

蒲敏, 孙玉川, 刘宁坤, 刘九缠. 岩溶区石漠化土壤 CO<sub>2</sub> 浓度和地表 CO<sub>2</sub> 通量研究 [J]. 广东农业科学, 2019, 46(5): 74-82.

## 岩溶区石漠化土壤 CO<sub>2</sub> 浓度和地表 CO<sub>2</sub> 通量研究

蒲敏<sup>1</sup>, 孙玉川<sup>1,2</sup>, 刘宁坤<sup>2</sup>, 刘九缠<sup>2</sup>

(1. 西南大学地理科学学院 / 岩溶环境重庆市重点实验室, 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, 广西 桂林 541004)

**摘要:** 【目的】探讨我国南方喀斯特石漠化地区 CO<sub>2</sub> 浓度分布和时空排放规律及岩区土壤有机碳含量、土壤温度及土壤含水率等环境因子对 CO<sub>2</sub> 浓度及释放速率的影响。【方法】采用静态密闭箱-气相色谱法, 对 2017 年 1~12 月重庆市南川石漠化治理示范区岩溶碳汇试验区坡改梯及对对照区非坡改梯的土壤 CO<sub>2</sub> 浓度和地表 CO<sub>2</sub> 通量进行原位监测。【结果】非坡改梯地区土壤 CO<sub>2</sub> 浓度比坡改梯地区大, 坡改梯和非坡改梯地区土壤 CO<sub>2</sub> 浓度大多数随着土壤深度增加呈下降趋势; 非坡改梯地区地表 CO<sub>2</sub> 释放通量高于坡改梯地区; 土壤 CO<sub>2</sub> 浓度及释放通量均随季节有明显变化, 在一定范围内土壤温度及土壤含水率都与地表 CO<sub>2</sub> 释放通量呈显著正相关关系, 在个别月份出现显著变化, 表现为巨大的源与汇。【结论】土壤 CO<sub>2</sub> 浓度主要受土壤有机碳、土壤温度、土壤含水率、土壤微生物及人为因素共同影响, 地表 CO<sub>2</sub> 通量变化与植被覆盖、人类活动及土壤 CO<sub>2</sub> 浓度密切相关。

**关键词:** 喀斯特; 坡改梯; 静态密闭箱-气相色谱法; 土壤 CO<sub>2</sub> 浓度; 释放通量

中图分类号: S154.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-874X(2019)05-0074-09

## Study on Soil CO<sub>2</sub> Concentration and Surface CO<sub>2</sub> Flux in Karst Rocky Desertification Area

PU Min<sup>1</sup>, SUN Yuchuan<sup>1,2</sup>, LIU Ningkun<sup>2</sup>, LIU Jiuchan<sup>2</sup>

(1. Chongqing Key Laboratory of Karst Environment, School of Geographical Sciences, Southwestern University, Chongqing 400715, China; 2. Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Land and Resources & Guangxi Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China)

**Abstract:** 【Objective】 This paper aimed to investigate the distribution of CO<sub>2</sub> concentration and its temporal and spatial emission laws in karst rocky desertification areas in southern China, and to explore the effects of environmental factors such as soil organic carbon content, soil temperature and soil water content on CO<sub>2</sub> concentration and release rate in karst areas. 【Method】 The Static sealed chamber-gas chromatography method was used to monitor in situ the soil CO<sub>2</sub> concentration and the surface CO<sub>2</sub> flux in the terraced karst carbon sink experimental area and in the non-terraced karst carbon sink control area respectively in Nanchuan Rocky Desertification Control Demonstration Area in Chongqing from January to December of 2017. 【Result】 The soil CO<sub>2</sub> concentration in the non-terraced area was higher than that in the terraced area, and the soil CO<sub>2</sub> concentration in terraced area and non-terraced area decreased with the increase of soil depth; the surface CO<sub>2</sub> emission flux in non-terraced area was higher than that in terraced area; both the soil CO<sub>2</sub> concentration and the emission flux changed significantly with seasons. The soil temperature and soil water content showed

收稿日期: 2018-12-27

基金项目: 重庆市科委院士专项基金 (cstc2018jcyj-yszx0013)

作者简介: 蒲敏 (1995—), 女, 在读硕士生, 研究方向为岩溶学与环境变化, E-mail: 7378293192@qq.com

通信作者: 孙玉川 (1982—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为环境科学与资源利用, E-mail: 13982456@qq.com

significant positive correlations with the surface CO<sub>2</sub> emission flux to some extent, and obvious changes occurred in some months, shown as huge sources and sinks. 【 Conclusion 】 Soil CO<sub>2</sub> concentration is jointly affected by soil organic carbon, soil temperature, soil water content, soil microorganisms and human factors while the surface CO<sub>2</sub> flux is closely related to vegetation coverage, human activities and soil CO<sub>2</sub> concentration.

**Key words:** Karst; slope to terraced area; static sealed chamber-gas chromatography; soil carbon dioxide concentration; emission flux

【研究意义】CO<sub>2</sub>是大气中最重要的温室气体，并以每年0.5%的速率增长，对全球气候变化影响重大。土壤动物、土壤微生物和植物根系的新陈代谢过程，土壤有机质氧化分解过程及碳酸盐岩的矿化沉积过程等都会造成土壤CO<sub>2</sub>的产生，部分形成的土壤CO<sub>2</sub>通过土壤呼吸排放到大气中，因而探测土壤作为CO<sub>2</sub>的源与汇是全球气候变化研究的重点前沿课题。土壤是全球陆地系统中最巨大的碳库载体，其贮存的碳总量为1 300~2 000 PgC，是全球陆地植被碳储量(500~600 PgC)的2~3倍，也是大气碳储量(750 PgC)的2倍<sup>[1]</sup>，土壤碳库在全球碳平衡中也具有重要作用。我国岩溶区占国土面积的1/3，而全球岩溶区的分布面积占陆地面积的15%，我国是世界上喀斯特覆盖最广、面积最大、类型最多的国家，岩溶面积高达344万km<sup>2</sup><sup>[2]</sup>。我国西南岩溶区是一个巨大的碳库，在特定条件下土壤、植被、地质、地貌、气候、水文共同作用下发育形成的独特喀斯特生态环境，是我国甚至全球热带、亚热带喀斯特覆盖面积最大、发育最强烈的地区。深入研究岩溶区土壤碳储量及其变化，不仅能了解全球土壤碳储量动态变化，还有助于探索全球碳汇未知之谜<sup>[3]</sup>。【前人研究进展】目前，我国对西南岩溶地区土壤CO<sub>2</sub>源与汇的研究区域主要集中在桂林盘龙洞、贵州贵阳、云南路南石林地区、重庆金佛山等。虽然关于岩溶地区土壤CO<sub>2</sub>浓度分布状况、地表CO<sub>2</sub>通量时间、空间变化规律的研究很多，但涉及岩溶石漠化地区土壤CO<sub>2</sub>的浓度及通量时空变化规律的报道较少，且只有少数学者进行了小部分研究，未能对比较长时期与昼夜期间的变化，对不同空间部位进行原位检测和动态跟踪研究，对将我国岩溶区土壤CO<sub>2</sub>对全球气候变化的影响量化显然不够。【本研究切入点】特殊地质背景下，造就了喀斯特地区既脆弱又敏感的生态环境，全球气候变化的核心问题之一是全球碳循环，岩溶作用对土壤

