

罗维均,王世杰,刘秀明. 喀斯特洞穴系统碳循环的烟囱效应研究现状及展望[J]. 地球科学进展, 2014, 29(12): 1333-1340. doi: 10.11867/j.issn.1001-8166.2014.12.1333. [Luo Weijun, Wang Shijie, Liu Xiuming. Research progresses and prospect of chimney effect about carbon cycle in the Karst cave system[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(12): 1333-1340. doi: 10.11867/j.issn.1001-8166.2014.12.1333.]

# 喀斯特洞穴系统碳循环的烟囱效应 研究现状及展望\*

罗维均,王世杰\*,刘秀明

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. 中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站,贵州 普定 562100)

**摘要:**对全球碳循环的系统研究已有几十年的历史,至今已取得很多重要成果,但对占整个地球陆地面积约 10% 的喀斯特地区碳循环的研究却在近 10~20 年来才逐渐受到重视。近年来的研究表明,岩溶作用对全球碳循环具有重要影响。目前,科学家们对影响喀斯特地区碳循环的各种因素有了较为全面系统的认识,并对碳源或碳汇量进行了估算。然而,与非喀斯特地区不同,喀斯特地区普遍发育着大小和形态各异的溶洞/裂隙,为喀斯特地区地—气交换增加了一个通道(窗口),其在喀斯特地区碳循环过程中扮演着什么样的角色,至今还少有报道。已有研究显示,喀斯特洞穴具有明显的烟囱效应,是不可忽略的。综述前人的研究发现,洞穴系统碳循环研究还存在诸多问题有待进一步研究,如烟窗效应对区域和全球大气 CO<sub>2</sub> 的贡献;烟窗效应的区域差异、季节变化及其原因(驱动力);烟窗效应对当地生态系统的影响等。随着现代科学技术(如涡度相关、大孔径闪烁和同位素)的发展,为解决上述问题提供了可能。因此,有必要运用现有的先进手段对洞穴系统碳循环进行自动连续监测和研究,这对喀斯特地区碳循环,甚至全球碳循环研究均具有重要意义。

**关键词:**碳酸盐岩;喀斯特关键带;涡度相关;大孔径闪烁仪;稳定同位素

中图分类号: P595 文献标志码: A 文章编号: 1001-8166(2014)12-1333-08

## 1 碳循环研究背景

碳是地球上主要元素之一,也是地球上生命存在的关键元素,在地球生命演化和延续过程中发挥着关键性作用,因此很早就受到生物学家们的关注。然而,随着人类社会的发展,尤其是工业社会以来,人类通过消耗大量化石燃料等方式严重干预了自然的碳循环过程,严重影响着地球的生态系统和人们的生产生活,逐渐引起了越来越多的环境学家和地

球化学家们的注意。20 世纪 70 年代,有关碳循环的研究开始全面发展,在之后的几十年中,取得了非常丰富的研究成果,归纳起来,主要表现在以下几个方面:

(1) 对全球各碳库碳储量有了粗略的估算。在不考虑岩石圈的情况下,海洋碳储量占绝大多数(超过 90%),其次是土壤碳库(约占 4%),大气和陆地生物圈所占比例相对较小(二者都占 1%~2%)。

(2) 研究碳循环的方法和技术取得了较大突

\* 收稿日期: 2014-07-09; 修回日期: 2014-09-29.

\* 基金项目: 国家重大科学研究计划项目“基于水—岩—土—气—生相互作用的喀斯特地区碳循环模式及调控机理”(编号: 2013CB956700); 贵州省科技计划项目“碳汇动态及通量长期自动监测系统建设”(编号: 黔科合计 Z 字[2014]4004) 资助。

作者简介: 罗维均(1978-) 男, 云南镇雄人, 副研究员, 主要从事环境地球化学研究. E-mail: luoweijun@vip.gyig.ac.cn

\* 通讯作者: 王世杰(1966-) 男, 浙江台州人, 研究员, 主要从事环境地球化学研究. E-mail: wangshijie@vip.skleg.cn

破。微气象学法(如基于空气动力学原理的测定方法、基于热平衡原理的测定方法以及基于涡度相关技术的测定方法)、箱法(静态箱法、动态箱法和巨型箱法)、定量遥感等均为当前比较先进的研究方法。

(3) 对地球系统中各主要碳循环过程的研究均有了一定的认识。如森林生态系统碳循环过程、草地生态系统碳循环过程以及湿地生态系统碳循环过程。

(4) 人类活动(如消耗大量化石燃料和对生态系统的不合理利用)对全球碳循环影响的评估。

(5) 建立了多种碳循环模型。如森林生态系统碳循环模型、草地生态系统碳循环模型、农田生态系统碳循环模型以及湿地生态系统碳循环模型。

(6) 固碳技术和碳减排的研究也取得了一些进展。

由于土壤和陆地生态系统是与人类关系极为密切、且极易变化的碳库,因此,自然成为了碳循环研究中最受关注的一个环节。然而,占整个地球陆地面积约 10% 的喀斯特地貌区碳循环的研究却一直未受到重视,直到近 10~20 年来,随着对喀斯特研究的深入,才引起科学家们的注意。因此,相关研究亟待加强。

## 2 喀斯特地区的碳循环

### 2.1 喀斯特的基本特征

喀斯特(Karst)即岩溶,是水对可溶性岩石(碳酸盐岩、石膏、岩盐等)进行以化学溶蚀作用为主,流水的冲蚀、潜蚀和崩塌等机械作用为辅的地质作用,以及由这些作用所产生的现象的总称。由喀斯特作用所造成的地貌,称为喀斯特地貌(岩溶地貌)。

