

# 贵州喀斯特地区不同土地利用方式土壤 CO<sub>2</sub> 体积分数变化及影响因素

程建中<sup>1</sup>, 李心清<sup>1\*</sup>, 唐源<sup>1,2</sup>, 周志红<sup>1,2</sup>, 王兵<sup>1</sup>, 程红光<sup>1</sup>, 邢英<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要:** 为了解不同土地利用方式对土壤剖面CO<sub>2</sub>体积分数的影响, 采用气相色谱法对贵州喀斯特地区土壤不同深度空气CO<sub>2</sub>体积分数进行观测。结果表明: 不同土地利用对土壤平均CO<sub>2</sub>体积分数影响较大, 其次序为: 次生林(0.35%±0.06%) > 草地(0.34%±0.05%) > 人工林(0.27%±0.03%) > 农田(0.16%±0.03%)。次生林、草地与农田之间土壤CO<sub>2</sub>体积分数差异性显著, 而人工林与农田之间无显著性差异。不同土地利用方式土壤剖面CO<sub>2</sub>体积分数的时空变化特征比较一致: 从春季到夏季逐渐增加而从秋季到冬季又逐渐降低, 与该区域的温度和降雨量变化趋势一致。同时随着土壤剖面深度增加CO<sub>2</sub>体积分数逐渐增大, 但在土层12 cm处有突然降低现象(农田除外)。不同土地利用方式土壤空气CO<sub>2</sub>体积分数变化与大气、土壤温度密切相关( $r=0.602\sim0.886$ ,  $P<0.05$ ), 土壤温度升高会导致土壤CO<sub>2</sub>体积分数上升。土壤湿度虽然也在一定程度上影响了剖面CO<sub>2</sub>体积分数, 但相关性分析表明二者之间并不显著( $r=0.105\sim0.393$ ,  $P>0.05$ ), 说明在贵州喀斯特地区, 土壤温度对土壤空气CO<sub>2</sub>体积分数的影响大于土壤湿度。

**关键词:** 土壤CO<sub>2</sub>体积分数; 土地利用方式; 季节变化; 温、湿度; 喀斯特地区

中图分类号: X144

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906(2010)11-2551-07

自 1750 年以来, 全球大气 CO<sub>2</sub> 体积分数已增加了 31%, 且在过去 20 年间, 大气 CO<sub>2</sub> 体积分数每年以  $1.5\times 10^{-6}$  的速率增加<sup>[1]</sup>。CO<sub>2</sub> 是引起全球气候变化最重要的温室气体, 在由温室气体引起的全球气候变化中, CO<sub>2</sub> 的辐射效应占 64%<sup>[2]</sup>, 同时 CO<sub>2</sub> 在大气中的存留期很长, 最长可达 200 年, 因而最受关注。大气的 CO<sub>2</sub> 体积分数一般在 0.03%~0.04% 之间, 而土壤 CO<sub>2</sub> 体积分数变化范围在 0.18%~4.17%<sup>[3]</sup>, 因此相对于大气来说, 土壤空气中的 CO<sub>2</sub> 体积分数要高得多, 其体积分数比大气高出 1 到 2 个数量级。由于二者之间的巨大体积分数差, 故一旦土壤 CO<sub>2</sub> 产生后, 它们将通过分子扩散进入大气而引起大气 CO<sub>2</sub> 体积分数变化。

土壤空气 CO<sub>2</sub> 是陆地生态系统碳收支的重要组成部分, 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, 其体积分数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>[4-5]</sup>, 土壤 CO<sub>2</sub> 可以反映和影响土壤-大气间 CO<sub>2</sub> 的交换, 同时反过来对植物根系生长发育、土壤微生物活动以及各种养料物质循环也有很大的影响。土壤 CO<sub>2</sub> 形成后, 大部分通

过土壤呼吸作用进入大气, 而另一小部分则通过亨利定律溶解在土壤水中, 虽然土壤水溶解的 CO<sub>2</sub> 通量远不如土壤呼吸 CO<sub>2</sub> 的释放量, 但有研究指出, 土壤中溶解的 CO<sub>2</sub> 与其在大气中的体积分数相当<sup>[6]</sup>, 同时大量研究还发现土壤水中 CO<sub>2</sub> 易形成碳酸从而与碳酸盐岩等基岩发生反应, 这种过程对土壤 CO<sub>2</sub> 的消耗降低了土壤 CO<sub>2</sub> 向大气的排放, 成为大气 CO<sub>2</sub> 的一个重要碳汇<sup>[7-9]</sup>。由于土壤剖面 CO<sub>2</sub> 具有上述生物地球化学特性, 因此将研究区域选择在碳酸盐岩大量分布的贵州喀斯特地区更具实际意义。贵州位于西南喀斯特中心, 其出露喀斯特面积为 109 085.94 km<sup>2</sup>, 占全省国土面积的 61.92%<sup>[10]</sup>, 是世界上典型的喀斯特地貌分布区域, 在此区域开展不同深度 CO<sub>2</sub> 体积分数变化的相关研究和分析, 不仅有利于人们认识土壤呼吸机制, 为采取相应措施减少 CO<sub>2</sub> 释放等方面具有重要意义, 而且也为进一步探讨喀斯特地区土壤 CO<sub>2</sub> 的产生、消耗、输送机制及碳循环提供基础数据和科学依据。

本文选取了4种不同土地利用方式, 进行了一年的观测。通过分析其土壤CO<sub>2</sub>体积分数的时空变

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-306-3); 国家自然科学基金项目(40872212); 国家基金委创新研究群体基金(40721002)

