

织金洞二氧化碳的变化规律及其影响因素分析

罗时琴, 吕文强, 李安定, 李 坡

(贵州省山地资源研究所, 贵州 贵阳 550001)

摘要: 中国贵州织金洞以美奇吸引全世界的游客。为了游客的健康, 保护洞穴的空气质量显得至关重要。二氧化碳是影响洞穴空气质量的一个重要影响因素, 控制洞穴中二氧化碳体积分数对保护游客的健康十分必要。以织金洞3 a的定点监测资料为基础, 结合历史监测数据进行分析比较, 探索这些数据在洞穴中的变化规律和影响因素。结果表明: 洞穴中二氧化碳体积分数随着游客数量、季节、海拔高度、距洞口深度、洞穴地表因素等的变化发生变化。游客数量的增加是织金洞内二氧化碳大幅度增长的主要因素。图3表4参14

关键词: 旅游学; 织金洞; 二氧化碳体积分数; 影响因素; 变化规律

中图分类号: P642.25; S731 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2015)02-0291-07

Variation of CO₂ concentration and its controlling factors in Zhijin Cave, China

LUO Shiqin, LÜ Wenqiang, LI Anding, LI Po

(Guizhou Research Institute of Mountain Resources, Guiyang 550001, Guizhou, China)

Abstract: The Zhijin Cave is the first in the ten most beautiful China cave, which is famous of the beauty and vagar, and attract tourists from all over the world. For tourists health, it is necessary to protect the air quality in the cave. CO₂ is an important influencing factor of the cave air quality, and it may bring adverse effects on the human body as the content is gathered to a certain. Therefore, it is very important to keep certain levels. Compared with historical data, this study is based on the monitoring data of Zhijin Cave for three years, to explore the change and factors of the CO₂ in the cave. The result shows, the CO₂ in the cave changes with the change of the visitor's quantity, season, altitude, and the depth to structural opening. [Ch, 3 fig. 4 tab. 14 ref.]

Key words: tourism; Zhijin Cave; CO₂ concentration; influencing factor; change regulation

喀斯特洞穴是自然界赋予人类的遗产, 也是一种独特的自然景观^[1]。洞穴景观经过漫长的地质年代, 在洞穴特定的环境条件下形成、积累和保存下来, 具有非常高的科学价值和旅游价值^[1]。一般来说, 未开发的洞穴与外界较为隔绝, 具有隐蔽、高湿、空气稳定的特点^[2]。但是近年来随着洞穴旅游的兴起, 越来越来多洞穴被开发, 洞穴作为旅游风景区开发后, 不合理的工程建设、大量的游客进入导致洞穴环境普遍发生变化, 洞穴环境改变直接影响洞穴生态系统组成, 威胁洞穴生物生长和多样性, 洞内次生化学沉积物受到不同程度的破坏, 洞穴气候发生变化。因此, 洞穴旅游的持续发展面临严峻的挑战, 已经引起国际旅游洞穴协会和中国地质学会的关注。旅游洞穴的保护和可持续发展已成为广泛关注的课题, 很多国家都对洞穴的环境因子(二氧化碳体积分数、温度、湿度、灰尘、风速等)进行监测, 希望能更多地了解旅游开发对洞穴产生的影响程度, 找出影响因子的变化规律, 提出洞穴生态环境及景观稳定的安全性保护技术。

收稿日期: 2014-04-14; 修回日期: 2014-06-17

基金项目: 贵州省科学技术基金资助项目(黔科合J字[2011]2042号)

作者简介: 罗时琴, 助理研究员, 从事旅游资源开发与保护研究。E-mail: luoshiq@126.com。通信作者: 吕文强, 助理研究员, 博士, 从事环境与地球化学研究。E-mail: johnkymno.student@sina.com

1 织金洞景区概况

1.1 地理位置

织金洞位于贵州省西部毕节地区的织金县境内,距贵阳市120 km,距织金县城23 km,地理坐标为 $26^{\circ}38'31''\sim 26^{\circ}52'35''N$, $105^{\circ}44'42''\sim 106^{\circ}11'38''E$ 。中心景区处于织金县城东北的官寨乡,地处乌江上游支流六冲河与三岔河交汇处,总面积为307 km²,为国家AAAA级风景名胜区^[3]。

