

典型岩溶区不同土地利用类型土壤 CO₂ 浓度 时空变化特征及影响因素分析 ——以贵州双河洞为例

郑维熙^{1,2}, 周忠发^{1,2*}, 朱粲粲^{1,2}, 梅再美^{1,2}, 汤云涛^{1,2}, 安 丹^{1,2}

(1. 贵州师范大学地理与环境科学学院/喀斯特研究院, 贵州 贵阳 550001;

2. 贵州省喀斯特山地生态环境国家重点实验室培育基地, 贵州 贵阳 550001)

摘要: 为揭示典型岩溶地区不同用地类型下土壤 CO₂ 的时空变化特征及其影响因素, 于 2018 年 1 月~2019 年 8 月对白云岩分布的贵州绥阳双河洞地区 6 种典型用地的 5、20、40 和 60 cm 深度土壤 CO₂ 浓度进行了为期一年的监测、采样和室内实验。并运用数理统计分析方法对各指标进行综合分析, 进一步探究影响土壤 CO₂ 时空变化的主要影响因子。结果表明: 不同用地类型下土壤 CO₂ 各深度平均浓度均表现出明显的夏秋高、冬春低的季节性变化特征, 年平均浓度最高出现在 10 月, 浓度值为 23276 ppm, 最低在 1 月, 浓度值为 6602 ppm; 不同用地类型下土壤 CO₂ 浓度表现为旱地 (19967 ppm) > 灌草地 (17098 ppm) > 灌丛地 (15054 ppm) > 有林地 (11494 ppm) > 退耕还林地 (10529 ppm) > 撂荒地 (6147 ppm), 且除有林地土壤 CO₂ 随着深度加深, 表现出先减小后增加的特征外, 其余五种用地类型下土壤 CO₂ 均表现出随土层深度增加而增加的趋势; 土壤温度、土壤含水量、有机碳含量、孔隙度与土壤 CO₂ 浓度均成正相关关系, 相关系数分别为 0.406、0.252、0.382、0.703。相关性分析表明土壤温度、土壤孔隙度对土壤中 CO₂ 的产生和保存具有显著影响。

关键词: 典型岩溶区; 不同用地类型; 土壤 CO₂ 浓度; 时空变化; 影响因素

中图分类号: S147.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2021)03-0594-08

DOI: [10.19336/j.cnki.trtb.2020011001](https://doi.org/10.19336/j.cnki.trtb.2020011001)

郑维熙, 周忠发, 朱粲粲, 梅再美, 汤云涛, 安 丹. 典型岩溶区不同土地利用类型土壤 CO₂ 浓度时空变化特征及影响因素分析 [J]. 土壤通报, 2021, 52(3): 594 - 601

ZHENG Wei-xi, ZHOU Zhong-fa, ZHU Can-can, MEI Zai-mei, TANG Yun-tao, AN Dan. Spatiotemporal Variation Characteristics of CO₂ and its Influencing Factors under Different Land Use Types in Typical Karst Areas——A Case Study of the Shuanghe Cave, Guizhou[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(3): 594 - 601

近年来, 随着全球气候变暖, 全球碳循环研究成为学术界研究的热点问题, 土壤作为陆地表面最大的碳库, 在全球碳循环研究中扮演着重要角色^[1]。土壤 CO₂ 主要来源于植物根系呼吸和土壤微生物对有机质的分解, 其影响土壤 CO₂ 变化的因素主要为植物根系、土壤微生物活性等生物因素和土壤温度、湿度等环境因素等^[2-3], 而土壤垂直剖面的 CO₂ 浓度受土壤温度^[4]、土壤有机质^[5]、土壤孔隙含水量^[6-7]以及地形条件^[8]等因素的控制。然而这些陆地生态系统要素正在因为人类活动而发生着巨大的变化, 人类活动对陆地生态系统碳循环的影响主要表现在其对土地利用/覆被类型的影响^[9]。明确每个土地覆被类型

的碳收支特点, 掌握土地覆被变化而导致的碳收支影响, 是维持区域陆地生态系统碳收支的前提, 也是应对气候变化的重要依据^[10]。土地利用方式变化会导致植物根系和土壤中微生物种群和活性的变化, 影响土壤温度、湿度等环境因素^[11], 从而使土壤中 CO₂ 浓度的改变, 影响土壤 CO₂ 向大气的释放^[12], 不同土地利用类型下土壤 CO₂ 的时空变化及影响因素的研究成果已经较为丰富。邵明玉分析了黄土丘陵区不同土地利用类型土壤的 CO₂ 分布特征及其影响因素^[13], 梁福源等研究了云南路南石林不同植被类型对土壤 CO₂ 的影响^[14], 周运超等研究了岩溶系统不同植被类型下土壤 CO₂ 排放对温度效应的响应^[15],

收稿日期: 2020-01-10; **修订日期:** 2020-01-24

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41361081、41661088)、贵州师范大学资助博士科研项目 (GZNUD[2017]6 号) 和贵州省高层次创新型人才培养计划 (黔科合平台人才 [2016]5674) 资助

作者简介: 郑维熙 (1995-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为喀斯特地貌、洞穴与土壤有机碳研究。E-mail: zwx0041@163.com