CO<sub>2</sub>浓度的调节受到国内外普遍关注<sup>[4]</sup>。土壤与大气之间的碳通量对调节大气CO<sub>2</sub>浓度具有重要意义，岩溶作用消耗土壤CO<sub>2</sub>对大气碳库起到重要的减源作用，对土壤CO<sub>2</sub>进行研究将有利于进一步揭示岩溶碳循环过程。研究喀斯特石漠化地区CO<sub>2</sub>气体在全球大气CO<sub>2</sub>的源与汇研究中具有重要作用，揭示喀斯特地区碳循环的机理、碳通量的差异，加强碳汇估算研究，了解土壤CO<sub>2</sub>在土壤-大气界面的分布，可为我国增汇减排任务的顺利完成提供科学依据<sup>[5]</sup>。【拟解决的关键问题】作为陆地生态系统碳循环的重要环节之一，喀斯特地区在全球碳循环中影响巨大，喀斯特地区土壤碳收支及其对土壤温度和土壤含水率的响应需要进一步深入研究。本文主要针对西南喀斯特石漠化典型地区重庆南川试验区，通过对坡改梯区域与对照区非坡改梯区域两者不同剖面深度的土壤CO<sub>2</sub>浓度及地表CO<sub>2</sub>通量进行12个月的动态跟踪监测，分析土壤CO<sub>2</sub>浓度及地表CO<sub>2</sub>通量的分布状况和变化规律，讨论研究区土壤温度、土壤含水率等环境因子对土壤CO<sub>2</sub>浓度的影响，为量化西南地区土壤CO<sub>2</sub>温室气体对全球气候变化的影响作贡献，为我国西南岩溶区石漠化治理工程碳汇通量科学估算和增汇途径提供科技支撑，也为减少温室气体的排放进而缓解全球变暖提供数据支撑。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

研究区位于重庆市南川区南平镇境内(图1)，距离市中心16 km，地处南川市西南边缘，地形大体为东部低、西部高，两边多浅丘地貌，中部为“U”型河谷平缓地带，大部分属浅丘槽坝地貌，以山坡地块为主，海拔为620~1 031 m。多年平均气温为16℃，多年平均降水量为1 360 mm，最小年降水量为826 mm，最大年降水量为1 528 mm。土壤主要类型为石灰土，发育不完

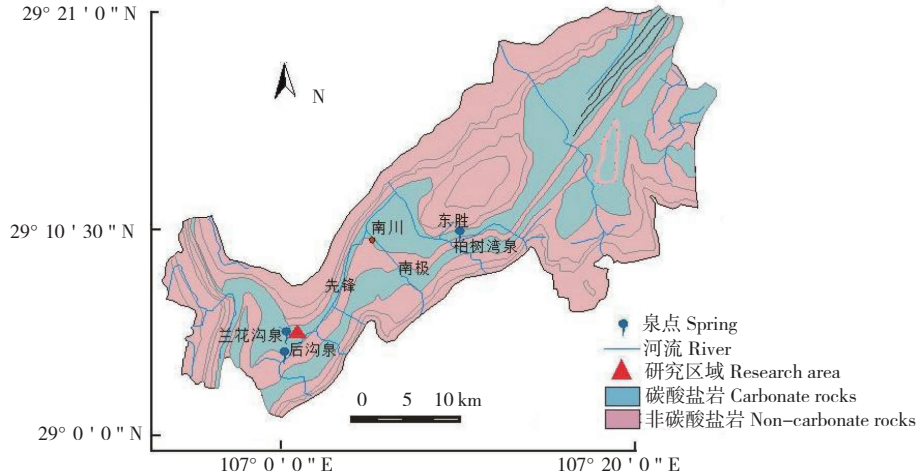


图1 研究区域位置及概况

Fig. 1 Location and general situation of research area

全，土壤质地黏重细腻，胶体品质较差，矿物养分贫乏，且土壤酸瘦缺磷，为酸性土壤<sup>[6]</sup>。亚热带灌乔木为主要植物种类，覆盖面积最广，马尾松 (*Pinus massoniana*)、杉木 (*Cunninghamia lanceolata*)、柏树 (*Cupressus funebris*)、香樟 (*Cinnamomum camphora* Presl) 等树种为主要用材林，杜鹃 (*Rhododendron simsii* Planch)、马桑 (*Coriaria nalesis* Wall) 等树种为主要灌木林，马尾松、杉木、青杨 (*Populus cathayana* Rehd) 等树种为主要人工造林，造林分布比较零星分散，未集中形成规模<sup>[7]</sup>。目前研究区的林地面积 152.27 hm<sup>2</sup>，其中乔木林 65.23 hm<sup>2</sup>、占林地面积的 42.8%，灌木林 20.25 hm<sup>2</sup>、占林地面积的 13.3%，疏幼林 79 hm<sup>2</sup>、占林地面积的 43.9%。南川区目前植被覆盖率为 27.3%，森林植被覆盖率为 9.3%。地质构造属新华夏构造体系，出露的地层为早三叠系嘉陵江组白云质灰岩 (T1j)<sup>[8]</sup>。由于长期遭受不合理的土地利用，加上喀斯特地区脆弱的自然环境，岩溶区石漠化现象较为严重，林地呈斑块状分布。

## 1.2 气体采集与测定

**1.2.1 土壤剖面 CO<sub>2</sub> 浓度监测** 用自制的土壤 CO<sub>2</sub> 采集装置，将 L 型 PVC 管埋设在坡改梯与非坡改梯地区的土壤剖面 10、20、50 cm 处，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，插有硅胶管，具有防止土壤气体与大气对流交换的作用；水平管为土壤气体收集管，管上钻有小孔，具有通气作用。土壤气体样品统一采用带三通阀的注射器采集，观测周期为每月 1 次。

**1.2.2 地表 CO<sub>2</sub> 释放速率测定** CO<sub>2</sub> 释放速率的测定通常有碱液吸收法和静态密闭气室法，静态密闭气室法相对于碱液吸收法具有精度高、经济可靠的优点<sup>[9]</sup>，还可以对土壤净排放以及加上植物呼吸作用进行分析对比，CO<sub>2</sub> 释放速率采用静态密闭气室法。该方法使用的采样箱 (40 cm × 40 cm × 40 cm) 用有机玻璃材料制成，箱底基座采用不锈钢柜架。采集气体样品时，将采样箱放入基座凹槽中，在凹槽中注水保证其密封性，采样箱在使用时用保温材料包裹以确保采样时箱内温度稳定。采样箱内安装有搅气小风扇、温度传感器及采气三通阀，气体样品采集用 20 mL 注射器。在 20 min 时间段内，每 5 min 采集 1 次气体样品。CO<sub>2</sub> 通量计算公式为：

$$F = \frac{273.15}{T_a} \times \frac{P}{1.013} \times \frac{1000}{22.4} \times \frac{dc}{dt} \times H \times M \quad (1)$$

