

文章编号:1001-4810(2008)03-0273-05

湖北清江和尚洞洞穴温度对气候变化的响应

何璐瑶,胡超涌,曹振华,马仲武,熊志方

(中国地质大学生物地质与环境地质教育部重点实验室,湖北武汉 430074)

摘要:对湖北清江流域和尚洞内、洞外气温进行同步高频监测,发现洞穴温度响应洞外气温的变化,但由于受到洞穴的“缓冲作用”,由外及里的温度变化幅度变小,时间滞后,且响应的快慢具有明显的季节性。2003—2008年度监测的统计数据表明,在150m洞深处,洞内日温度的变化幅度仅0.2℃,明显低于洞外气温变化幅度(6.9℃);同样,洞内夏、冬季节温差变化(6.9℃)也小于洞外(31.8℃)。比较洞内外温度的时间序列,发现日尺度上,洞内气温滞后洞外0~2小时,而在季节尺度上则滞后10~40天,其中降温阶段滞后小,升温阶段滞后大。此外,一年四季中,洞内温度对外界气温变化的响应呈现慢(2—4月)→快(5—7月)→较快(8—10月)→较慢(11—1月)的特点,可能与不同季节下洞穴“缓冲作用”的强弱变化有关。

关键词:洞穴温度;响应;滞后;洞穴缓冲作用;季节性变化;湖北清江和尚洞

中图分类号:P643.21

文献标识码:A

0 前言

现代洞穴调查和监测对了解洞内环境变化及其对洞外气候响应的十分有效,因而倍受岩溶和石笋古气候学家的重视。早期的洞穴监测和调查主要是为了洞穴开发和管理,即旅游和观光,如早在1884年前南斯拉夫科学家Marinitsch就对现今被列入世界自然遗产名录的斯洛文尼亚Skocjanske洞的气温和水温进行了系统观测^[1]。这类旅游洞穴主要监测洞内温度、湿度和CO₂浓度,研究旅游活动对洞穴环境的影响及景观保护的问题^[2~11]。近几年,以古气候重建为目的的洞穴监测工作在世界各地陆续展开并取得了初步的成果,如Gentya等^[12]就石钟乳的滴水速率和滴水量对外界降水的响应做了系统的研究工作;Sondag等^[13]详细考察了1998—2000年间巴西两个洞穴的滴水速率、气压和温度及其对古气候重建的意义;周运超和王世杰^[14]分析了贵州凉风洞滴水的水动力地球化学过程;王新中等^[32]讨论了北京石花洞滴水的地球化学时空变化与外界气候的关系,其余则更多关注于洞穴滴水的同位素、微量元素等化学指

标^[15~18],很少有针对洞内、外温度及其对气候因素的响应实施长期、高频的监测。尤其在我国,洞穴环境调查起步较晚,监测的洞穴数量少,历时短,测次少,对测量结果的分析也比较简单^[19]。

从2003年9月开始,我们在湖北清江和尚洞开展了以重建高分辨古气候为科学目标的现代洞穴地质过程观测,获取了洞外气候和洞内环境参数的第一手资料。其中温度的记录序列长,分辨率高,洞内和洞外同步。本文将利用该监测的温度数据,研究洞内温度的日、季变化特征及其对洞外气候变化的时空响应特征,为下一步利用年层石笋重建季节气候记录提供科学依据。

1 和尚洞的地质概况和气候特征

和尚洞位于湖北省长阳县鱼峡口镇清江南岸(30°26′49″N, 110°25′12″E),高程294m。洞口距清江河面约30m。洞穴发育于寒武系中统上峰尖组(∈_{2sh})及上统三游洞群(∈_{3sh})中,位于长江中游EW向构造与新华夏系NNE向构造复合部位的西段,长

基金项目:国家自然科学基金重点和面上项目(批准号:40531004和40572150)

第一作者简介:何璐瑶(1983—),女,硕士研究生,主要从事全球变化研究。E-mail: heluyao@163.com.

通讯作者:胡超涌,男,教授,主要从事石笋古气候环境研究。E-mail: chyhu@cug.edu.cn.

