

文章编号:1001-4810(2011)03-0348-06

桂林盘龙洞岩溶表层带土壤 CO₂ 浓度的季节变化研究

李涛^{1,2,3}, 曹建华¹, 张美良¹, 黄艳梅^{1,2}, 陈家瑞^{1,2}, 严毅萍^{1,2}, 李光超^{1,2}, 朱晓燕¹

(1. 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实验室, 广西 桂林 541004;

2. 广西师范大学生命科学学院, 广西 桂林 541004; 3. 云南省红河热带农业科学研究所, 云南 河口 661300)

摘要:以桂林盘龙洞岩溶实验场为例,选择岩溶洼地里的坡地和洼地2个样地,通过长期定时监测土壤 CO₂ 浓度变化,表明:(1)土壤 CO₂ 浓度具有明显的季节性变化特征,夏季(6-8月)土壤 CO₂ 浓度是其它时期的2~3倍,并显示与气温、降水和生物活动密切相关;(2)洼地地段土壤 CO₂ 浓度比坡地地段要高,尤其夏季时洼地比坡地高近1000 mg/m²; (3)在垂直剖面上,大多数的情况下土壤 CO₂ 浓度随土壤深度的递增而升高,但在雨季时坡地(-50 cm 与 -80 cm 处)和洼地(-80 cm 与 -100 cm 处)的土壤 CO₂ 浓度随深度的增加而降低。

关键词:桂林盘龙洞;岩溶表层带;土壤 CO₂;气温

中图分类号:X144 **文献标识码:**A

岩溶土壤系统中存在着对 CO₂ 吸收和释放的作用,它是岩溶-土壤系统碳转移过程和土壤水地球化学效应的一个耦合结果^[1]。自 Tans 等 1990 年在 Science 上撰文认为北半球陆地生态系统(陆地植被或土壤)可能是 CO₂ 的未知汇以来,一些学者开始探讨土壤 CO₂ 与大气 CO₂ 的源、汇关系,但是这些研究对占全球陆地总面积 15% 的岩溶地区涉及较少。碳酸盐岩作为全球最大的碳库,其全球的分布面积达 2 200 × 10⁴ km²^[2], 出露面积约占陆地面积的 12%^[3], 含有 10¹⁶ t 碳,占全球碳库总量的 99.55%, 在全球大气 CO₂ 的源、汇研究中具有十分重要的作用。

我国是世界上岩溶分布最广、面积最大、类型最多的国家,岩溶面积达 344 万 km², 占国土面积的 1/3^[4]。近年来,我国的一些学者也开始探讨岩溶地区土壤 CO₂ 含量的变化特征以及土壤 CO₂ 与大气 CO₂ 的源、汇关系^[5]。但对表层岩溶系统碳转移的量化关系的研究尚报道较少。本次试验将通过桂林典型

岩溶区土壤 CO₂ 浓度变化进行长期动态监测,分析表层岩溶系统中土壤 CO₂ 迁移、转化规律,以及影响其变化的因素。

1 研究区概况

实验选点地处桂林盘龙洞岩溶试验场内,该试验场位于桂林南部 38 km 处的报安村附近,是一个典型的亚热带湿润地区岩溶峰丛洼地,母岩为上泥盆统融县组(D₃r)灰岩,灰岩质纯,局部有页岩夹层,峰丛坡地有多处岩溶洞穴,洼地里有多处地下河天窗。试验场土壤以灰褐、黄褐色砂质粘土为主,分布不均匀,层厚一般为 30~100 cm。场区植被以灌木和草本占绝对优势,优势种为继木、黄荆和九龙藤等。区内属亚热带季风气候区,年均气温 19.5 °C, 年均降水 1 868 mm, 年蒸发量 1 268 mm, 年均湿度 76%, 日照 1 285 小时;降水量全年分布不均,4-7 月降水量占全年的 62%^[6]。

基金项目:国土资源部地调项目“岩溶动力系统与碳循环”(编号:1212010911062)和“高分辨率洞穴石笋记录气候突变及其规律性研究”(编号:水[2010]矿评 03-06-02)

第一作者简介:李涛(1984-),男,硕士研究生,主要从事环境生态学与土壤生态学研究。E-mail:litaol25334@126.com.