喀斯特地貌分布在世界各地的可溶性岩石地区,从热带到寒带、从大陆到海岛都有喀斯特地貌发育,占地球陆地总面积的 10% 左右。其集中连片分布于东亚、地中海沿岸、北美及加勒比等 3 个片区,是世界三大喀斯特集中分布区,其中以东亚片区最为发育。

我国喀斯特分布区达 363.1 万  $\text{km}^2$ ,超过全国总陆地面积的 1/3,其中裸露的碳酸盐类岩石面积约为 130 万  $\text{km}^2$ ,约占全国总陆地面积的 1/7,主要分布在以贵州高原为中心的西南地区,是世界上最大的喀斯特区之一。

由于喀斯特地貌主要分布在世界各地的可溶性岩地区,如碳酸盐类岩石(石灰岩、白云岩、泥灰岩等)、硫酸盐类岩石(石膏、硬石膏和芒硝)以及卤盐

类岩石(钾、钠、镁盐岩石等),因此,具有与溶蚀有关的独特特点,最主要的是具有与温湿度相关的纬度或垂直高度地带性特征。如中国东部喀斯特地貌呈纬度地带性分布,自南而北为热带喀斯特(以峰林—洼地为代表)、亚热带喀斯特(以缓丘—洼地为代表)和温带喀斯特(以喀斯特化山地干谷为代表),而中国西部由于受水分的限制或地形的影响,属干旱地区喀斯特(位于西北地区,发育微弱)和寒冻高原喀斯特(位于青藏高原,冻融风化强烈)。另外,喀斯特通常还具有地上(石牙和峰林等)和地下(洞穴和裂隙等)的“二元结构”,尤其是在热带和亚热带地区最为明显。因此,喀斯特系统以短的响应时间和低缓冲效果为特征<sup>[1]</sup>,物质循环快速。

### 2.2 喀斯特地区的碳循环研究进展

在以往的全局碳循环研究中,绝大多数的成果均与喀斯特没有直接关系。然而,喀斯特地区碳循环却是全球碳循环的重要组成部分,甚至扮演着特殊的角色。通过最新的调研发现,最近国内外已有了一些关于喀斯特地区碳循环的重大研究成果或研究计划。

早在 20 世纪 70 年代,Atkinson<sup>[2]</sup>就在英格兰 Mendip Hills 地区,通过每周的泉水样采集分析,发现泉水的  $p\text{CO}_2$  是恒定不变的,而土壤空气中的  $\text{CO}_2$  浓度存在季节变化,且总低于泉水的  $p\text{CO}_2$ ,最后通过对洞壁裂缝中  $\text{CO}_2$  的直接测定和对滴水的分析来解释这种差异,即  $p\text{CO}_2$  随着深度的增加而增加,洞底的值与泉水相近。这可能是由向下迁移的土壤有机质分解所致。80 年代,Crowther<sup>[3]</sup>在马来西亚西部,对热带喀斯特不同深度土壤中的  $\text{CO}_2$  浓度进行了研究,发现有明显的时空变化,浓度随深度的增加而增加,不纯灰岩形成的紧实土壤中最高,纯灰岩形成的多孔坡面土壤中最低,这表明很难获得热带喀斯特土壤中确凿的平均浓度,但却暗示,在热带喀斯特土壤中的平均  $\text{CO}_2$  浓度很可能低估了渗滤水的真实溶蚀潜力,而过高地估计了温带地区的溶蚀潜力。最近,Tissier 等<sup>[1]</sup>在法国阿尔卑斯地区对喀斯特地下水的有机质进行监测,Peyraube 等<sup>[4]</sup>提出了一种利用泉水和洞穴空气的有关参数(如  $p\text{CO}_2$  和碳同位素)估算表层喀斯特中空气  $p\text{CO}_2$  的方法,并发现表层喀斯特空气  $p\text{CO}_2$  高达 4.4% (冬季)~10.0% (夏季),远高于土壤(0.27%~1.60%)或洞穴(0.30%~3.10%,某些地方达到 7.50%),且随季节变化。在国际上,还未见有喀斯特碳循环与全球碳循环联系的文献报道。