收稿日期:2007-12-27

阳复式背斜由EW向转为NNE向的转折端^[20]。背斜东翼岩层倾向280°,倾角70°~85°,西翼岩层倾角25°~35°,总体为东翼陡西翼缓、轴面西倾的倒转背斜。洞穴的总体展布方向为354°,主要受层面裂隙和顺巨型裂隙控制,走向分别为330°~350°和10°~45°。本区地下水径流方向为南北向,与构造线方向及主要的断裂、裂隙方向相一致。和尚洞顶部为厚约400m的白云岩,其上覆盖中等发育的土壤层,厚度约为20~40cm不等,有机质较为丰富,植被较好。

和尚洞为单口水平型洞穴,长250m,宽20~30m,高15~20m,面积约为6500m²,容积约13万m³。洞穴形态较为简单,线状廊道,无支洞(图1)。洞口宽广(宽22.8m,高12.7m),是影响洞穴空气对流与洞穴微气候系统的主要通道。洞道横断面为椭圆形,洞道宽敞平坦,由外及里地表稍有上升,洞穴最深处与洞口落差约30m。距洞口100m处有一巨型边石坝,并形成微型石梯田,多雨期坝内蓄成池水。该洞目前尚未开发,加上交通不便等原因,受人为干扰较小,因而基本处于自然状态。洞穴碳酸钙沉积物和崩塌岩体堆积物较发育,分布广泛,数量多,且保存好。其中大部分石笋具有肉眼可辨的年层,适合季节气候记录的重建^[21~23]。

和尚洞洞内水流类型较为丰富,洞顶常年滴水,洞壁可见流淌水,夏季常有间歇性洞底水流,尤其在暴雨过后洞底流水多而急。洞顶滴水的时空分布不均匀,从洞口至洞底,主要分布在洞深30~65m、100~110m、150~170m和230~250m等区域。每个滴水的水动力状况也存在差别,有的滴水(如D3~D6监测点)常年滴水,有的(如靠近洞口的D1、D2监测点)则只出现在雨季。滴水速率因滴水而异,大多分布在1~100滴/min之间,雨季快,旱季慢。由于洞口宽敞且洞体宏大,洞内空气流动较好。150m洞深处的CO₂年平均浓度为492ppm,与洞外空气CO₂浓度(约360ppm)相差不大,也说明了该洞穴空气流通较好。

和尚洞所处长江中游,是东亚季风的腹地。作为热带海洋气团与极地大陆气团交替控制和互相角逐、交汇的地带,当地季风气候特征显著。主要雨带位置与夏季风的进退紧密相关,春夏季盛行西南季风,炎热多雨,秋冬季盛行东北风,寒冷干燥。近50年来(1951—2004年)当地气象站(长阳)资料统计,年平均气温16.5℃,最高温度为每年7月(27.5℃),最低温度为每年的1月(4.8℃);年平均降水量1118.3mm,主要集中于4—9月,占全年总降水的70%以上。明显的气候季节变化为洞穴响应气候研究提供了良好的场所。

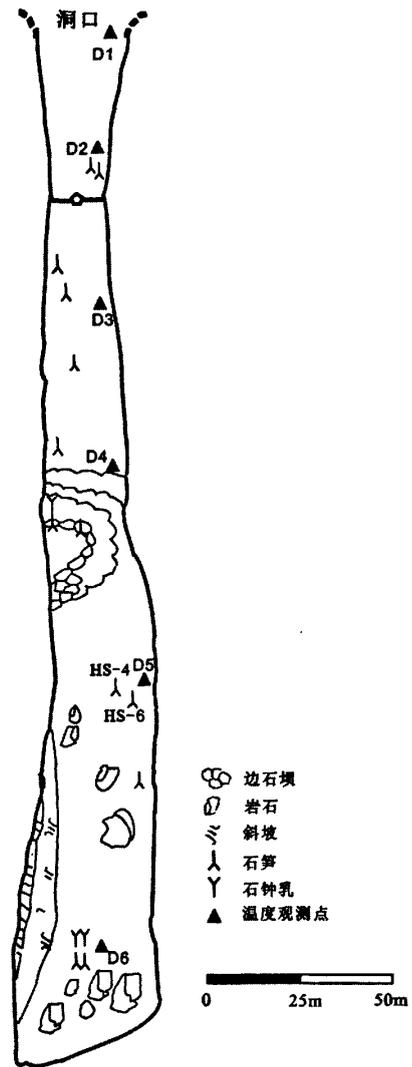


图1 和尚洞平面示意图
Fig. 1 Plane of the Heshang cave

2 洞内、外温度测量和数据处理方法

洞外的气温数据由宜昌和洞口温度组成。宜昌日均气温数据由武汉气象中心陈正洪研究员提供,时间序列为2003年9月20日至2007年2月28日。洞口温度由布置在洞口外50m处的一台自动气温记录仪(型号:HOBO H8 PRO)记录,时间分辨率是2小时,测量精度为0.1℃。测温仪记录始于2004年9月17日,由于仪器故障缺失2005年4月27日至2005年9月15日的记录数据。已有的数据表明,和尚洞洞外温度和宜昌气象站的温度相近,两组数据互为补充。本