式中， $F$  为  $t$  时 CO<sub>2</sub> 的排放通量 (mg/m<sup>2</sup>·h)， $H$  为水面以上采样箱高 (m)， $M$  为被测气体摩尔质量， $T_a$  为空气温度 (K)， $P$  为采样点气压 (105 Pa)， $\frac{dc}{dt}$  为采样时气体浓度随时间变化的直线斜率<sup>[10]</sup>。

CO<sub>2</sub> 体积浓度与质量浓度之间的转换公式为：

$$C_m = \frac{C_v \times M \times P}{8.314 \times T} \quad (2)$$

式中， $C_m$  为待测气体的质量浓度 (mg/m<sup>3</sup>)； $C_v$  为气相色谱分析得到的体积浓度 (10<sup>-6</sup>)； $M$  为待测气体的摩尔质量 (g/mol)； $P$  为采样时刻箱内气压 (kPa)； $T$  为箱内温度 (K)<sup>[11]</sup>。

**1.2.3 CO<sub>2</sub> 气体含量检测** CO<sub>2</sub> 气体含量采用气

相色谱仪 (Agilent 7890A, 配有三阀四柱系统, TCD 检测器、FID 检测器、Ni63- $\mu$ ECD 电子捕获检测器) 检测。CO<sub>2</sub> 检测条件为: 色谱柱为 Porapak-Q 不锈钢填充色谱柱; 填充柱进样口: 50℃, 阀: 80℃; 柱箱温度: 100℃; 柱流量: 40 mL/min; 检测器 TCD: 180℃。

### 1.3 环境因子测定

**1.3.1 温度测定** 每次采集气体样品时用水银温度计测定空气气温、地表温度以及土下 10、20、50 cm 不同剖面的土壤温度和采样箱箱内温度。地温计用于测定地表及地下土壤温度、水体温度。同时采集安置的气象站中气象监测数据。此外, 坡改梯与非坡改梯区内, 样地 1~4 为有草监测, 样地 5~6 为无草监测。

**1.3.2 土壤采样** 每个样地分层采集土壤样品, 实验室称鲜质量后采用烘干法, 即先称出土样鲜质量, 然后在 105℃ 条件下将土样烘干 24 h 并称出干质量, 计算土壤含水率:

$$\text{土壤含水率 (\%)} = \frac{\text{湿土重量} - \text{烘干后重量}}{\text{湿土重量}} \times 100$$

冻干机冻干后的土壤样品, 采用重铬酸钾氧化-油浴加热法测定土壤有机碳含量。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤 CO<sub>2</sub> 浓度监测结果

为分析坡改梯与非坡改梯地区研究点在不同季节月份、不同土壤深度的土壤 CO<sub>2</sub> 浓度变化规律及差异, 将 2017 年各月份坡改梯与对照区非坡改梯地区的研究点在 10、20、50 cm 土层深度的 CO<sub>2</sub> 浓度检测值进行比较分析 (图 2、图 3), 得出以下变化规律: (1) 非坡改梯地区土壤 CO<sub>2</sub> 浓度总体比坡改梯地区大, 非坡改梯为 79 596.12 mg/m<sup>3</sup>, 坡改梯为 60 923.42 mg/m<sup>3</sup>, 土层深度 10、20 cm 的 CO<sub>2</sub> 浓度非坡改梯均比坡改梯大, 但在土壤深度 50 cm 处非坡改梯比坡改梯 CO<sub>2</sub> 浓度小。坡改梯与非坡改梯地区 CO<sub>2</sub> 浓度差异主要取决于人类对土地的不同利用方式和利用的程度。(2) 坡改梯和非坡改梯地区土壤 CO<sub>2</sub> 浓度大多数随着土壤深度增加呈下降趋势, 各土层深度中坡改梯地区浓度变化范围为 756.61~4 798.16 mg/m<sup>3</sup>, 非坡改梯浓度变化范围为 695.32~7518.74 mg/m<sup>3</sup>。但在某些月份如坡改梯地区的 5 月份与非坡改梯的 10 月份其土壤 CO<sub>2</sub> 浓度变化呈现随土壤深度增加 CO<sub>2</sub> 浓度减小

的现象。不同月份不同深度土壤 CO<sub>2</sub> 浓度垂向梯度变化不明显, 可见, 土壤深度对 CO<sub>2</sub> 浓度情况的影响较为复杂。(3) 坡改梯地区土壤 CO<sub>2</sub> 浓度春夏高、秋冬低, 浓度高峰出现在夏季尤其是 6 月份, 最高值为 9 594.06 mg/m<sup>3</sup>, 1 月份为最低值 2 755.37 mg/m<sup>3</sup>。非坡改梯地区土壤 CO<sub>2</sub> 浓度夏秋高、冬春低, 土壤 CO<sub>2</sub> 浓度在 9 月份最大、最高值为 13 913.82 mg/m<sup>3</sup>, 此外 7、10 月份也出现了接近浓度高值的次高峰, 分别为 10 162.41、10 135.42 mg/m<sup>3</sup>, 1 月份为最低值 (2 321.68 mg/m<sup>3</sup>)。土壤 CO<sub>2</sub> 浓度受很多因素影响, 如气候条件、土壤理化性质及人类对土地的利用等, 研究发现本项目区土壤 CO<sub>2</sub> 浓度与土壤温度、土壤含水率和土壤有机碳含量密切相关。

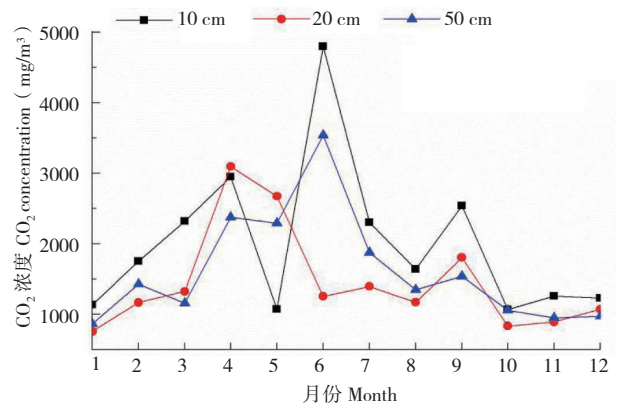


图 2 坡改梯地区不同深度土壤 CO<sub>2</sub> 月浓度变化  
Fig. 2 Monthly change of CO<sub>2</sub> concentration at different depths soil in the terraced area