1.2 地质地貌

织金洞景区境内地势西南高,东北低,最高海拔凤凰山1 837 m,最低海拔是六冲河河床940 m^[4]。由于受新构造运动间歇性抬升的影响,区域地势从河谷向两岸呈阶梯状地形。景区内地貌以喀斯特地貌为主,个体齐全,个体形态主要有包气带渗流水形成的漏斗、落水洞;有地表水形成的溶沟、石芽、干谷、峡谷、峰丛、溶丘;有潜流水形成的洞穴、天坑及天生桥等,其中以洞穴、天坑、峡谷规模宏大,形态优美,具有较高的观赏价值,是织金洞地质公园内的主要地质遗迹景观资源^[4]。这些个体地貌大多不是单独分布,而是相互配合,相互伴生,形成一些特殊的地貌组合类型,根据其成因,类型主要有:以溶蚀为主、溶蚀侵蚀和侵蚀剥蚀等三大类。

1.3 水文

织金洞景区处于非可溶岩发育的地表径流吸收带,具有较广泛的补给区,水量丰沛。从景区及周边其他洞穴遗留下的沙砾岩层和侵蚀痕迹,所以织金洞景区的区域除接受雨水补给外还接受非喀斯特地区集中水流的补水^[1]。

在织金洞内,目前仅有一些零星、分散的洞顶或洞壁渗滴(流)水汇集而成的洞池水。洞池水与伏流水的发育的作用要小很多,但是对洞穴碳酸钙沉积物的发育具有强烈的作用。

在织金洞中心区内主要有4条河流:六冲河、以结河、新寨河和苗寨河^[4]。其中以新寨河和以结河对织金洞的形成作用最大。

1.4 气候、土壤

织金洞景区气候类型属亚热带季风气候,年平均气温为14.7℃,最热月平均气温22.5℃,年平均降水量1 436.0 mm,全年日照1 172.0 h,无霜期327.0 d,太阳总辐射量为 $351.7\times 10^3 J\cdot cm^{-2}$,冬无严寒,夏无酷暑,适宜喀斯特地貌发育,同时也适宜开展各种旅游活动^[2]。

土壤以黄壤为主,呈酸性,pH 4.5~5.5,土层较薄且厚度变化大,多数不足50 cm。此外,在景区东部有部分石灰土分布^[4]。

1.5 生物

景区植被以亚热带常绿阔叶林为主,森林覆盖率为39%,物种丰富,有各类林木65种以上,其中有国家一级保护植物银杏 *Ginkgo biloba* 和水杉 *Metasequoia glyptostroboides* 等,二级保护植物厚朴 *Magnolia officinalis*, 杜仲 *Eucommia ulmoides* 和楠木 *Phoebe zhennan* 等^[5],具有很高的观赏价值和经济价值。区域内动物资源也十分丰富。有脊椎动物和昆虫多种,有国家一级保护动物蟒蛇 *Python molurus*, 二级保护动物短尾猴 *Macaca arctoides*, 大鲵 *Andrias davidianus* 和红腹锦鸡 *Chrysolophus pictus* 等。此外,在洞穴中还栖息着很多洞穴生物,如蝙蝠 *Menispermum dauricum*, 马陆 *Spiroboleus bungii*, 蜘蛛 *Araneida* 和豪猪 *Hystrix hodgsoni* 等^[5]。

1.6 社会经济

织金洞景区所处的官寨,是官寨乡政府所在地,是织金县八个少数民族乡镇之一,居住着汉、苗、彝、回、布依、仡佬等民族。少数民族人口占全乡总人口的49.3%,是水西古彝重地,有“天下第一洞乡”的美称^[5]。全乡总面积为6 260 hm²。传统农作物有水稻 *Oryza sativa*, 玉米 *Zea mays*, 小麦 *Triticum aestivum*, 香米,豆类等。其中,丫勒香米是该乡土特产之一。乡境内已探明的矿物资源有煤、金、锰、锑、汞等,水利资源丰富。

作为国家AAAA级风景名胜区的织金洞自旅游开发以来,一直都呈现健康可持续的发展状态,实现了一定的经济效益,大力推动了当地社会经济的发展。近年来,随着景区管理的完善和旅游设施的不断健全,景区的旅游接待人数不断增长(图1),从1985年的40 445人次上升到2012年的167 345人

