不同土地利用下,土壤中  $\text{CO}_2$  浓度与地表  $\text{CO}_2$  通量的季节变化及其相关关系,得出地表  $\text{CO}_2$  排放强烈依赖于土壤中  $\text{CO}_2$  浓度积累和分布。经过多年的治理,我国西南岩溶地区石漠化总面积由 2005 年的 12.96 万  $\text{km}^2$  降至 2015 年的 9.2 万  $\text{km}^2$ ,且石漠化土地扩展速度和面积增加势头均呈现减缓态势<sup>[7-8]</sup>。然而,对于石漠化治理后岩溶地区土壤中  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  浓度的变化及由此引发的碳汇变化研究较少,这对于石漠化治理而言显然是不够的。因此探究

资助项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0502300);中央高校基本科研业务费专项(XDJK2017D024);重庆市科委院士专项(cstc2016jcyjys0003)

第一作者简介:刘九缠(1991—),男,硕士研究生,主要研究方向为全球变化、岩溶生态环境。E-mail:1442605890@qq.com。

通信作者:E-mailsunyc@swu.edu.cn

收稿日期:2018-02-27

经过石漠化治理的岩溶区土壤中  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  浓度的变化特征及其相互效应对于岩溶区固碳增汇而言意义重大。

本研究选择国家“十一五”科技支撑计划的实施样区—重庆市南川石漠化治理示范区为研究区,观测经过石漠化治理土壤中  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  浓度的变化特征,以及不同埋放深度岩溶试片的溶蚀量,探讨石漠化治理对岩溶作用产生碳汇的影响,解析土壤中  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  的相互效应对于碳排放的影响,为我国西南岩溶区石漠化治理及碳汇估算提供数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本研究区位于重庆市南川区南平镇境内,地处南川市西南部边缘,距市区 25 km,处于  $106^{\circ}56'15'' \sim 107^{\circ}0'30''\text{E}$ ,  $29^{\circ}05'30'' \sim 29^{\circ}0'10''\text{N}$  之间,地形总体是西高东低,中间为 U 型河谷平缓带,两边为浅丘,大部分属浅丘地貌,部分地区为低山地貌,海拔 578~1 031 m,相对高差 453 m,平均海拔 690 m,地层为三叠系嘉陵江组地层。该区主要发育黄色石灰土和黄壤,土层薄厚不均,大部分土壤含碳酸钙。植物类型主要以亚热带灌乔木分布最广,用材林主要树种为马尾松、杉木、柏树、香樟;灌木林主要有杜鹃、马桑等树种;人工林主要是马尾松、杨树、花椒等树种,但人工造林比较分散零星,不成规模,且人工林主要处于生长初期,郁闭度较低。研究区多年平均气温  $16^{\circ}\text{C}$ ,极端最高温度  $39.8^{\circ}\text{C}$ ,极端最低温度  $-5.3^{\circ}\text{C}$ ,多年平均降水量 1 300 mm,最大年降水量 1 528 mm,最小年降水量 826 mm。

本文选择 4 个石漠化治理区(多为人工造林地,依次为金银花地 JYH、杨树林地 YSL、坡改梯 PGT、花椒林地 HJ)作为试验区,并选择附近坡度、坡位等条件基本一致的未治理区作为对比区(多为废弃耕地,依次为荒地 HD、非坡改梯 FPGT、弃耕地 QGD);在试验区和对比区内分层埋放试片(土下 10 cm、20 cm、50 cm、地表 0 cm),每个点设置 3 个埋放剖面,7 个点共埋放 84 个岩溶试片,对比试验区和对比区土壤  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  浓度和岩溶试片溶蚀情况,得出经过石漠化治理岩溶碳汇的差异。

### 1.2 土壤 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 浓度及岩溶试片测定

2016 年 11 月至 2017 年 10 月,每月对研究区 7 个监测点土壤中的  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  气体进行采集,并用气相色谱仪测定(Agilent 7890A,配微池 TCD 和

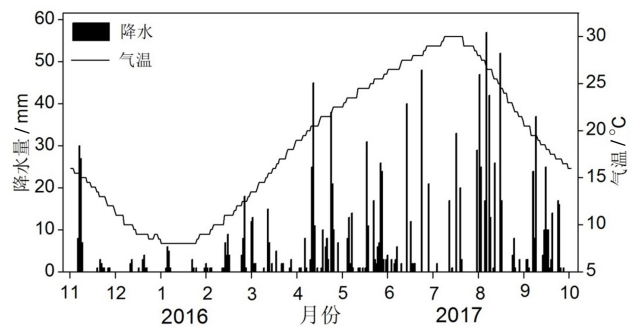


图 1 重庆市南川气温降水图

Fig. 1 Temperature and precipitation map of Nanchuan, Chongqing

FID 检测器),气体样品均在上午 10 点之前采集完毕。利用环刀法在对应深度采集土样,土样经烘干测定含水率和容重;土壤有机碳测定采用重铬酸钾氧化—油浴加热法(GB 7857—87);土壤温度用便携式温度测定仪(FLUKE 51 II)测定;岩溶试片溶蚀量计算采用差量法;用 ArcGIS 解译得到研究区碳汇量。

### 1.3 监测方法

#### 1.3.1 土壤中 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 浓度监测

用自制的土壤  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  采集装置<sup>[9]</sup>,将 L 型 PVC 管埋设于土下 10 cm、20 cm 和 50 cm 处,水平管为土壤气体收集管,其上钻有小孔,作为通气孔;竖管为导气管,导气管顶端升至地面,其上为橡皮塞和玻璃棒(插进硅胶管),以防止土壤气体与大气的交换,埋放在 7 个土壤剖面中;土壤气体用带三通阀的注射器采集(20 mL),采集周期为每月 1 次。