研究中,我们对2003年9月20日至2008年3月12日共1636天的洞外气温数据作2小时、日平均及月平均值的处理。洞内的温度数据由一台设置在距洞口150m处(观测点D5)石墙上的HOBO H8 PRO温度记录仪,以2小时的时间间隔自动记录了洞内的温度变化。该仪器于2003年9月20日开始运行,迄今近5年。期间由于电池失效的原因,丢失2004年3月15日至4月10日、2006年2月25日至7月4日的部分数据;本研究取2003年9月20日至2008年3月12日的的数据,也分别进行2小时、日、月平均的统计。同时,为了观测温度随洞深的变化,我们分别在距洞口0m、30m、65m、105m、150m和250m的地方设立6个观测点D1、D2、D3、D4、D5和D6(图1)测量洞内空气温度。空气温度的测量使用手提Telaire 7001 CO₂& T记录仪,人工读数,时间间隔为10天。其中D1~D5数据序列长度为两年,而D6点的序列较短,仅为一年。

3 监测结果与讨论

3.1 洞内、外温度的日变化

洞内(D5点,距洞口150m)、外温度的日变化如图2。总体来说,洞内、洞外温度变化的趋势相同,但洞内温度变化幅度较洞外的小。24小时内,洞内温度在18.2℃(平均值)附近有规律的升降,温差不超过0.2℃,而洞外气温从6:00的极小值15℃抬升至14:00的22.5℃,温差达到7.5℃。值得注意的是,洞内温度对洞外的响应存在滞后,但滞后的程度随时间而不同,其中22:00—8:00滞后较少或基本上同步,而10:00—22:00,滞后明显,滞后时间约2小时。

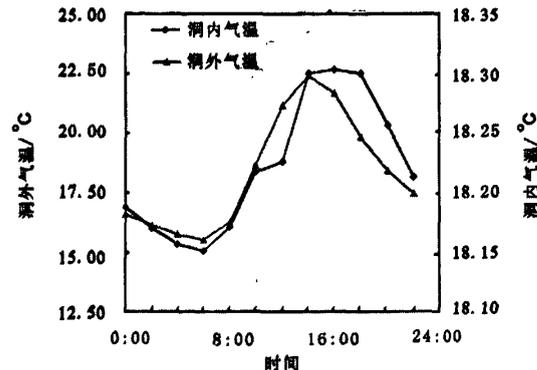


图2 洞内和洞外温度的日变化

Fig. 2 Diurnal change of temperatures in and out of the Heshang cave

3.2 洞内温度响应外界气温的季节变化

和尚洞洞内(D5点)、外温度的季节变化见图3。

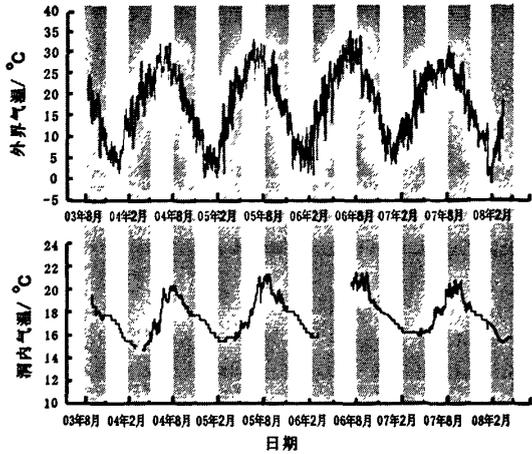


图3 洞内、外温度的季节变化

(上为宜昌气温(浅线条)和和尚洞外器测温度(深线条);下为洞内D5点器测温度)

Fig. 3 Seasonal change of temperatures in and out of the Heshang cave

(The upper is the temperatures in Yichang (grey) and outside the Heshang cave (black), the lower is the cave temperature measured on spot D5)