作者简介: 程建中(1983年生), 男, 助理研究员, 博士, 研究方向为土地利用与气候变化。E-mail: chengjianzhong@gmail.com

\*通讯作者: 李心清, 研究员, 博导。E-mail: xinqinglee@hotmail.com

收稿日期: 2010-10-28

化动态特征,期望能认识以下几个方面的问题:(1)贵州喀斯特地区不同土地利用方式土壤CO<sub>2</sub>体积分数的季节变化规律;(2)对比分析该地区土壤CO<sub>2</sub>的空间分布特征;(3)分析不同土地利用方式下土壤剖面CO<sub>2</sub>产生的驱动因子(温度、湿度)。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域自然概况

龙洞堡郊区位于贵州省贵阳市中心区东面,地处云贵高原东斜坡上,属全国东部平原向西部高原过渡型地带,平均海拔1000 m左右,主要的土壤类型有石灰土、黄壤、水稻土等,具有典型的亚热带湿润温和型气候。夏无酷暑,冬无严寒,阳光充足,无霜期长(270~280 d),雨水充沛,年均降雨量1100 mm,夏季(6-8月)的降水约550 mm。70%以上的降雨多集中在4-8月,其中夜间降雨量占总降雨量的70%。空气不干燥,四季无风沙,年平均气温在14.8℃左右。其中,最热的7月下旬,平均气温为23.2℃;最冷的1月上旬,平均气温是3.9℃。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 样地的设置

本研究共设置了4种土地利用方式,人工林样地(26°32'41.3" N, 106°46'46.9" E),主要营造树种为马尾松(*Pinus massoniana*),平均胸径约15 cm,平均树高约13 m,林下有油茶(*Camellia oleifera* Abel)等灌丛植被。次生林(26°32'35.7" N, 106°46'42.0" E),主要树种为女贞(*Ligustrum lucidum*),平均树高约1.5 m左右,林下长有大量的杂草,无凋落物。草地(26°32'32.2" N, 106°46'22.6" E),此样地在2007年冬天曾被当地农民烧荒过,大量灌丛林被烧毁,如今只有草本植物遍布于整个山头。农田(26°32'43.4" N, 106°46'43.5" E),按照当地典型农业生产活动方式套种玉米和大豆,播种玉米和大豆前需对耕地翻耕。4月播种同时施底肥,5月中旬施尿素和复合肥,9—10月中旬收获玉米。

#### 1.2.2 土壤CO<sub>2</sub>的采集和测定

在各采样点随机划一块50 cm×50 cm采样区域,2008年6月-2009年5月,于每月月初(8号)和月底(23号)分别采集土壤剖面气体,采样时间主要集中在当天上午9:00-11:00。土壤空气样品采集参照郑乐平<sup>[11]</sup>研制的采样装置,略微改进。内径为6.0 mm“T”字形不锈钢管底端磨尖并在其上均匀分布通气孔(孔径:2 mm)若干,以便土壤空气自由进出,不锈钢管的另一端用带真空垫的阀门封住,并与三通阀相连,以便取气。每次采样时将标有不同刻度集气管插入土壤指定的深度(0、3、6、12、15、20 cm),并立即针管排空管中空气,平衡2~3 h后,

用60 mL注射器采集土壤剖面气体样品贮存至预先抽成高真空(0.01 mbar)的35 mL胶塞玻璃气瓶内,样品带回实验室后立即用HP6890气相色谱仪测定CO<sub>2</sub>体积分数。CO<sub>2</sub>体积分数测定的色谱条件为:Porapak Q填充柱分离,经Ni催化剂高温催化后(375℃),火焰原子检测器(FID)分离检测,分离柱和检测器的温度分别为50℃和250℃,载气为高纯N<sub>2</sub>,流速20 mL·min<sup>-1</sup>。

#### 1.2.3 土壤理化性质和环境因子测定

采用电位法测定土壤pH(H<sub>2</sub>O),水土比为2.5:1。土壤无机氮采用2 mol·L<sup>-1</sup> KCl(土液比1:5)浸提,铵态氮测定采用靛酚蓝比色法<sup>[12]</sup>,硝态氮采用双波长比色法<sup>[13]</sup>。土壤有机碳和氮质量分数先用1 mol·L<sup>-1</sup> 盐酸处理,烘干后采用元素分析仪(PE 2400 II)测定。土壤温、湿度测定在每次采集气体样品时,用温度计分别测定大气温度,地表温度,土壤5、10、15、20 cm温度,同时用铝盒和环刀采集土壤(0~10 cm)带回实验室用烘干法测定土壤质量含水量和计算容重。按下式计算土壤充水孔隙度(WFPS):

$$\text{土壤总孔隙度} = 1 - \text{土壤容重} / 2.65$$

$$\text{土壤充水孔隙度(WFPS\%)} = (\text{土壤质量含水量} \times \text{土壤容重}) \times 100 / \text{土壤总孔隙度}$$

(所有分析和测试工作都在中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室完成)

#### 1.2.4 统计分析

所有的统计分析均采用SPSS15.0 (SPSS Inc., Chicago, USA),其中不同土地利用方式土壤平均CO<sub>2</sub>体积分数显著性分析采用方差分析(ANOVA)中最小显著差异法(LSD),土壤平均CO<sub>2</sub>体积分数与土壤温度、湿度之间的相关性分析采用person相关系数和two-tailed显著性检验,显著性在0.05水平上为显著,0.01水平上为极显著,图形的绘制采用Microsoft Excel 2003和CorelDraw X4。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同土地利用方式土壤理化特征