次，旅游收入从 2002 年的 442.00 万元上升到 2012 年的 1 871.00 万元。在 2011 年，全县国内生产总值 (GDP)总量达 72.53 亿元，农民人均纯收入 3 610.00 元，官寨乡的农民人均纯收入 3 196.00 元^[1]。

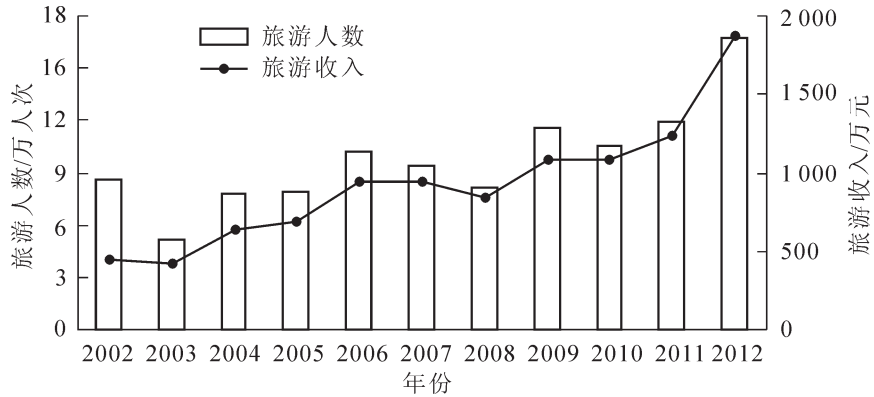


图 1 织金洞景区近十年来的旅游人数和门票收入统计

Figure 1 Statistical of tourists and ticket sales of Zhijin Cave scenic area in 2002 - 2012

2 调查方法与数据处理

2.1 监测点布设

在织金洞内，筛选数据齐全的游客停留时间较长的 10 个监测点(主要洞段)，开展空气中的二氧化碳体积分数的观测。观测仪器选用上海双旭电子有限公司生产的 C1100 型二氧化碳便携式检测仪，测量精度为±0.02%。监测点的具体布设位置见图 2。