相对而言,国内喀斯特地区碳循环的相关研究起步较晚,但最近有井喷式的发展趋势,且研究相对国外更加系统和全面。早期的研究主要是由袁道先<sup>[5]</sup>和翁金桃<sup>[6]</sup>等提出并系统论述,随后提出了喀斯特系统碳循环的概念模型,并估算出中国的喀斯特过程可能每年消耗  $1.77 \times 10^{13}$  g CO<sub>2</sub>,超过水中释放出来的 CO<sub>2</sub> 量,即喀斯特过程是个吸收 CO<sub>2</sub> 的过程<sup>[7]</sup>。在此基础上,2000 年后,有关研究得到了迅速发展,研究手段更加丰富,对喀斯特地区的碳循环过程和机理都有了比较深入的认识:发现岩溶作用碳循环主要受生态系统控制<sup>[8]</sup>;碳酸酐酶(Carbonic Anhydrase, CA)作为催化剂在喀斯特过程中发挥重要作用,如加速 CO<sub>2</sub> 的水化过程<sup>[9]</sup>;岩溶土壤系统碳转移转化过程研究<sup>[10,11]</sup>。尤其是近 3 年来,获得了诸多研究成果,发现喀斯特地区水电站开发对河流溶解无机碳(Dissolved Inorganic Carbon, DIC)有干扰<sup>[12]</sup>;通过多年的监测数据估算出贵州普定后寨河流域的 DIC 平均通量为 20.7 g C/(m<sup>2</sup>·a),目前中国喀斯特地区化学风化的碳汇估计约为 12 Tg C/a,雨水是其最重要的影响因素,认为全球的经验模型高估的后寨河碳汇达 29%<sup>[13]</sup>;喀斯特水中 DIC 的河流通量对于区域或国家的碳收支是非常重要的<sup>[14]</sup>;土壤 CO<sub>2</sub> 和降雨是表层喀斯特水化学变化的主要驱动力,强降雨下稀释效应明显,反之 CO<sub>2</sub> 效应占主导<sup>[15]</sup>;来自喀斯特地下河的碳酸氢根进入河流系统,经过植物(水生)消耗或碳酸钙沉积,形成了一个自然的喀斯特系统碳汇<sup>[16]</sup>;利用阴离子(碳酸根、硝酸和硫酸)和阳离子(Mg<sup>2+</sup>和 Ca<sup>2+</sup>),以及无机碳的稳定碳同位素研究了人类活动(硝酸和硫酸)对中国西南喀斯特地下水无机碳通量的贡献<sup>[17,18]</sup>;水生生物的光合和呼吸作用是影响池水中有关水文地球化学指标日变化的主要过程,从而影响到喀斯特地区的碳循环<sup>[19]</sup>;发现表层喀斯特中主要发生的是气-水-岩的相互作用,并估计中国南方喀斯特地区贡献了中国碳酸盐系统产生碳汇的一半以上(约 64%),每年 1 000 万 t,认为中国南方喀斯特系统是一个碳汇区<sup>[20]</sup>。

### 3 喀斯特洞穴的烟囱效应

#### 3.1 喀斯特洞穴特征

洞穴是指一个地下的通道或空间,可进入其中,喀斯特洞穴形成方式主要是水的侵蚀作用,是由喀斯特水沿可溶岩层层面节理或裂隙进行溶蚀扩大而成,可见,其形成主要受地质因素(如岩性和构

造)<sup>[21~23]</sup>、气候因素(如气温和降水)<sup>[24]</sup>以及生物作用(通过 CO<sub>2</sub> 作用)等影响。喀斯特洞穴是喀斯特地区常见的自然景观,从南到北、从高山到平原、从内陆到大海均有分布,但地带性特征明显,这是因为洞穴的发育主要受上述地质和气候因素的控制,如我国西南喀斯特地区,洞穴密度大多为每平方公里数十个<sup>[21,22]</sup>,北方和青藏高原等地区要少得多。根据其成因大致可分为 3 类:渗流带洞穴,如落水洞、竖井;饱水带洞穴,如多层水平溶洞;承压水带洞穴。总之,喀斯特洞穴的发育规律为:主要受岩性、构造和气候控制,生物、土壤、地形地貌和潜水面等对其也有影响;喀斯特洞穴发育特点是:相对集中性、对底层的选择性、成层性、方向性和差异性<sup>[21~23]</sup>。喀斯特洞穴/管道的形态特征可通过人工实测、地质雷达扫描以及 3D 模拟(ODSIM)<sup>[25]</sup>等方法获得。

#### 3.2 喀斯特洞穴的烟囱效应研究进展

烟囱效应(chimney effect)是指空气沿着有较大坡度的空间上升或下降,造成空气加强对流的现象。在有共享中庭、竖向通风(排烟)风道、楼梯间或某些自然地质体等具有类似烟囱特征,即从底部到顶部具有通畅的流通空间的建筑物、构筑物或洞穴等中,空气靠密度差(气压差)的驱动,沿着通道很快进行扩散或排出建筑物。在自然环境中,这种现象也十分普遍,如洞穴系统的烟囱效应(图 1)。

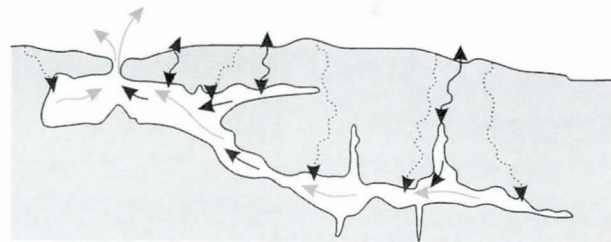


图 1 烟囱效应示意图<sup>[26]</sup>

Fig. 1 Cartoon of cave air circulation (chimney effect)<sup>[26]</sup>

黑色实线箭头表示主要气流;黑色虚线箭头表示气体扩散;  
灰色箭头表示弱气流

The black solid arrows indicate main airflows; The black dotted arrows indicate air Diffusion flows; The gray arrows indicate weak airflows

然而,目前关于洞穴/裂隙对陆地生态系统碳通量影响的研究,全球仅发现在西班牙北部的 Altamir 洞进行的相对系统,但也只是定性的<sup>[27~31]</sup>,其他地区,包括国内均还未见报道。尽管如此,这些研究已明确表明,在喀斯特地区,裂隙/洞穴呼吸对生态系统碳通量的影响不能忽视。