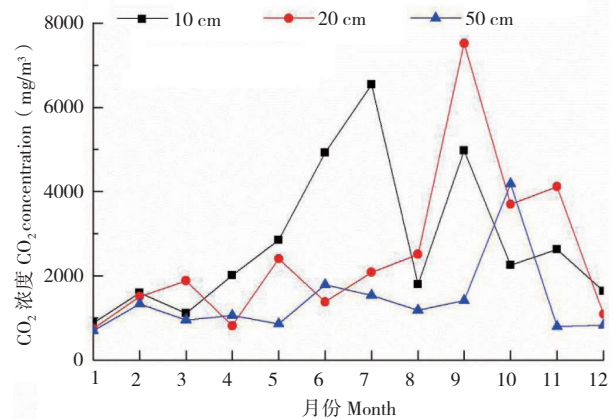


图 3 非坡改梯地区不同深度土壤 CO<sub>2</sub> 月浓度变化  
Fig. 3 Monthly change of CO<sub>2</sub> concentration at different depths soil in non-terraced area

### 2.2 地表 CO<sub>2</sub> 释放通量监测结果

为量化研究区人类活动对石漠化造成的影响,

本研究除比较坡改梯与对照区非坡改梯的地表  $\text{CO}_2$  通量差异, 还分别在坡改梯地区与非坡改梯地区选取具有代表性的有植被覆盖和无植被覆盖监测点, 即进行有草情况和无草情况下地表  $\text{CO}_2$  通量的对比分析(图 4、图 5), 得出以下变化规律: (1) 坡改梯地区有草覆盖与无草覆盖情况下的地表  $\text{CO}_2$  通量相差较小, 通量值相差约  $350.54 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{h}$ ,  $\text{CO}_2$  释放通量相近; 非坡改梯地区无草覆盖下地表  $\text{CO}_2$  释放通量高于有草覆盖的监测点, 通量值相差约  $602.38 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{h}$ , 地表  $\text{CO}_2$  通量相差较大, 与植被呼吸能减缓地表  $\text{CO}_2$  通量释放有关。(2) 非坡改梯地区地表  $\text{CO}_2$  释放通量总体高于坡改梯地区, 差值约为  $648.11 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{h}$ 。具体

而言, 有草情况下坡改梯地区地表  $\text{CO}_2$  释放通量较高, 无草情况下非坡改梯地区地表  $\text{CO}_2$  释放通量高于坡改梯地区。说明研究区地表  $\text{CO}_2$  通量不仅受人类活动影响, 还受土壤  $\text{CO}_2$  浓度制约。(3) 一年中 4~12 月地表  $\text{CO}_2$  释放通量约为 1~3 月的 6 倍, 坡改梯地区与非坡改梯地区监测数据均符合此规律。此外, 坡改梯地区和非坡改梯地区的地表  $\text{CO}_2$  释放通量均具有明显季节变化规律, 夏季地表  $\text{CO}_2$  释放通量最高、秋季次之、春季略低于秋季、冬季地表  $\text{CO}_2$  释放通量最低, 4 个季节地表  $\text{CO}_2$  通量动态变化趋势一致。春季气温上升、日照渐长, 植物萌芽并发育生长, 植物根系活动和土壤微生物呼吸作用增强, 土壤  $\text{CO}_2$  释放通量

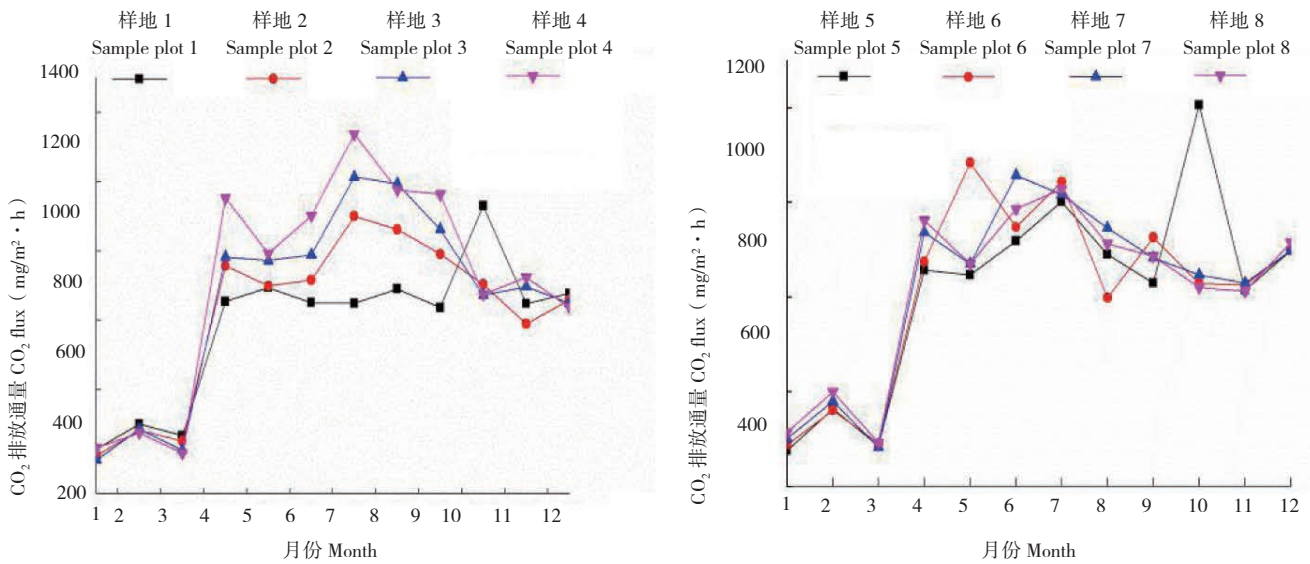


图 4 坡改梯地区有草覆盖地表/无草覆盖地表  $\text{CO}_2$  排放通量 (左为有草, 右为无草)

Fig. 4 Surface  $\text{CO}_2$  emission fluxes in the terraced area with/without grass(left: with grass; right: without grass)

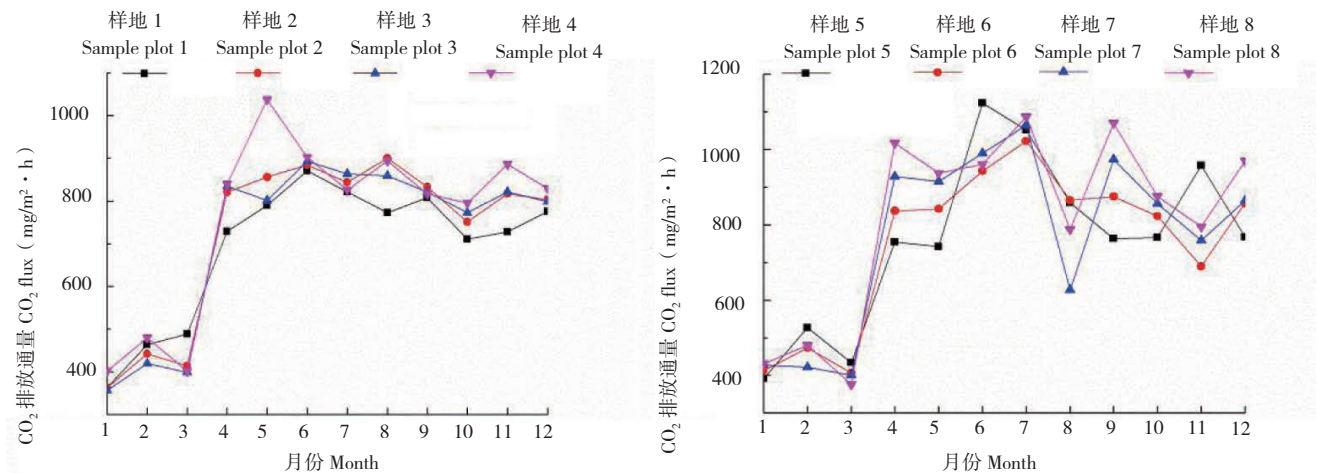


图 5 非坡改梯地区有草覆盖/无草覆盖地表  $\text{CO}_2$  排放通量 (左为有草, 右为无草)