#### 1.3.2 岩溶试片监测

采用磨制的统一规格圆形石灰岩试片(直径 3.0 cm,厚约 3 mm,质量为 10.612 95~13.531 14 g),洗净烘干后用十万分之一的电子天平准确称量试片重量,用油性笔进行编号标记,系上 1 m 长的钓鱼线,放入试片袋中保存(每袋放置一片)。在研究区的 21 个土壤剖面中,在土下 10 cm、20 cm、50 cm、地表和空中 150 cm 处放置试片并掩埋。

#### 1.3.3 溶蚀量计算

采用差量法,定期挖出试片用超纯水洗净,烘干,并用十万分之一的电子天平称取溶蚀后的试片重量,算出其年单位面积溶蚀量,计算公式见(1)<sup>[10]</sup>。

$$ER = (W_1 - W_2) \cdot 1000 \cdot t^{-1} \cdot S^{-1} \cdot 365$$

式中:ER 为年单位面积溶蚀量( $\text{mg} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ),  $W_1$  为试片初始质量(g),  $W_2$  为试片埋放后质量(g),  $t$  为埋放时间(d),  $S$  为试片表面积(约  $16.956 \text{ cm}^2$ )。

根据 7 个点的试片溶蚀速率数据值,估算经过石漠化治理和没有经过石漠化治理的区域的碳汇量。岩溶作用碳汇公式见(2)<sup>[11]</sup>:

$$F_{\text{CO}_2} = r \cdot s \cdot a \cdot M_1(\text{CO}_2) / M_2(\text{CaCO}_3)$$

式中:  $F_{\text{CO}_2}$  为 CO<sub>2</sub> 碳汇量( $10^9 \text{ g} \cdot \text{a}^{-1}$ ),  $r$  为岩溶试片的溶蚀速率( $\text{g} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ),  $a$  为比溶蚀度<sup>[12]</sup>,  $s$  为碳酸盐岩面积( $\text{km}^2$ ),  $M_1(\text{CO}_2)$  为 CO<sub>2</sub> 的分子量(44),  $M_2(\text{CaCO}_3)$  为标准试片(泥盆系融县组纯灰岩,酸不溶物 $<1\%$ )中矿物 CaCO<sub>3</sub> 的分子量(100)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 试验区 and 对比区土壤 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>变化趋势

由图 2 可以看出,土壤中 CO<sub>2</sub> 浓度夏、秋季高于冬、春季,四个试验区不同深度土壤中,CO<sub>2</sub> 浓度在 11 月至次年 4 月(冬、春季)均高于三个对比区,而在 5 月至 10 月(夏、秋季)均低于三个对比区;最大值为  $7\,400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,出现在 6 月对比区土下 20 cm 处;最小值为  $393 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,出现在 1 月对比区土下 50 cm 处;土壤中 CO<sub>2</sub> 浓度随着土壤深度的增加呈现的变

化趋势为先增加后减小,这与前人的研究结果相一致<sup>[4,13]</sup>;但是土壤中 CO<sub>2</sub> 浓度随着深度增加变化较小,且最大值出现在土下 20 cm 处,这与前人研究结果不一致(图 2)。刘芳等<sup>[4]</sup> 研究发现,自地表向下,随着土壤深度的增加,CO<sub>2</sub> 的浓度先增加而后急剧减小,最大值出现在土下 50 cm 处。这可能是由于土壤有机碳在土下 20 cm 处较土下 50 cm 处高,且采样点土质为粘质土,孔隙度较小、质地较硬,不利于 CO<sub>2</sub> 的产生和流通所致(表 1)。

由图 3 可知,土壤中 CH<sub>4</sub> 浓度变化趋势为冬、春季高于夏、秋季。四个试验区不同深度土壤中,CH<sub>4</sub> 浓度在 9 月至次年 1 月(秋、冬季)均低于三个对比区,而在其他月份无明显规律。最大值为  $3.42 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,出现在 12 月对比区土下 50 cm 处;最小值为  $1.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,出现在 10 月试验区土下 20 cm 处。土壤中 CH<sub>4</sub> 浓度与土壤中 CO<sub>2</sub> 浓度表现为相反的趋势,这与刘芳等<sup>[4,14]</sup> 在黔中喀斯特区研究土壤中 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 浓度变化趋势的结果一致。可能是经过石漠化治理植被得到恢复,植被根系排放 O<sub>2</sub> 氧化土壤中 CH<sub>4</sub>,同时根系为 CH<sub>4</sub> 排放提供了通道,导致土壤中 CH<sub>4</sub> 浓度降低<sup>[15-17]</sup>。