不同土地利用方式土壤理化性质见表1。草地土壤有机碳和总氮质量分数最高,人工林和次生林次之,农田最低,但不同土地利用方式下土壤C/N基本一致,从(13.2±0.9)到(14.3±1.3)。农田土壤pH值为7.2,其余样地pH≤7.0。人工林样地NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N质量分数最高[(5.3±0.6) mg·kg<sup>-1</sup>],次生林和草地次之,农田最低[(1.3±0.2) mg·kg<sup>-1</sup>],而不同土地利用方式土壤NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N质量分数次序正好与NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N相反,其中农田NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N高达(7.9±1.4) mg·kg<sup>-1</sup>。人工林土壤平均WFPS显著高于农田,次生林平均WFPS与草地基本一致。

表 1 不同土地利用方式土壤理化性质  
Table 1 Soil physical and chemical characteristics of the different land use

土地利用类型	w(有机碳)/%	w(氮)/%	C/N(molar)	w(NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N)/(mg·kg <sup>-1</sup> )	w(NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N)/(mg·kg <sup>-1</sup> )	w(无机氮)/(mg·kg <sup>-1</sup> )	pH(H <sub>2</sub> O)	w(WFPS)/%
人工林	3.6±0.3	0.29±0.01	14.3±0.7	5.3±0.6	3.0±0.5	8.3	6.0±0.2	72.6±2.8
次生林	4.7±0.4	0.41±0.02	13.2±0.4	4.2±0.8	3.1±0.6	7.3	6.5±0.3	61.1±3.4
草地	5.1±0.3	0.42±0.03	14.2±0.3	3.7±0.8	3.6±0.7	7.3	6.7±0.1	60.1±3.1
农田	3.2±0.2	0.28±0.02	13.2±0.7	1.3±0.2	7.9±1.4	9.2	7.2±0.2	48.9±3.0

平均值±标准误

## 2.2 土壤剖面 CO<sub>2</sub> 体积分数的时间分布

通过对喀斯特地区不同土地利用方式土壤剖面平均 CO<sub>2</sub> 体积分数变化一年的观测, 结果发现, 不同土地利用方式土壤 CO<sub>2</sub> 体积分数具有明显的季节变化规律(图 1a)。总体上表现为从 2008 年 6 月到 12 月, 土壤平均 CO<sub>2</sub> 体积分数逐渐降低; 而从 2009 年 1 月到 5 月, 体积分数又逐渐升高。这种土壤剖面 CO<sub>2</sub> 体积分数的季节变化与该区域大气温度和降雨量的季节变化趋势是一致的(图 1c), 即春季随着温度和降雨量的增加, 土壤微生物和植物根系活性逐渐增强, 土壤剖面平均 CO<sub>2</sub> 体积分数也随之升高, 直至夏季温度和降雨量都最高, 此时出现了土壤

CO<sub>2</sub> 体积分数的峰值, 当然不同土地利用方式土壤 CO<sub>2</sub> 体积分数峰值出现的具体时间并不一致。在人工林、次生林和草地中, 高峰期出现在 6 月, 分别为: 0.46%、0.96%、0.66%; 而在农田中, 高峰期却出现在 8 月, 其值为 0.33%。一旦进入秋季, 温度和降雨量逐渐降低, 微生物活性和植物根系呼吸减弱, 这时土壤剖面 CO<sub>2</sub> 体积分数也随着时间的推移缓慢下降。直至进入冬季, 由于此时温度和降雨量都已到达一年中的最低点, 微生物活性迅速减弱, 土壤剖面平均 CO<sub>2</sub> 体积分数降至最低且相对平稳(图 1a, 1c)。

把采样时间分为春、夏、秋、冬 4 季, 试验期间不同土地利用方式下各季土壤(0~20 cm)平均 CO<sub>2</sub> 体积分数分布见图 2。从图中可以看出, 不同土地利用方式夏季土壤 CO<sub>2</sub> 体积分数均高于其余 3 季。方差分析表明, 不同季节之间差异性显著, 特别是夏季与冬季, 在所有样地土壤 CO<sub>2</sub> 体积分数均达显著水平, 这也进一步说明在高温和多雨的夏季, 土壤微生物活性和植物根系呼吸作用显著增强, 使得土壤自身产生的 CO<sub>2</sub> 速率增加, 引起土壤 CO<sub>2</sub> 在剖面累积, 这与前人研究结果是一致的<sup>[4,7]</sup>。从全年平均值来看, 次生林(0.35%±0.06%)>草地(0.34%±0.05%)>人工林(0.27%±0.03%)>农田(0.16%±0.03%)。方差分析表明, 次生林、草地与农田之间土壤 CO<sub>2</sub> 体积分数差异性显著, 其余样地之间无显著性差异。然而这与地表实测土壤 CO<sub>2</sub> 排放的大小顺序并不一致<sup>[14]</sup>, 说明地表 CO<sub>2</sub> 的排放除与剖面气体体积分数有关外, 还与 CO<sub>2</sub> 在剖面的迁移过程, 土壤孔隙度、质地等因素有关。另外, 从全年土壤剖面平均 CO<sub>2</sub> 体积分数的变异程度来看, 次生林变异最大(63.5%), 草地和农田次之, 人工林最小(42.1%)。这主要由于女贞次生林在采样后期受到当地农民开荒等人为活动的影响, 严重改变了土壤结构和微生物群落的分布, 从而影响了土壤剖面 CO<sub>2</sub> 体积分数的积累, 而马尾松人工林由于在整个采样期间的扰动相对最小, 土壤和微生物群落相对稳定, 因此土壤 CO<sub>2</sub> 体积分数的变异程度较低。