与洞外温度的季节变化相似,洞穴温度有显著的升温与降温。洞内温度最高值(21.6℃)出现在每年的7—8月份,而最低值(14.7℃)位于2—4月份,平均温度为17.7℃,近似于洞外年均气温(17.3℃)。从季节变化的振幅来看,洞内冬夏两季的温度差(约6.9℃)明显弱于洞外(31.8℃),反映了洞穴的“缓冲作用”,即洞内空气在洞壁热辐射和气体热交换作用下与外界空气达到某种程度的动态平衡,此平衡从洞口逐渐传递到洞深处,并随洞穴的加深而稳定,使得洞内的气温变化总是难以与外界气候变化完全同步。这种洞内温度滞后响应洞外气温变化的特征体现在全年的各个季节,二者存在10~40天的时间差,其中降温阶段滞后相对较少(约10天),而升温阶段的滞后时间长,约为40天。特别是在每年的2—4月,洞外气温开始逐步回升,但洞穴围岩的温度仍然较低,因而作为“冷源”对洞内气温的升高起了抑制的作用,导致温度上升缓慢甚至不变化;直至4月中旬洞外气温升高至与洞内温度基本持平,洞内温度才开始迅速升温(5—7月),并在7—8月份间达到最高值;夏季过后(8月至次年1月),洞内温度又随洞外降温而呈阶梯状下

降,但变幅在8—10月和11—1月有所不同,前者较后者下降更快。值得注意的是,与洞外气温的变化不同,洞内温度抬升和降低的速度并不一致,其中升温过程(5—7月)快,降温过程(8月—次年1月)慢,表现出非正态分布的特征(图3,下)。

对洞内外气温变化进行相关分析,获得洞内温度升、降的轨迹图(图4)。由图4可见,洞内温度对外界升温 and 降温的响应过程是不同的,存在明显的季节差别。即使同为升温阶段,春、夏两季二者的响应快慢也有所不同,2—4月,二者的相关趋势线为一平行线,斜率接近0,即洞穴温度几乎不随洞外气温的增加而变化,响应非常慢;5—7月,洞内和洞外温度线性回归的斜率为0.37,表示洞内温度的变幅是洞外气温变幅的0.37倍,这是全年中洞穴温度响应洞外气温变化最灵敏的季节;降温阶段,从洞内外温度相关直线的斜率减小看来,洞内随外界降温的速度较夏季温度的变化缓慢,且随着冬天的到来这种响应越迟缓(8—10月相关线斜率为0.18,11—1月为0.11)。因此,和尚洞洞穴温度对外界气候的季节响应在一年中呈现慢(2—4月)→快(5—7月)→较快(8—10月)→较慢(11—1月)的特点。这种非线性的响应特点至今尚未见报道,因而其机理不详,可能与不同季节下洞穴“缓冲作用”的强弱变化有关,也与洞内外空气对流强度、洞壁岩层接纳热量的程度及洞内水源蒸发和扩散等有关。

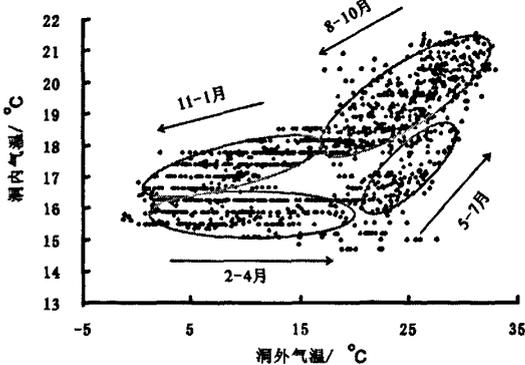


图4 洞、内外温度的相关分析

Fig. 4 The correlation of exterior and interior cave temperature

3.3 洞穴气温的空间变化

和尚洞不同深度处的温度变化如图5。从洞口到洞里(D1~D6),空气温度的季节变化幅度逐渐减小。

D1靠近洞口,受外界天气影响最为显著,测量的温度最低5.8℃,最高38.2℃,相差32.4℃,冬、夏季平均温度的差值为15.6℃,基本上与洞外的气温变化相同。进入洞内,洞穴“缓冲作用”开始发挥效应,且深度越大,效应越强。如30m处的D2观测点,其冬、夏季温差为14.7℃,而D3~D6的季节温度差分别是13.0℃,10.5℃,6.1℃和3.8℃。总体而言,和尚洞洞穴温度的季节变化强烈,其变化幅度大于国内外公开报道一些深(长)型洞穴的温度变化^[24~28],这可能与和尚洞洞身较短、洞口较大有关,即特殊的洞穴结构导致了较强的能量和物质交换。