***通讯作者:** E-mail: fa6897@163.com

丁梦凯等人对桂林毛村进行不同土地利用方式下土壤呼吸的空间变异特征进行研究, 说明土地利用方式是影响土壤呼吸空间变异性的关键因子^[16]。但是上述大多数研究区主要集中在非岩溶区和石灰岩地区, 而对白云岩分布的地区土壤 CO₂ 浓度的年季变化和影响因素探讨较少。鉴于此, 本文以典型白云岩分布的贵州绥阳双河洞区域为研究区, 用对研究区六种不同用地类型土壤 CO₂ 浓度、温度、含水量等指标进行为期一年监测的方法获取相关数据, 分析不同用地类型土壤 CO₂ 浓度的时空变化特征, 并将其与孔隙度、有机碳含量等土壤理化性质指标结合, 探讨土壤 CO₂ 浓度时空变化的主要影响因素, 以期为进一步探讨典型岩溶区土壤 CO₂ 产生、转换、输送及碳循环过程提供基础数据和科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵州省遵义市绥阳县双河国家地质公园境内 (107°02'30" ~ 107°25'00" E, 28°08'00" ~ 28°20'00" N 之间)^[17], 研究区气候总体属于中亚热带季风气候, 兼有亚热带山地季风气候的特点, 雨热同期, 四季分明, 7 月平均气温为 22.5 °C, 1 月平均气温为 1.6 °C, 年平均气温为 15.1 °C, 年平均降雨量 1139.6 mm, 水热条件充足, 降水主要集中在夏季, 冬季降水较少^[18]; 研究区位于大娄山山脉东北支, 地处长江水系乌江一级支流芙蓉江的主要发源地, 海拔高度在 600 ~ 1700 m 之间, 地貌特征受地质构造和岩性的影响, 多为峰丛山地和丘陵, 岩性主要

为寒武系中上统娄山关组 (e2 ~ 3ls) 和奥陶系下统桐梓组 (O1t) 地层出露的台地蒸发相白云岩及白云质灰岩^[19], 是典型的白云岩出露的岩溶区。土壤以黄色石灰土为主, 土层厚度深浅不一, 由于喀斯特地区特有的地表和地下 (洞穴) 二元结构, 植被以亚热带常绿阔叶林、落叶阔叶混交林为主, 并且还发育了地球同纬度地区分布相对集中、保存完整、原生性强的多种生态系统, 其用地类型多样化, 植被覆盖率较高^[20]。

1.2 研究材料与方法

为揭示典型岩溶区不同用地类型土壤 CO₂ 浓度的时空变化, 综合考虑代表性、人为干扰少等因素, 在研究区内选择 6 种典型用地类型开展定点连续观测研究。在 6 种不同用地类型的不同土层深度下埋入两节 PE 管进行测量, 其中一节表面钻满孔隙, 并用石英棉裹住, 水平埋入不同层已钻好的扰动较小的土壤孔隙中, 另一节通过一个弯头相连并垂直于水平放置的 PE 管, 伸出土壤表面, 并用防腐塑料塞进行密封处理, PE 管在伸出土壤表面的采样口与泵吸式二氧化碳检测仪相连, 由泵吸式二氧化碳检测仪吸入, 并进行现场测定。于 2018 年 9 月 ~ 2019 年 8 月, 逐月选取该月月中的一天对不同用地类型、不同土层深度 (5 cm、20 cm、40 cm、60 cm) 土壤 CO₂ 浓度、温度、湿度、土壤含水量等指标进行为期一年的监测。并采集不同层土壤样本用于室内土壤有机碳和土壤化学性质的测量。土壤监测点参数见表 1。

表 1 不同土地利用类型土壤样品采集基本情况
Table 1 Basic situation of soil sampling under different land use types

用地类型 Type of land use	采样点编号 Number	海拔 (m) Altitude	植被盖度 (%) Vegetation coverage	植被状况 Vegetation condition	土壤机械组成 (%) Soil mechanical composition		
					黏粒 (< 2 μm) Clay	粉粒 (2 ~ 50 μm) Silt	砂粒 (> 50 μm) Sand
撂荒地	SH ^{1#}	774	28	杂草	9.27	82.38	8.35
退耕还林地	SH ^{2#}	735	59	人工林	13.64	83.27	3.09
有林地	SH ^{3#}	687	82	天然乔木	15.79	81.22	2.99
旱地	SH ^{4#}	962	43	玉米	7.57	84.01	8.41
灌丛地	SH ^{5#}	850	67	灌木和杂草	10.59	84.31	5.10
灌草地	SH ^{6#}	760	56	天然次生小灌木, 杂草	10.05	83.17	6.78

使用 JA901 泵吸式二氧化碳检测仪测定土壤 CO₂ 浓度, 测量范围 50000 ppmv, 分辨率为 1 ppmv, 线性误差 ≤ 100 ppmv, 响应时间 ≤ 20 s。土壤温度、土壤含水量测量均采用英国 Delta-T 公司的 WET Sensor type WET-2 对各土层土体进行测量, 其准确

度 ± 3%。土壤孔隙度测量采用威尔科斯法 (环刀法) 按照 5、20、40 和 60 cm 不同深度进行土样采集, 物理性质测定包括土壤容重、孔隙度、土壤温度、土壤孔隙含水量等等; 土壤的化学性质包括有机碳含量的测定等等。土壤有机碳的测定要先经过预处