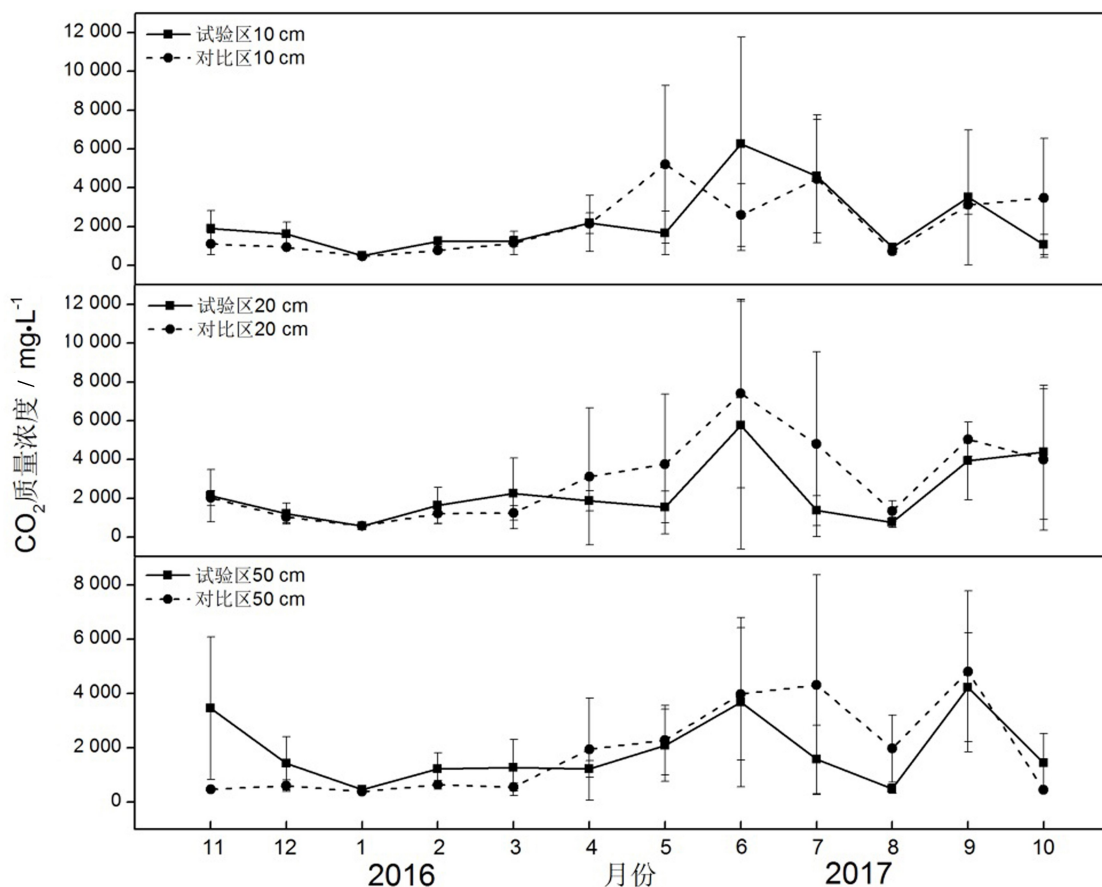
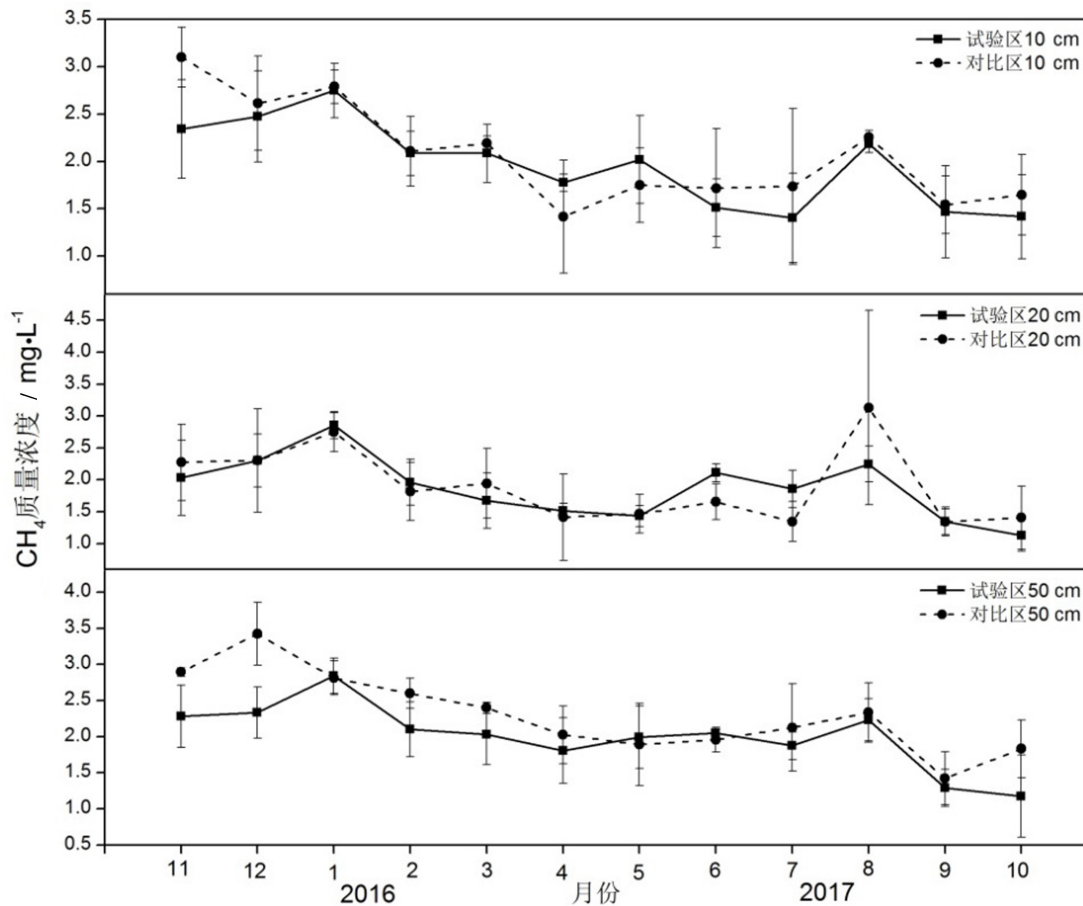


图 2 试验区和对比区土壤 CO<sub>2</sub> 浓度

Fig. 2 Soil CO<sub>2</sub> concentration in experimental area and comparison area

图3 试验区和对比区土壤 CH<sub>4</sub> 浓度Fig. 3 Soil CH<sub>4</sub> concentration in experimental area and comparison area

## 2.2 土壤温度对 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 浓度的影响

由图4可知,试验区和对比区土壤中 CO<sub>2</sub> 浓度均与土壤温度呈正相关关系。这与岩溶区类似研究结果一致,类似研究结果证实土壤 CO<sub>2</sub> 浓度与土壤温度呈正相关关系<sup>[4-5,12]</sup>。土壤中的 CO<sub>2</sub> 主要来源于植物根系呼吸和土壤微生物对有机质的分解氧化,其浓度大小取决于生物因素(植物根系、土壤微生物活性等)和环境因素(土壤温度、湿度等)<sup>[6]</sup>;试验区土壤中 CO<sub>2</sub> 浓度与土壤温度的相关性( $R^2 = 0.3$ ,  $P = 0.57$ )较对比区土壤中 CO<sub>2</sub> 浓度与土壤温度的相关性( $R^2 = 0.58$ ,  $P = 0.77$ )弱,这可能是经过石漠化治理,植被得到恢复(表1),植被的遮蔽作用使得试验区土下温度较稳定,使得土壤温度对于土壤中 CO<sub>2</sub> 浓度的影响减弱。