尽管直接针对洞穴系统碳循环(烟囱效应)研

究的工作还不多,但与洞穴相关的碳循环研究却已有较长的历史,且已获得了重要认识。世界上对喀斯特洞穴监测始于 19 世纪的欧洲德国和奥地利,20 世纪上半叶因受战争等因素影响而发展缓慢,20 世纪下半叶,由于监测技术的进步和大量经费的支持,得到了较快发展<sup>[32]</sup>。20 世纪 80 年代,科学家们对美国宾西法尼亚 Tytoona 洞穴空气  $p\text{CO}_2$  的季节波动进行监测,并发现了其夏季高冬季低的变化规律<sup>[33]</sup>,而 Ek 等<sup>[34]</sup>比较了比利时洞穴和其他国家洞穴空气中的  $\text{CO}_2$  含量,发现在寒冷气候和半干旱地区,洞穴空气  $\text{CO}_2$  含量通常较低(生物影响),并指出,由于裂缝与土壤或水接触面大,是土壤与洞穴的链接通道,因此,裂缝中  $\text{CO}_2$  浓度通常都要比大的通道中高。

20 世纪 90 年代末至 21 世纪初,由于洞穴旅游的快速兴起,为了保护洞穴内的自然景观,很多研究者都对洞穴内不同小气候参数(如  $\text{CO}_2$ 、气温、相对湿度、 $^{222}\text{Rn}$ )进行监测<sup>[35-37]</sup>,发现洞穴内  $\text{CO}_2$  浓度的变化不仅受降水量控制,还受洞穴内外的气压差和温度梯度影响(洞穴通风),其中  $\text{CO}_2$  浓度的季节变化主要受降水和温差影响,而短期变化则主要受气压差控制,表明渗透水不总是将  $\text{CO}_2$  传输进洞穴的主要载体<sup>[37]</sup>。Bourges 等<sup>[38]</sup>的研究也得出类似的结论,认为喀斯特系统动力学中,空气动力学传输可能是主要的过程,由当地的气象条件和洞穴几何结构控制着洞穴内外空气的交换,说明洞穴是喀斯特系统的窗口。由此可见,这一阶段的研究已经表明,喀斯特洞穴具有明显的烟囱效应。

2010 年以来,随着研究的深入,对喀斯特洞穴碳循环的研究取得了比较丰硕的成果。如在美国佛罗里达州的 Hollow Ridge 洞穴, Kowalczyk 等<sup>[39]</sup>应用  $\text{CO}_2$  质量平衡模型和  $^{222}\text{Rn}$  质量平衡模型,估算了从表层喀斯特到洞穴大气的  $\text{CO}_2$  净通量,发现洞穴平均净  $\text{CO}_2$  脱气为正值,即洞穴净损失碳;还明确指出,由于石灰岩含有平均  $1.3 \times 10^{-6} \sim 2.5 \times 10^{-6}$  的  $^{238}\text{U}$  ( $^{238}\text{U} \rightarrow ^{222}\text{Rn} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$ ),导致喀斯特洞内  $^{222}\text{Rn}$  含量远高于洞外大气,且  $^{222}\text{Rn}$  是惰性气体,不起化学反应,其半衰期为 3.82 天,远长于大多数洞穴空气的周转时间<sup>[40-42]</sup>,因此,在喀斯特洞穴研究中, $^{222}\text{Rn}$  是最好的可用天然空气交换示踪物。Benavente 等<sup>[43]</sup>对西班牙南部的 Nerja 洞穴进行监测,发现洞穴本身似乎是地下水位以上的包气带子系统,由于其通气性,导致  $\text{CO}_2$  浓度明显偏低(最大每升几千毫升),气体能通过喀斯特管道向四周扩散,在孔

隙内,特别是穿越重大的喀斯特空隙的孔隙内,产生明显的向下或向上的空气通量。Faimon 等<sup>[44]</sup>研究了捷克 Balcarka 洞穴和邻近土壤中  $\text{CO}_2$  的关系,发现洞穴  $\text{CO}_2$  的来源除了土壤外,其他来自于人和表层喀斯特,并构建了一个土壤—表层喀斯特—洞穴系统中  $\text{CO}_2$  的概念模型,分析了不同库间的  $\text{CO}_2$  通量。Breecker 等<sup>[45]</sup>通过对美国 4 个不同植被条件下洞穴  $\text{CO}_2$  浓度及其碳同位素(土壤呼吸  $\text{CO}_2$  碳同位素与洞穴  $\text{CO}_2$  相近)的研究也得出相似的结论,即洞穴内的  $\text{CO}_2$  主要来自于土壤的扩散(深部跟呼吸)而不是通过水溶液传输。Peyraube 等<sup>[4]</sup>的研究发现洞穴内部部分地方空气  $p\text{CO}_2$  高达 7.5%,远高于土壤。越来越多的科学家们运用 Keeling 图<sup>[46]</sup>来分辨洞穴空气的 2 个主要来源(土壤空气具有较高的  $p\text{CO}_2$  和较轻的碳同位素,洞外空气具有较低的  $p\text{CO}_2$  和较重的同位素)<sup>[39,47-50]</sup>。Matthey 等<sup>[51]</sup>对直布罗陀喀斯特洞穴背景空气、土壤空气和洞穴空气进行为期 4 年的每月  $\text{CH}_4$  浓度和碳同位素监测,发现洞穴空气与土壤空气在一个范围内,都低于背景空气值,但具有强烈的季节变化,认为动力通风的洞穴可能扮演着大气  $\text{CH}_4$  的净汇角色, $\text{CH}_4$  是洞穴通风路径的一种有用示踪剂。