理,是将土壤样品装入自封袋中,带回实验室剔除土壤中的动植物残体、石头及其他杂质,除去各种杂质后用烤箱对样品进行烘干,用筛子将其分别研磨过 200 目后,送至中国科学院地球化学研究所以供测定。由于该区碳酸盐岩为主要的成土母质,因此得先将土样进行酸化处理后再对土壤有机碳进行测定,土壤有机碳测定采用的仪器是德国艾利蒙塔公司生产的有机元素分析仪,能对固体样品碳、氮、氢、硫含量进行测定,其检测限: C、N < 10 ppm (约 300 mg 土壤),检测精度为: < 0.5% rel。

数据处理用 Origin 2016、SPSS 19.0 等软件进行,图件处理用 ArcMap 10.1、CorelDRAW X8、Adobe Photoshop CS6 等软件完成。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用类型土壤 CO₂ 浓度变化特征

2.1.1 不同土地利用类型下土壤 CO₂ 的时间变化特征 由图 1 可以看出,不同土地利用类型下土壤 CO₂ 浓度的月平均值变化情况基本一致,均表现出夏秋高、冬春低的季节性变化特征,年平均浓度最高出现在 10 月,最低在 1~2 月。1~7 月土壤 CO₂ 浓度逐渐上升,在 8 月出现急速下降,在 10 月达到峰值之后又开始下降,到次年 2 月左右达到最低值。其中,各种土地利用类型 CO₂ 浓度月间变化都比较大,除 SH1#CO₂ 浓度增幅较缓;在夏秋两季土壤 CO₂ 浓度呈现大幅度上升的状态,可能是与当时该地区的大气水热条件组合有关,由于该地是亚热带季风气候区,雨热同期,大气温度和大气降水具有明显的季节性差异。在 8 月份,各土地利用类型土壤 CO₂ 浓度均出现快速下降,根据实际情况调查分析得出,该月平均气温为 30 ℃,基本无降水,出现轻微

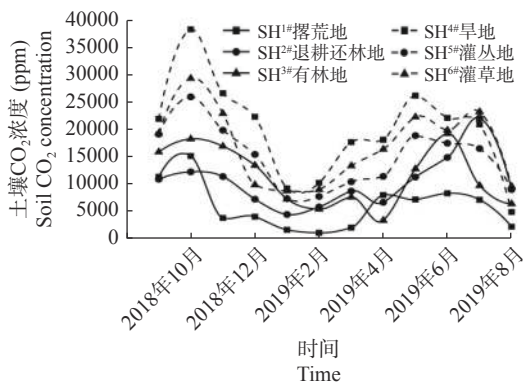


图 1 不同土地利用类型土壤 CO₂ 浓度月平均值变化

Fig.1 Changes of soil CO₂ concentration with months under different land use types

干旱情况,所以土壤中微生物活动十分不活跃,土壤呼吸减弱,进而导致土壤中 CO₂ 浓度下降。6 种土地利用类型各层土壤 CO₂ 浓度月均最大值表现为: SH4# (38311 ppm) > SH6# (29370 ppm) > SH5# (26008 ppm) > SH2# (22175 ppm) > SH3# (19332 ppm) > SH1# (15237 ppm)。最小值表现为: SH6# (8931 ppm) > SH5# (7891 ppm) > SH3# (5593 ppm) > SH4# (5074 ppm) > SH2# (4610 ppm) > SH1# (2202 ppm)。

2.1.2 不同土地利用类型下土壤 CO₂ 的空间分布特征 不同土地利用类型的演变会影响土壤中的碳收支,因不同植被类型凋落物的影响,其根系的分布和环境也会随之改变,这些又会成为影响植物根系呼吸和微生物活动的重要因素^[21],由图 2 可得,土地利用类型和覆被类型对土壤 CO₂ 垂直变化具有明显的影响,SH1#土壤 CO₂ 浓度较其他用地类型相比,各土壤深度 CO₂ 浓度都是最低,而 SH4#是最高,SH6#和 SH5#较为接近,SH2#和 SH3#也较为接近。根据实地调查与分析,在双河溶洞池武夷小流域内,所选择的不同土地利用类型和植被覆盖类型中,SH1#为撂荒地,地表基本无植被覆盖,净初级生产量较低,由于土壤中的有机物及腐殖质是土壤中微生物呼吸活动最为重要的一个碳源,因此 SH1#相比与其他土地利用类型土壤呼吸较弱,微生物活动较为减缓,导致 SH1#土壤有机质含量比较低。此外,SH1#不同深度土壤 CO₂ 变化最小,可能是由于之前人类耕作活动影响,导致各层土壤扰动较大,其土壤 CO₂ 在不同深度间变化较小。SH4#土壤有机碳的含量是最高的,是由于人类活动及施肥措施,使得土壤有机质的含量增加,虽然其植被原有覆盖率不