由图4可知,试验区和对比区土壤中 CH<sub>4</sub> 浓度与土壤温度呈显著负相关关系(由图4知,  $P = -0.72$  和  $P = -0.75$ )。但是土壤中 CH<sub>4</sub> 浓度变化趋势随温度的升高先急剧降低后逐渐趋于平缓;这可能是随着气温升高,土壤中产甲烷菌活性增强,产生更多 CH<sub>4</sub>,

土壤 CH<sub>4</sub> 排放量也随温度升高而增加,同时温度升高植物根系生长促进了 CH<sub>4</sub> 排放,二者共同导致土壤中 CH<sub>4</sub> 浓度降低;而温度升高到一定程度且尚未超过产甲烷菌最适温度(35~37 °C),产甲烷菌活性进一步增强,此时 CH<sub>4</sub> 产生量与排放量趋于一致,因此土壤中 CH<sub>4</sub> 浓度趋于稳定。

## 2.3 土壤含水率、土壤有机碳对 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 浓度的影响

大量研究证实土壤含水率对于土壤中 CO<sub>2</sub> 产生和释放的影响远小于土壤温度,只有在极端干旱和大量降雨的条件下,土壤含水率才瞬时地影响 CO<sub>2</sub> 的产生速率<sup>[18-21]</sup>。土壤容重除了土下 10 cm 处对比区高于试验区外,其余深度试验区均高于对比区,这与试验区和对比区土壤中 CO<sub>2</sub> 变化趋势一致,可能是由于试验区植被覆盖较好,地势平坦,土质较硬,土壤中 CO<sub>2</sub> 不易扩散到空气所致;土壤有机碳最小值出现在杨树林土下 50 cm 处,为 1.48 g·kg<sup>-1</sup>;最大值出现在弃耕地土表 0 cm 处,为 54.60 g·kg<sup>-1</sup>。土壤有机碳含量试验区高于对比区,与土壤中 CO<sub>2</sub> 浓度一致,这是由于试验区植被覆盖较好,枯枝落叶



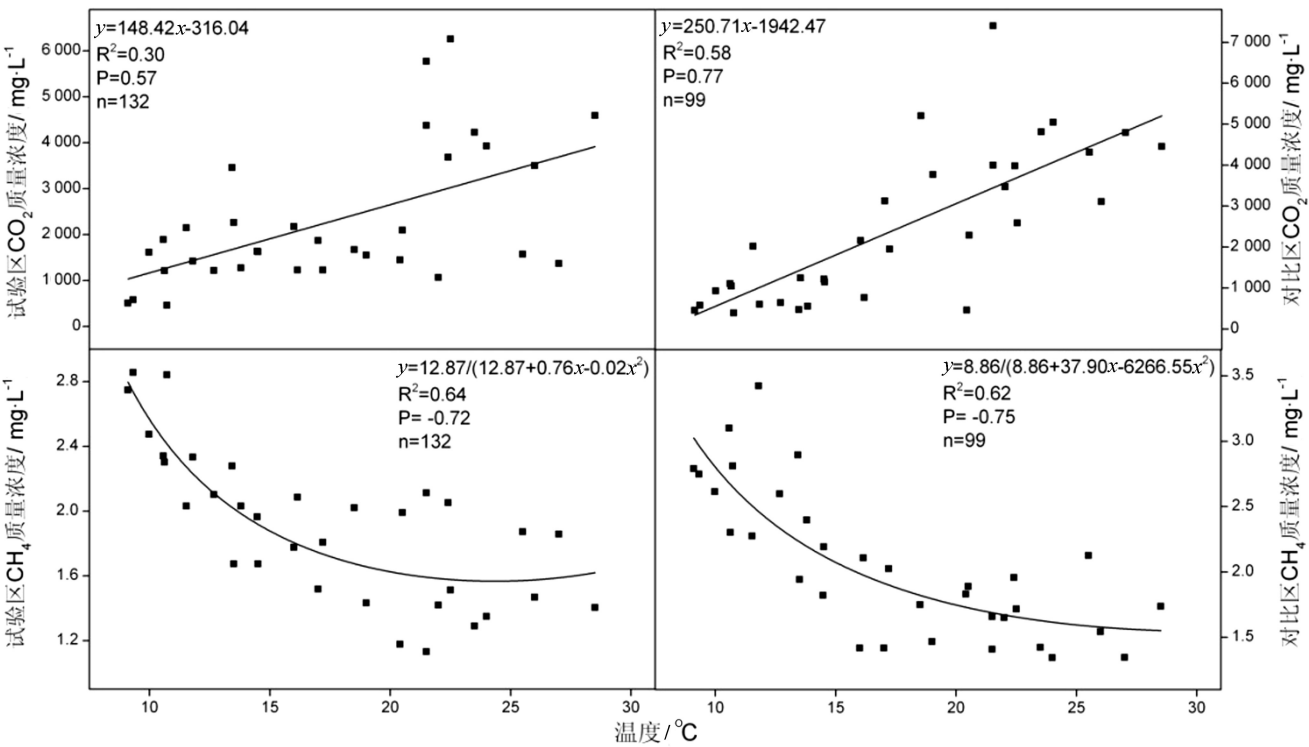


图 4 试验区和对比区土壤 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 浓度与土壤温度关系

Fig. 4 Relationship between soil CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> concentration and soil temperature in experimental area and comparison area

较多所致;以上结果表明土壤温度和土壤有机碳是控制土壤中 CO<sub>2</sub> 的主要因子<sup>[22]</sup>。同时,试验区土壤有机碳含量高也表明石漠化治理对于岩溶区植被恢复具有重要意义(表 1,表 2)。