收稿日期:2011-03-21

2 材料与方 法

2.1 土壤剖面 CO₂动态观测

采用自制的装置(图 1,图表)采集土壤 CO₂(参考文献^[7])。分别在坡地和洼地处理设采集装置,具体方法是将 L 型 PVC 管埋设于坡地土下 30 cm、50 cm 和 80 cm 处(坡地受土壤厚度限制,最深只能埋放到 80 cm 处);洼地土下 30 cm、50 cm、80 cm 和 100 cm 处。水平管为土壤气体收集管,其上钻有空隙,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(插进乳胶管),以防止土壤气体与大气的交换。采用日本 Gestec 公司(光明理化学工业株式会社产)生产的真空泵和专制的 CO₂测试管进行现场测定。

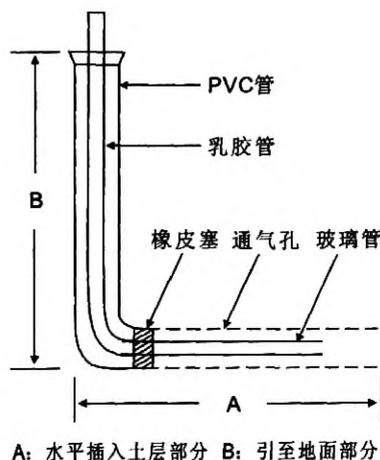


图 1 试验装置图

Fig. 1 Map of the soil CO₂ collecting device



图 2 野外监测照片

Fig. 2 Photos of the field monitoring

a. 坡地上壤 CO₂采集装置;b. 洼地上壤 CO₂采集装置;c. 水平管;d. 野外测量中
 a. soil CO₂ collecting device on the slope section;b. soil CO₂ collecting device on the depression section;c. horizontal pipe;d. field measurement

2.2 土壤含水率的测定

在两个试验点周围采样,进行土壤含水率的测定。取样的时间为上午 10:00。把采集的土壤带回实验室,分别用千分之一的电子天平称出其质量,用烘箱 105 ℃烘干 8 h 后称重,然后计算出不同试验点土壤的含水率,每个样品做三个平行样,最后求平均值。