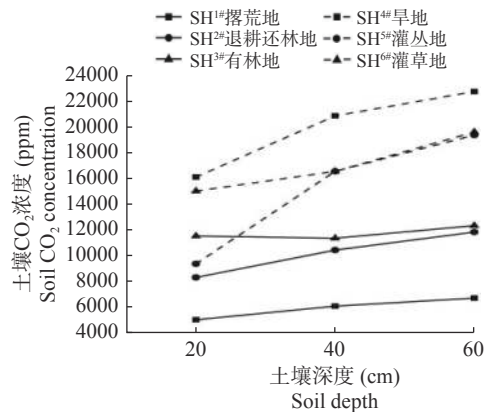


图 2 不同土地利用类型下土壤 CO₂ 浓度随土层深度变化

Fig.2 Soil CO₂ concentration with soil depth under different land use types

高, 但人类活动的参与使其改变了土壤本身的演变情况, 对比其它自然演化的土地利用类型, 其变化规律有所不同。SH2#、SH6#、SH5#都是呈现随土壤深度的增加土壤 CO₂ 浓度也随之增加, 但是 SH3#是先减小后增加, 可能是由于其表层土壤有机物及腐殖质大量堆积, 土壤微生物活动较为活跃, 加之人类干扰较小, 其土壤 CO₂ 含量较高, 随着土壤深度的增加, 土壤有机质含量减小, 其生物活动减缓, 土壤 CO₂ 相应较小, 随深度的逐渐加深, 土壤 CO₂ 受表层腐殖质及微生物活动的影响更小。但由于该地植被茂盛, 因此受植物根系呼吸的影响比重较大, 再加上接近基岩, 上覆土壤 CO₂ 与洞内空间进行交换, 也可能会增加其 CO₂ 含量。

对 6 种土地利用类型土壤各深度 CO₂ 进行对比分析(图 2), 在 20~60 cm 的深度上, 各土地利用类型下土壤 CO₂ 均呈现随深度增加而增加的趋势, 除 SH3#之外, SH1#增涨平稳, SH5#增涨幅度最大, SH6#和 SH5#在 40~60 cm 的深度上基本维持在同一水平上, SH3#与 SH2#在 40~60 cm 的深度上变化不大。主要原因可能是在 0~20 cm 土壤层上 SH6#与 SH5#的植被密集度不同, SH5#植被分布较散, 凋落物较少。SH5#地表土壤疏松, 地表微生物呼吸和根系呼吸作用产生的 CO₂ 与大气交换较快, 造成一个失汇现象, 越靠近地表失汇现象越明显, 土壤 CO₂ 浓度越低, 而随着深度增加, 土壤中 CO₂ 不易散发到空气当中, 变化趋于平缓。SH2#与 SH3#在表层差异较大, 是因其树木品种不同, SH2#是在国家政策实施下种植的退耕还林的杉树, 其树龄较小, 有机质含量不高, 再加上人类活动的扰动, 造成了土壤 CO₂ 与 SH3#在表层存在差异, 随着深度增加, 这些影响越小, 逐渐趋于一致。由此可见, 土壤中 CO₂ 浓度不仅受到上覆植被的影响, 不同土地利用类型下土壤的理化性质也起着至关重要的影响。不同土地利用类型下土壤 CO₂ 年浓度表现为: SH4#(19967 ppm) > SH6#(17098 ppm) > SH5#(15054 ppm) > SH3#(11494 ppm) > SH2#(10529 ppm) > SH1#(6147 ppm)。

2.2 土壤 CO₂ 的影响因素分析

2.2.1 土壤温度与土壤含水量对土壤 CO₂ 浓度的影响 由图 3 可得, 土壤温度与 CO₂ 变化情况总体基本一致, 土壤温度呈现夏季高、冬季低的季节变化, 夏季土壤温度可达到 33 °C, 而冬季只有 8 °C 左右。

表层土壤的温度比深层土壤温度更易受外界环境影响, 土壤温度波动幅度较大, 冬季和夏季的土壤温度差为 25 °C 左右。8 月土温和土壤 CO₂ 浓度都有明显下降趋势, 是由于采样时间段期间该地一直处于高温天气, 空气干燥, 基本无降水, 土壤含水量较小, 但在监测后期, 气温下降, 土壤温度降低, 导致土壤 CO₂ 浓度降低, 说明土壤 CO₂ 浓度的变化与土壤温度变化有很大关联。对土壤温度与土壤 CO₂ 浓度进行相关性分析可得, 各土地利用类型土壤 CO₂ 浓度与土壤温度的相关系数范围为 0.012~0.723, 相关性差异较大。土壤 CO₂ 浓度随土壤温度的变化而改变, 在 5~25 °C 范围内, 土壤 CO₂ 浓度随着土壤温度的深度升高而升高, 到达 25 °C 以上时, 土壤 CO₂ 浓度随之降低。土壤温度一方面控制着植物的新陈代谢活动, 温度的升高会导致植物的呼吸作用加强, 根部向土壤中释放的 CO₂ 浓度增加, 与图 3 中的反应基本一致。另一方面, 土壤温度的升高会增强土壤中微生物活动, 微生物对土壤有机质及腐殖质的分解速度加快, 从而增强土壤呼吸^[21-22], 许多研究已经表明土壤温度与土壤 CO₂ 浓度之间具有显著的正相关关系。蓝芙宁^[12]等人对湖南湘西大龙洞地下河流域的研究表明, 土壤温度会在很大程度上决定土壤 CO₂ 的浓度。也有研究表明在坦桑尼亚干旱的热带农田中, 土壤 CO₂ 浓度主要受到土壤湿度的影响, 与温度没有相关性^[23]。这也说明在不同的气候条件下, 土壤温度对土壤 CO₂ 浓度的影响具有差异, 其变化情况也会随其他影响因子变化而变化。