2.2 数据处理

考虑到季节、人流等因素对洞内二氧化碳体积分数的影响，监测时选择不同季节、旅游淡旺季，以及不同时段等。

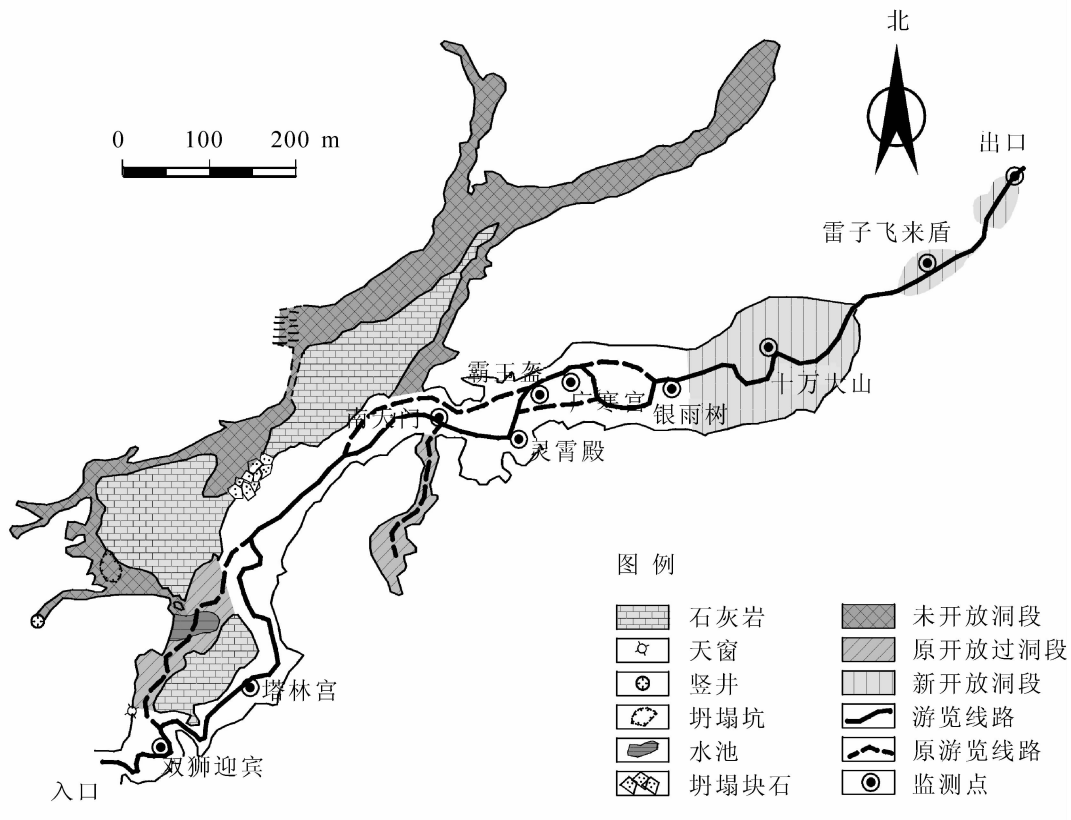


图 2 监测点平面分布示意图

Figure 2 Diagram of monitoring points plane distribution

二氧化碳监测仪 C1100 记录数据为体积分数, 前期有部分监测结果以 10^{-6} 为单位, 为方便比较, 故统一换算为体积分数, 二氧化碳分子量取 44, 空气平均分子量取 29。

3 结果与分析

3.1 洞穴开发游客数量的增长导致洞穴空气中二氧化碳体积分数的增加

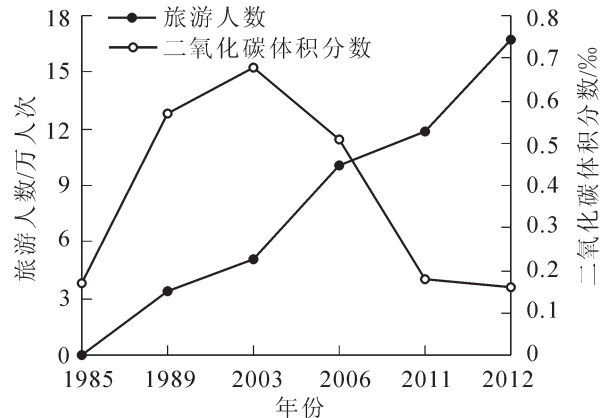
一般而言, 未开发的地下洞穴与外界较为隔绝, 具有隐蔽、高湿、空气稳定等小气候特点^[6]。它主要通过岩石缝隙、洞穴通道等同外界进行物质与能量交换, 洞穴环境变化很小^[7]。

织金洞在 1985 年试开放对外接待游客已经有 29 a 的时间。在旅游发展中随着景区旅游设施的不断完善, 旅游人数不断增加, 游客人数从 1985 年的 5 000 人次不到发展到 2012 年的 167 345 人次。同时洞内空气中二氧化碳体积分数从 0.017% 增加到 0.162%^[8]。具体数据见图 3。和开发前相比, 织金洞内空气中的二氧化碳体积分数已高出 95.0% 以上, 而且已超出 GB/T 17094-1997 室内空气中二氧化碳卫生标准值 0.100%, 室内空气中二氧化碳卫生标准值 $\leq 0.100\%$ ($2\ 000\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)^[9]。

一个健康的成年人在静态下, 新陈代谢过程中释放热量 $82\sim 116\ \text{J}\cdot\text{s}^{-1}$, 呼出的二氧化碳气体为 $20\sim 30\ \text{L}\cdot\text{h}^{-1}$ ^[9]。因而洞穴空气二氧化碳体积分数的背景值就会受游客量的变化而波动。洞穴的开发导致游客的大量涌入, 破坏了洞穴的小气候特点, 使洞穴环境发生较大的变化, 导致洞穴空气中二氧化碳体积分数的增加。

3.2 在洞内外空气中二氧化碳体积分数区别较大

为了让本项目的研究结果更趋于精确和科学, 在对织金洞监测的同时也对贵州省铜仁九龙洞进行相同因子的监测。从表 1 可以得出: 在喀斯特地区洞穴内外二氧化碳体积分数明显的不同, 洞内空气中的二氧化碳体积分数要高于洞外空气中二氧化碳体积分数 50% 以上。



说明: 2006 年二氧化碳体积分数降低是因为 2004 年雷子洞出口的打通。为了方便游客, 为了安全, 为了疏导人流, 使游览路径不重复, 织金洞在 2004 年打通了雷子洞出口, 这样游客减少停留时间从而改变化洞穴空气中二氧化碳体积分数。

图 3 织金洞 1985-2012 年旅游人数与二氧化碳体积分数 (%) 值对照

Figure 3 Control statistical of tourist number and CO₂ concentration value in 1985-2012