$$\text{土壤含水量}(\%) = [(\text{湿土称重} - \text{烘干后称重}) / \text{湿土重}] \times 100\%$$

3 结果与讨论

3.1 土壤 CO₂浓度的年际变化规律

自 2009 年 11 月至 2010 年 12 月,针对桂林盘龙

洞岩溶试验场内的坡地灌木丛和洼地灌木丛两个实验点进行了一年多的土壤 CO₂ 浓度、降雨、温度及土壤含水率的监测,实验结果如图 3、图 4 所示。

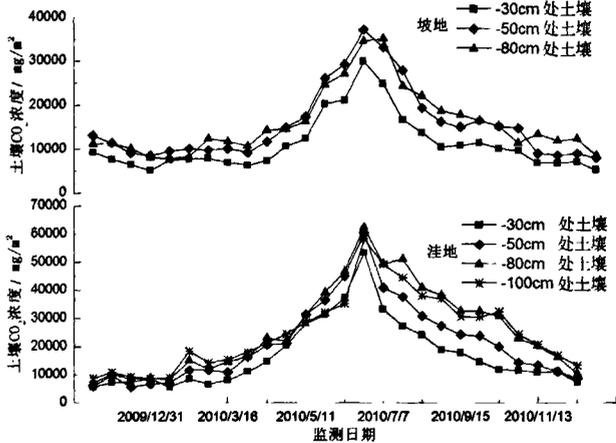


图3 土壤 CO₂ 浓度变化曲线
Fig. 3 Curves of soil CO₂ concentration variation

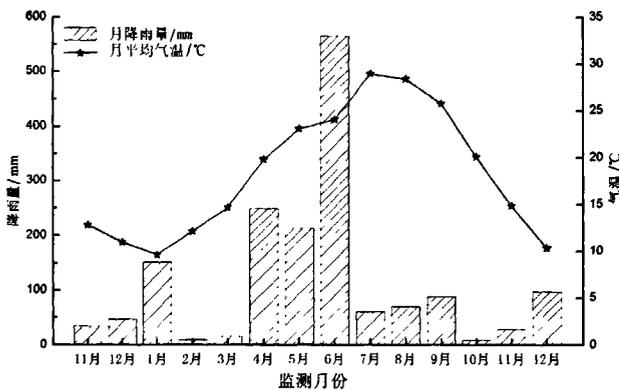


图4 盘龙洞岩溶区月降雨量和月平均气温
(2009年11月—2010年12月)
Fig. 4 The monthly rainfall and average temperature of Panlong Cave karst area(Nov. 2009—Dec. 2010)

3.1.1 土壤 CO₂ 浓度在垂向剖面上的总体变化特征

据图 3 可知:土壤 CO₂ 浓度在垂向剖面上表现为在绝大多数的情况是随土壤深度的递增而升高,但在雨季时近底部往往有所降低。坡地总体上表现为 -80 cm > -50 cm > -30 cm 的变化趋势占大多数;而洼地总体上表现为 -80 cm 和 -100 cm > -50 cm > -30 cm。

前人对土壤薄层的研究表明,土壤 CO₂ 在 50~110 cm 深处含量最高,更深处含量会有所降低^[8]。此次试验所得出的认识与前人相同,这也表明在一定深度范围内,土壤 CO₂ 浓度在垂向剖面上随土壤深度增加,但近底部有所降低。李林立等^[9]对重庆金佛山典型岩溶区林地、裸地表层岩溶生态系统 CO₂ 浓

度进行短时间尺度变化的野外观测,结果表明土层中 CO₂ 浓度随土层深度增加而增高。夏发生等^[10]通过对西北黄土剖面 CO₂ 通量进行连续 1 年的定位观测,表明在 0~150 cm 剖面范围内各层土壤 CO₂ 浓度也呈现出表层低—中部高一底层低的趋势。

从总体来看,不同深度土壤 CO₂ 值基本上呈同向变化,但变化幅度有所不同。无论坡地还是洼地,其不同深度土壤 CO₂ 浓度的浓度差变化不明显,仅在一年中的 7 月下旬到 10 月底之间其变化较大,其余时间的土壤 CO₂ 浓度变化总体上都不明显,尤其是冬季,不同深度土壤 CO₂ 浓度差都很小,梯度变化不明显。

3.1.2 土壤 CO₂ 浓度的双向梯度变化

坡地土壤 CO₂ 浓度在旱季(7 月至翌年 3 月)表现为 -80 cm > -50 cm > -30 cm 的变化趋势占大多数,但在雨季(4—6 月)却表现为 -50 cm > -80 cm > -30 cm 的变化趋势,表明 -80 cm 和 -50 cm 两处的土壤 CO₂ 浓度在一年中呈交替变化,出现双向梯度变化;洼地土壤 CO₂ 浓度在春夏季时(4—9 月)表现为 -80 cm > -100 cm > -50 cm > -30 cm;在秋冬季时(10 月至翌年 3 月)为 -100 cm > -80 cm > -50 cm > -30 cm,说明 -80 cm 和 -100 cm 处的 CO₂ 浓度也表现出了双向梯度变化。