除土壤温度外, 土壤含水量变化也会对土壤

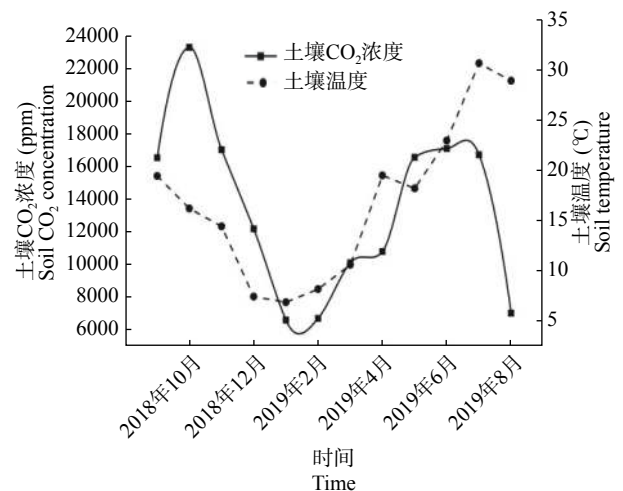


图 3 土壤 CO₂ 浓度和土壤温度随月份的变化
Fig.3 Changes of soil CO₂ concentration and temperature with months

CO₂ 浓度的产生与转换产生一定影响 (图 4)。秋冬土壤孔隙含水量明显较春夏高, 原因是秋冬季降水较少, 气温低, 土壤蒸发量最小, 春夏两季降水较大, 但气温与比秋冬两季增大了近 20 °C, 蒸发量也随之增大, 导致土壤含水量降低。从土壤 CO₂ 浓度与土壤温度月平均值的变化趋势来看, 土壤 CO₂ 浓度与土壤温度曲线并没有完全重合, 在 8~10 月出现了较大的波动, 表明除土壤温度外, 还受土壤孔隙含水量的影响。夏季土壤温度和土壤孔隙含水量的大幅增加会导致土壤中微生物活动增强, 从而促进土壤 CO₂ 浓度上升。Sugihara 等人^[23] 研究表明, 土壤 CO₂ 浓度与土壤孔隙含水量有明显的相关性, 在雨季土壤 CO₂ 浓度会明显升高, 而在旱季明显较小。但土壤孔隙含水量并不会一直促进土壤 CO₂ 浓度增加, 当土壤孔隙含水量较大时, 土壤 CO₂ 浓度会因为水分阻碍气体传输而迅速下降^[23], 在喀斯特地区, 土壤孔隙含水量会通过影响土壤 CO₂ 浓度而间接影响岩溶作用强度, 即土壤 CO₂ 浓度升高, 岩溶作用随之增强, 反之亦然^[24]。岩溶作用常受到土壤温度和土壤孔隙含水量的共同影响, 当其中任何一个因子成为限制条件时都会对其岩溶作用产生一定影响, 温度过低会限制土壤中微生物活性, 土壤水在下渗过程中由于没有充足的 CO₂ 补给会制约岩溶作用强度^[24]。当土壤湿度较低, 温度较高时, 微生物活动也不活跃, 土壤 CO₂ 浓度也会相应减小, 进而制约岩溶作用的强。当土壤湿度到达最佳时, 土壤温度的敏感性增大, 土壤 CO₂ 浓度会随温度升高而增加, 而随着土壤湿度不断增加至限制土壤 CO₂ 产生

时, 土壤 CO₂ 浓度对温度的敏感性也会降低^[25-29]。野外监测也表明, 在 8 月, 土壤 CO₂ 浓度出现急剧下降, 待土壤温度和土壤孔隙含水量在九月有所回升之后, 土壤 CO₂ 浓度也会随之上升, 由此可知, 土壤温度与土壤孔隙含水量并不是单一对土壤 CO₂ 浓度产生影响, 而是两者之间相互作用, 相互制约从而对土壤 CO₂ 浓度产生影响, 水动力条件的组合对 CO₂ 浓度具有重要的影响, 而 CO₂ 浓度对岩溶作用强度又起着主导因素的作用, 综上所述, 土壤温度与土壤孔隙含水量带来的水动力条件的变化会通过土壤中 CO₂ 浓度的产生与转换而成为岩溶作用的控制因素。

2.2.2 土壤有机碳对土壤 CO₂ 的影响 土壤 CO₂ 的来源主要有两个方面, 一方面是来自植被的根系呼吸, 另一方面是微生物对土壤有机碳的分解^[30]。土壤有机碳作为土壤 CO₂ 的重要物质来源, 对 CO₂ 的浓度变化具有重要影响。对 6 种不同土地利用类型土壤有机碳进行对比得出, 各用地类型下冬季土壤有机碳的含量和夏季差异较大, 表层和深层含量也不同。表层土壤有机碳含量均高于深层土壤有机碳含量, 各样地类型土壤深层的有机碳含量相差不大, 而表层差异较为显著, 表现为 SH3#、SH5#、SH6# 土壤有机碳含量较高, SH1#、SH2#、SH4# 土壤有机碳含量较低。冬季和夏季土壤 CO₂ 浓度与土壤有机碳含量均为正相关, 说明气候条件对土壤有机碳和土壤 CO₂ 浓度的蓄积和输入、输出过程起着至关重要的作用。有研究表明, 当土壤中水分充足时, 其透气性差, 有机质易于分解能够保存在土壤中, 从而有利于土壤有机碳的积累, 当土壤中水分不足时, 土壤的孔隙度增大, 利于有机碳的矿化分解。研究区夏季降水丰富, 但土壤蒸发量大, 其土壤保水性能较冬季差, 而冬季虽大气降水较少, 但土壤水分不易流失, 土壤透气性差, 因此有利于土壤有机碳的积累, 而前文提到, 土壤孔隙含水量对土壤 CO₂ 浓度的产生也会有影响, 存在一个阈值, 当土壤中水分过少时, 土壤 CO₂ 的产生会受到抑制, Schindlbacher 等人^[30] 的研究也证实阈值的存在, 当土壤的含水量在 25%~45% 时最有利于土壤中微生物的活动。在夏季, 随着气温升高, 植物光合作用增强, 土壤微生物活动较活跃, 有机碳的分解速率加快, 其有机碳的积累理应比冬季要大, 但是本文研究得出, 当温度持续上升时, 一方面会导致地表含水量减少,