在贵州喀斯特地区, 不同土地利用方式土壤剖面不同深度 CO<sub>2</sub> 体积分数的动态变化特征基本相

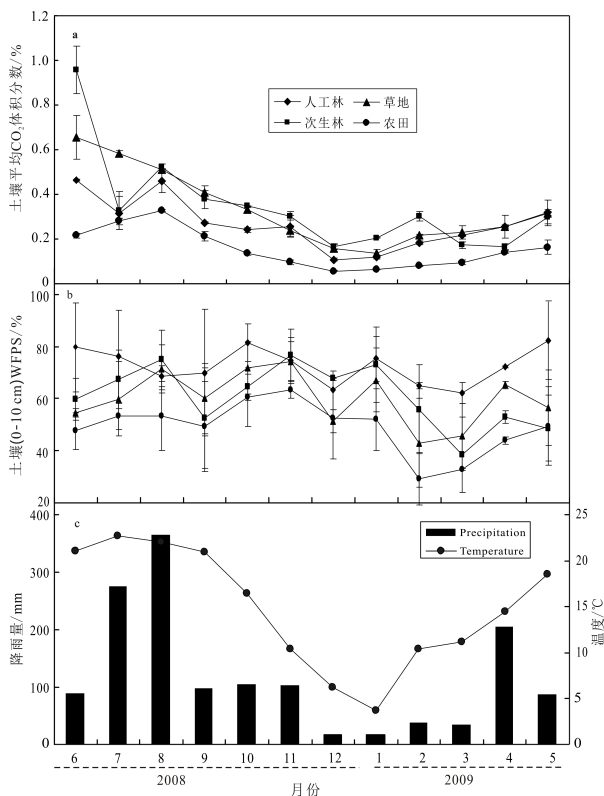


图 1 不同土地利用方式土壤平均 CO<sub>2</sub> 体积分数(0~20 cm)(a); 土壤(0~10 cm) WFPS(b); 降雨量和温度(c)随时间变化, 文中误差线均代表标准误差(SE)

Fig.1 Monthly variation of volume fractions of soil CO<sub>2</sub> (0~20 cm) (a) and soil WFPS (0~10 cm) (b) under different land use; Monthly mean temperature and precipitation (c) during the study period; Error bars represent standard error in this paper

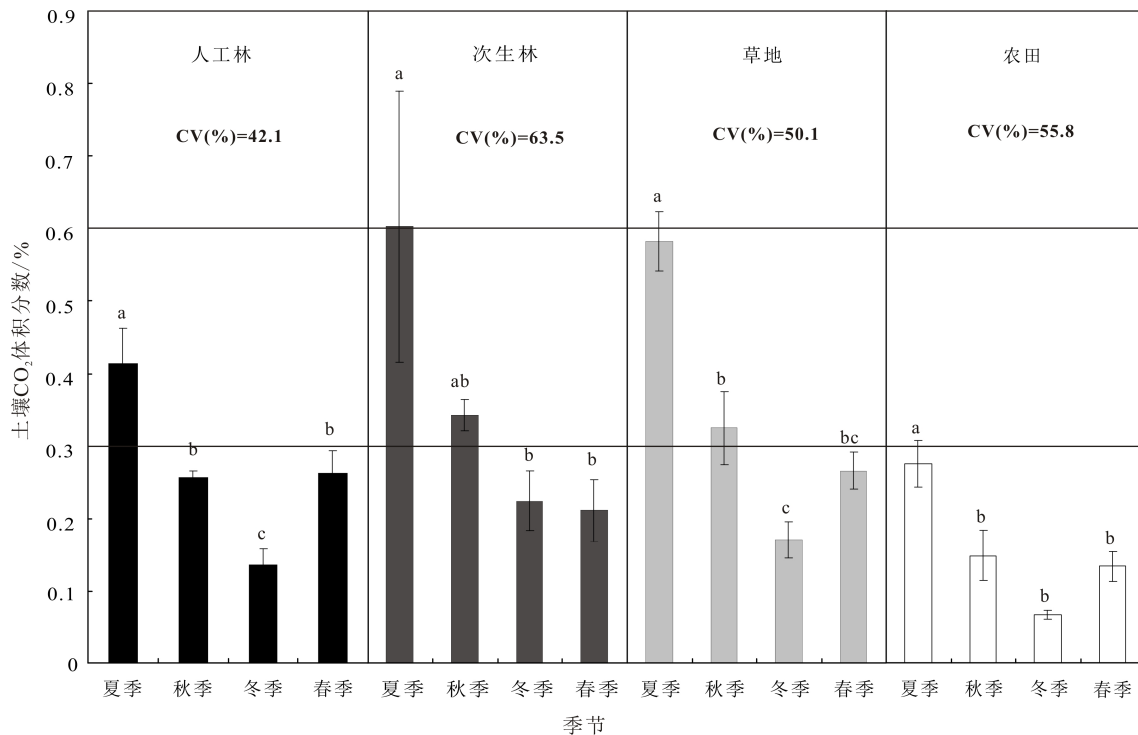


图2 不同土地利用方式土壤(0~20 cm)平均 CO<sub>2</sub> 体积分数的季节变化; 不同字母之间表示差异性显著( $P < 0.05$ ), LSD 检验结果