上述雨季土壤 CO₂ 浓度反向变化形成的最主要原因可能是受大气降水的影响,从 4 月开始随着雨季的到来,降雨量逐渐增多,直到 7 月才开始迅速减少(图 4)。前人研究表明在岩溶土壤中,土下 -60 cm 附近是土壤水最主要的径流层^[11],原因是雨季由于补给量较大,而土壤孔隙透水能力通常随着深度的增大而减小,所以入渗水比较容易在这个深度上积滞。我们在雨季进行 CO₂ 浓度测定时,在坡地 -50 cm 处和洼地 -80 cm 处,洼地 -100 cm 处多次出现 CO₂ 测试管被弄湿的情况,也在一定程度上说明 -60 cm 附近是土壤水最主要的径流层。土壤中的 CO₂ 主要是植物根系呼吸、微生物活动释放出来的,土壤中水分过多会抑制根系的呼吸作用和微生物的活动,使其释放出的 CO₂ 量减少。因此,在雨季来临时,土壤 CO₂ 浓度表现为坡地 -50 cm > -80 cm,洼地 -80 cm > -100 cm。邓艳等^[12]对广西弄拉岩溶动力中的土壤 CO₂ 浓度研究表明:在旱季,土壤 CO₂ 浓度随着土壤的加深逐渐增大;在雨季,土壤 CO₂ 浓度随着土壤的加深逐渐降低,试验结果与之相似。

而对于坡地和洼地深层土 CO₂ 浓度的时间差

异,原因可能主要是坡地土层较薄(平均厚度为30~50 cm),且土壤分布不均匀,呈斑块状分布,其对土壤水的蓄积能力有限,随着雨季的结束,土壤中的水分得不到充足的补充,水分很容易蒸发和渗漏,所以到6月底时,土壤CO₂浓度很快就表现-80 cm > -50 cm。而洼地土层厚且密实,水分不容易蒸发和渗漏,其对土壤水的保存能力强,且下部就是岩溶地下水,由于水分的扩散作用,地下水对洼地深层土壤的水分具有一定的调蓄作用,从而使得洼地深层土的土壤水不会随着雨季的结束而立即发生变化,而是一直持续到了9月,-80 cm和-100 cm两处的土壤CO₂浓度才发生变化,表现为-100 cm > -80 cm。

3.1.3 土壤CO₂浓度的季节变化规律

从图3可知:岩溶坡地和洼地中土壤CO₂浓度在季节变化上表现为从冬季到夏季,土壤CO₂的浓度开始逐渐上升,夏季到秋季又开始缓慢下降,呈现出明显的单峰现象,其中夏季时(6-8月)达到最高值,是其它时期的2~3倍;冬季时最低,其平均值仅为1 000 mg/m³左右。表明随着季节的更替,土壤CO₂的浓度具有明显的季节性变化特征。

这一变化规律与生物活动性强弱受土层温度、湿度控制有关,而土层温度和湿度直接受气温和降雨影响。从图4可看出,春季至夏季降水增多,温度升高,微生物新陈代谢活动增强,利于植物快速生长,植物根系呼吸作用加强,另一方面降水溶解空气中部分CO₂渗入土层中,同时土壤有机质的分解较快,从而导致土壤中CO₂浓度升高。由此可见,降水、湿度、微生物和植物的生产量对CO₂浓度的变化起着重要的控制作用,显示雨热同季的变化特征。

3.2 坡地和洼地土壤CO₂浓度变化对比

根据岩溶斜坡和洼地的土壤CO₂浓度记录(图5)表明,从30 cm、50 cm、到80 cm,总体上洼地的土壤CO₂浓度大于坡地土壤CO₂浓度,在夏季洼地比斜坡高近1 000~2 000 mg/m²。形成土壤CO₂浓度空间变化差异的主要原因是:岩溶斜坡的土层较薄,土壤疏松且厚度不均匀,与大气连通性较好,土壤CO₂易向浓度低的大气扩散,而且所监测的坡地为向阳面,光照强度较洼地要稍强,其土壤水分蒸发和湿度变化快,从而影响到土壤中CO₂的释放量,进而影响到土壤中CO₂的浓度,不利于土壤CO₂的积累。而岩溶洼地土层较厚,分布较均一,土壤气体与外界气体交换受阻,土壤水分蒸发和湿度变化相对坡地稍缓慢,利于微生物活动,而微生物活动不断消耗土壤

