

土壤 CO₂ 与喀斯特洞穴 CO₂ 季节变化响应分析

殷超^{1,2}, 周忠发^{1,2}, 田衷琿^{1,2}, 曹明达^{1,2}, 张结^{1,2}, 潘艳喜^{1,2}, 汪炎林^{1,2}

(1. 贵州师范大学喀斯特研究院, 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, 贵阳 550001)

摘要: 为了揭示土壤 CO₂ 对洞穴内环境的意义, 对大风洞和响水洞 2016 年洞内环境指标和上覆土壤的相关数据进行统计与回归分析。结果表明, 洞内 CO₂ 浓度、土壤 CO₂ 浓度具有显著的季节性特征, 土壤 2# 对应的洞内空气 CO₂ 在夏冬两季差值达 793~884 mg/kg。土壤水 P_{CO2} 和滴水 P_{CO2} 在夏冬两季的差值最高可分别达 1.12 和 0.41, 因此洞内滴水 P_{CO2}、土壤水 P_{CO2} 也表现出明显的季节性特征。土壤 CO₂、洞内空气 CO₂、洞内滴水 P_{CO2} 和土壤水 P_{CO2} 间均表现出一定的滞后现象, 如 4# 土壤水 P_{CO2} 与滴水 P_{CO2} 的相关系数, 由非滞后条件下的 0.123 上升至滞后条件下的 0.596。同时在滞后条件下, 土壤 CO₂ 对洞内 CO₂ 的贡献率的总和最高可达 84.6%, 高于非滞后条件下的值。

关键词: 喀斯特; 二氧化碳; 滴水 P_{CO2}; 多元回归分析; 双河洞

中图分类号: P642.25

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)04-0304-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.04.048

Seasonal Response Between Soil CO₂ and Karst Cave CO₂ Concentration

YIN Chao^{1,2}, ZHOU Zhongfa^{1,2}, TIAN Zhonghui^{1,2},

CAO Mingda^{1,2}, ZHANG Jie^{1,2}, PAN Yanxi^{1,2}, WANG Yanlin^{1,2}

(1. School of Karst Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001; 2. The State Key

Laboratory Incubation Base for Karst Mountain Ecology Environment of Guizhou Province, Guiyang 550001)

Abstract: In order to reveal the significance of soil CO₂ on cave environment, statistical and regression analysis were conducted on the related data of the cave environmental indexes and the overlying soil properties in 2016. The results showed that the cave air CO₂ concentration and soil CO₂ concentration presented the significant seasonal variation and obvious hysteresis phenomenon. The difference between summer and winter of cave air CO₂ concentration corresponded with soil 2# was 793~884 mg/kg. The highest differences of soil water P_{CO2} and drip water P_{CO2} between summer and winter were 1.12 and 0.41 respectively. So the drip water P_{CO2} and soil water P_{CO2} also showed obviously seasonal variations. The lag phenomenon was shown among soil CO₂, cave air CO₂, drip water P_{CO2} and soil water P_{CO2}, e. g., the coefficients between soil water P_{CO2} and drip water P_{CO2} were improved from 0.123 without hysteresis to 0.596 with hysteresis. Under the hysteresis, the highest total contribution of soil CO₂ concentration to cave air CO₂ concentration was 84.6%, higher than that without hysteresis.

Keywords: Karst; soil CO₂; drip water P_{CO2}; multiple regression analysis; Shuanghe Cave

随着全球变暖的影响日益突出, 气候变化成为各界研究和关注的热点问题, 其中碳循环是研究的主要对象^[1]。土壤是地球表面最大碳库^[2-3], 其有机碳储量达 1 400~1 500 Pg C^[4-5], 其全球 CO₂ 的排放量仅次于全球生态系统 NPP 通量。在喀斯特地区, 土壤环境也是喀斯特发育最为活跃的部位^[6]。土壤 CO₂

生产速率受到自养生物呼吸(植被根部呼吸、根系微生物呼吸)和异养生物呼吸等多种因素的影响^[7]。而土壤垂直剖面的 CO₂ 浓度受土壤温度^[8]、土壤有机质^[9]、土壤水分^[10-11]以及地形条件^[12]等因素的控制。洞内空气 CO₂ 的来源主要有洞顶上覆植被根系作用^[13], 岩溶表层带和土壤的直接扩散, 滴水的脱气作

收稿日期: 2017-03-02

资助项目: 国家自然科学基金地区项目“岩溶洞穴 CO₂ 迁移变化机制及对洞穴岩溶环境的影响研究”(41361081); 贵州省高层次创新型人才培养计划项目——“百”层次人才(黔科合平台人才[2016]5674); 贵州省科技计划项目“贵州省洞穴调查数据技术服务”(黔科合 G 字[2014]4004-2 号); 贵州省重大应用基础研究项目“喀斯特石漠化生态修复及生态经济系统优化调控研究—岩土类型格局”(黔科合 JZ 字[2014]200201)

第一作者: 殷超(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事喀斯特地貌与洞穴研究。E-mail: 997250278@qq.com