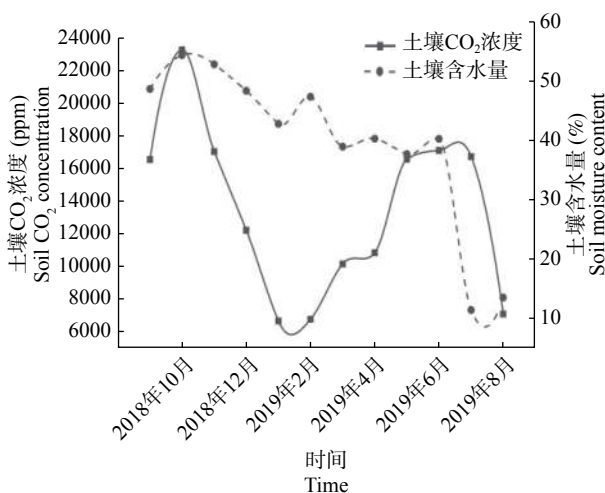


图 4 土壤 CO₂ 浓度和土壤含水量随月份变化

Fig.4 Changes of soil CO₂ concentration and water content with months

从而会引发轻微的干旱。另一方面,也有可能促进微生物活跃的同时抑制微生物的活动,导致土壤中有机碳的积累受抑,土壤中 CO₂ 浓度的变化也同理。由于受到不同土地利用类型及其他环境因素的影响,不同深度的土壤有机碳含量与不同深度的土壤 CO₂ 浓度并不一致。对于土壤有机碳含量而言,土壤中 CO₂ 浓度随深度的增加而增加,但是土壤有机碳随深度增加而减小,可能是土壤表层 CO₂ 与大气进行空气交换,导致土壤 CO₂ 浓度较低,土壤深部有机碳含量较低,但 CO₂ 浓度却高,是因为土层较厚,CO₂ 扩散受到限制从而在深部聚集。

2.2.3 土壤孔隙度对土壤 CO₂ 的影响 在喀斯特地区,土壤孔隙度通过下渗水影响土壤的保水和供水能力^[21],当表层孔隙度大时,有利于降水的下渗,反之亦然,当下层土壤孔隙度较小时,有利于土壤水分的保存。在土壤水分下渗过程中,表层的营养物质会随着土壤水的下渗而被带到底部,为底部的微

生物活动带来丰富的营养物质使其分解。土壤孔隙度也会影响土壤 CO₂ 的迁移方向^[31]。对土壤孔隙度与土壤中 CO₂ 浓度进行相关性分析得出,其相关系数为 0.703,呈显著正相关,不同土地利用类型下土壤孔隙度大小分别为 SH6# > SH4# > SH5# > SH3# > SH2# > SH1#。土壤 CO₂ 浓度显示出 SH5#、SH4#、SH6# 的 CO₂ 浓度比 SH3#、SH2#、SH1# 的 CO₂ 浓度高。根据实际情况及前文分析可知,表层 SH4# 由于人类农耕的干预,人为改变了土壤原始结构,破坏了土壤的透气性,使得其透气性变大,气孔变大,土壤 CO₂ 的迁移速度加快。随着土壤深度的增加,受到人为干预的活动范围变小,紧实度高于表层,限制了土壤 CO₂ 的交换,在底部形成碳汇。而 SH5# 和 SH6# 虽然受到人为干扰较小,但土壤表层原始结构比较疏松,底部土壤较为紧实,导致表层土壤 CO₂ 浓度低于深层。土壤 CO₂ 浓度与土壤其他理化指标的相关性如表 2 所示。

表 2 土壤 CO₂ 浓度平均值与其他土壤理化性质的相关性分析

Table 2 Correlation analysis between soil monthly average CO₂ concentration and soil physical and chemical indices

土壤理化指标 Chemical and physical index of soil	样品数 Sample number	相关系数 Correlation coefficient
温度	12	0.406*
含水量	12	0.252*
有机碳	12	0.382*
孔隙度	12	0.703**

注: **在 0.01 级别(双尾)相关性显著 *在 0.05 级别(双尾)相关性显著

2.2.4 不同土地利用类型对土壤 CO₂ 的影响 土地利用方式(如耕作方式、耕作年限、灌溉条件)的改变会导致植物覆被类型发生变化。随着人类活动的加剧使得土壤原始结构遭到破坏,土壤理化性质也受到不同程度的影响,本文研究发现 SH3#、SH5#、SH6# 的土壤 CO₂ 浓度高于 SH1#、SH2#, 但 SH4# 的 CO₂ 浓度却高于其他五种土地利用类型,出现这种现象可能是由于 SH3#、SH5#、SH6# 作为原生植物,自然凋落物较多,在地表形成了较厚的有机质层(腐殖质层),在微生物活动的参与下,释放出大量 CO₂ 聚集于此。而 SH1# 和 SH4# 的凋落物相比 SH3#、SH5# 和 SH6# 的凋落物少得多,有机质含量也相对较少,有机碳含量也随之减少。SH4# 作为人类活动影响最明显的土地利用类型,其植被的凋落物较少,但人为的施肥方式和耕作制度很大程度上改变了土壤有机质含量,大量的有机肥进入土壤,经微生物分解与转换后,在一定程度上补充了遗失