综上所述,喀斯特洞穴在喀斯特地区碳循环研究中是不可忽略的<sup>[28]</sup>,它是喀斯特化的结果,提供了进入喀斯特系统内部的窗口<sup>[38]</sup>。然而,洞穴又是喀斯特包气带的特殊组成部分,在此处,外部空气与包气带空气发生混合作用<sup>[52]</sup>,这种交换作用的发生取决于气温和气压梯度,其次是洞穴空气量,尤其是  $p\text{CO}_2$ 。研究表明,洞穴内的  $\text{CO}_2$  有些主要来自于气体扩散<sup>[45,53]</sup>,有些主要来自于渗流水的脱气<sup>[33]</sup>,当然,大多还是两者都有贡献<sup>[34,49]</sup>,另外,通过精确的洞穴空气  $\text{O}_2$  浓度测试就可以区分洞穴内是以气态进入还是来自于水<sup>[54]</sup>,因为如果是通过水进入的,则  $\text{O}_2$  不会增加,反之会随  $\text{CO}_2$  的增加而增加<sup>[45]</sup>。控制洞穴空气通风的 2 个主要因素是温度和风,他们的相对重要性取决于洞口的位置和高度,以及洞穴的形状和容积<sup>[55-58]</sup>。

## 4 问题与展望

喀斯特洞穴(裂隙)系统在喀斯特地区扮演着重要角色,它在喀斯特关键带各圈层介质间物质和能量循环中发挥着特殊作用,其碳循环是喀斯特碳循环研究的重要组成部分。当前,对喀斯特洞穴系

统碳循环的研究正处于蓬勃发展的阶段, 尽管很多普遍性的规律已经掌握, 但依然还存在诸多问题有待进一步研究, 如烟囱效应对区域和全球大气 CO<sub>2</sub> 的贡献; 烟囱效应的区域差异、季节变化及其原因(驱动力); 烟囱效应对当地生态系统的影响等。

可见, 目前洞穴碳循环研究还存在诸多有待解决的问题, 而随着现代科学技术的发展, 尤其是大量适合野外连续自动监测设备的成功研制, 将来应该主要发展自动监测网络<sup>[32]</sup>。涡度相关技术(Eddy Covariance, EC)自 20 世纪 70 年代开始用于碳通量研究<sup>[59]</sup>以来, 目前已成为直接测定生态系统碳通量的主要方法或标准方法, 且已从主要对农田系统的观测向森林等生态系统发展。但是, 由于涡度相关技术本身的特征, 即要求监测场地下垫面平坦、异质性低等<sup>[60]</sup>, 以及其监测尺度较小(通常数百米)等限制, 喀斯特地区难以较好满足(地表起伏大、植被和土壤等异质性高是喀斯特地区普遍存在的特点), 因此, 结合观测尺度较大(公里级别)的大孔径闪烁仪(Large Aperture Scintillometer, LAS)监测就显得十分必要。事实上, 即使是下垫面不是特别复杂的地方, 涡度相关技术结合大孔径闪烁仪的使用也非常普遍, 如在中国 40 多个涡度相关系统设置点中, 就有 30 个左右的场所同时安装了大孔径闪烁仪, 二者结合的效果都很好<sup>[61]</sup>。另外, 随着稳定同位素技术的进步, 使得同位素的野外实时连续监测成为了可能, 这对研究碳的来源具有重要意义。因此, 涡度相关技术结合大口径闪烁仪和稳定同位素技术, 将可能会成为今后喀斯特碳循环, 尤其是洞穴烟囱效应研究的主要手段。