通信作者: 周忠发(1969—), 男, 博导, 主要从事喀斯特地貌与洞穴、GIS 与遥感研究。E-mail: fa6897@163.com

用^[14]和人类活动作用^[15-16]等。土壤 CO₂ 对洞内水气环境影响的研究成果已经较为丰富,如 Borsato 对土壤 CO₂ 和洞穴 CO₂ 间存在的 1 个月滞后现象进行了分析^[17];Treble 等、Faimon 等和 Camille 等^[18-20]通过洞内气象指标以及洞内水化学指标与邻近土壤 CO₂ 浓度间的关系进行分析,发现土壤 CO₂ 是洞内 CO₂ 的重要来源,并且对洞内滴水 P_{CO_2} 和化学性质具有显著影响。Mandić 和 Krajnc 等^[21-22]利用 $\delta^{13}C$ 等技术,对洞内滴水 and 土壤水理化指标及 $\delta^{13}C$ 特征进行了研究,进一步揭示了洞内 CO₂ 主要来源于土壤 CO₂ 并分析了其运移过程。前期研究虽然取得了丰硕的成果,但在土壤 CO₂ 与洞内空气 CO₂ 间滞后现象的分析和洞内 CO₂ 浓度影响因子的量化处理上研究不足。因此本文对土壤 CO₂ 和洞内空气 CO₂ 浓度间的滞后现象进行分析,并利用多元线性回归方法,量化土壤 CO₂ 和其他因子对洞内 CO₂ 浓度的影响的贡献率,并为洞穴环境变化研究和保护提供理论支撑。

1 研究区概况

双河洞位于贵州省遵义市绥阳县境内,目前已探明长度为 186.333 km,位居中国第一,亚洲第二,是世界上最长的白云岩洞穴,也是世界面积最大的天青石沉积洞穴^[23]。其经纬度范围为 107°02′30″E—107°25′00″E,28°08′00″N—28°20′00″N^[24]。研究区所在位置水热条件充足,1 月平均气温 4℃,7 月平均气温 25.3℃,年均气温 15℃;年降水量 1 200 mm,77% 集中于 5—10 月,降水强度大^[25]。岩性主要为寒武系中上统娄山关组 and 奥陶系下统桐梓组地层出露的台地蒸发相白云岩及白云质灰岩^[26]。植被以亚热带常绿阔叶林为主,植被覆盖率较高。

2 材料与方法

在 2016 年 1—12 月,每月对土壤 CO₂ 浓度、洞内 CO₂ 和空气湿度等指标进行监测(图 1)。土壤 CO₂ 数据采自大风洞上部,薛教山上设置的 5 个土壤监测点,使用 Gas 901 型土壤 CO₂ 仪测定土壤 CO₂ 浓度,利用 Telaire-7001 型便携式红外 CO₂ 仪,对土壤点大气 CO₂ 浓度和温度进行测量,大气湿度、气压和风速使用 Kestrel 4500 型微型气象站进行观测。在洞穴内部,为系统研究大风洞和响水洞的洞内环境,在各洞内各设置 15 个监测点;监测点的分布根据洞道形态、距离等因素进行均匀分布;利用 Telaire-7001 型便携式红外 CO₂ 仪和 Kestrel 4500 型微型气象站,对洞内 CO₂ 浓度、气压、湿度和温度进行测量。土壤水与洞内滴水样品用两个 50 mL 聚乙烯瓶存储。其中一瓶加入两滴硝酸,保持水样离子活性,用于阳离子测定;同时利用酸碱测试盒现场测定

水样中的 Ca²⁺ 和 HCO₃⁻。水样阴阳离子的室内试验分析在中科院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室测定完成。根据洞道走向和监测点分布位置,将 5 个土壤点和所临近的洞内 CO₂ 监测点的相关监测数据进行匹配。其中土壤 1# 与洞内 CO₂ 监测点 DF15#、DF16#,XS1# 对应;土壤 2# 与洞内 CO₂ 监测点 XS3#~5# 对应;土壤 3# 与洞内 CO₂ 监测点 DF11# 和 DF12# 及滴水 3# 对应;土壤 4# 与洞内 CO₂ 监测点 DF8# 和 DF9# 及滴水 1# 对应;土壤 5# 与洞内 CO₂ 监测点 DF13# 和 DF14# 及滴水 4# 对应。此外按时间顺序对土壤 CO₂ 与洞内 CO₂ 数据进行对应,利用 SPSS 软件计算两者在滞后与非滞后现象下的相关系数,土壤水和滴水 P_{CO_2} 利用 PHREEQC 软件计算。



图 1 双河洞系监测点分布

3 结果与分析

3.1 土壤与洞内空气 CO₂ 和洞穴滴水年际变化

从图 2a 可以看出,土壤 1# 大气 CO₂ 浓度的月间波动较大,其波动状况与洞内 CO₂ 浓度变化状况差异较明显,两者无明显的关联性。土壤 1# 的大气 CO₂ 浓度与土壤 CO₂ 浓度波动状况相似(图 2b),夏秋季节高于冬春季节,并且土壤点的空气 CO₂ 浓度同样具有 6 月份低的现象。洞内 CO₂ 浓度自 3 月份的最低值 495 (DF15#),457 (DF16#),427 mg/kg (XS1#),不断上升至 8 月份的最高值 1 260 (DF15#),1 279 (DF16#),1 279 mg/kg (XS1#),具有明显的季节性特征。土壤 CO₂ 浓度同样表现出显著的季节性特征,除 6 月份外,各深度土壤 CO₂ 浓度夏秋季节高于冬春季节,且各深度的土壤 CO₂ 浓度变化趋势一致。6 月份土壤 CO₂ 浓度较低是受到前期降水影响所致,由于雨水的下渗,土壤中的 CO₂ 受到挤压作用释放到大气中或溶解进入土壤水中,因此 6 月份土壤 1# 的土壤 CO₂ 浓度较低,4 个深度的 CO₂ 浓度值由浅到深为 5 090,6 307,6 772,7 125 mg/kg。对土壤 CO₂ 浓度和洞内空气 CO₂ 浓度比较分析发现,土壤 1# 土壤 CO₂ 浓度与洞内 CO₂ 浓度之间表