Fig.2 Seasonal variation of volume fractions of soil mean CO<sub>2</sub> (0~20cm) under different land use; Means in a column by the different letter were significantly different ( $P < 0.05$ ) by LSD test

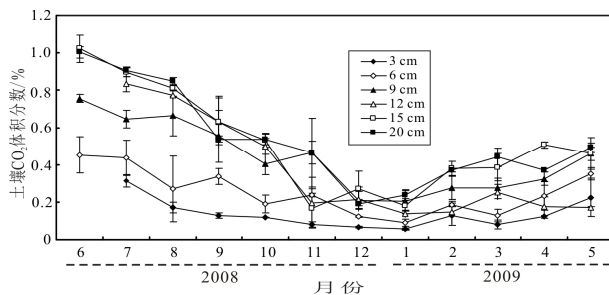


图3 贵州喀斯特地区草地土壤剖面 CO<sub>2</sub> 体积分数随时间变化

Fig.3 Monthly variation of volume fractions of soil CO<sub>2</sub> between different layers in grassland, Guizhou Karst region

同,在这里以草地为例来说明,从图3中可以看出,地下3、6、9、12、15、20 cm 土壤 CO<sub>2</sub> 体积分数的变化范围依次为 0.06%~0.31%、0.09%~0.45%、0.20%~0.76%、0.14%~0.83%、0.18%~1.02%、0.19%~1.00%。不同剖面深度 CO<sub>2</sub> 体积分数的变化规律比较一致,各层体积分数高峰出现在夏季的6、7月,低谷则出现在冬季的12、1月。从土壤剖面体积分数分布来看,总体上表现为上层低,下层高的特点。3、6、9、12、15、20 cm 深度土壤 CO<sub>2</sub> 体积分数的平均值分别为:0.13%、0.25%、0.44%、0.37%、0.52%、0.53%。3 cm 处较低,6 cm 处略有上升,随着深度增加体积分数明显增大,9、12 cm 处 CO<sub>2</sub> 体积分数的平均值约为3 cm 的3倍,土壤15、20 cm 处体积分数相差不大,但约为3 cm 处的4倍。

### 2.3 土壤剖面 CO<sub>2</sub> 体积分数的空间分布

土壤 CO<sub>2</sub> 主要来自于土壤呼吸,包括根呼吸,土壤微生物和动物呼吸。不同土地利用方式下土壤各层 CO<sub>2</sub> 体积分数的均显著高于大气,是大气 CO<sub>2</sub> 体积分数的几倍到几十倍。夏季土壤各层 CO<sub>2</sub> 体积分数的均较高且波动较大,冬季体积分数较低同时波动最小,春、秋季各层体积分数和波动范围均介于二者之间(图4)。这种现象可能主要与土壤剖面温度和湿度的季节变化强度不一致从而影响了植物呼吸和微生物活性的季节波动程度等因素有关。

除农田外,其它样地从0到9 cm 随土层加深体积分数迅速递增,大约在土壤12 cm 处,土壤 CO<sub>2</sub> 体积分数的突然降低,在接下来的土层中,随土壤深度增加,CO<sub>2</sub> 体积分数的又呈现出逐渐变大的变化趋势(图4)。这种现象可能是由于喀斯特地区土层较薄,有机质主要集中于上层土壤(<10 cm),下层土壤(>10 cm)有机质质量分数逐渐减少<sup>[15]</sup>。虽然上层土壤有机质质量分数较高,但由于上层疏松,由根呼吸和微生物呼吸产生的 CO<sub>2</sub> 很快就通过气体交换释放到大气中,越靠近表层的地方向大气释放的 CO<sub>2</sub> 越多,体积分数的越低。故表现出随着土层深度增加,体积分数的增大。但在土壤12 cm 处出现了 CO<sub>2</sub> 体积分数的突然降低的现象,实际观测发现此层土壤特性已发生明显改变,土壤湿度突然增大,粘粒含量明显增多,这种土壤特性的突然变化

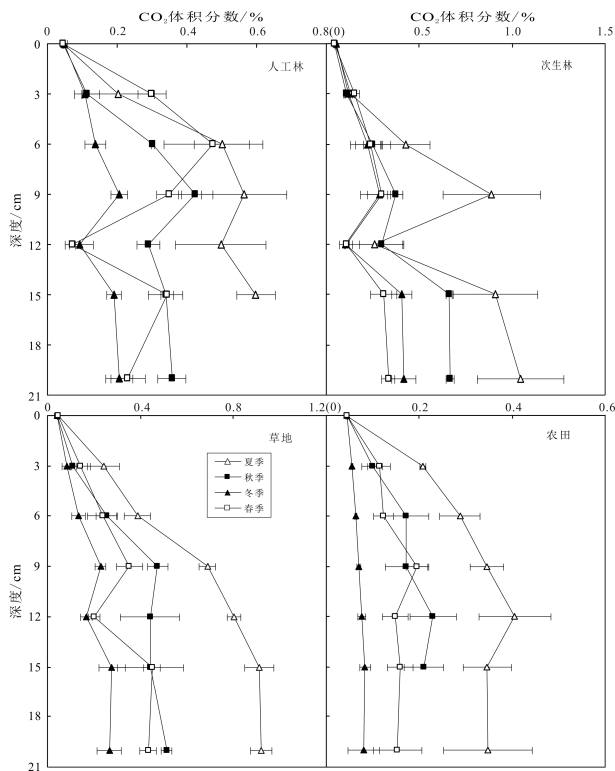


图4 不同土地利用方式土壤 CO<sub>2</sub> 体积分数的空间分布  
Fig.4 The special distribution of volume fractions of soil CO<sub>2</sub> under different land use