Fig. 5 Surface  $\text{CO}_2$  emission fluxes in non-terraced area with/without grass(left: with grass; right: without grass)

上升；夏季气温越来越高、太阳光充足、降水丰富，植物光合作用增强，生长发育旺盛，植物根系活动呼吸作用最强，土壤 CO<sub>2</sub> 释放通量达到最高；秋季气温偶有回升，降水较多，加上枯枝落叶为土壤微生物提供养分，土壤微生物呼吸作用

强，CO<sub>2</sub> 释放通量较高；冬季昼短夜长，日照渐短，气温下降，加之降水量减少，植物发育缓慢趋于停止生长，植物根系活动和土壤微生物呼吸作用也减弱，土壤 CO<sub>2</sub> 释放通量在一年中最低（图 6）。

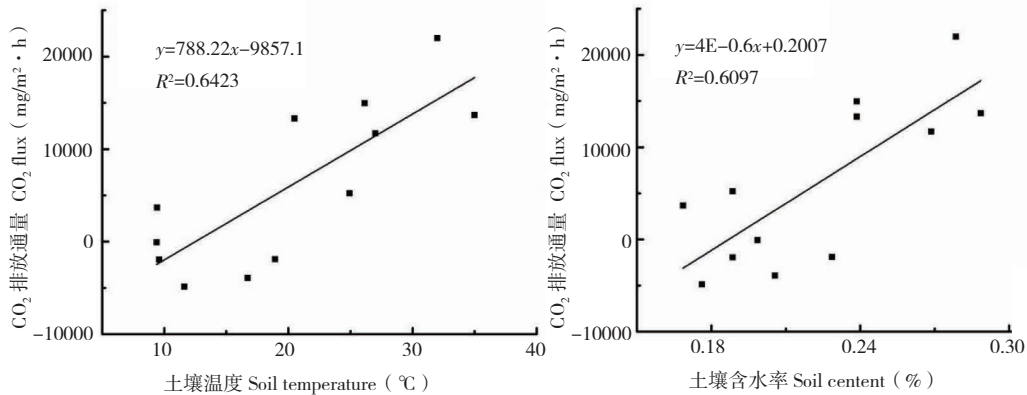


图 6 CO<sub>2</sub> 排放通量与土壤温度、含水率的相关分析

Fig. 6 Correlation analysis of CO<sub>2</sub> emission flux and soil temperature and moisture content

### 3 讨论

#### 3.1 土壤 CO<sub>2</sub> 浓度研究

总体而言，非坡改梯地区土壤 CO<sub>2</sub> 浓度比坡改梯地区大，其主要取决于人类对土地的不同利用方式及程度，喀斯特石漠化地区生态环境脆弱<sup>[12]</sup>，人们对土壤的干扰程度严重影响土壤的碳汇能力，坡地改造为梯田的过程一定程度上改变了土壤结构，削弱了坡改梯地区土壤的碳汇能力，导致土壤中部分 CO<sub>2</sub> 排放到大气中，最终坡改梯地区土壤 CO<sub>2</sub> 浓度变小。非坡改梯地区未受人类活动干扰，土壤碳汇能力较强，因而土壤中的 CO<sub>2</sub> 浓度较大。土壤有机碳主要分布于土壤上层 1 m 深度以内，本研究区土壤 CO<sub>2</sub> 浓度与土壤有机碳含量变化趋势具有相关性，即在一定土壤深度范围内，土壤 CO<sub>2</sub> 浓度与土壤有机碳含量随深度的变化趋势一致，两者呈正相关<sup>[13]</sup>。坡改梯地区有机碳含量开始随土壤深度增加而减小至土深 20 cm 附近，后随土壤深度增加而增加，土壤 CO<sub>2</sub> 浓度变化趋势与此一致。坡改梯地区表层土壤深度越深，受人类活动干扰程度越小，有机碳含量较高，上层土壤中有有机碳储量多，可供土壤微生物分解的有机质多，导致土壤 CO<sub>2</sub> 不断分解产生，因此坡改梯地区土壤深度 50 cm 的土壤 CO<sub>2</sub> 浓度较大。研究表明，喀斯特地区土壤有

机碳含量随着土层深度增加而降低，土壤 CO<sub>2</sub> 浓度随土层深度的增加而增加，两者呈现一定的负相关性<sup>[14]</sup>，非坡改梯地区土壤有机碳含量随土壤深度增加而不断下降，非坡改梯地区土壤 CO<sub>2</sub> 浓度随土壤深度增加也不断下降，土壤 CO<sub>2</sub> 浓度与土壤有机碳含量随深度的变化趋势呈正相关，与上述结论不符。本研究一年中各月份土壤 CO<sub>2</sub> 浓度绝大多数随土层深度的增加而下降，仅少数情况下 CO<sub>2</sub> 浓度随土壤深度增加而上升，如坡改梯地区 5 月份和非坡改梯地区 10 月份土壤 CO<sub>2</sub> 垂直浓度变化与土层深度呈正相关性，主要是因为喀斯特地区土层较薄，上层土质疏松<sup>[15]</sup>，根呼吸和微生物呼吸产生的 CO<sub>2</sub> 很快通过气体交换排放到大气中，越靠近地表，向大气排放的 CO<sub>2</sub> 越多，导致上层土壤 CO<sub>2</sub> 浓度较低。而土壤粘性随着深度增加而增大，土壤孔隙中气体交换受阻，加上部分土壤微生物和植物根系活动不断消耗土壤中的氧气，不断释放 CO<sub>2</sub> 在土壤深层积累，导致下层土壤 CO<sub>2</sub> 浓度较高。但研究区土壤 CO<sub>2</sub> 浓度主要受土壤有机碳制约，一方面，土壤温度直接影响 CO<sub>2</sub> 垂直浓度变化，在一定范围内土壤温度升高，植物呼吸作用增强，微生物活动剧烈，土壤中含碳物质的分解迅速加快了 CO<sub>2</sub> 的产生，加上土壤中生物的呼吸作用也会加强，这些都促使土壤 CO<sub>2</sub> 浓度增加。另一方面，土壤含水率也