#### 参考文献(References):

- [1] Tissier G, Perrette Y, Dzikowski M, et al. Seasonal changes of organic matter quality and quantity at the outlet of a forested karst system (La Roche Saint Alban, French Alps) [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 482: 139-148.
- [2] Atkinson T C. Carbon dioxide in the atmosphere of the unsaturated zone: An important control of groundwater hardness in limestones [J]. *Journal of Hydrology*, 1977, 35(1/2): 111-123.
- [3] Crowther J. Carbon dioxide concentrations in some tropical karst soils, west Malaysia [J]. *CATENA*, 1983, 10(1/2): 27-39.
- [4] Peyraube N, Lastennet R, Denis A, et al. Estimation of epikarst air pCO<sub>2</sub> using measurements of water δ<sup>13</sup>C<sub>TDIC</sub>, cave air pCO<sub>2</sub> and δ<sup>13</sup>C<sub>CO<sub>2</sub></sub> [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, 118: 1-17.
- [5] Yuan Daoxian. Carbon cycle and global karst [J]. *Quaternary Science*, 1993, 13(1): 1-6. [袁道先. 碳循环与全球岩溶 [J]. 第四纪研究, 1993, 13(1): 1-6.]
- [6] Weng Jintao. The effect of carbonate rocks on global carbon cycle [J]. *Advances in Earth Science*, 1995, 10(2): 154-158. [翁金桃. 碳酸盐岩在全球碳循环过程中的作用 [J]. 地球科学进展, 1995, 10(2): 154-158.]
- [7] Jiang Z C, Yuan D X. CO<sub>2</sub> source-sink in karst processes in karst areas of China [J]. *Episodes*, 1999, 22(1): 33-35.
- [8] He Shiyi, Pan Genxing, Cao Jianhua, et al. Research on characteristics of carbon cycle in epi-karst ecological system [J]. *Quaternary Science*, 2000, 20(4): 383-390. [何师意, 潘根兴, 曹建华, 等. 表层统碳循环特征研究 [J]. 第四纪研究, 2000, 20(4): 383-390.]
- [9] Liu Z H. Role of carbonic anhydrase as an activator in carbonate rock dissolution and its implication for atmospheric CO<sub>2</sub> sink [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2001, 75(3): 275-278.
- [10] Pan Genxing, He Shiyi, Cao Jianhua, et al. Variation of δ<sup>13</sup>C in karst soil in Yaji karst experiment site, Guilin [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(6): 500-503.
- [11] Cao Jianhua, Pan Genxing, Yuan Daoxian, et al. Seasonal changes of dissolved organic carbon in soil: Its environmental implication in karst area [J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(2): 224-229. [曹建华, 潘根兴, 袁道先, 等. 岩溶地区土壤溶解有机碳的季节动态及环境效应 [J]. 生态环境, 2005, 14(2): 224-229.]
- [12] Wang F S, Liu C Q, Wang B L, et al. Disrupting the riverine DIC cycling by series hydropower exploitation in karstic area [J]. *Applied Geochemistry*, 2011, 26(Suppl. 1): S375-S378.
- [13] Yan J H, Wang Y P, Zhou G Y, et al. Carbon uptake by karsts in the Houzhai Basin, southwest China [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2011, 116(G04012): 1-10.
- [14] Yan J H, Li J M, Ye Q, et al. Concentrations and exports of solutes from surface runoff in Houzhai Karst Basin, southwest China [J]. *Chemical Geology*, 2012, 304/305: 1-9.
- [15] Yang R, Liu Z H, Zeng C, et al. Response of epikarst hydrochemical changes to soil CO<sub>2</sub> and weather conditions at Chenqi, Puding, SW China [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 468/469: 151-158.
- [16] Zhang C, Wang J L, Pu J B, et al. Bicarbonate daily variations in a Karst River: The carbon sink effect of subaquatic vegetation photosynthesis [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(4): 973-979.
- [17] Jiang Y J. The contribution of human activities to dissolved inorganic carbon fluxes in a karst underground river system: Evidence from major elements and δ<sup>13</sup>C<sub>DIC</sub> in Nandong, Southwest China [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2013, 152: 1-11.
- [18] Zhang Xingbo, Jiang Yongjun, Qiu Shulan, et al. Agricultural activities and carbon cycling in karst areas in Southwest China: Dissolving carbonate rocks and CO<sub>2</sub> sink [J]. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(4): 466-476. [张兴波, 蒋勇军, 邱述兰, 等. 农业活动对岩溶作用碳汇的影响: 以重庆青木关地下河流域为例 [J]. 地球科学进展, 2012, 27(4): 466-476.]
- [19] Jiang Y J, Hu Y J, Schirmer M. Biogeochemical controls on dai-