形成了一个滞水层,该层的存在起到了 CO<sub>2</sub> 汇的作用从而导致 CO<sub>2</sub> 体积分数的突然降低<sup>[16-17]</sup>。接下来随着深度增加,土壤粘性增大,气体交换受阻,且部分微生物活动不断消耗土壤中的 O<sub>2</sub> 并释放 CO<sub>2</sub> 并在土壤深层处积累,导致 CO<sub>2</sub> 体积分数较高<sup>[18]</sup>,这种土壤剖面 CO<sub>2</sub> 体积分数在一定深度出现突然降低的现象在国外也有类似的报道<sup>[16-17]</sup>。在农田土壤中,随着深度增加,不同季节的 CO<sub>2</sub> 体积分数几乎一直呈上升趋势,但体积分数增加的幅度相对较低(图4)这主要是因为农田长期受翻耕等农事活动的影响,土壤有机质在 0~20 cm 分布比较均匀,上层气体交换频繁,下层土壤水分蒸发比上层小,湿度较大,利于微生物活动,因此表现出随着土壤深度的增加,土壤 CO<sub>2</sub> 体积分数逐渐增大。总之,在贵州喀斯特地区,不同季节,不同土地利用方式下土

壤剖面 CO<sub>2</sub> 体积分数均表现为上层(0~10 cm)低,下层(10~20 cm)高的特点。

#### 2.4 土壤剖面平均 CO<sub>2</sub> 体积分数与环境因子的关系

温度直接影响土壤微生物和植物根系活性,同时也影响植物光合作用产物的形成及其向下运输过程,但过低的温度会制约着这两种过程,同时温度过高会导致土壤水分消耗,从而也会影响土壤 CO<sub>2</sub> 的产生<sup>[19]</sup>。从表2中可以看出,不同土地利用方式下二者均具有显著的正相关关系,说明土壤 CO<sub>2</sub> 体积分数变化强烈依赖于土壤温度,这与其他研究结果基本一致<sup>[19-20]</sup>。此外,土壤平均 CO<sub>2</sub> 体积分数与各层温度的相关程度差异较大,与表层土壤(0 cm)温度的相关性较低,其中次生林在此层相关性不显著,土层越深,相关性越高。在土壤 15 cm 处,不同土地利用方式此层温度均能单独解释土壤 CO<sub>2</sub> 体积分数 39.7%~77.3%的变异,其原因可能是由于表层土壤 CO<sub>2</sub> 体积分数受大气的影 响较大,气体交换较多,温度对 CO<sub>2</sub> 体积分数的影响相对较弱。随着土壤深度增加,产生的 CO<sub>2</sub> 不易扩散,土壤 CO<sub>2</sub> 体积分数能较准确地反映植物根系的微生物活性,而温度主要通过影响它们活性进而影响土壤 CO<sub>2</sub> 体积分数,故两者关系就越密切<sup>[21]</sup>。

土壤水分也是影响土壤 CO<sub>2</sub> 体积分数分布的重要环境因子之一,但两者之间并不是简单的线性关系,过低水分影响微生物和植物根系活动,水分过高将阻碍土壤中 O<sub>2</sub> 扩散从而降低微生物的分解和土壤 CO<sub>2</sub> 的产生<sup>[22-23]</sup>。大量研究证实:土壤水分对于 CO<sub>2</sub> 产生的影响远小于温度,只有在极端干旱和大量降雨的条件下,土壤水分才瞬时地影响 CO<sub>2</sub> 的产生速率<sup>[24-25]</sup>。本研究表明,土壤含水量在一定程度上影响了土壤 CO<sub>2</sub> 体积分数,土壤含水量越高,CO<sub>2</sub> 气体不易扩散,土壤中积累的 CO<sub>2</sub> 也越多,体积分数增大。但在不同土地利用方式下的影响程度并不一致( $r=0.105\sim 0.393$ ),且两者之间的相关性均不显著( $P>0.05$ )(表2),同时土壤含水量仅能单独解释土壤 CO<sub>2</sub> 体积分数变异的 1.1%~15.4%,出现这种现象的主要原因在于喀斯特地区的土层

表2 土壤剖面平均 CO<sub>2</sub> 体积分数(0~20 cm)与环境因子的相关性分析( $r$ )

Table 2 Correlation analysis between volume fractions of mean CO<sub>2</sub> in soil profiles (0-20 cm) and environmental factors ( $r$ )

土地利用类型	气温	土深 0 cm 处温度	土深 5 cm 处温度	土深 10 cm 处温度	土深 15 cm 处温度	土深 20 cm 处温度	WFPS (0~10 cm)
人工林	0.810**	0.844**	0.824**	0.824**	0.833**	0.820**	0.393
次生林	0.486	0.443	0.602*	0.619*	0.630*	0.615*	0.130
草地	0.818**	0.849**	0.881**	0.865**	0.879**	0.869**	0.105
农田	0.882**	0.847**	0.859**	0.872**	0.877**	0.886**	0.216

采用 person 相关系数和 two-tailed 显著性检验, \*表示相关性显著( $P<0.05$ ), \*\*表示相关性极显著( $P<0.01$ )