表 1 线织金洞、九龙洞二氧化碳体积分数监测结果

Table 1 Monitoring results of CO₂ concentration in Zhijin Cave and Jiulong Cave

洞穴名称	测定日期	二氧化碳体积分数/%		
		洞穴入口	洞内监测点平均值	洞穴出口
织金洞	2011-10-10	0.060	0.190	0.080
	2012-04-26	0.070	0.120	0.090
	2012-10-08	0.060	0.180	0.070
	2013-05-01	0.070	0.130	0.120
	2013-10-03	0.060	0.170	0.090
九龙洞	2011-10-06	0.100	0.120	
	2012-05-26	0.110	0.130	
	2012-10-15	0.090	0.120	

说明: 九龙洞出入口是同 1 个, 2013 年没有监测数据。

3.3 洞穴空气中二氧化碳体积分数在季节上和洞外有较大的区别

从表 2 得知: 在洞内, 二氧化碳体积分数在季节上有很大的变化, 夏季要高于冬季。这是因为夏季洞穴水丰富, 洞底的通道以排水为主, 洞顶通过节理、裂隙向洞内输水, 阻碍二氧化碳向洞外流通, 减小了洞穴内外空气的对流, 同时夏季也是洞穴旅游的黄金季节, 游客增多; 而冬季洞穴水断流或干涸,

排水通道和洞穴节理裂隙成为重要排气孔，与洞内空气交流增强^[10]。

3.4 洞穴空气中二氧化碳体积分数距离洞口的远近发生变化

表 3 监测对比结果显示：距离洞近的监测点二氧化碳体积分数都很低，而随着监测点的不断深入，二氧化碳体积分数明显增加。最高值发生在距离入口 1 400 m 的十万大山和 1 200 m 的银雨树 2 个监测点。银雨树是洞中奇观，被誉为溶洞之魂，地球之宝；十万大山则是整个游程中的最高点，垂直高度约为 175 m，是洞中沉积物最多的洞厅。这 2 个监测点位于整个洞穴旅游线路的中间段，距离两边洞口都远，风向频率较低，同时一直都是主要洞厅之一，景点众多，游客流量大，因而二氧化碳体积分数高。

表 2 织金洞 2012 年监测点全年二氧化碳体积分数变化

Table 2 CO₂ concentration change of monitoring points in 2012 in Zhijin Cave

监测点	不同监测时间二氧化碳体积分数/%		
	4-10 月平均值	12 月平均值	季节变化值
双狮迎宾厅	0.140	0.070	0.070
塔林宫	0.140	0.100	0.040
凌霄殿	0.250	0.170	0.080
广寒宫	0.220	0.110	0.110
霸王盔	0.200	0.110	0.090
银雨树	0.200	0.100	0.100
十万大山	0.210	0.120	0.090
雷子洞出口	0.070	0.050	0.020

表 3 距洞口不同深度洞段二氧化碳体积分数值的变化情况

Table 3 Statistical table of CO₂ concentration value in the tunnels of different depth

监测点	距洞口位置/m	二氧化碳体积分数平均值/%			
		1989	2003	2011	2012 年
双狮迎宾	70	0.035	0.040	0.100	0.110
塔林宫	1 255	0.039	0.046	0.190	0.150
凌霄殿	1 000	0.063	0.073	0.220	0.220
霸王盔	1 030	0.067	0.082	0.210	0.160
广寒宫	1 050	0.068	0.084	0.210	0.170
银雨树	1 200	0.072	0.099	0.210	0.200
十万大山	1 400	0.072	0.089	0.220	0.190

说明：2011 年为 10 月平均值，2012 年为 4-12 月平均值。

3.5 洞穴空气中二氧化碳体积分数在景点集中和封闭的洞段变化较大

从监测结果中得出：此次二氧化碳体积分数最高值在凌霄殿。凌霄殿段景点密集，且洞厅空间相对较小，高仅为 40 m，面积 5 000 m²(织金洞的洞厅以高大宽闻名，一般高宽均为 60~100 m，多数洞厅的面积均在 10 000 m² 以上)，洞段相对封闭，所以空气对流较慢。从数据监测中可以看出，凌霄殿洞段二氧化碳体积分数值很高，平均值仅次于海拔最高点的十万大山，且洞内单次监测数据最高值产生在此监测点，为 2012 年 10 月 8 日测量的 0.250%。同时凌霄殿景观以瑶池闻名，游客停留时间较长，也是二氧化碳体积分数高的原因之一。