的碳源。同时,人类的耕作方式和耕作制度会通过影响作物根系或凋落物的数量与质量,而影响土壤有机碳的矿化和固定作用,进而影响土壤 CO₂ 的变化情况。

3 结论

(1) 不同土地利用类型下土壤 CO₂ 浓度的月变化情况基本一致,夏秋高冬春低,年平均浓度最高出现在 10 月,最低在 1~2 月;土壤温度与 CO₂ 变化情况总体基本一致,但是在 8 月出现了较大波动,表明土壤 CO₂ 浓度不仅仅只受到土壤温度的影响,还与土壤孔隙含水量有关。

(2) 不同土地利用类型下土壤 CO₂ 表现为旱地(19967 ppm) > 草丛地(17098 ppm) > 灌丛地(15054 ppm) > 有林地(11494 ppm) > 退耕还林地(10529 ppm) > 撂荒地(6147 ppm); 随着土壤深度的增加,各土地利用类型下土壤 CO₂ 均呈现随深度增加而增加的趋势,除有林地外,其变化情况

是先减小后增加。

(3) 岩溶作用经常受到土壤温度和土壤孔隙含水量的共同影响, 当其中任何一个因子成为限制条件时都会对其岩溶作用产生一定的影响, 土壤温度与土壤孔隙含水量带来的水动力条件的变化会通过土壤中 CO_2 浓度的产生与转换而成为岩溶作用的控制因素。从不同的土地利用类型来看, 有林地、旱地、灌丛地的有机碳含量较高, 撂荒地、退耕还林地、灌草地有机碳含量较低, 与 CO_2 浓度的大小基本对应, 但是不同深度的土壤有机碳含量与不同深度的土壤 CO_2 浓度并不是一一对应的。不同土地利用类型下土壤孔隙度大小分别为灌丛地 > 旱地 > 灌丛地 > 有林地 > 退耕还林地 > 撂荒地, 而土壤 CO_2 浓度也显示出灌丛地、旱地、灌草地的 CO_2 浓度相比有林地、退耕还林地、撂荒地的 CO_2 浓度偏高。

参考文献:

- [1] Piao S, Fang J, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China[J]. *Nature*, 2009, 58(7241): 1009 – 13.
- [2] 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.
- [3] Amundson R G, Davidson E A. Carbon dioxide and nitrogenous gases in the soil atmosphere[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1990, 38(1): 13 – 41.
- [4] 蒲晓婷, 林伟盛, 杨玉盛, 等. 杉木幼林土壤垂直剖面 CO_2 通量对土壤增温的响应[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(1): 288 – 297.
- [5] 程建中, 李心清, 周志红, 等. 土壤 CO_2 浓度与地表 CO_2 通量的季节变化及其相互关系[J]. *地球与环境*, 2011, (2): 196 – 202.
- [6] Dreybrodt, Gabrovec. A Model of Karstification in Extended Limestone Plains by Mixing Corrosion[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2010: 457 – 462.
- [7] Dreybrodt W. Chemical kinetics, speleothem growth and climate[J]. *Boreas*, 2010, 28(3): 347 – 356.
- [8] 李 涛, 曹建华, 张美良, 等. 桂林盘龙洞岩溶表层带土壤 CO_2 浓度的季节变化研究[J]. *中国岩溶*, 2011, 30(3): 348 – 353.
- [9] 曾思博, 蒋勇军. 土地利用对岩溶作用碳汇的影响研究综述[J]. *中国岩溶*, 2016, 35(2): 153 – 163.
- [10] 张海凤, 崔桂善. 土地利用/覆盖类型的变化对陆地生态系统碳收支的影响[J]. *中国资源综合利用*, 2019, 37(1): 176 – 179.
- [11] 王红旗. 污染土壤植物-微生物联合修复技术及应用[M]. 中国环境科学出版社, 2015.
- [12] 蓝芙宁, 王文娟, 吴华英, 等. 不同土地利用方式下土壤 CO_2 时空分布特征及其影响因素: 以湘西大龙洞地下河流域为例[J]. *中国岩溶*, 2017, 36(4): 427 – 432.
- [13] 邵明玉, 张连凯, 刘朋雨, 等. 夏季黄土丘陵区不同土地利用方式土壤 CO_2 分布特征及影响因素[J]. *中国岩溶*, 2019, 38(1): 70 – 79.
- [14] 梁福源, 宋林华, 王 静. 土壤 CO_2 浓度昼夜变化及其对土壤 CO_2 排放量的影响[J]. *地理科学进展*, 2003, 22(1): 170 – 176.
- [15] 周运超, 周习会, 熊志斌, 等. 岩溶系统不同植被下土壤碳排放的温度效应[J]. *贵州科学*, 2004, 22(4): 21 – 40.
- [16] 丁梦凯, 胡晓农, 曹建华, 等. 桂林毛村不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异特征[J]. *环境科学*, 2019, 40(2): 924 – 933.
- [17] 陈建庚, 张英骏. 贵州绥阳双河洞系的发育与成因探讨[J]. *中国岩溶*, 1994, 13(3): 247 – 255.
- [18] 李 坡, 贺 卫. 双河洞地质公园研究[M]. 贵阳: 贵州人民出版社, 2008.
- [19] 韦跃龙, 罗书文, 陈伟海, 等. 贵州绥阳地质公园白云岩喀斯特景观特征及其形成演化分析[J]. *地球学报*, 2018, 39(3): 365 – 383.
- [20] 刘 平. 贵州绥阳双河洞国家地质公园洞穴基本特征及成因探讨[J]. *贵州地质*, 2008, 25(4): 302 – 305.
- [21] 赵瑞一, 吕现福, 蒋建建, 等. 土壤 CO_2 及岩溶碳循环影响因素综述[J]. *生态学报*, 2015, 35(13): 4257 – 4264.
- [22] Cao J H, Yang H, Kang Z Q. Preliminary regional estimation of carbon sink flux by carbonate rock corrosion: A case study of the Pearl River Basin[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(35): 3766 – 3773.
- [23] Sugihara S, Funakawa S, Kilasara M, et al. Effects of land management on CO_2 flux and soil C stock in two Tanzanian croplands with contrasting soil texture[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 46: 1 – 9.
- [24] 章 程, 蒋忠诚, 何师意, 等. 垂直气候带岩溶动力系统特征研究——以重庆金佛山国家级自然保护区为例[J]. *地球学报*, 2006, 27(5): 510 – 514.
- [25] 曹建华, 周 莉, 杨 慧, 等. 桂林毛村岩溶区与碎屑岩区林下土壤碳迁移对比及岩溶碳汇效应研究[J]. *第四纪研究*, 2011, (3): 431 – 437.
- [26] Curiel Y J, Baldocchi D D, Gershenson A, et al. Microbial soil respiration and its dependency on carbon inputs, soil temperature and moisture[J]. *Global Change Biology*, 2007, 13(9): 2018 – 2035.
- [27] Jassal R S, Black T A, Novak M D, et al. Effect of soil water stress on soil respiration and its temperature sensitivity in an 18-year-old temperate Douglas-fir stand[J]. *Global Change Biology*, 2010, 14(6): 1305 – 1318.
- [28] Suseela V, Conat R T, Wallenstein M D, et al. Effects of soil moisture on the temperature sensitivity of heterotrophic respiration vary seasonally in an old-field climate change experiment[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(1): 336 – 348.
- [29] Craine J M, Gelderman T M. Soil moisture controls on temperature sensitivity of soil organic carbon decomposition for a mesic grassland[J]. *Soil Biology and Biochemistr*, 2011, 43(2): 455 – 457.
- [30] Schindlbacher A, Zechmeister B S, Kitzler B, et al. Experimental forest soil warming: response of autotrophic and heterotrophic soil respiration to a short-term 10 °C temperature rise[J]. *Plant and*