现出明显的滞后现象,洞内对应点的 CO_2 浓度从 3 月份开始增长,而土壤各深度的土壤 CO_2 浓度总体上自 2 月份开始不断增加,洞内 CO_2 浓度的变化较

土壤 CO_2 滞后近 1 个月。由于土壤 1# 在洞内无对应水点,故不对土壤 1# 的土壤 CO_2 浓度和洞内滴水 P_{CO_2} 间的联系进行分析。

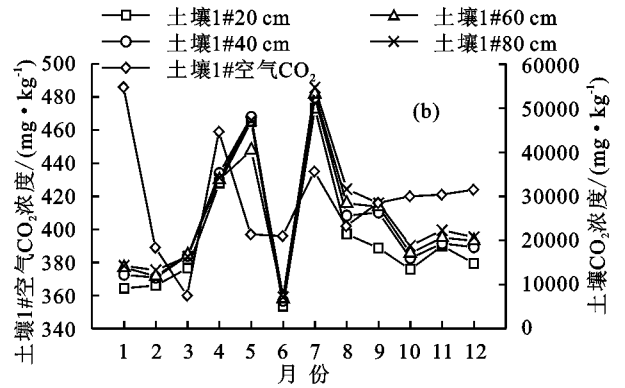
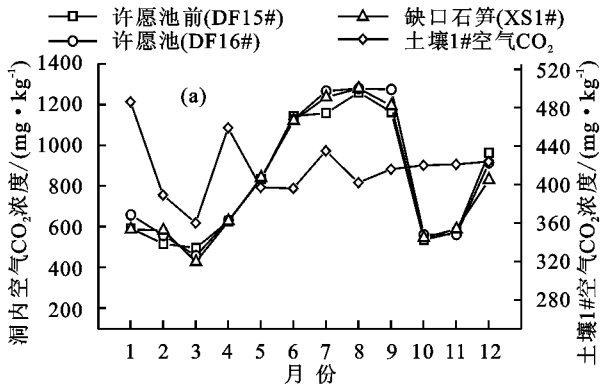


图 2 土壤 1# 空气、土壤 CO_2 和洞内 CO_2 对比

土壤 2# 土壤 CO_2 浓度与对应的洞内(XS3#、XS4#、XS5#) CO_2 浓度变化趋势一致,洞内 CO_2 浓度自 3 月份开始上升(图 3)。土壤 2# 土壤 CO_2 浓度季节性变化明显,各深度土壤 CO_2 浓度总体上在 6 月份达到最高值; CO_2 浓度值由浅到深为 9 204, 14 218, 16 889, 17 640 mg/kg ;土壤 2# 60 cm 和 80 cm 深度土壤 CO_2 在 5 月份较低,仅为 518 mg/kg 和 516 mg/kg ,这可能是由于外界大气降水影响所致。此外土壤 2# 植被类型可能也产生了巨大影响;土壤 2# 处于大片竹林中,由于竹子生长需要吸收大量水汽和 CO_2 ,且生长迅速,竹根繁茂,因此竹林大量抽取土壤 CO_2 和土壤水分。故土壤 2# 的土壤 CO_2 浓度

远低于其他土壤点,且无土壤水。

对土壤 CO_2 浓度和对应的洞内 CO_2 浓度进行比较分析发现,土壤 2# 的土壤 CO_2 浓度与洞内空气 CO_2 间也存在近 1 个月的滞后现象。洞内空气 CO_2 浓度从 3 月份的全年最低值 434 (XS3#), 443 (XS4#), 458 mg/kg (XS5#) 不断增加至 8 月份的最高值 1 251 (XS3#), 1 318 (XS4#), 1 312 mg/kg (XS5#)。相应的土壤 CO_2 浓度从 2 月份 853, 570, 582, 487 mg/kg (由浅到深) 开始不断增高,至 6 月份达到全年最高值。由于土壤 2# 在洞内也没有对应的水点,故不对土壤 2# 的土壤 CO_2 浓度和洞内滴水 P_{CO_2} 间的联系进行分析。

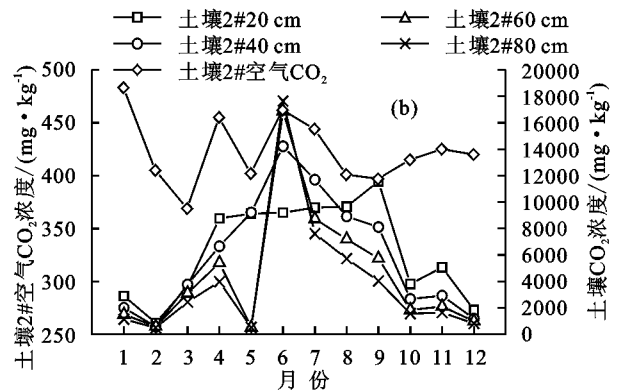
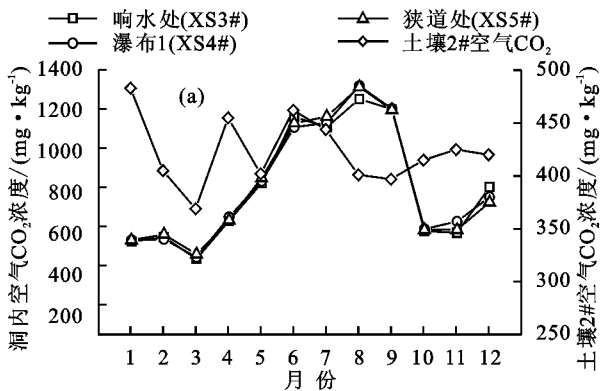