土壤中 CH<sub>4</sub> 变化趋势与土壤含水率无显著的相关关系,试验区土下 20 cm 以上土壤含水率低于对比区,土下 20 cm 以下则高于对比区,土下 20 cm 处土壤含水率相等,此时试验区和对比区土壤中 CH<sub>4</sub> 变化趋势最相近,这可能是由于试验区植被处于生长初期,植被吸收了大量表层土壤水,造成表层土壤含水

率降低,而土壤水分渗透性增强<sup>[23]</sup>,土壤水分更易进入深层土壤所致。土壤容重除土下 10 cm 处对比区高于试验区外,其余深度试验区均高于对比区,这与试验区和对比区土壤中 CH<sub>4</sub> 变化相反,这可能是由于试验区植被恢复,土壤中植物根系增多,含氧量随之增加,土壤中 CH<sub>4</sub> 被氧化为 CO<sub>2</sub> 所致<sup>[16,24]</sup>。土壤有机碳含量试验区高于对比区,与土壤中 CH<sub>4</sub> 变化趋势相反,这与土壤中 CO<sub>2</sub> 变化趋势与土壤有机碳关系相反。

表 1 试验区和对比区岩溶动力条件<sup>1)</sup>

Table 1 Karst dynamic conditions in experimental area and comparison area

| 名称  | 采样点  | 土地利用 | 平均土温 /℃ | 含水率/% | 容重    | 土壤有机碳/<br>g · kg <sup>-1</sup> | 溶蚀速率/<br>mg · cm <sup>-2</sup> · a <sup>-1</sup> |
|-----|------|------|---------|-------|-------|--------------------------------|--------------------------------------------------|
| 试验区 | 杨树林地 | 次生林地 | 14. 21  | 22. 6 | 1. 29 | 11. 44                         | 2. 29                                            |
|     | 花椒林地 | 经济林地 | 13. 39  | —     | —     | 12. 26                         | 1. 45                                            |
|     | 金银花地 | 药材地  | 15. 69  | 23. 1 | 1. 29 | 21. 02                         | 2. 90                                            |
|     | 坡改梯  | 防护林地 | 15. 98  | 22. 6 | 1. 21 | 23. 97                         | 0. 91                                            |
| 对比区 | 荒地   | 草地   | 16. 14  | 21. 5 | 1. 33 | 9. 93                          | 1. 82                                            |
|     | 弃耕地  | 次生林地 | 14. 53  | —     | —     | 22. 87                         | 3. 73                                            |
|     | 非坡改梯 | 荒草地  | 16. 29  | 21. 6 | 1. 04 | 16. 62                         | 0. 76                                            |

1) 以上数值均为平均值;“—”表示无测量数据。

表 2 试验区 and 对比区土壤有机碳条件

Table 2 Soil organic carbon conditions in experimental area and comparison area

| 名称  | 采样点  | 0cm 土壤有机碳/<br>g · kg <sup>-1</sup> | -10cm 土壤有机碳/<br>g · kg <sup>-1</sup> | -20cm 土壤有机碳/<br>g · kg <sup>-1</sup> | -50cm 土壤有机碳/<br>g · kg <sup>-1</sup> |
|-----|------|------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 试验区 | 杨树林地 | 30.38                              | 11.22                                | 2.69                                 | 1.48                                 |
|     | 花椒林地 | 23.85                              | 12.34                                | 7.22                                 | 5.65                                 |
|     | 金银花地 | 47.08                              | 15.97                                | 14.07                                | 6.98                                 |
|     | 坡改梯  | 39.54                              | 15.38                                | 11.85                                | 10.13                                |
| 对比区 | 荒地   | 15.82                              | 8.94                                 | 8.70                                 | 6.26                                 |
|     | 弃耕地  | 54.60                              | —                                    | 8.60                                 | 5.40                                 |
|     | 非坡改梯 | 27.18                              | 21.42                                | 12.75                                | 5.11                                 |

1.7 试验区和对比区岩溶试片溶蚀状况

最新研究表明,植被恢复对岩溶作用有促进作用<sup>[25]</sup>,生物作用及土壤碳酸酐酶对岩溶作用也有一定促进作用<sup>[26]</sup>;蓝家程等<sup>[27]</sup>对贵州石漠化治理区的研究也证实石漠化治理能明显增强碳汇效应。本研究采用标准溶蚀试片法<sup>[28]</sup>监测溶蚀速率,图 5 所示,溶蚀速率最大值出现在金银花地土下 50 cm 处,为 4.66 mg · (cm<sup>2</sup> · a)<sup>-1</sup>;最小值出现在非坡改梯土下 10 cm 处,为 -5.00 mg · (cm<sup>2</sup> · a)<sup>-1</sup>。总体而言,试验区较对比区岩溶试片溶蚀速率大,且与 CO<sub>2</sub> 变化趋势一致,说明石漠化治理对于岩溶碳汇起到了促进作用。非坡改梯(对比区)处部分岩溶试片质量增加,这是因为,非坡改梯处地表灰岩出露,具有侵蚀

性的雨水首先会溶解试片上部的灰岩,到达试片位置时其溶蚀能力已大为减弱,甚至方解石达到饱和(既不溶解也不沉积)或过饱和(不但不溶解,反而出现碳酸钙沉积)<sup>[29]</sup>,从而导致岩溶试片质量增加。花椒林地溶蚀速率低于弃耕地,这是由于弃耕地为自然恢复的次生林地,植被生长茂盛,而花椒林地由于受到人类活动影响较大,其物种丰富度较低,因此花椒林地溶蚀速率偏低。试验区土壤中 CO<sub>2</sub> 变化趋势与溶蚀速率的相关性(P=0.683)较对比区土壤中 CO<sub>2</sub> 变化趋势与溶蚀速率的相关性(P=0.326)强,说明经过石漠化治理,土壤中 CO<sub>2</sub> 对于溶蚀速率的影响加强<sup>[30]</sup>(图 6)。结合溶蚀速率计算得到石漠化治理后岩溶碳汇增加了 0.66~9.42 t · km<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup>(表 3),变化范围