Soil, 2008, 303(2): 323 – 330.

利用方式下冬夏岩溶作用的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(6):

[31] 刘文, 张强, 贾亚男. 气象要素及土壤理化性质对不同土地

1418 – 1428.

Spatiotemporal Variation Characteristics of CO₂ and its Influencing Factors under Different Land Use Types in Typical Karst Areas ——A Case Study of the Shuanghe Cave, Guizhou

ZHENG Wei-xi^{1,2}, ZHOU Zhong-fa^{1,2*}, ZHU Can-can^{1,2}, MEI Zai-mei^{1,2}, TANG Yun-tao^{1,2}, AN Dan^{1,2}

(1. College of Geography and Environmental Science/Karst Institute, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China;

2. National Key Laboratory Breeding Base of Karst Mountain Ecological Environment in Guizhou Province, Guiyang 550001, China)

Abstract: In order to reveal the temporal and spatial variation characteristics of soil CO₂ and its influencing factors under different land use types in the typical karst areas, the CO₂ concentration of 5 cm, 20 cm, 40 cm, and 60 cm depths of six typical sites in the Shuanghe Cave, Suiyang, Guizhou was detected from January 2018 to August 2019. And the main factors affecting the spatial and temporal changes of soil CO₂ were investigated. The results showed that: (1) The soil CO₂ concentration under different land types showed obvious seasonal variation characteristics, being higher in summer and autumn and lower in winter and spring. The annual average concentration of CO₂ was the highest in October (23276 ppm), and was the lowest in January (6602 ppm). (2) The soil CO₂ concentration under different land types decreased in the order of dry land (19967 ppm) > grassland (17098 ppm) > shrub land (15054 ppm) > forest land (11494 ppm) > returning farmland to forestland (10529 ppm) > wasteland (6147 ppm). The soil CO₂ concentration in the forest land showed a decreasing first and then increasing trend with soil depths, while the CO₂ concentrations in the other five land types were increased with soil depths. (3) The soil CO₂ concentration was positively correlated with soil temperature, soil moisture content, organic carbon content, and porosity, with a correlation coefficient of 0.406, 0.252, 0.382, and 0.703, respectively. Correlation analysis showed that soil temperature and soil porosity had significant effects on the generation and preservation of CO₂ in soil. The research results are of great significance for evaluating the effects of land types in typical karst areas on soil carbon sources and sinks, and would provide a certain theoretical reference for investigating the vertical carbon cycling in a key karst zones.

Key words: Typical karst area; Different land use type; Soil CO₂ concentration; Temporal and spatial variation; Influencing factor

[责任编辑: 韩春兰]