图 3 土壤 2# 空气、土壤 CO_2 和洞内 CO_2 对比

DF11# 和 DF12# 空气 CO_2 浓度均在 8 月份达到最高值,两个监测点的 CO_2 浓度变化状况总体一致(图 4a)。从 1 月份 510 mg/kg 和 491 mg/kg 不断波动上升至 8 月份的最高值,显现出显著的季节变化特征。土壤 3# 各深度土壤 CO_2 浓度表现出较为显著的一致性,总体上波动趋势保持一致(图 4b)。土壤 3# 各深度土壤 CO_2 浓度在 4, 10, 11 月的值高于其他月份,且均表现出峰谷交替的波动规律;并且除 5, 6, 7 月外,深层土壤 CO_2 浓度高于浅层土壤 CO_2 浓度。此外,与土壤 3# 对应的滴水 P_{CO_2} 变化趋势与

洞内 CO_2 浓度相似,即夏秋季节 P_{CO_2} 高而冬春季节偏低。滴水 P_{CO_2} 受到洞内 CO_2 浓度的显著影响,因此其变化趋势与洞内空气 CO_2 浓度较为一致。

由于土壤 3# 土壤 CO_2 浓度变化的波动性大,因此与洞内 CO_2 浓度变化趋势存在一定差异。洞内 CO_2 与土壤 CO_2 的对比发现,洞内空气 CO_2 相对于土壤 CO_2 浓度存在一个月的滞后效应。土壤点的空气 CO_2 浓度与土壤 CO_2 浓度间对应性较为明显,特别是 80 cm 深度的土壤 CO_2 浓度变化与其变化趋势相似度高于其他深度。

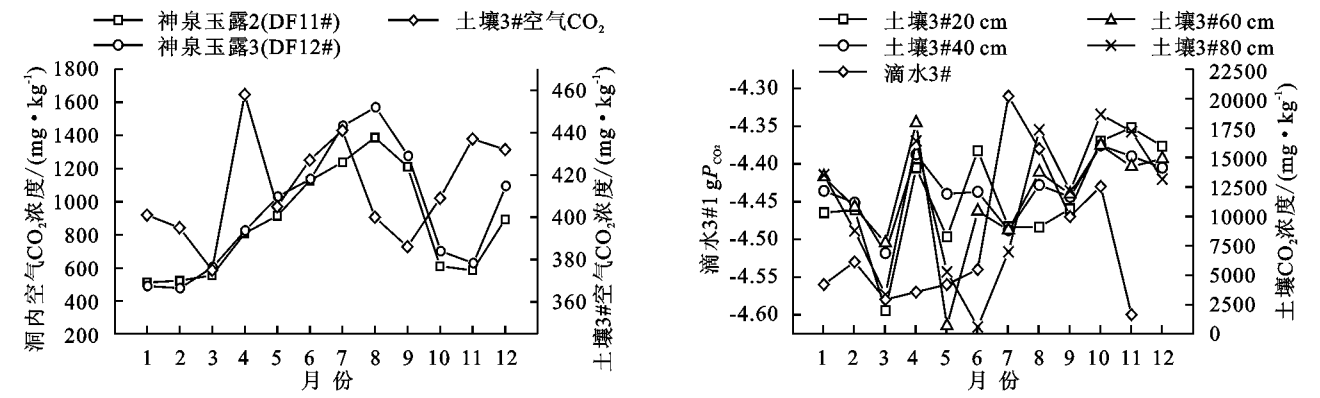


图 4 土壤 3# 空气、土壤 CO₂ 和对应洞内 CO₂ 对比

土壤 4# 对应的洞内监测点 (DF8#、DF9#) CO₂ 浓度表现出显著的季节性特征,除 6 月份外,总体上 DF8# 和 DF9# CO₂ 浓度变化趋势一致 (图 5a)。6 月份 DF8# 的空气 CO₂ 浓度较 DF9# 高 481 mg/kg,其他月份两者 CO₂ 浓度差异较小,差值范围在 6~100 mg/kg。土壤 4# 各深度土壤 CO₂ 浓度在秋、冬、春三个季节的差异并不十分明显,秋季 CO₂ 浓度仅略高于冬春两季节 (图 5b)。土壤 CO₂ 浓度在 6 月份达到最高值,土壤 CO₂ 浓度由浅到深为 39 561, 46 178, 49 999, 49 999 mg/kg,洞内对应的滴水点 P_{CO2} 也达到全年的最高值 -4.26。土壤 CO₂ 在夏季的 7 月和 8 月并未表现出显著的高值,这与大气降水较多有关,受到降水的挤压和溶解作用,土壤 CO₂ 浓度监测值较低。但由于夏季土壤 CO₂ 总量高,降水量丰富,因此土壤水中溶解的 CO₂ 浓度较多。土壤水随裂隙进入洞内,使滴水中溶解的 CO₂ 量增加,所以洞内滴水 P_{CO2} 在夏季处于较高水平。

土壤 4# 土壤 CO₂ 浓度与洞内对应监测点的空气 CO₂ 浓度间未表现出明显的滞后效应,土壤 CO₂ 峰值与洞内空气 CO₂ 峰值时间均在 6 月,但两者间的波动趋势差异较大。由于外界降水等环境因素的影响,土壤 CO₂ 浓度的季节性变化除 6 月份外,各季节间土壤 CO₂ 浓度差异并不显著。因此洞内空气 CO₂ 与土壤 CO₂ 间的响应微弱。