3.6 地表因素对洞穴空气中二氧化碳体积分数造成影响

喀斯特洞穴景观的发育与形成，除了不可少的气候、水的溶蚀力和水的流动等基本条件外，地表因素中的植被和土壤对喀斯特洞穴景观的发育过程同样有重要的影响^[11]。植物的影响表现在植物根部的机械破坏作用及分解的植物残余物、腐殖质能产生大量的游离二氧化碳。同时植被的覆盖能增加洞穴中空气的湿度，也能减弱地表径流的速度加强下渗作用，促使地下喀斯特的发育^[12]。目前，在织金洞景区也加强对应地表的环境治理。如对地表的耕地进行退耕还林，在一些漏斗和天窗周围修建拦沙墙，现在该区植被已得到很好恢复，景区中心森林覆盖率为 68% 以上。由于植物根部的呼吸和雨水的冲刷加快了土壤二氧化碳的扩散，降雨后洞穴空气中二氧化碳体积分数明显要高于降雨前。另外土壤中的二氧化碳体积分数过高时，在水的压力下部分土壤中的二氧化碳以气体的形式直接从岩体的微小裂隙进入洞内，从而改变洞穴空气中二氧化碳体积分数值^[13]。

3.7 洞穴空气中二氧化碳体积分数与海拔高度的关系

从表 4 可以得出：位于同一厅中的银雨树和十万大山，海拔相差 73 m，但监测中二氧化碳体积分

数值却是十万大山稍高于银雨树,而且二氧化碳体积分数值随着海拔的增加而增加。二氧化碳密度比空气大,气态为 $1.977\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,液态 $1.816\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,这一现象与的二氧化碳性质特征完全相悖。据贵州省洞穴协会李坡等洞穴专家分析,原因有以下几点:①与洞穴中产生的脚风有关。在织金洞中,从塔林宫的沉积物开始,都存在一种特殊的景观现象,沉积物叶片明显呈旋转状,且厚薄不一致。如:塔林宫中著名的“雪松”景观,这就表明织金洞中存在一定风力的脚风。脚风把低处的二氧化碳吹向洞穴深处,到海拔相对较高的十万大山,因十万大山洞道突然变窄,二氧化碳流通速度放慢故而体积分数值高于海拔相对较低的银雨树。②随着海拔的增加,游客在徒步游览中消耗的体力越大,呼出的二氧化碳气体要高于正常时的呼吸,同时游客需要时间稍作休息,故而停留时间相对较长。③洞穴滴水控制洞穴空气中二氧化碳体积分数值。土壤中二氧化碳体积分数比洞穴空气中二氧化碳体积分数要高,滴水在离开洞穴顶板时就开始发生脱气,脱气作用会带来二氧化碳分压的降低,故而滴水在下降过程中海拔高的地方二氧化碳体积分数相对要高,所以在海拔不同的地方产生浓度差^[14]。④目前,十万大山景点周边沉积物较多,且滴水丰富,沉积物形成较快,洞顶滴水在洞底发生溅击作用,经水的蒸发,二氧化碳逸出,故而二氧化碳体积分数要高于洞内其他洞厅。

以上的分析还需要进一步的研究。

表 4 20 多年来织金洞银水树、十万大山二氧化碳体积分数变化

Table 4 Statistical table of CO₂ concentration change in the main section of Zhijin Cave over the past 20 years

监测点	二氧化碳体积分数/%						
	1989	1995	2003	2006	2011	2012	2013年
银雨树	0.072	0.053	0.099	0.067	0.210	0.200	0.180
十万大山	0.072	0.061	0.089	0.071	0.220	0.190	0.190

说明:二氧化碳体积分数均为年平均值,银雨树海拔高度为1 337 m,十万大山海拔高度为1 410 m。

4 结论

洞穴空气中二氧化碳体积分数是旅游洞穴最重要的环境因子之一,对洞穴碳酸钙沉积景观和游客的舒适度有直接的影响。为了游客的健康,保护洞穴环境,洞穴中二氧化碳体积分数的控制十分必要。