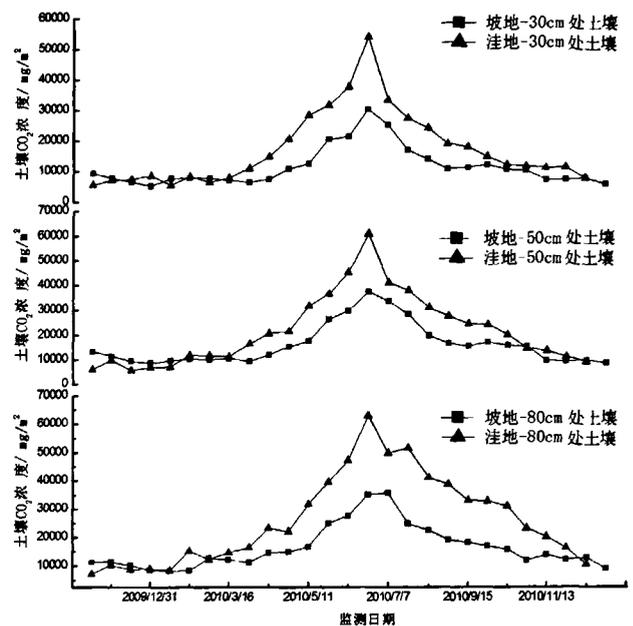


图5 洼地、坡地土壤CO₂浓度变化特征对比

Fig. 5 Comparison of soil CO₂ concentration variations on karst slope and at depression bottom

中的O₂并释放出CO₂^[13],使得土壤CO₂在洼地中积累的较多;二是不同植被类型由于生物量和覆盖度的差异,能够通过对土壤湿度的影响改变土壤温度的变化速度,进而影响到土壤CO₂释放量^[14]。邓艳等^[12]对广西弄拉岩溶动力中森林和灌丛土壤CO₂浓度的研究表明:森林土壤CO₂浓度是灌丛的1.3倍。此次试验中的坡地和洼地虽都为灌丛,但洼地灌丛植被种类比坡地多,且有一些生长旺盛的次生林,其植物根系呼吸作用强,释放出的CO₂比坡地多。

总之,土壤中的CO₂是植物根系呼吸、微生物活动及大气扩散输入的混合^[15]。CO₂的浓度受土壤的通气性、土壤生物化学过程的强度、气象条件及植被的共同影响^[16]。在不同空间部位,由于土壤结构、植被等环境因素的不同,使得土壤CO₂浓度会有很大差别。

3.3 土壤CO₂浓度与平均气温和土壤含水率的关系(仅以-30 cm深的土层为例)

3.3.1 土壤CO₂浓度与平均气温的关系

土壤呼吸的主要组分是土壤微生物呼吸和根系呼吸^[17-18],土壤CO₂中68%来自土壤中微生物的呼吸排放,而直接影响土壤微生物活动性的因素是土壤温度^[19]。温度升高,微生物活动加强,加速了土壤中含碳物质的分解和CO₂的产生,同时土壤中生物的呼吸作用也会加强,这些都促使土壤CO₂浓度的增加^[20]。观测结果表明,本研究区土壤CO₂浓度与

气温的变化趋势基本一致(图6)。通过以洼地和坡地(-30cm)的土壤 CO₂ 浓度与气温作用相关分析及显著性检验(图7)得出:坡地土壤 CO₂ 浓度与气温的相关系数 R=0.683, P<0.001, 两者呈极显著性正相关;洼地土壤 CO₂ 浓度与气温的相关系数 R=0.793, P<0.001, 两者也呈显著性正相关,这说明在一定温度范围内,土壤气温对土壤 CO₂ 浓度有直接的影响作用。