从图 6a 可以看出,土壤 5# 对应的洞内空气 CO₂ 浓度依然具有明显的季节性特征,夏季洞内 CO₂ 浓度处于全年最高水平,而冬季 CO₂ 浓度最低。洞内空气 CO₂ 浓度自春季不断增长,在 9—10 月间急剧降低,由 1 165~1 175 mg/kg 降至 532~552 mg/kg。土壤 5# 的空气 CO₂ 浓度在 7—9 月间急剧降低,由 412 mg/kg 降至 365 mg/kg,并且在 9 月份达到最低值。土壤 5# 的空气 CO₂ 与对应的洞内监测点 CO₂ 浓度存在着明显的滞后效应。洞内空气 CO₂ 浓度相对于土壤点空气 CO₂ 浓度显现出 1 个月

的滞后现象。

土壤 5# 夏季土壤 CO₂ 浓度波动幅度较大,土壤 CO₂ 浓度最高值出现在 7 月份,而 6 月与 8 月浓度处于较低水平 (图 6b)。6 月和 8 月土壤 CO₂ 浓度较低的原因可能也是受外界降水影响,使土壤 CO₂ 浓度明显降低。土壤 5# 对应的洞内滴水 P_{CO2} 表现出明显的季节变化特征,夏季水中 P_{CO2} 较高,9 月份后急剧降低。夏季土壤 CO₂ 总量高,溶于水中的 CO₂ 量较其他季节大,所以滴水 P_{CO2} 夏季较高,两者相关性明显。土壤 5# 土壤 CO₂ 与洞内空气 CO₂ 间也存在明显的滞后现象。与其他监测点不同,土壤 5# 土壤 CO₂ 浓度较洞内 CO₂ 滞后一个月。在土壤 5# 监测时期内,土壤 CO₂ 峰值出现在 7 月份,浓度值由浅到深为 16 622, 22 884, 16 332, 22 225 mg/kg,洞内 CO₂ 浓度 6 月份达到全年最高值 1 246 mg/kg 和 1 542 mg/kg。

3.2 相关性与多元线性回归分析

3.2.1 相关性分析 土壤 CO₂ 浓度对洞内空气 CO₂ 浓度、洞内滴水 P_{CO2} 有一定影响,这种影响可以通过相关性进行说明。通过对 HCO₃⁻、pH、水温 and 阴阳离子的测量,结合 CO₂ 在水溶液中的碳酸平衡原理,可计算出水溶液中的 P_{CO2}^[27-28]。对土壤水 P_{CO2}、滴水 P_{CO2} 和对应洞内空气 CO₂ 监测数据统计见表 1。

各土壤点的土壤水 P_{CO2} 均有明显的季节性特征,夏季土壤水 P_{CO2} 比冬春季的 P_{CO2} 高出 0.06~1.12,说明夏季土壤水中所溶解的 CO₂ 量高于其他季节。土壤监测点所对应的滴水 P_{CO2} 也表现出与土壤水类似的变化趋势,夏秋季节滴水 P_{CO2} 高于其他季节,差值最大可达 0.41。

由于洞内 CO₂ 浓度和土壤 CO₂ 浓度之间存在一定的滞后现象,所以在分析土壤 CO₂ 对洞内 CO₂ 浓度的影响时,将相关系数分为不考虑滞后现象和考虑滞后现象两种,从而显示滞后作用对洞内空气 CO₂ 浓度和土壤 CO₂ 浓度间关系的影响。洞内空气 CO₂ 浓度和土壤 CO₂ 浓度间的相关系数见表 2。