会影响 CO<sub>2</sub> 不同深度的浓度变化, 土壤含水量变化导致土壤中可溶性有机碳浓度、土壤通透性产生变化, 同时水分对根系呼吸和土壤微生物呼吸也会产生影响。受土壤密度和含水率制约的土壤孔隙度控制着土壤 CO<sub>2</sub> 传输<sup>[16]</sup>, 坡改梯地区受人类活动影响改变了土壤孔隙度和含水率, 导致土壤 CO<sub>2</sub> 加速产生, 受人类活动干扰, 不注重表土的保留, 倒置了表土和生土, 土壤 CO<sub>2</sub> 浓度逐渐降低。土壤中 CO<sub>2</sub> 浓度和植物的生长状况有密切关系, 温度是影响植物生长的关键因素, 而土壤含水率起到重要的控制作用, 在土壤不同生长阶段, 它们一起控制植物根系的呼吸及发育<sup>[17]</sup>。

### 3.2 地表 CO<sub>2</sub> 释放通量研究

(1) 非坡改梯地区地表 CO<sub>2</sub> 释放通量比坡改梯地区更高, 这主要与研究区土壤 CO<sub>2</sub> 浓度有关, 即地表 CO<sub>2</sub> 释放通量与土壤 CO<sub>2</sub> 浓度具有正相关关系。非坡改梯地区土壤中有有机碳含量较高, 有利于土壤 CO<sub>2</sub> 的形成, 导致土壤中 CO<sub>2</sub> 浓度升高, 促进土壤 CO<sub>2</sub> 加速排放。有植被覆盖下坡改梯地区地表 CO<sub>2</sub> 释放通量更高, 说明人类活动通过直接活动或者间接活动改变了土壤理化性质而对土壤释放 CO<sub>2</sub> 具有不同程度的贡献, 人为因素不仅改变了土壤孔隙度、土壤含水率<sup>[18]</sup>, 还促使土壤有机碳分解加速、引起土壤释放 CO<sub>2</sub> 增强。在无植被覆盖下非坡改梯地区地表 CO<sub>2</sub> 释放通量更高, 说明地表 CO<sub>2</sub> 释放不仅受人类活动影响, 还覆盖受土壤 CO<sub>2</sub> 浓度制约, 非坡改梯地区土壤 CO<sub>2</sub> 浓度较高, 导致地表 CO<sub>2</sub> 释放通量更高。坡改梯地区无论在有草覆盖还是无草情况下地表 CO<sub>2</sub> 释放通量相差不大, 而非坡改梯地区无草情况下地表 CO<sub>2</sub> 释放通量更高, 主要是因为植被呼吸作用吸收部分土壤 CO<sub>2</sub>, 从而缓解 CO<sub>2</sub> 释放。

(2) 不同季节月份和不同植被类型的土壤温度和土壤含水率不同, 土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量也有差别<sup>[19]</sup>。不同植被覆盖下土壤温度和水分状况存在显著的季节变化, 土壤 CO<sub>2</sub> 通量对温度升高的适应往往导致夏季土壤 CO<sub>2</sub> 通量的温度敏感性低于冬季, 土壤 CO<sub>2</sub> 通量对全球变暖的反应也存在季节差异<sup>[20]</sup>。CO<sub>2</sub> 排放通量与月平均土壤气温、土壤的含水率的相关性分析及显著性检验结果表明: 土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量与土壤温度呈显著正相关关系, 即土壤温度升高可促进土壤中碳储存的大量分解, CO<sub>2</sub> 排放通量随土壤温度的升高而增加;

土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量与土壤含水率亦呈显著正相关性, 表明在一定含水率范围内, 土壤水分增加使土壤 CO<sub>2</sub> 呼吸增强, 导致土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量升高。在微生物的能量供应及体内循环、植物及微生物的生命活动过程、土壤空隙的通透性和气体的扩散过程的调节和控制, 都体现出土壤水分对土壤 CO<sub>2</sub> 通量的重要影响作用<sup>[21]</sup>。雨季期间连续的降水在短时间内迅速增加了土壤含水量, 导致土壤中可溶性有机碳浓度、通透性产生变化。土壤在不同植物根系和不同微生物中, 产生反应可能各不相同, 因此土壤 CO<sub>2</sub> 排放速率在不同降水形式及大小强度的不同、降水时间长短等不同的情况下, 产生影响不尽相同。降水发生之前, 土壤 CO<sub>2</sub> 通量的日动态没有明显变化, 随着降水发生一段时间后, 土壤 CO<sub>2</sub> 通量有明显上升趋势, 一方面可能是降雨激活了土壤微生物的活性, 增加了微生物的种群数量, 进而增强了其分解活动, 另一方面可能是降雨增强了根系的呼吸<sup>[22]</sup>, 进一步说明了实验结果。

## 4 结论

研究区不同植被类型下土壤 CO<sub>2</sub> 浓度为 695.32~7 518.74 mg/m<sup>3</sup>, 土壤有机碳含量是影响其浓度变化的主要原因, 土壤温度、土壤含水率是重要控制因素, 因此, 增加土壤碳储存能力是减缓大气 CO<sub>2</sub> 浓度增加的有效方法。土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量随季节明显变化, 在一定范围内, 土壤温度及含水率都与 CO<sub>2</sub> 排放通量呈显著正相关关系。在个别月份出现显著变化表现为巨大的源与汇, 主要是受到降水、土壤温度及含水率及土壤微生物的共同影响。

研究区石漠化越来越严重的主要原因之一是人类对土地的不合理利用。全球温室气体 CO<sub>2</sub> 受人类活动尤其是土地利用方式改变的重要影响, 喀斯特地区土壤不停产生并排放 CO<sub>2</sub>, 且排放数量不小, 如果没有良好的地面植被吸收转化, 那么排放出的大部分 CO<sub>2</sub> 很容易直接排放到大气中, 导致温室效应加剧产生。因此, 加大力度治理喀斯特地区石漠化, 保护喀斯特地区的生态环境, 减少岩溶区 CO<sub>2</sub> 等温室气体是缓解温室效应的重要途径之一。从某种意义上说国家的退耕还林还草政策实际上是一项缓解温室效应强有力措施, 认真落实这一政策将会减少土壤 CO<sub>2</sub> 排放, 增加土壤对大气 CO<sub>2</sub> 的吸收, 从而有效缓解温室效应。