本研究在织金洞3 a的定点监测中,结合历史监测数据分析比较研究,得出织金洞在29 a的旅游开发中,洞内二氧化碳体积分数呈大幅度增长趋势,二氧化碳体积分数从1985年的0.017%增加到2012年的0.162%。基本总结出洞穴中二氧化碳体积分数变化的原因有以下几点:洞穴中二氧化碳体积分数的变化会随着洞穴开发游客的增加、海拔的高度、距洞口的深度、景点集中的程度、洞段的封闭程度和洞穴地表因素等。

研究对象前期缺乏监测数据,不能完整反应洞穴环境的详细过程。本研究虽然持续3 a的监测,但是数据资料仍然有限,只能代表当前的状况,结果也会存在一定的偏差,仅作参考。期望持续监测能得到更具说服力和更为详尽的研究,对保护洞穴环境和保证游客的健康均十分重要。

5 参考文献

- [1] 王静. 喀斯特洞穴旅游开发与景观保护研究[M]. 北京: 中国旅游出版社, 2013: 1.
- [2] 颜文洪, 张朝枝. 旅游环境学[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 8 - 10.
- [3] 贺卫, 李坡, 钱治, 等. 织金洞地质遗迹的开发保护与管理[M]. 贵阳: 贵州人民出版社, 2011: 11.
- [4] 刘长运. 织金洞的成因及开发利用初探[J]. 南都学坛: 自然科学版, 1993, 13(1): 46 - 48.
LIU Changyun. Preliminary study on cause, development and utilization [J]. *Acad Forum Nandu Nat Sci Ed*, 1993, 13(1): 46 - 48.
- [5] 贵州省织金洞风景名胜区管理局, 贵州织金洞国家地质公园管理局. 织金洞志[M]. 贵阳: 贵州人民出版社, 2010.
- [6] 周运超, 王世杰. 贵州凉风洞洞穴滴水水文水化学过程分析[J]. 第四纪研究, 2005, 25(2): 208 - 215.
ZHOU Yunchao, WANG Shijie. Analysis of hydrochemical process of drip water in the Liangfeng Cave, Libo, Guizhou

- [J]. *Quar Sci*, 2005, **25**(2): 208 – 215.
- [7] 朱文孝. 织金洞成因及环境条件研究报告[R]. 贵阳：贵州省山地资源研究所, 1989.
- [8] 朱文孝, 李坡, 潘高潮. 织金洞的气候环境及空气中二氧化碳[J]. 中国岩溶, 1989, **12**(4): 409 – 414.
ZHU Wenxiao, LI Po, PAN Gaochao. Climate and CO₂ of air in Zhijin Cave [J]. *Carsol Sin*, 1989, **12**(4): 409 – 414.
- [9] 杨汉奎. 旅游洞穴的开展与保护[G]//宋林华, 丁怀元. 喀斯特景观与洞穴旅游. 北京：中国环境科学出版社, 1993: 160 – 165.
- [10] 刘玲. 旅游环境承载力研究[M]. 北京：中国环境科学出版社, 2000: 3 – 4.
- [11] 林华, 韦小宁, 梁福源. 河北临城白云洞洞穴旅游对洞穴 CO₂ 浓度及温度的影响[J]. 中国岩溶, 2003, **22**(3): 230 – 235.
LIN Hua, WEI Xiaoning, LIANG Fuyuan. Effect of speleo-tourism on the CO₂ content and temperature in Baiyun Cave, Lincheng, Hebei [J]. *Carsol Sin*, 2003, **22**(3): 230 – 235.
- [12] 袁道先, 蔡桂鸿. 岩溶环境学[M]. 重庆：重庆出版社, 1988: 33.
- [13] 杨晓霞, 施俊庄, 向旭, 等. 浅议旅游洞穴灯光植物的危害及防治[J]. 中国岩溶, 2012, **31**(4): 433 – 440.
YANG Xiaoxia, SHI Junzhuang, XIANG Xu, *et al.* A primary study on hazards, prevention and control of lampenflora in tourist cave [J]. *Carsol Sin*, 2012, **31**(4): 433 – 440.
- [14] 周运超, 王世杰. 洞穴滴水的水文地球化学过程分析：贵州犀牛洞的研究[J]. 地球与环境, 2005, **33**(2): 23 – 30.
ZHOU Yunchao, WANG Shijie. Hydrogeochemical process of cave drips study on Xiniu Cave, Zhening, Guizhou [J]. *Earth Environ*, 2005, **33**(2): 23 – 30.