- ly cycling of hydrochemistry and  $\delta^{13}\text{C}$  of dissolved inorganic carbon in a karst spring-fed pool[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 478: 157-168.
- [20] Jiang Z C, Lian Y Q, Qin X Q. Carbon cycle in the epikarst systems and its ecological effects in South China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 68(1): 151-158.
- [21] Zhang Meiliang, Lin Yushi, Ran Jingcheng, et al. The characteristics of karst caves development in Libo, Guizhou[J]. *Carsologica Sinica*, 2000, 19(1): 13-20. [张美良, 林玉石, 冉景丞, 等. 贵州荔波岩溶洞穴发育特征[J]. 中国岩溶, 2000, 19(1): 13-20.]
- [22] Chen Changming. Karst cave development and mineral deposit features in Hunan boundary[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 1994, 18(2): 183-190. [陈长明. 试论湖南境内喀斯特洞穴发育及成矿特征[J]. 大地构造与成矿学, 1994, 18(2): 183-190.]
- [23] Wan Junwei, Shen Jifang, Chao Nianying. The characteristics of karst cave development and tourism resources in Banxia area of the Qingjiang River[J]. *Carsologica Sinica*, 1997, 16(3): 268-274. [万军伟, 沈继方, 晁念英. 清江半峡地区岩溶洞穴发育特征及其旅游资源[J]. 中国岩溶, 1997, 16(3): 268-274.]
- [24] Lu Yaoru, Jie Xianyi, Zhang Shanglin, et al. The development law and number of hydrogeology and engineering geology conditions of Chinese Yanrong (Karst) [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1973, (1): 121-136. [卢耀如, 杰显义, 张上林, 等. 中国岩溶(喀斯特)发育规律及其若干水文地质工程地质条件[J]. 地质学报, 1973, (1): 121-136.]
- [25] Rongier G, Collon-Drouaillet P, Filipponi M. Simulation of 3D karst conduits with an object-distance based method integrating geological knowledge [J]. *Geomorphology*, 2014, 217: 152-164.
- [26] Fairchild I J, Baker A. *Speleothem Science: From Process to Past Environments*[M]. Chichester: Wiley-Blackwell, 2012.
- [27] Cuezva S, Fernandez-Cortes A, Benavente D, et al. Short-term  $\text{CO}_2$  (g) exchange between a shallow karstic cavity and the external atmosphere during summer: Role of the surface soil layer[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(7): 1 418-1 427.
- [28] Kowalski A S, Serrano-Ortiz P, Janssens I A, et al. Can flux tower research neglect geochemical  $\text{CO}_2$  exchange? [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(6): 1 045-1 054.
- [29] Sanchez-Cañete E P, Serrano-Ortiz P, Kowalski A S, et al. Subterranean  $\text{CO}_2$  ventilation and its role in the net ecosystem carbon balance of a karstic shrubland[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(9): L09802 doi: 10.1029/2011GL047077.
- [30] Serrano-Ortiz P, Roland M, Sanchez-Moral S, et al. Hidden, abiotic  $\text{CO}_2$  flows and gaseous reservoirs in the terrestrial carbon cycle: Review and perspectives[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(3): 321-329.
- [31] Were A, Serrano-Ortiz P, Moreno de Jong C, et al. Ventilation of subterranean  $\text{CO}_2$  and eddy covariance incongruities over carbonate ecosystems[J]. *Biogeosciences*, 2010, 7(3): 859-867.
- [32] Cigna A A. Modern trend in cave monitoring[J]. *Acta Carsologica*, 2002, 31(1): 35-54.
- [33] Troester J W, White W B. Seasonal fluctuations in the carbon dioxide partial pressure in a cave atmosphere[J]. *Water Resources Research*, 1984, 20(1): 153-156.
- [34] Ek C, Gewalt M. Carbon dioxide in cave atmospheres. New results in Belgium and comparison with some other countries [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1985, 10(2): 173-187.
- [35] Hoyos M, Soler V, Canaveras J, et al. Microclimatic characterization of a karstic cave: Human impact on microenvironmental parameters of a prehistoric rock art cave (Candamo Cave, northern Spain) [J]. *Environmental Geology*, 1998, 33(4): 231-242.
- [36] Faimon J, Stelel J, Sas D. Anthropogenic  $\text{CO}_2$ -flux into cave atmosphere and its environmental impact: A case study in the Cisaraska Cave (Moravian Karst, Czech Republic) [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 369(1/3): 231-245.
- [37] Hoyos M, Sanchez-Moral S, Canaveras J C, et al. Carbon Dioxide Fluxes in Karstic Caves (Altamira and Tito Bustillo Caves, Northern Spain) [Z]. Abstract Book, Friends of Karst-IGCP 379, WKU, USA, 1998: 34.
- [38] Bourges F, Mangin A, d'Hulst D. Carbon dioxide in karst cavity atmosphere dynamics: The example of the Aven d'Orgnac (Ardeche) [J]. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences Series IIA Earth and Planetary Science*, 2001, 333(11): 685-692.
- [39] Kowalczk A J, Froelich P N. Cave air ventilation and  $\text{CO}_2$  outgassing by radon-222 modeling: How fast do caves breathe? [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 289(1/2): 209-219.
- [40] Fernández P, Gutierrez I, Quindós L, et al. Natural ventilation of the paintings room in the Altamira cave [J]. *Nature*, 1986, 321: 585-589.
- [41] Perrier F, Richon P, Sabroux J C. Modelling the effect of air exchange on  $^{222}\text{Rn}$  and its progeny concentration in a tunnel atmosphere [J]. *Science of the Total Environment*, 2005, 350(1/3): 136-150.
- [42] Richon P, Perrier F, Sabroux J C, et al. Spatial and time variations of radon-222 concentration in the atmosphere of a dead-end horizontal tunnel [J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2004, 78(2): 179-198.
- [43] Benavente J, Vadillo I, Carrasco F, et al. Air carbon dioxide contents in the vadose zone of a Mediterranean karst [J]. *Vadose Zone Journal*, 2010, 9(1): 126-136.
- [44] Faimon J, Ličbinská M, Zajíček P. Relationship between carbon dioxide in Balcarka Cave and adjacent soils in the Moravian karst region of the Czech republic [J]. *International Journal of Speleology*, 2011, 41(1): 17-28.
- [45] Breecker D O, Payne A E, Quade J, et al. The sources and sinks of  $\text{CO}_2$  in caves under mixed woodland and grassland vegetation [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, 96: 230-246.
- [46] Keeling C D. The concentration and isotopic abundances of at-



- mospheric carbon dioxide in rural areas [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1958, 13(4): 322-334.
- [47] Matthey D P, Fairchild I J, Atkinson T C, *et al.* Seasonal microclimate control of calcite fabrics, stable isotopes and trace elements in modern speleothem from St Michaels Cave, Gibraltar [J]. *Geological Society, London (Special Publications)*, 2010, 336(1): 323-344.
- [48] Riechelmann D F C, Schröder-Ritzrau A, Scholz D, *et al.* Monitoring Bunker Cave (NW Germany): A prerequisite to interpret geochemical proxy data of speleothems from this site [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 409(3/4): 682-695.
- [49] Spötl C, Fairchild I J, Tooth A F. Cave air control on dripwater geochemistry, Obir Caves (Austria): Implications for speleothem deposition in dynamically ventilated caves [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69(10): 2451-2468.
- [50] Tremaine D M, Froelich P N, Wang Y. Speleothem calcite formed in situ: Modern calibration of  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^{13}\text{C}$  paleoclimate proxies in a continuously-monitored natural cave system [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(17): 4929-4950.
- [51] Matthey D P, Fisher R, Atkinson T C, *et al.* Methane in underground air in Gibraltar karst [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 374: 71-80.
- [52] Baldini J U L, Baldini L M, McDermott F, *et al.* Carbon dioxide sources, sinks, and spatial variability in shallow temperate zone caves: Evidence from Ballynamitra Cave, Ireland [J]. *Journal of Cave and Karst Studies*, 2006, 68(1): 4-11.
- [53] Frisia S, Fairchild I J, Fohlmeister J, *et al.* Carbon mass-balance modelling and carbon isotope exchange processes in dynamic caves [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(2): 380-400.
- [54] Halbert E. Evaluation of carbon dioxide and oxygen data in atmospheres using the Gibbs triangle and cave air index [J]. *Helveticite*, 1982, 20(2): 60-68.
- [55] Buecher R H. Microclimate study of Kartchner caverns, Arizona [J]. *Journal of Cave and Karst Studies*, 1999, 61(2): 108-120.
- [56] Fairchild I J, Smith C L, Baker A, *et al.* Modification and preservation of environmental signals in speleothems [J]. *Earth-Science Reviews*, 2006, 75(1/4): 105-153.
- [57] Batiot-Guilhe C, Seidel J L, Jourde H, *et al.* Seasonal variations of  $\text{CO}_2$  and  $^{222}\text{Rn}$  in a mediterranean sinkhole-spring (Causse d'Aumelas, SE France) [J]. *International Journal of Speleology*, 2007, 36(1): 51-56.
- [58] Cowan B D, Osborne M C, Banner J L. Temporal variability of cave-air  $\text{CO}_2$  in central Texas [J]. *Journal of Cave & Karst Studies*, 2013, 75(1): 38-50.
- [59] Desjardins R L. A technique to measure  $\text{CO}_2$  exchange under field conditions [J]. *International Journal of Biometeorology*, 1974, 18(1): 76-93.
- [60] Wang Jiemin, Wang Weizhen, Ao Yinhuan, *et al.* Turbulence flux measurements under complicated conditions [J]. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(8): 791-797. [王介民, 王维真, 奥银焕, 等. 复杂条件下湍流通量的观测与分析 [J]. *地球科学进展*, 2007, 22(8): 791-797.]
- [61] Xu Ziwei, Huang Yongbin, Liu Shaomin. A study of the observation method of large aperture scintillometer [J]. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(8): 875-889. [徐自为, 黄勇彬, 刘绍民. 不同土壤热通量测算方法的比较及其对地表能量平衡闭合影响的研究 [J]. *地球科学进展*, 2013, 28(8): 875-889.]