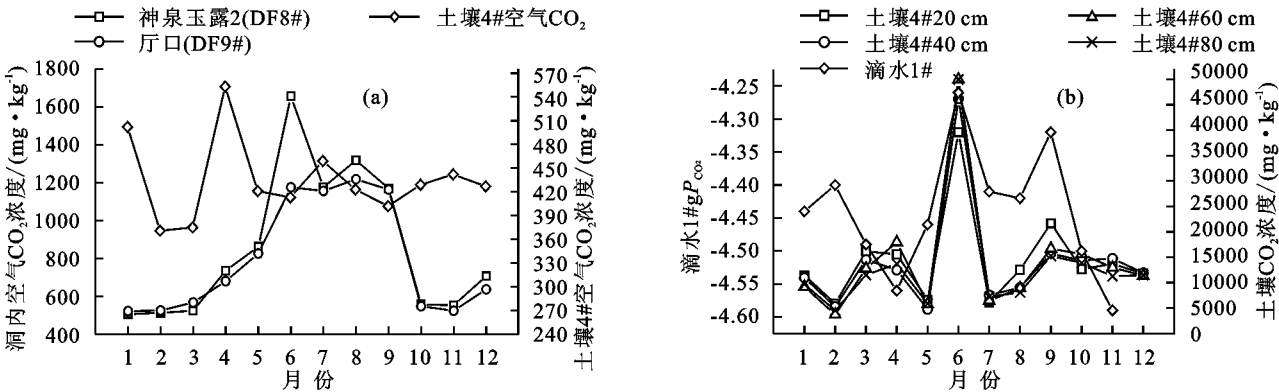


图 5 土壤 4# 空气、土壤 CO₂ 和对应洞内 CO₂ 对比

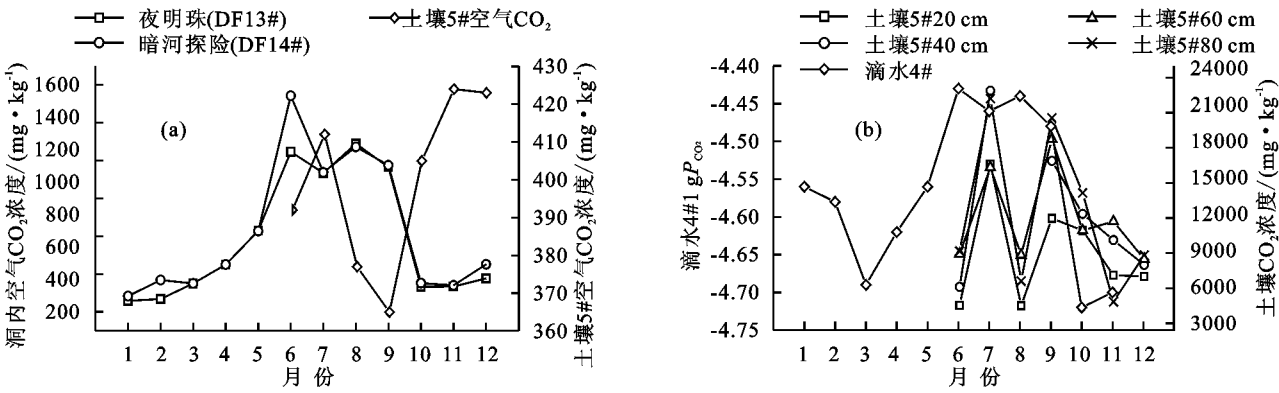


图 6 土壤 5# 空气、土壤 CO₂ 和对应洞内 CO₂ 对比

表 1 土壤水和洞内滴水 P_{CO2}

月份	1#土壤水	3#土壤水	4#土壤水	1#洞内	3#洞内	4#洞内	3#对应滴水	4#对应滴水	5#对应滴水
(月)	P _{CO2}	P _{CO2}	P _{CO2}	CO ₂ 浓度	CO ₂ 浓度	CO ₂ 浓度	P _{CO2}	P _{CO2}	P _{CO2}
1	-2.49	-2.35	-2.01	612	510	506	-4.56	-4.40	-4.56
3	-2.16	-2.36	-1.99	552	553	524	-4.58	-4.44	-4.69
4	-1.68	-1.99	-1.80	459	807	736	-4.57	-4.48	-4.62
7	-1.55	-2.23	-1.10	628	1236	1176	-4.31	-4.37	-4.46
10	-2.46	-2.29	-2.22	836	608	557	-4.43	-4.36	-4.72

表 2 洞内 CO₂ 与土壤 CO₂ 相关系数

不同土层	1#对应洞内	1#对应洞内	2#对应洞内	2#对应洞内	3#对应洞内	3#对应洞内	4#对应洞内	5#对应洞内	5#对应洞内
CO ₂	CO ₂	CO ₂ 滞后	CO ₂	CO ₂ 滞后	CO ₂	CO ₂ 滞后	CO ₂	CO ₂	CO ₂ 滞后
20 cm	0.286	0.547*	0.797**	0.690*	-0.055	0.211	0.521*	0.116	0.924**
40 cm	0.351	0.507	0.791**	0.849**	-0.121	-0.033	0.468	0.228	0.874**
60 cm	0.414	0.509	0.669*	0.587*	-0.125	-0.409	0.492	0.360	0.760**
80 cm	0.411	0.532*	0.610*	0.568*	-0.094	-0.587*	0.516*	0.461	0.950**

注：* 表示在 0.05 的显著水平下显著；** 表示在 0.01 的显著水平下显著。

将 5 个土壤点各深度土壤 CO₂ 浓度和对应洞内 CO₂ 浓度按滞后与非滞后两种情况进行相关性分析发现,土壤 1#与洞内的 CO₂ 浓度在不考虑滞后现象情况下的相关性较差,两者相关系数最高仅 0.414,且不显著。在滞后现象下,两者的相关性得到大幅度提升,相关系数达 0.507~0.547。土壤 2#在非滞后条件下,土壤 CO₂ 浓度与洞内对应点间的 CO₂ 浓度关系显著,两者相关系数达 0.610~0.797,并均在 0.05 的置信水平下显著。土壤 2#在滞后条件下两者关系除在 40 cm 深度有升高外,其他深度均出现一定降低,相关性显著。土壤 3#土壤 CO₂ 浓度与洞内

空气 CO₂ 浓度间的相关性在非滞后条件下呈现十分微弱的负相关性。在滞后条件下,两者相关性得到一定的提升,并且在 80 cm 深度下,两者的相关性达到了显著水平。分析土壤 4#土壤 CO₂ 浓度与对应洞内空气 CO₂ 的关系可知两者在 20 cm 和 80 cm 深度的相关性显著且相关系数分别为 0.521 和 0.516。土壤 4#由于土壤 CO₂ 浓度与洞内对应的空气 CO₂ 浓度间滞后效应并不显著,所以不考虑滞后效应对两者关系的影响。土壤 5# CO₂ 浓度与洞内 CO₂ 浓度间在不考虑滞后现象下两者的相关性较弱,相关系数最高值仅 0.461,且不显著。在滞后条件下的土壤 5#

CO₂ 浓度和洞内空气 CO₂ 浓度相关性十分显著,不同深度土壤 CO₂ 与洞内 CO₂ 浓度的相关系数分别达 0.924,0.874,0.76 和 0.95,且均在 99%的置信区间内显著。

3.2.2 多元线性回归分析 为综合考虑各因素对洞内空气 CO₂ 浓度的影响,对洞内气象指标和土壤 CO₂ 浓度进行线性回归分析,从而定量分析各因素对洞内空气 CO₂ 浓度的影响程度。如表 3,所选监测点非滞后和滞后条件下的回归方程显著性检验的 *p* 值小于显著水平(0.05),因此被解释变量与解释变量间的线性相关性显著,建立的线性模型是恰当的。