## 参考文献 (References) :

- [1] 史常青, 卢新卫. 春季人工草地土壤 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 通量日变化研究[J]. 山东农业科学, 2016, 48(7): 91-94. doi: 10.14083/j.issn.1001-4942.2016.07.020.
- SHI C Q, LU X W. Diurnal variations of soil CO<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> fluxes in artificial grassland in spring[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2016, 48(7):91-94. doi: 10.14083/j.issn.1001-4942.2016.07.020.
- [2] 叶红, 杨红, 曹舰艇. 不同土地利用方式土壤呼吸速率动态研究进展[J]. 广东农业科学, 2017, 44(8): 72-79. doi: 10.16768/j.issn.1004-874X.2017.08.11.
- YE H, YANG H, CAO J T. Research progress on dynamics of soil respiration under different land-use types[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2017,44(8):72-79. doi: 10.16768/j.issn.1004-874X.2017.08.11.
- [3] 刘瑜, 高志建, 尹飞虎, 吕宁. 土壤养分及棉花植株干物质质量对大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高的响应[J]. 广东农业科学, 2014, 41(17): 58-62. doi: 10.3969/j.issn.1004-874X.2014.17.014.
- LIU Y, GAO Z J, YIN F H, LYU N. Response of soil nutrients and cotton plant dry weight to elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2014, 41(17):58-62. doi: 10.3969/j.issn.1004-874X.2014.17.014.
- [4] SHRESTHA B M, SITAULA B K, SINGH B R, BAJRACHARYA R M. Fluxes of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in soil profiles of a mountainous watershed of Nepal as influenced by land use, temperature, moisture and substrate addition. [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2004, 68(2):155-164. doi: 10.1023/B:FRES.0000019044.52811.11.
- [5] 张剑锋. 不同经营类型杉木人工林土壤呼吸率及影响因素研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2007.
- ZHANG J F. Study on Soil Respiration Rate and Influencing Factors of Chinese Fir Plantation with Different Management Types [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2007.
- [6] XU M, QI Y. Soil-surface CO<sub>2</sub> efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California. [J]. *Global Change Biology*, 2010, 7(6):667-677. doi: 10.1046/j.1354-1013.2001.00435.x.
- [7] 陈庆强, 沈承德, 易惟熙, 彭少麟, 李志安. 土壤碳循环研究进展[J]. 地球科学进展, 1998, 13(6): 555-563. doi: 10.3321/j.issn:1001-8166.1998.06.007.
- CHEN Q Q, SHEN C D, YI W X, PENG S L, LI Z A. progresses in soil carbon cycle researches [J]. *Advance in earth sciences*, 1998, 13(6):555-563. doi: 10.3321/j.issn:1001-8166.1998.06.007.
- [8] 谢芳. 岩溶区成土速率的影响因素研究[D]. 重庆: 西南大学, 2011.
- XIE F. Study on the Influencing Factors of Soil Formation Rate in Karst Areas [D]. Chongqing: Southwestern University, 2011.
- [9] 房彬, 李心清, 张立科, 程建中, 王兵, 程红光, 杨放. 西南喀斯特地区灌丛林土壤 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 通量研究[J]. 地球化学, 2013, 42(3): 221-228. doi: 10.3969/j.issn.0379-1726.2013.03.004.
- FANG B, LI X Q, ZHANG L K, CHENG J Z, WANG B, CHENG H G, YANG F. CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> fluxes from soil of scrub forest in the karst area of southwest China [J]. *Geochimica*, 2013, 42(3):221-228. doi:10.3969/j.issn.0379-1726.2013.03.004.
- [10] 闫美杰, 时伟宇, 杜盛. 土壤呼吸测定方法述评与展望[J]. 水土保持研究, 2010, 17(6): 148-152.
- YAN M J, SHI W Y, DU S. Review and prospect on the methods of soil respiration measurement [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2010, 17(6):148-152.
- [11] 杜睿, 吕达仁, 王庚辰. 天然温带草地 CO<sub>2</sub> 通量排放规律研究[J]. 自然科学进展, 2005, 15(10): 1223-1229. doi: 10.3321/j.issn:1002-008X.2005.10.011.
- DU R, LYU D R, WANG G C. Study on CO<sub>2</sub> flux emission from natural temperate grassland [J]. *Progress Innatural Science*, 2005, 15(10):1223-1229. doi: 10.3321/j.issn:1002-008X.2005.10.011.
- [12] 韩营营, 黄唯, 孙涛, 陆彬, 毛子军. 不同林龄白桦天然次生林土壤碳通量和有机碳储量[J]. 生态学报, 2015, 35(5): 1460-1469. doi: 10.5846/stxb201403110418.
- HAN Y Y, HUANG W, SHUN T, MAO Z J. Soil organic carbon stocks and fluxes in different age stands of secondary *Betula platyphylla* in Xiaoxing'an Mountain, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(5): 1460-1469. doi: 10.5846/stxb201403110418.
- [13] MORIN T H, BOHRER G, NAOR-AZRIELI L. The seasonal and diurnal dynamics of methane flux at a created urban wetland [J]. *Ecological Engineering*, 2014, 72:74-83. doi: 10.1016/j.ecoleng.2014.02.002.
- [14] 沙晨燕, 谭娟, 王卿, 王敏. 不同类型河滨湿地甲烷和二氧化碳排放初步研究[J]. 生态环境学报, 2015(7): 1182-1190. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2015.07.016.
- SHA C Y, TAN J, WANG Q, WANG M. Preliminary study on methane and carbon dioxide emissions from different riverside wetlands [J]. *Ecology and Environment*, 2015(7):1182-1190. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2015.07.016.
- [15] 刘实, 王传宽, 许飞. 4种温带森林非生长季土壤二氧化碳、甲烷和氧化亚氮通量[J]. 生态学报, 2010, 30(15): 4075-4084.
- LIU S, WANG C K, XU F. Soil effluxes of carbon dioxide, methane and nitrous oxide during non-growing season for four temperate forests in northeastern China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(15):4075-4084.
- [16] 易志刚, 蚁伟民, 丁明懋, 周丽霞, 张德强, 王新明. 鼎湖山自然保护区土壤有机碳、微生物生物量碳和土壤 CO<sub>2</sub> 浓度垂直分布[J]. 生态环境学报, 2006, 15(3): 611-615. doi: 10.3969/j.issn.1674-5906.2006.03.033.
- YI Z G, YI W M, DING M, MZHOUL X, ZHANG D Q, WANG X M. Vertical distribution of soil organic carbon, soil microbial biomass and soil CO<sub>2</sub> concentration in Dinghushan Biosphere Reserve [J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(3):611-615. doi: 10.3969/j.issn.1674-5906.2006.03.033.
- [17] 李涛, 曹建华, 张美良, 黄艳梅, 陈家瑞, 严毅萍, 李光超, 朱晓燕. 桂