较薄,土壤保水能力差,一旦有降雨发生,大量雨水易随地下径流损失掉。本研究区域不同土地利用方式下土壤WFPS逐月变化幅度都相对较小,分别为:63.2%~82.3%(马尾松人工林)、38.5%~76.8%(女贞次生林)、43.0%~74.4%(草地)、29.2%~63.4%(农田)(图1b),很难达到土壤微生物永久性萎蔫点或者超过田间持水量,不足以影响微生物与植物根系活动,因此难以表现出含水量对土壤CO<sub>2</sub>体积分数的影响。同时如果水分变化范围太小,土壤剖面CO<sub>2</sub>体积分数受水分变化的影响也可能被其它因子的影响或系统误差所掩盖<sup>[26]</sup>。因此,在贵州喀斯特地区,相对于温度来讲,土壤含水量对土壤CO<sub>2</sub>体积分数的影响处于次要地位,这与大量的研究结果基本一致<sup>[19,21,27]</sup>。

### 3 结论

贵州喀斯特地区不同土地利用方式对土壤剖面CO<sub>2</sub>体积分数的影响较大,其大小顺序为:次生林(0.35%±0.06%)>草地(0.34%±0.05%)>人工林(0.27%±0.03%)>农田(0.16%±0.03%)。次生林、草地与农田之间土壤剖面CO<sub>2</sub>体积分数差异性显著,人工林与农田之间无显著性差异。不同土地利用方式剖面CO<sub>2</sub>体积分数的时空变化特征基本一致,空间上表现为上层低、下层高;时间上呈现出夏季高、冬季低的特点。土壤温、湿度均在一定程度上影响了土壤CO<sub>2</sub>的产生,但相对于湿度( $r=0.105\sim 0.393$ ,  $P>0.05$ )来讲,不同土地利用方式土壤空气CO<sub>2</sub>体积分数变化与大气、土壤温度的关系更为密切( $r=0.602\sim 0.886$ ,  $P<0.05$ ),随着温度升高土壤CO<sub>2</sub>体积分数呈线性显著增加。值得注意的是本文研究只选取了一个典型样点的几种不同土地利用方式,为了使结果更为真实可靠,在今后的研究中进行多点选取对比分析是非常必要的。

致谢:感谢两位匿名专家给予的修改建议;中国科学院地球化学研究所安宁老师、凌宏文老师以及耿龙年老师在样品采集和测试过程中给予的帮助。

### 参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of IPCC [EB/OL]. New York, Cambridge University Press, 2001:p7. [http://www.grida.no/climate/ipcc\\_tar/wg1/pdf/WG1\\_TAR-FRONT.pdf](http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/pdf/WG1_TAR-FRONT.pdf).
- [2] HOUGHTON J T, MEIRA FILHO, L G, CALLANDER, B A, et al. Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [EB/OL]. New York, Cambridge University Press, 1996:108-109. [http://www.ipcc.ch/ipccreports/sar/wg\\_1/ipcc\\_sar\\_wg\\_1\\_full\\_report.pdf](http://www.ipcc.ch/ipccreports/sar/wg_1/ipcc_sar_wg_1_full_report.pdf)
- [3] BROOK G A, FOLKOFF M E, BOX E O. A global model of soil carbon dioxide[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1983, 8: 79-88.
- [4] BUYANOVSKY G A, WAGNER G H. Annual cycles of carbon dioxide level in soil air[J]. Soil Science Society of America Journal, 1983, 47(6): 1139-1145.
- [5] AMUNDSON R G, DAVIDSON E A. Carbon dioxide and nitrogenous gases in the soil atmosphere[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1990, 38(1/2): 13-41.
- [6] HAMADA Y, TANAKA T. Dynamics of carbon dioxide in soil profiles based on long-term field observation[J]. Hydrological Processes, 2001, 15(10): 1829-1854.
- [7] REARDON E J, ALLISON G B, FRITZ P. Seasonal chemical and isotopic variations of soil CO<sub>2</sub> at Trout Creek, Ontario[J]. Journal of Hydrology, 1979, 43(1): 355-371.
- [8] FRITZ P, REARDON E J, BARKER J, et al. The carbon isotope geochemistry of a small groundwater system in northeastern Ontario[J]. Water Resources Research, 1987, 14(6): 1059-1057.
- [9] 刘再华. 大气 CO<sub>2</sub> 两个重要的汇[J]. 科学通报, 2001, 45(21): 2381-2351. LIU Zaihua. The two important sink of atmosphere CO<sub>2</sub>[J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 45(21): 2381-2351.
- [10] 邓晓红, 毕坤. 贵州省喀斯特地貌分布面积及分布特征分析[J]. 贵州地质, 2004, 21(3): 191-193. DENG Xiaohong, Bi Kun. Analysis on the karst topographic distribution in Guizhou province[J]. Guizhou Geology, 2004, 21(3): 191-193.
- [11] 郑乐平. 土壤气体采样装置的研制[J]. 地质地球化学, 1999, 27(1): 113-114. ZHENG Leping. Development of a soil gas sampling device [J]. Geology-Geochemistry, 1999, 27(1): 113-114.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 49-60. BAO Shidan. Soil Chemistry Analysis[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000: 49-60.
- [13] 陈明昌, 张强, 杨晋玲. 土壤硝态氮含量测定方法的选择和验证[J]. 山西农业科学, 1995, 23(1): 31-36. CHEN Mingchang, ZHANG Qiang, YANG Jinling. Selection and verification of methods for determination of nitrate in soil extracts [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 1995, 23(1): 31-36.
- [14] 程建中, 李心清, 周志红, 等. 西南喀斯特地区几种主要土地覆被下土壤 CO<sub>2</sub>-C 通量研究[J]. 地球化学, 2010, 39(3): 258-265. CHENG Jianzhong, LEE Xingqing, ZHOU Zhihong, et al. Differences in soil CO<sub>2</sub>-C flux between several major types of land covers in the Southwest Karst area of China[J]. Geochimica, 2010, 39(3): 258-265.
- [15] 李孝良, 陈效民, 周炼川, 等. 西南喀斯特石漠化过程中土壤有机质组分及其影响因素[J]. 山地学报, 2010, 28(1): 56-62. LI Xiaoliang, CHEN Xiaomin, ZHOU Lianchuan, et al. Study on soil organic fractions and their influential factors in rocky desertification process in southwest of China[J]. Journal of Mountain Science, 2010, 28(1): 56-62.
- [16] BEKELE A, KELLMAN L, BELTRAMI H. Soil profile CO<sub>2</sub> concentrations in forested and clear cut sites in Nova Scotia, Canada [J]. Forest Ecology and Management, 2007, 242(2/3): 587-597.
- [17] MAGNUSSON T. Studies of the soil atmosphere and related physical site characteristic in mineral forest soils[J]. European Journal of Soil Science, 1992, 43(4): 767-790.
- [18] 李艳花, 赵景波. 西安南郊不同人工植被下土壤 CO<sub>2</sub> 浓度研究[J]. 中国沙漠, 2006, 26(6): 910-914. LI Yanhua, ZHAO Jinbo. Soil CO<sub>2</sub> concentration under different