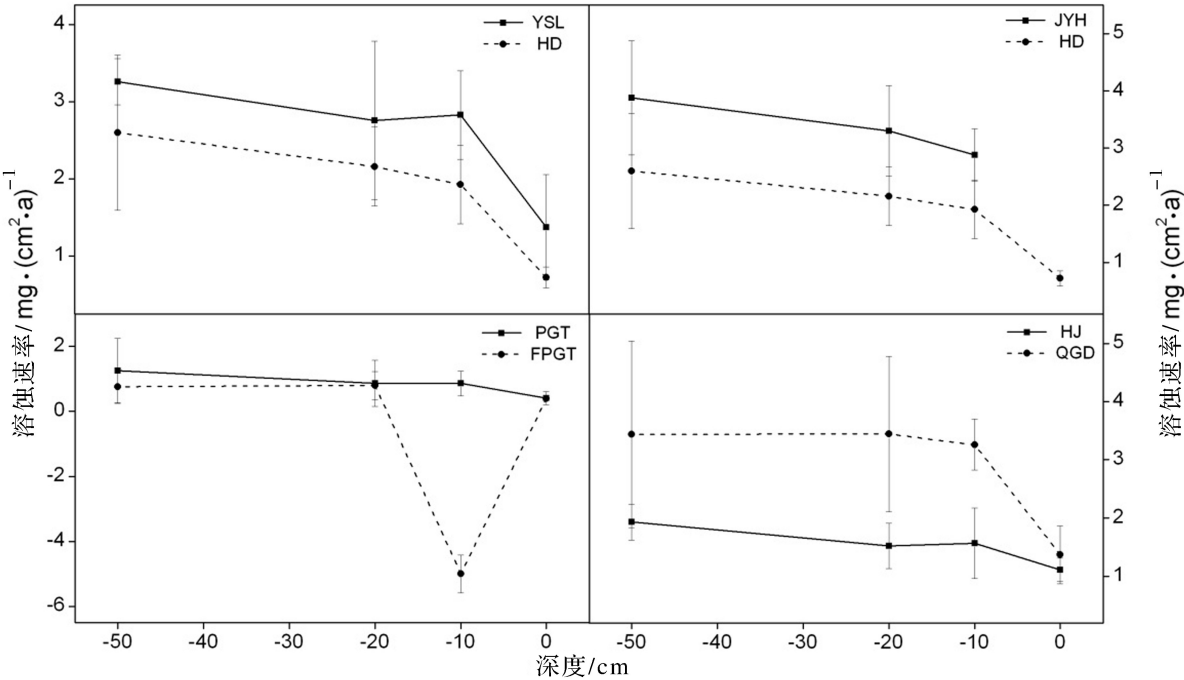


图 5 试验区和对比区岩溶试片溶蚀速率

Fig. 5 The dissolution rate of karst test trip in experimental area and comparison area

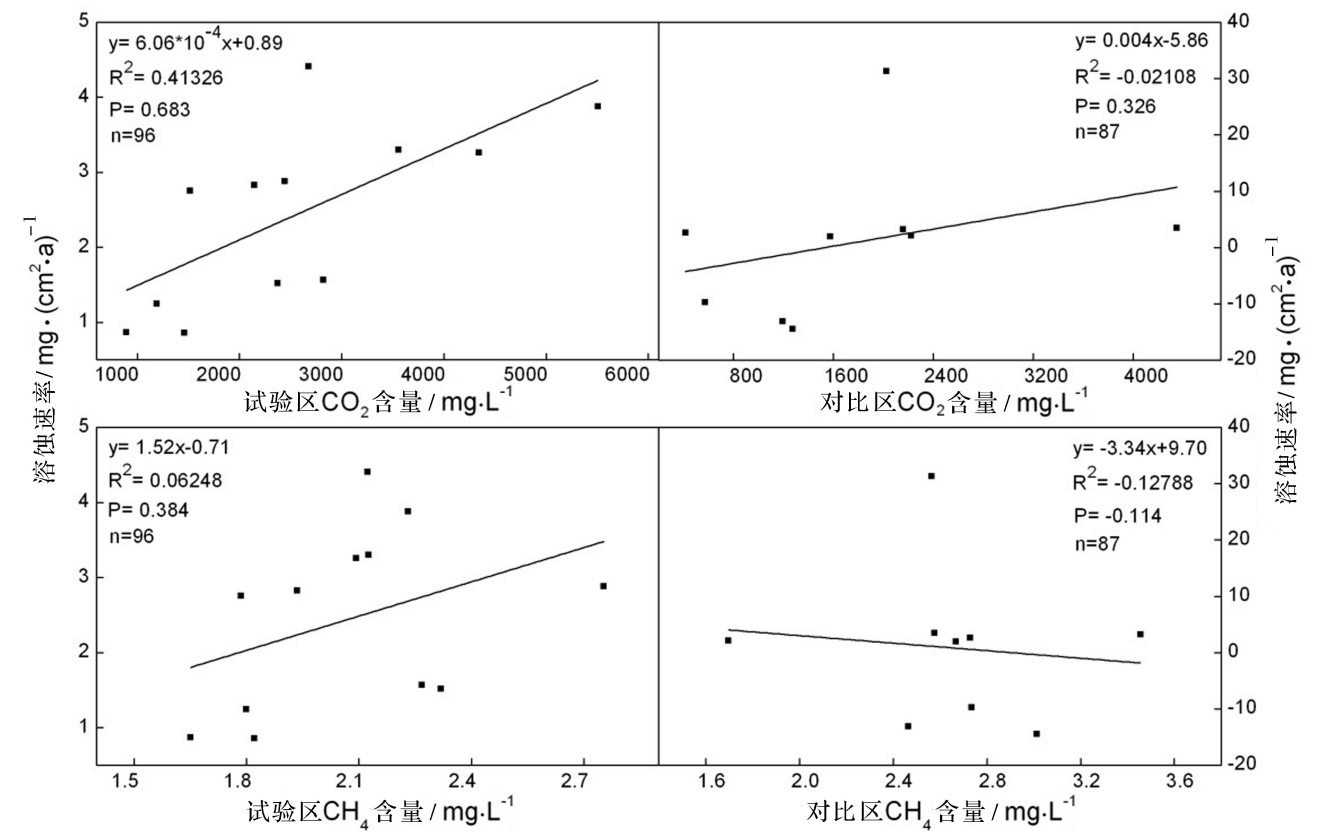


图 6 试验区和对比区土壤 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 含量与溶蚀速率关系

Fig. 6 Relationship between soil CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> concentration and dissolution rate in experimental area and comparison area