- 林盘龙洞岩溶表层带土壤 CO<sub>2</sub> 浓度的季节变化研究[J]. 中国岩溶, 2011, 30(3): 348-353. doi:10.3969/j.issn.1001-4810.2011.03.018.
- LIT, CAO J H, ZHANG M, LUANG Y M, CHEN J R, YAN Y P, LI G C, ZHU X Y. The seasonal variation of soil CO<sub>2</sub> concentration in epikarst in the Panlong Cave, Guilin [J]. *Carsologica Sinica*, 2011, 30(3):348-353. doi:10.3969/j.issn.1001-4810.2011.03.018.
- [18] 刘芳, 刘丛强, 王仕禄, 兰翠玲. 喀斯特石漠化地区土壤温室气体的地气交换特征[J]. 生态科学, 2009, 28(4): 289-292. doi: 10.3969/j.issn.1008-8873.2009.04.001.
- LIU F, LIU C Q, WANG S L, LAN C L. The characteristics of greenhouse flux of soil in Karst rocky desertification regions [J]. *Ecological Science*, 2009, 28(4):289-292. doi: 10.3969/j.issn.1008-8873.2009.04.001.
- [19] 魏书精, 罗碧珍, 魏书, 威孙龙, 文正敏, 胡海清. 森林生态系统土壤呼吸测定方法研究进展[J]. 生态环境学报, 2014(3): 504-514. doi: 10.3969/j.issn.1674-5906.2014.03.021.
- WEI S J, LUO B Z, WEI S, WEI S L, WEN Z M, HU H Q. Methods of measuring of soil respiration in forest ecosystems: A review [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2014(3):504-514. doi: 10.3969/j.issn.1674-5906.2014.03.021.
- [20] 蓝家程, 肖时珍, 杨龙, 敖向红, 肖华. 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. doi: 10.13870/j.cnki.stbxb.2016.03.042.
- LAN J C, XIAO S Z, YANG L, AOX H, XIAO H. Impact of Rocky desertification treatment on karst carbonate rock dissolution rates and its carbon sink effect [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(3):244-249. doi: 10.13870/j.cnki.stbxb.2016.03.042.
- [21] 刘慧峰, 伍星, 李雅, 李宗善, 刘国华. 土地利用变化对土壤温室气体排放通量影响研究进展[J]. 生态学杂志, 2014, 33(7): 1960-1968. doi: 10.13292/j.1000-4890.20140422.032.
- LIU H F, WU X, LI Y, LI Z S, LIU G H. Effects of land use change on greenhouse gas fluxes from soils: A review [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(7):1960-1968. doi: 10.13292/j.1000-4890.20140422.032.
- [22] 蓝芙宁, 王文娟, 覃小群, 黄奇波, 刘朋雨, 安树青, 唐绍政. 土地利用和覆被变化对岩溶区土壤 CO<sub>2</sub> 浓度的影响[J]. 中国岩溶, 2011, 30(4): 449-455. doi: 10.3969/j.issn.1001-4810.2011.04.016.
- LAN F N, WANG W J, QIN X Q, HUANG Q B, LIU M Y, AN S Q, TANG S Z. Impact on soil CO<sub>2</sub> concentration by the changes of land use and vegetation cover in karst area [J]. *Carsologica Sinica*, 2011, 30(4):449-455. doi: 10.3969/j.issn.1001-4810.2011.04.016.
- [23] 孙树臣, 翟胜, 王巨媛, 贾富, 刘力, 李成帅. 土壤 CH<sub>4</sub> 产生机理及其排放的影响因素[J]. 贵州农业科学, 2011, 139(1): 135-138. doi: 10.3969/j.issn.1001-3601.2011.01.039.
- SUN S C, ZHAI S, WANG J Y, JIA F, LIU L, LI C S. Generation mechanism and impact factors on CH<sub>4</sub> Emission [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2011, 139(1):135-138. doi: 10.3969/j.issn.1001-3601.2011.01.039.
- [24] 郎红东, 杨剑虹. 土壤 CO<sub>2</sub> 浓度变化及其影响因素的研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2004, 26(6): 731-734. doi: 10.3969/j.issn.1673-9868.2004.06.019.
- LANG H D, YANG J H. Study of CO<sub>2</sub> concentration changes in soil profile and its affecting factors [J]. *Journal of Southwest Agricultural University (Natural Science)*, 2004, 26(6):731-734. doi: 10.3969/j.issn.1673-9868.2004.06.019.
- [25] 盛浩, 罗莎, 周萍, 李腾毅, 王娟, 李洁. 土壤 CO<sub>2</sub> 浓度的动态观测、模拟和应用[J]. 应用生态学报, 2012, 23(10): 2916-2922. doi: 10.1007/s11783-011-0280-z.
- SHENG H, LUO S, ZHOU P, LI T Y, WANG J, LI J. Dynamic observation, simulation and application of soil CO<sub>2</sub> concentration: A review [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(10):2916-2922. doi: 10.1007/s11783-011-0280-z.
- [26] 程建中, 李心清, 周志红, 王兵, 程红光, 邢英, 唐源. 土壤 CO<sub>2</sub> 浓度与地表 CO<sub>2</sub> 通量的季节变化及其相互关系[J]. 地球与环境, 2011, 39(2): 196-202.
- CHEN J Z, LI X Q, ZHOU Z H, WANG B, CHEG N H G, XING Y, TANG Y. Seasonal variation and relationship between soil CO<sub>2</sub> concentrations and surface CO<sub>2</sub> fluxes [J]. *Earth and Environment*, 2011, 39(2):196-202.
- [27] 梁福源, 宋林华, 王静. 土壤 CO<sub>2</sub> 浓度昼夜变化及其对土壤 CO<sub>2</sub> 排放量的影响[J]. 地理科学进展, 2003, 22(2): 170-176. doi: 10.11820/dlxxjz.2003.02.009.
- LIANG F Y, SONG L H, WANG J. Diurnal variation of soil CO<sub>2</sub> concentration and its relationship with soil CO<sub>2</sub> flux [J]. *Progress in Geography*, 2003, 22(2):170-176. doi: 10.11820/dlxxjz.2003.02.009.
- [28] 牛莉平, 许嘉巍, 靳英华, 尹海霞, 王媛林, 刘羽霞, 张英洁. 温带森林不同演替阶段下的土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量日间变化[J]. 生态学报, 2017, 37(8): 2673-2683. doi: 10.5846/stxb201512182529.
- LIU L P, XU J W, QI Y H, YIN H X, WANG Y L, LIU Y X, ZHANG Y J. Diurnal variation in soil CO<sub>2</sub> emission flux at different stages of temperate forest succession [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(8):2673-2683. doi: 10.5846/stxb201512182529.
- [29] 冉景丞, 何师意, 曹建华. 亚热带森林岩溶区土壤 CO<sub>2</sub> 迁移动态初步研究[J]. 贵州地质, 2001, 18(4): 247-252. doi: 10.3969/j.issn.1000-5943.2001.04.008.
- RAN J C, HE S Y, CAO J H. Preliminary study on soil CO<sub>2</sub> transfer in subtropical forest karst areas [J]. *Guizhou Geology*, 2001, 18(4):247-252. doi: 10.3969/j.issn.1000-5943.2001.04.008.
- [30] 王超, 黄群斌, 杨智杰, 黄蓉, 陈光水. 杉木人工林不同深度土壤 CO<sub>2</sub> 通量[J]. 生态学报, 2011, 31(19): 5711-5719.
- WANG C, HUANG Q B, YANG Z J, HUANG R, CHEN G B. Soil CO<sub>2</sub> flux in different depths of *cunninghamia lanceolata* plantation [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(19):5711-5719.