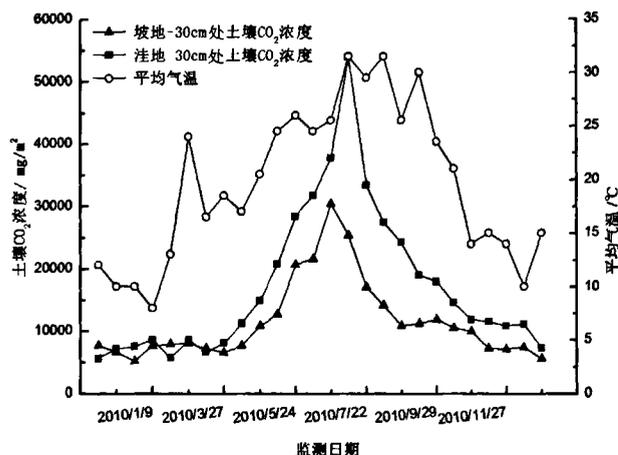


图6 土壤 CO₂ 浓度与平均气温变化曲线
Fig.6 Curves of soil CO₂ concentration and average air temperature

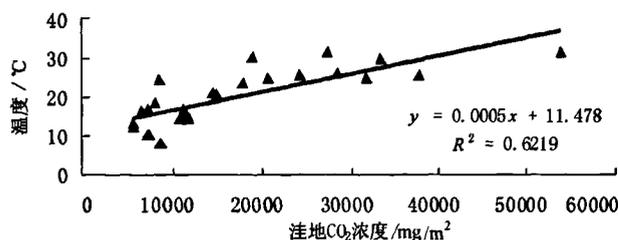
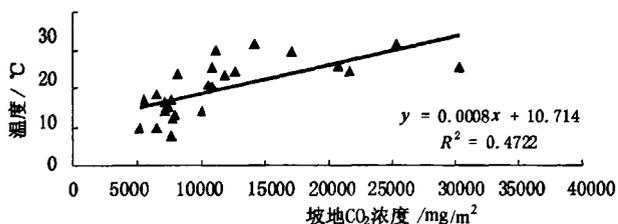


图7 土壤 CO₂ 浓度与平均气温的相关性分析
Fig.7 The correlation analysis between the soil CO₂ concentration and the average air temperature

3.3.2 土壤 CO₂ 浓度与土壤含水率的关系

通过相关性分析及显著性检验,此次试验中的土壤 CO₂ 浓度与土壤含水率两者之间的相关性明显(图8)。原因可能是本区土壤含水量较高,且土壤含水率在一年中变化幅度较小,坡地和洼地均在 20~30% 的范围内变化,总体呈平缓趋势,而土壤 CO₂ 浓度同时受到气温、降水、土壤含水率和生物活动等多个影响因子的共同控制,而不只是含水率一个因素。

同时还表明岩溶区土壤含水率并不是影响土壤 CO₂ 浓度变化的最主要因素。

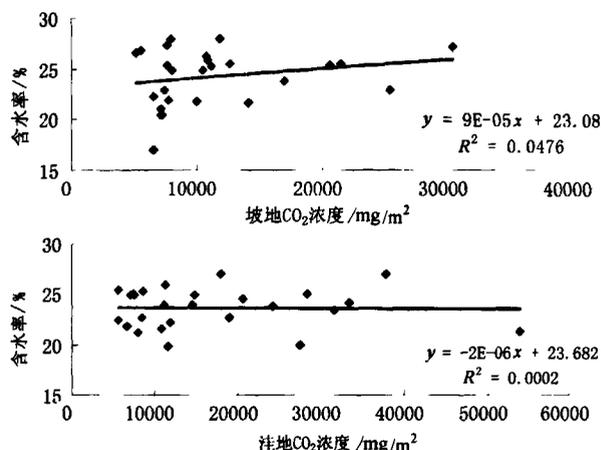


图8 土壤 CO₂ 浓度与土壤含水率的相关性分析
Fig.8 The correlation analysis between the soil CO₂ concentration and the moisture content