## Research Progresses and Prospect of Chimney Effect about Carbon Cycle in the Karst Cave System

Luo Weijun, Wang Shijie, Liu Xiuming

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 2. Puding Karst Ecosystem Research Station, Chinese Academy of Sciences, Puding 562100, China)

**Abstract:** There is a long history of several decades for the systemic study of global carbon cycles, and many important achievements have been obtained. However, these studies of carbon cycles in the karst area that accounts for about 10% of the entire Earth's land area were paid attention gradually only in the past twenty. Recent researches suggest that karstification has important effects of the global carbon cycle. At present, scientists have had a very comprehensive and systemic understanding of various factors affecting the carbon cycle in the karst area, and estimated the carbon source or sink. However, unlike non-karst area, there are generally many caves and fractures that have various sizes and morphologies in the karst area. These caves and fractures provide gas exchange between epikarst zone and atmosphere with a channel (as a window) in the karst area. There have been few reports about

the role of the channel in the carbon cycle in the karst area. Previous studies have shown there is an obvious chimney effect in the karst cave system, which cannot be ignored. However, through the overview of the previous studies on carbon cycle of chimney effect in the karst cave system, we found that there were still many problems need to be further studied, such as the contribution of chimney effect to regional and global atmospheric CO<sub>2</sub>; the regional differences, the seasonal changes and its reason (driving force) of chimney effect; the influences of chimney effect on the local ecosystem. With the development of modern science and technology (such as eddy covariance, large aperture scintillation and isotope), it becomes possible to solve the above problems. Therefore, it is necessary to use these advanced means for automatic and continuous monitoring and researching the carbon cycles in the karst cave system, which are of important significance for the researches of carbon cycles in the karst area, even for the global carbon cycle studies.

**Key words:** Carbonate rock; Karst Critical Zone (KCZ); Eddy Covariance (EC); Large Aperture Scintillometer (LAS); Stable isotope.

## 2014 年《地球科学进展》优秀审稿专家

《地球科学进展》(月刊)近年来屡获佳绩,本刊的任何一点进步都离不开审稿专家的支持。综合 2014 年度审稿专家的审阅稿件数量、详细程度以及审稿时效性等多项指标,评选出《地球科学进展》2014 年度优秀审稿专家 30 位,在此新年来临之际对他们表示衷心的感谢!

优秀审稿专家名单如下(按拼音字母排列):

- |                           |                   |
|---------------------------|-------------------|
| 丁永建(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所)    | 王浩(中国水利水电科学研究院)   |
| 焦念志(厦门大学)                 | 王成善(中国地质大学)       |
| 李新(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所)     | 王东晓(中国科学院南海海洋研究所) |
| 李崇银(中国科学院大气物理研究所)         | 王会军(中国科学院大气物理研究所) |
| 李小文(北京师范大学)               | 仵彦卿(上海交通大学)       |
| 李晓兵(北京师范大学)               | 俞孔坚(北京大学)         |
| 李秀彬(中国科学院地理科学与资源研究所)      | 翟盘茂(中国气象科学研究院)    |
| 林而达(中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所) | 张国伟(西北大学)         |
| 刘昌明(中国科学院地理科学与资源研究所)      | 张人禾(中国气象科学研究院)    |
| 刘池阳(西北大学)                 | 郑永飞(中国科学技术大学)     |
| 刘文汇(中国石化石油勘探开发研究院)        | 周广胜(中国气象科学研究院)    |
| 马耀明(中国科学院青藏高原研究所)         | 周秀骥(中国气象科学研究院)    |
| 彭平安(中国科学院广州地球化学研究所)       | 朱筱敏(中国石油大学)       |
| 任国玉(国家气候中心)               | 邹才能(中国石油勘探开发研究院)  |
| 史培军(北京师范大学)               | 邹学勇(北京师范大学)       |