表 3 试验区和对比区碳汇量

Table 3 The amount of carbon sink in experimental area and comparison area

| 名称  | 采样点  | 土地利用 | 单位面积溶蚀量/<br>t · km <sup>-2</sup> · a <sup>-1</sup> | 单位面积 CO <sub>2</sub> 消耗量/<br>t · km <sup>-2</sup> · a <sup>-1</sup> | 碳汇/<br>t · C · km <sup>-2</sup> · a <sup>-1</sup> |
|-----|------|------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 试验区 | 杨树林地 | 次生林地 | 22.9                                               | 10.08                                                               | 2.75                                              |
|     | 花椒林地 | 经济林地 | 14.5                                               | 6.38                                                                | 1.74                                              |
|     | 金银花地 | 药材地  | 29.0                                               | 12.76                                                               | 3.48                                              |
|     | 坡改梯  | 经济林地 | 9.1                                                | 4.00                                                                | 1.09                                              |
| 对比区 | 荒地   | 荒草地  | 18.2                                               | 8.01                                                                | 2.18                                              |
|     | 弃耕地  | 次生林地 | 37.3                                               | 16.41                                                               | 4.48                                              |
|     | 非坡改梯 | 荒草地  | 7.6                                                | 3.34                                                                | 0.91                                              |

大于章程<sup>[31]</sup>的 5.71~7.02 t · km<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup>。这是由于坡改梯处于治理初期,植被处于生长初期,因此相较于荒草地而言碳汇增量较小,而金银花地已经过多年治理、植被茂盛,相较于荒草地而言碳汇增量相对较高,这也从侧面说明植被正向演替的不同阶段对大气 CO<sub>2</sub> 吸收的量是不同的。

3 结 论

(1)在时间和空间分布上,无论是总的变化趋势,还是试验区与对比区土壤中 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>变化趋势均呈负相关关系,即 CO<sub>2</sub>浓度升高时 CH<sub>4</sub>浓度降低,反之亦然。

(2)通过对试验区 and 对比区土壤中  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  变化特征与土壤温度,土壤含水率,土壤容重,土壤有机碳含量的相关关系进行分析得出:土壤温度和土壤有机碳是影响土壤中  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  浓度的主要因素;土壤温度与土壤中  $\text{CO}_2$  呈正相关关系且相关性随石漠化治理而变弱,说明经过石漠化治理土壤温度对土壤中  $\text{CO}_2$  浓度的影响减弱。

(3)试验区岩溶试片溶蚀速率大于对比区;显示与土壤中  $\text{CO}_2$  变化趋势一致,相关性分析表明经过石漠化治理,土壤中  $\text{CO}_2$  对于溶蚀速率的影响加强;岩溶试片溶蚀速率增加表明石漠化治理对于岩溶碳汇起到了促进作用,结合溶蚀速率得到石漠化治理区较对比区岩溶碳汇增加了  $0.66 \sim 9.42 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ;试验区土壤有机碳含量高表明石漠化治理对于岩溶区植被恢复具有重要意义。