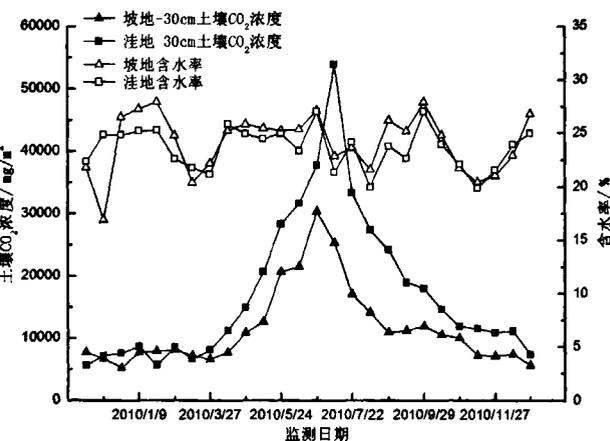


图9 土壤 CO₂ 浓度与土壤含水率变化曲线
Fig.9 Curves of soil CO₂ concentration and soil moisture content

4 结论

(1)土壤 CO₂ 浓度具有明显的季节性变化特征,夏季高,冬季低,夏季(6-8月)土壤 CO₂ 浓度是其它时期的 2~3 倍;地形地貌上,洼地处土壤 CO₂ 浓度比坡地处土壤 CO₂ 浓度要高,尤其夏季洼地比坡地高近 1 000 mg/m³,并显示与气温、降水、土壤深度和生物活动密切相关。

(2)在垂直的土壤剖面上,土壤 CO₂ 浓度随土壤深度的递增而升高,总体上深层土大于表层土,但在雨季时近底部处深层土壤 CO₂ 浓度往往有所降低,在一年四季中呈现双向梯度变化趋势。具体表现为坡地(-50 cm 与 -80 cm 处)和洼地(-80 cm 与 -100 cm 处)的深层土壤 CO₂ 浓度均出现交替变化,

使得深层土壤CO₂浓度在垂直土壤剖面上呈双向变化。

(3)在梯度变化上,坡地和洼地处不同深度的土壤CO₂浓度差小,其梯度在全年中变化不明显,仅在夏秋季节(7月下旬到10月底之间)其CO₂浓度差增大,存在一个较明显的梯度变化趋势。