在非滞后和滞后两种条件下,将洞内空气 CO₂ 浓度作为因变量,土壤 CO₂ 浓度和洞内空气湿度、气压、温度等作为自变量,借助线性回归模型(表 3)分析发现,在非滞后条件下,土壤 1#土壤 CO₂ 除 20 cm 外,其他深度对洞内对应的空气 CO₂ 浓度贡献率很低,仅 0.34%~8.76%(表 4)。而洞内监测点的 RH、P 对洞穴空气 CO₂ 浓度具有高贡献率,特别是

气压可达 55.95%。在滞后条件下,1#土壤 CO₂ 浓度对洞内 CO₂ 的贡献率除 20 cm 略有降低外,总体上升明显,贡献水平总和可达 59.56%。土壤 2#在非滞后条件下土壤 CO₂ 对洞内 CO₂ 的贡献率较高,特别是 20 cm 深度的土壤 CO₂ 浓度贡献率可达 37.86%,贡献率总和可达 83.26%。在滞后条件下,贡献率在 20 cm 深度有明显下降,但在其他深度贡献率上升显著,特别 40 cm 土壤 CO₂ 的贡献率上升至 43.97%,且贡献率总和上升至 84.6%。4#土壤 CO₂ 对洞内空气 CO₂ 的贡献率在非滞后条件下也相对较高,各深度贡献率总和达 59.55%。由于 4#土壤 CO₂ 浓度与洞内 CO₂ 浓度的滞后效应不明显,故不进行滞后条件贡献率的分析。5#土壤 CO₂ 在非滞后条件下对洞内空气 CO₂ 浓度的贡献率明显低于滞后条件下的贡献率。在非滞后条件下,5#土壤 CO₂ 的贡献率总和仅 14.08%,而滞后条件下可达 48.31%。土壤 3#由于土壤 CO₂ 与洞内空气 CO₂ 的相关性较弱,故不对土壤 3#进行多元线性回归分析。

表 3 土壤 CO₂ 与洞内环境指标多元线性回归分析

土样	回归方程	<i>R</i>	<i>R</i> ²	<i>F</i>	df1	df2	sig
土壤 1#非滞后	$Y=34443.59-0.213X_1-0.103X_2+0.04X_3-0.02X_4-36.22X_5-0.151X_6+0.027X_7$	0.658	0.370	6.871			0.028
土壤 1#滞后	$Y=34180.12+0.346X_1+0.331X_2+0.349X_3+0.37X_4-35.93X_5-0.277X_6+0.036X_7$	0.636	0.331	5.448	1	8	0.048
土壤 2#非滞后	$Y=391.03+0.066X_1+0.403X_2+0.292X_3+0.261X_4+0.215X_5-0.09X_6+0.047X_7$	0.797	0.598	17.384			0.002
土壤 2#滞后	$Y=454.417-0.131X_1+0.059X_2-0.349X_3-0.306X_4-0.047X_5+0.161X_6-0.088X_7$	0.849	0.689	23.142	1	9	0.001
土壤 4#非滞后	$Y=34481.95+0.383X_1+0.342X_2+0.344X_3+0.378X_4-36.15X_5-0.202X_6+0.126X_7$	0.655	0.372	7.509			0.021
土壤 4#滞后	$Y=34481.95+0.383X_1+0.342X_2+0.344X_3+0.378X_4-36.146X_5-0.202X_6+0.126X_7$	0.655	0.372	7.509	1	10	0.021
土壤 5#非滞后	$Y=-36880.32-0.01X_1-0.019X_2+0.128X_3+0.167X_4+0.643X_5+401.06X_6-0.416X_7$	0.918	0.790	16.086			0.028
土壤 5#滞后	$Y=237.04+0.318X_1+0.11X_2-0.002X_3+0.053X_4+0.509X_5-0.589X_6-0.378X_7$	0.950	0.871	28.028	1	3	0.013

注:Y 为洞内空气 CO₂ 浓度;X₁ 为 20 cm 深度土壤 CO₂ 浓度;X₂ 为 40 cm 深度土壤 CO₂ 浓度;X₃ 为 60 cm 深度土壤 CO₂ 浓度;X₄ 为 80 cm 深度土壤 CO₂ 浓度;X₅ 为洞内气压值;X₆ 为洞内湿度;X₇ 为洞内气温。

表 4 土壤 CO₂ 和洞内空气湿度、气压、温度对洞内 CO₂ 贡献率

单位:%

项目	1# (非滞后)	2# (非滞后)	4# (非滞后)	5# (非滞后)	1# (滞后)	2# (滞后)	5# (滞后)
20 cm 土壤 CO ₂	18.11	37.86	15.76	0.43	14.74	6.78	11.13
40 cm 土壤 CO ₂	8.76	19.14	14.07	0.83	14.10	43.97	3.85
60 cm 土壤 CO ₂	0.34	13.87	14.16	5.56	14.87	18.07	0.07
80 cm 土壤 CO ₂	1.70	12.39	15.56	7.26	15.85	15.85	33.26
洞内 RH 均值	12.84	4.27	8.31	39.89	11.80	8.34	20.62
洞内 P 均值	55.95	10.21	26.95	27.94	27.10	2.43	17.82
洞内 T 均值	2.29	2.23	5.18	18.08	1.53	4.56	13.24