- artificial vegetations in south suburb of Xi'an[J]. Journal of Desert Research, 2006, 26(6): 910-914.
- [19] KIEFER R H. Soil carbon dioxide concentrations and climate in a humid subtropical environment[J]. The Professional Geographer, 1990, 42(2): 182-194.
- [20] RIGHTMIRE C T. Seasonal variations in PCO<sub>2</sub> and C<sup>13</sup> content of soil atmosphere[J]. Water Resources Research, 1978, 14(4): 691-692.
- [21] 戴万宏. 农田土壤空气CO<sub>2</sub>动态和土壤-大气界面CO<sub>2</sub>释放的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2002: 54-58.  
DAI Wanhong. The dynamic of CO<sub>2</sub> concentration in farmland soil air and CO<sub>2</sub> emission from soil to atmosphere[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2002: 54-58.
- [22] DAVIDSON E A, BELK E, BOONE R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest[J]. Global Change Biology, 1998, 4(2): 217-227.
- [23] JASSAL R S, BLACK T A, DREWITT G B, et al. A model of the production and transport of CO<sub>2</sub> in soil: predicting soil concentrations and CO<sub>2</sub> efflux from a forest floor[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 124(3/4): 219-236.
- [24] ANDERSON J M. Carbon dioxide evolution from two temperate, deciduous woodland soils[J]. Journal of Applied Ecology, 1973, 10(2): 361-378.
- [25] 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.
- [26] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水分对土壤呼吸的影响及其机理[J]. 生态学报, 2003, 23(5): 972-978.  
CHEN Quansheng, Li Linghao, Han Xingguo, et al. Effects of water content on soil respiration and the mechanisms [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(5): 972-978.
- [27] 郎红东, 杨剑虹. 土壤 CO<sub>2</sub> 浓度变化及其影响因素研究[J]. 西南农业大学学报: 自然科学版, 2004, 26(6): 731-734.  
LANG Hongdong, YANG Jianhong. Study on 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.

## Variations and affecting factors of volume fractions of CO<sub>2</sub> in soils between different land use in Guizhou Karst region of China

CHENG Jianzhong<sup>1</sup>, LI Xinqing<sup>1\*</sup>, TANG Yuan<sup>1,2</sup>, ZHOU Zhihong<sup>1,2</sup>,  
WANG Bing<sup>1</sup>, CHENG Hongguang<sup>1</sup>, XING Ying<sup>1,2</sup>

1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guiyang 550002, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

**Abstract:** In order to study the effect of different land use on volume fractions of CO<sub>2</sub> in soil profiles, the volume fractions of soil air CO<sub>2</sub> in different land use were studied in Guizhou karst area by GC technique, the results showed that: the average volume fractions of CO<sub>2</sub> were affected greatly by different land use, the sequence was: secondary forest>grassland>planted forest>farmland and the average volume fractions were 0.35%±0.06%, 0.34%±0.05%, 0.27%±0.03%, 0.16%±0.03%, respectively. The volume fractions of CO<sub>2</sub> in secondary forest and grassland showed significantly higher than that in farmland, but there was no significant difference in volume fractions of subsurface CO<sub>2</sub> between planted forest and farmland. The temporal and spatial distribution of CO<sub>2</sub> showed generally constant annual patterns of volume fractions increase from spring to summer and decrease from autumn to winter in response to temperature and precipitation changes in this region. Volume fractions of soil CO<sub>2</sub> increased gradually with the depth increasing, but decreased suddenly at 12cm of the soil layer (except farmland). Volume fractions of subsurface CO<sub>2</sub> showed significant linear positive correlation ( $r=0.602-0.886$ ,  $P<0.05$ ) with soil temperature, the increasing of temperature would lead to increase volume fractions of CO<sub>2</sub> in soils. However, in almost all fields, there were no obvious correlations ( $r=0.105-0.393$ ,  $P>0.05$ ) between volume fractions of soil CO<sub>2</sub> and soil moisture (WFPS), suggesting that soil temperature (rather than moisture) controlled volume fractions of soil air CO<sub>2</sub> in different land use, Guizhou Karst region, southwest China.

**Key words:** volume fractions of soil CO<sub>2</sub>; different land use; seasonal variation; temperature and moisture; Karst region