参考文献

- [1] 潘根兴,曹建华,何师意,等.岩溶土壤系统对空气CO₂的吸收及其对陆地系统碳汇的意义——以桂林丫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.
- [2] 袁道先.岩溶动力系统和全球变化——为《水文地质工程地质》创刊40年而作[J].水文地质工程地质,1997,(04):15.
- [3] 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):441-442.
- [4] 李大通,罗雁.中国碳酸盐岩分布面积测量[J].中国岩溶,1983,2(2):147-150.
- [5] 郑乐平,欧阳自远,张晓岚,等.黔中岩溶地区草地土壤CO₂的稳定碳同位素组成[J].环境科学,2000,(05):38.
- [6] 张美良,朱晓燕,林玉石,等.桂林盘龙洞滴水的物理化学指标变化研究及其意义[J].地球与环境,2009,37(1):2.
- [7] 曾艳.亚热带岩溶山区夏季土壤CO₂浓度的分布状况与变化规律——以重庆金佛山自然保护区为例[D].重庆:西南师范大学,2003,16.
- [8] 刁一伟,郑循华,王跃思,等.开放式空气CO₂浓度增高条件下旱地土壤气体CO₂浓度廓线测定[J].应用生态学报,2002,13(10):1249-1252.
- [9] 李林立,况明生,张远曦,等.重庆金佛山岩溶区不同植被条件下土壤——植被系统CO₂浓度日变化[J].四川师范大学学报(自然科学版),农村生态环境,2005,21(3):67-70.
- [10] 夏发生,王益权,刘军,等.娄土剖面CO₂释放通量的变异特征[J].2010,28(1):120.
- [11] 何师意,徐胜友,张美良.岩溶土壤中CO₂浓度、水化学观测及其与岩溶作用关系[J].中国岩溶,1997,16(4):319-324.
- [12] 邓艳,覃星铭,蒋忠诚,等.表层岩溶动力系统中土壤水分及岩溶效应[J].应用生态学报,2009,20(7):1586-1590.
- [13] 李艳花,赵景波.西安南郊不同深度土壤CO₂浓度变化研究[J].干旱区资源与环境,2006,20(2):124-128.
- [14] 王静,宋林华,向昌国,等.不同植被类型覆盖下土壤CO₂浓度对洞穴景观的影响[J].地理研究,2004,23(1):73.
- [15] Fritz, P M ozeto A A and Reardon E. J. Practical consideration on carbon isotope studies on soil carbon dioxide[J]. Chemical Geology(Isotope GE OSCIENCE SECTION), 1985, (58): 89-95.
- [16] 俞锦标,李春华,赵培道,等.贵州普定县岩溶地区土壤空气中CO₂含量分布及溶蚀作用的研究[J].中国岩溶,1985,4(4):325-331.
- [17] 杨玉盛,董彬,谢锦升.森林土壤呼吸及其对全球变化的响应[J].生态学报,2004,24(3):583-591.
- [18] Liu Ying, Han Shi jie, LI Xuefeng. The contribution of root respiration of Pinuskoraiensis seedlings total soil respiration under elevated CO₂ concentrations[J]. Journal of Forest Research, 2004,15(3):187-191.
- [19] Kelting D L, Burger J A, Edwards GS. Estimating root respiration microbial respiration in the rhizosphere, and root-free soil respiration in forest soils[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1998,30(7):961-968.
- [20] 李艳花,赵景波.西安南郊不同深度土壤CO₂浓度变化研究[J].干旱区资源与环境,2006,20(2):124-128.

The seasonal variation of soil CO₂ concentration in epikarst in the Panlong Cave, Guilin

LI Tao^{1,2,3}, CAO Jian-hua¹, ZHANG Mei-liang¹, HUANG Yan-mei^{1,2}, CHEN Jia-rui^{1,2},
YAN Yi-ping^{1,2}, LI Guang-chao^{1,2}, ZHU Xiao-yan¹

(1. Karst Dynamics Laboratory, Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi 541004, China;

2. The College of Life Science, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541004, China;

3. Honghe Tropical Agriculture Research Institute of Yunnan, Hekou Yunnan 661300, China)

Abstract: Taking the Panlong Cave karst experimental site in Guilin as a case, long-term survey on soil CO₂ concentration variations at regular intervals is done in two sample plots - depression bottom and slope. The result shows that: (1)The soil CO₂ concentration varies seasonally obviously. In the summer (May to August), the soil CO₂ concentration is two or three times higher than that in the other periods. And it is closely related with temperature, precipitation and biological activities; (2)The soil CO₂ concentration at the depression bottom is higher than that on the slope, especially in the summer, the soil CO₂ concentration at the depression bottom nearly 1 000 mg/m² higher than on the slope; (3)In the vertical profile, the soil CO₂ concentration increases with depth in most cases, but the CO₂ concentration both on the slope (-50 cm and -80 cm) or at the depression bottom(-80 cm and -100 cm) reduce with soil depth during the rainy season, which make the soil CO₂ concentration to increase with the depth at the top and decrease at the bottom of the vertical profile.

Key words: Panlong Cave in Guilin; epikarst; soil CO₂; temperature