4 讨论与结论

由结果分析可知,5 个土壤点土壤 CO_2 及其洞内对应空气 CO_2 具有明显的季节性特征。除土壤 4# 外,土壤 CO_2 浓度和洞内空气 CO_2 浓度间存在着显著的滞后效应,土壤 1#、土壤 2# 和土壤 3# 对应的洞内空气 CO_2 较土壤 CO_2 滞后一个月,土壤 5# 则相反。滞后条件下的土壤 CO_2 浓度和洞内空气 CO_2 浓度相关系数总体上显著高于非滞后条件下,如土壤 5# 土壤 CO_2 浓度与洞内 CO_2 浓度的相关性,在非滞后现象下最高值仅 0.461,而在滞后条件下不同深度土壤 CO_2 与洞内 CO_2 浓度的相关系数分别达 0.924, 0.874, 0.76, 0.95。洞内滴水 and 土壤水 P_{CO_2} 也表现出一定的季节变化特征,夏季土壤水 P_{CO_2} 比冬春季的 P_{CO_2} 高出 0.06~1.12,而夏秋季节滴水 P_{CO_2} 与冬季的差值可达 0.41,且洞内滴水 P_{CO_2} 与土壤水 P_{CO_2} 的相关性也体现出一个月的滞后现象,滞后条件下洞内滴水 P_{CO_2} 与土壤水 P_{CO_2} 的相关系数较非滞后条件下上升明显。通过多元线性回归分析可知,土壤 CO_2 对洞内空气 CO_2 具有极大的贡献率,且贡献率在滞后条件下高于非滞后条件下,如土壤 5# 土壤 CO_2 在非滞后条件下的贡献率总和仅 14.08%,而在滞后条件下可达 48.31%。这一结果进一步说明了土壤 CO_2 是洞穴 CO_2 的最重要来源并且两者间存在较为显著的滞后效应。综上所述,所得主要结论为:

(1) 土壤 CO_2 和洞内空气 CO_2 浓度具有显著的季节性特征,总体上夏秋 CO_2 浓度显著高于冬春 CO_2 浓度。

(2) 土壤 CO_2 与洞内空气 CO_2 浓度具有一定的滞后现象,并且在土壤 1#~3# 具有滞后一个月的显著表现。

(3) 洞内滴水 and 土壤水 P_{CO_2} 也表现出一定的季节性特征,夏季土壤水 P_{CO_2} 比冬春季的 P_{CO_2} 高出 0.06~1.12,而夏秋季节滴水 P_{CO_2} 与冬季的差值可达 0.41。

(4) 土壤 CO_2 对洞内空气 CO_2 具有极大的贡献率,且贡献率在滞后条件下高于非滞后条件下。

参考文献:

- [1] 田娜,王义祥,翁伯琦. 土壤碳储量估算研究进展[J]. 亚热带农业研究,2010,6(3):193-198.
- [2] 余健,房莉,卞正富,等. 土壤碳库构成研究进展[J]. 生态学报,2014,34(17):4829-4838.
- [3] Papp M, Balogh J, Pintér K, et al. Calibration and field test of a new, automated open system to measure soil CO_2 efflux in sandy grassland[J]. *Agrokémia és Talajtan*,2015,63(2):329-340.
- [4] Piao S L, Ciais P, Friedlingstein P, et al. Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to au-

- tumn warming[J]. *Nature*,2008,451(7174):49-52.
- [5] 潘根兴. 中国土壤有机碳库及其演变与应对气候变化[J]. 气候变化研究进展,2008,4(5):282-289.
- [6] 曹建华,袁道先,潘根兴,等. 不同植被下土壤碳转移对岩溶动力系统中碳循环的影响[J]. 地球与环境,2004,32(1):90-96.
- [7] Buczek U, Bachmann S, Gropp M, et al. Spatial variability at different scales and sampling requirements for in situ soil CO_2 , efflux measurements on an arable soil[J]. *Catena*,2015,131(8):46-55.
- [8] 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.
- [9] 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,2011,39(2):196-202.
- [10] Kaufmann G, Dreybrodt W. Calcite dissolution kinetics in the system $\text{CaCO}_3 - \text{H}_2\text{O} - \text{CO}_2$ at high undersaturation[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*,2007,71(6):1398-1410.
- [11] Dreybrodt W. Chemical kinetics, speleothem growth and climate[J]. *Boreas*,2010,28(3):347-356.
- [12] 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.
- [13] Breecker D O, Payne A E, Quade J, et al. The sources and sinks of CO_2 in caves under mixed woodland and grassland vegetation[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*,2012,96(11):230-246.
- [14] 李玲珑,刘再华. 不同植被条件下岩溶地下水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的差异研究:以贵州夜郎洞、天钟洞和普定岩溶水碳通量模拟试验场为例[J]. 第四纪研究,2015,35(4):913-921.
- [15] Cowan B D, Osborne M C, Banner J L. Temporal variability of cave-air CO_2 in central Texas[J]. *Journal of Cave and Karst Studies*,2013,75(1):38-50.
- [16] Lang M, Faimon J, Ek C. The relationship between carbon dioxide concentration and visitor numbers in the homothermic zone of the Balcarka Cave (Moravian Karst) during a period of limited ventilation[J]. *International Journal of Speleology*,2015,44(2):167-176.
- [17] Borsato A, Frisia S, Miorandi R. Carbon dioxide concentration in temperate climate caves and parent soils over an altitudinal gradient and its influence on speleothem growth and fabrics[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*,2015,40(9):1158-1170.
- [18] Treble P C, Fairchild I J, Griffiths A, et al. Impacts of cave air ventilation and in-cave prior calcite precipitation on Golgotha Cave dripwater chemistry, southwest Australia[J]. *Quaternary Science Reviews*,2015,127(11):61-72.