## 参考文献

- [1] 吴次芳. 国土规划的理论与方法[M]. 北京:科学出版社, 2003.
- [2] 杨龙, 熊康宁, 肖时珍, 等. 花椒林在喀斯特石漠化治理中的碳汇效益[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1):292-297.
- [3] Wang Y Y. Concentration profiles of  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  and  $\text{N}_2\text{O}$  in soils of a wheat-maize rotation ecosystem in North China Plain, measured weekly over a whole year[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2013, 164(1).
- [4] 刘芳, 刘丛强, 王仕禄, 等. 喀斯特地区土壤剖面  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  浓度的相关关系[J]. 生态学杂志, 2010, 29(4):717-723.
- [5] 房彬, 李新清, 张立科, 等. 西南喀斯特地区灌丛土壤  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  通量研究[J]. 地球化学, 2013, 42(3):221-228.
- [6] 程建中, 李心清, 周志红, 等. 土壤  $\text{CO}_2$  浓度与地表  $\text{CO}_2$  通量的季节变化及其相互关系[J]. 地球与环境, 2011, 39(2):196-202.
- [7] 蒋忠诚, 罗为群, 童立强, 等. 21 世纪西南岩溶石漠化演变特点及影响因素[J]. 中国岩溶, 2016, 35(5):461-468.
- [8] 刘拓. 中国岩溶石漠化:现状、成因与防治[M]. 北京:中国林业出版社, 2009.
- [9] 何师意, 徐胜友, 张美良. 岩溶土壤中  $\text{CO}_2$  浓度、水化学观测及其与岩溶作用关系[J]. 中国岩溶, 1997(4):319-324.
- [10] 黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 等. 不同岩性试片溶蚀速率差异及意义[J]. 地球与环境, 2015, 43(4):379-385.
- [11] 曹建华, 杨慧, 康志强. 区域碳酸盐岩溶蚀作用碳汇通量估算初探:以珠江流域为例[J]. 科学通报, 2011, 56(26):2181-2187.
- [12] 朱真. 影响碳酸盐岩比溶蚀度, 比溶解度因素探讨[J]. 广西地质, 1997(3):37-44.
- [13] 吴靖霆. 湿地土壤剖面  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  进空分布规律及其影响因素研究[D]. 杭州:浙江大学, 2016.
- [14] 刘芳, 刘丛强, 王仕禄, 等. 黔中喀斯特石漠化地区土壤温室气体浓度的时空分布特征[J]. 环境科学, 2009, 30(11):3136-3141.
- [15] 丁维新, 蔡祖聪. 植物在  $\text{CH}_4$  产生、氧化和排放中的作用[J]. 应用生态学报, 2003, 14(8):1379-1384.
- [16] Calhoun A, King G M. Regulation of root-associated methanotrophy by oxygen availability in the rhizosphere of two aquatic macrophytes. [J]. Appl Environ Microbiol, 1997, 63(8):3051-3058.
- [17] Aulakh M S, Wassmann R, Rennenberg H, et al. Pattern and amount of aerenchyma relate to variable methane transport capacity of different rice cultivars. [J]. Plant Biol, 2000, 2(2):182-194.
- [18] Anderson J M. Carbon dioxide evolution from two temperate, deciduous woodland soils [J]. Journal of Applied Ecology, 1973, 10(2):361-378.
- [19] Edwards N T. Effects of temperature and moisture on carbon dioxide evolution in a mixed deciduous forest floor [J]. Soil Science Society of America, 1975, 39(2):361-365.
- [20] 孙向阳, 乔杰, 谭笑. 温带森林土壤中的  $\text{CO}_2$  排放通量[J]. 东北林业大学学报, 2001, 29(1):34-39.
- [21] 刘硕, 李玉娥, 孙晓涵, 等. 温度和土壤含水量对温带森林土壤温室气体排放的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(7):1093-1098.
- [22] 章程, 谢运球, 吕勇, 等. 不同土地利用方式对岩溶作用的影响:以广西弄拉峰丛洼地岩溶系统为例[J]. 地理学报, 2006, 61(11):1181-1188.
- [23] 章程. 不同土地利用下土溶蚀速率季节差异及其影响因素:以重庆金佛山为例[J]. 地质论评, 2010, 56(1):136-140.
- [24] 孙文涛, 肖千明, 娄春荣, 等. 土壤中甲烷的形成、排放及影响因素[J]. 杂粮作物, 2000(5):44-47.
- [25] Ford D, Williams P D. Karst Hydrogeology and Geomorphology[J]. American Geophysical Union, 2007.
- [26] Li W, Yu L J, Yuan D X, et al. Bacteria biomass and carbonic anhydrase activity in some karst areas of Southwest China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2004, 24(2):145-152.
- [27] 蓝家程, 肖时珍, 杨龙, 等. 石漠化治理对岩溶作用强度的影响及其碳汇效应[J]. 水土保持学报, 2016, 30(3):244-249.
- [28] 袁道先, 蔡桂鸿. 岩溶环境学[M]. 重庆:重庆科学技术出版社, 1988, 1-200.
- [29] 刘再华. 岩溶作用及其碳汇强度计算的“入渗-平衡化学法”:兼论水化学径流法和溶蚀试片法[J]. 中国岩溶, 2011, 30(4):379-382.
- [30] Xu S, He S. The  $\text{CO}_2$  regime in soil profile and its drive to dissolution in carbonate rock area. Carsologica Sinica, 1996(15):50-57.
- [31] 章程. 不同土地利用下的岩溶作用强度及其碳汇效应[J]. 科学通报, 2011, 56(26):2174-2180.



## Effects of rocky desertification control on CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> variation and carbon sink in soil

LIU Jiuchan<sup>1</sup>, SUN Yuchuan<sup>1,2</sup>, SHEN Licheng<sup>1</sup>, TANG Lian<sup>1</sup>, LIU Ningkun<sup>1</sup>, YOU Xianhui<sup>1</sup>

(1. *Opening Laboratory of Karst Environment, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China;*

2. *Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China*)

**Abstract** In order to explore the effects of rocky desertification control on the changes of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in soil and the effect of carbon sink, the CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> concentrations in the rocky desertification control demonstration area of Nanchuan, Chongqing were observed by gas chromatography. The effects of rocky desertification control on the changes of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in soil were analyzed combined with soil temperature, soil moisture content, soil bulk density and soil organic carbon in different soil layers in experimental area (the rocky desertification control area) and comparison areas (grassland without rocky desertification control). The effect of rocky desertification control on karst sink effect was studied (experimental area) and the amount of karst carbon sink was also estimated using the dissolution data. The results show that, (1) The changes of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in soil are different in terms of time and space. The CO<sub>2</sub> concentration increased firstly and then decreased with soil depth, and the variation range was 393–7,400 mg · L<sup>-1</sup>, while the CH<sub>4</sub> concentration decreased firstly and then increased with soil depth, the variation range was 1.13–3.42 mg · L<sup>-1</sup>. (2) The mean CO<sub>2</sub> concentration in the experimental area was 2,131 mg · L<sup>-1</sup>, and the mean value of CH<sub>4</sub> was 1.94 mg · L<sup>-1</sup>, whereas the mean CO<sub>2</sub> concentration in the comparison area was 2,338 mg · L<sup>-1</sup> and the mean value of CH<sub>4</sub> was 2.10 mg · L<sup>-1</sup>. (3) Soil temperature and soil organic carbon had a significantly positive correlation with CO<sub>2</sub>, but negatively correlated with CH<sub>4</sub> in soil, indicating that soil temperature and soil organic carbon are the main factors affecting the concentration of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in soil. (4) The relationship between soil temperature and CO<sub>2</sub> was positive and the correlation was weakened with the increase of rocky desertification control, indicating that the impact of soil temperature on soil CO<sub>2</sub> concentration was weakened after rocky desertification control. (5) The dissolution rate of karst test strip in the experimental area is larger than that in the comparison zone, and after the treatment of rocky desertification, the carbon sink generated by karst processes can be increased by 0.66–9.42 t · km<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup>, indicating that the rocky desertification control improves the carbon sink in the karst area.

**Key words** rocky desertification control, soil CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, karst test strip, karst carbon sink effect

(编辑 张玲)