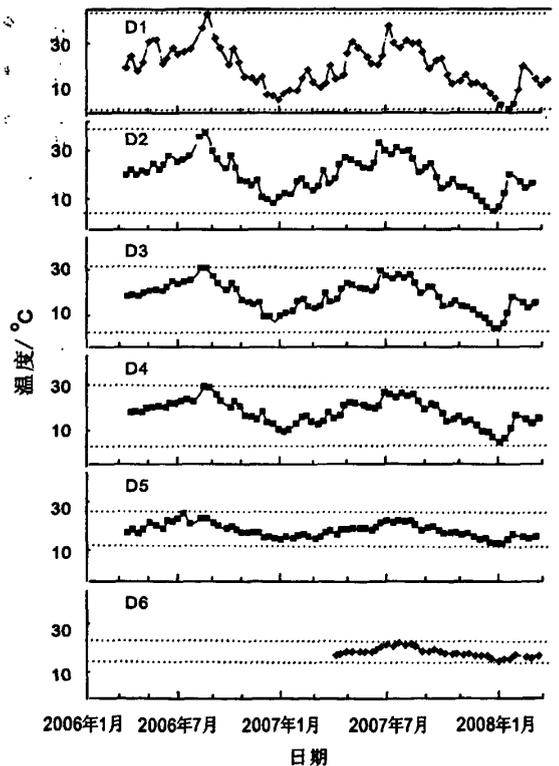


图5 和尚洞洞内温度的空间变化

Fig. 5 Spatial change of temperatures in the Heshang cave

4 结语

湖北清江和尚洞穴温度时、空变化特征明显。在日、季节尺度上,洞内温度的变化幅度都比洞外的变化小,乃是洞内物质,如相对恒温的岩石和水流等,通过热量交换的方式发挥出其对洞穴空气的调节功效。在空间上,洞穴温度的季节性变化随洞穴深度的加大而变小,也反映了热量交换由强至弱,并最终接近动

态平衡的特征。

研究还发现,洞穴温度对洞外气候变化的响应并非完全同步的,存在明显的滞后,其中当日滞后时间为0~2小时,季节尺度上的滞后时间则达到10~40天,且降温阶段滞后相对较少(约10天),升温阶段滞后时间长(约40天)。进一步的洞内、外温度相关分析证实,洞内温度对外界气温变化的响应有着明显的季节性,在一年中呈现慢(2—4月)→快(5—7月)→较快(8—10月)→较慢(11—1月)的特点,说明洞穴“缓冲作用”在不同季节对洞内气温影响的非均匀性。

参考文献

- [1] Kranjc A, Opara B. Temperature monitoring in Skocjanske Jama cave[J]. *Acta Carsologica*, 2002, 31(1): 85—96.
- [2] Fernandez-Cortes A, Calaforra J M, Sanchez-Martos F. Spatiotemporal analysis of air conditions as a tool for the environmental management of a show cave[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40: 7378—7394.
- [3] Buecher R H. Microclimate study of Kartchner caverns, Arizona[J]. *Journal of Cave and Karst Studies*, 1999, 61(2): 108—120.
- [4] Christoforou C S, Salmon L G, Cass G R. Air exchange within the buddhist cave temples at Yungang, China[J]. *Atmospheric Environment*, 1996, 30 (23), 3995—4006.
- [5] Freitas de C R, Littlejohn R N. Cave climate: assessment of heat and moisture exchange[J]. *Journal of Climatology*, 1987, 7: 553—569.
- [6] Gamble D W, Dogwiler J T, Mylroie J. Field assessment of the microclimatology of tropical flank margin caves[J]. *Climate Research*, 2000, 16: 37—50.
- [7] 陈伟海, 邓亚东, 韩道山, 等. 桂林市芦笛岩、大岩洞穴环境特征[J]. *中国岩溶*, 2004, 23(2): 113—119.
- [8] 程寿全. 岩溶洞穴大气中二氧化碳含量的预测——以贵州某些洞穴为例[J]. *中国岩溶*, 1992, 11(3): 240—244.
- [9] 方龙龙, 刘际松. 浙江洞穴气候特征及其分析[J]. *杭州大学学报*, 1990, 17(1): 102—110.
- [10] 林钧枢, 张耀光. 瑶林洞形成与环境研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1993, 1—229.
- [11] 张蕾, 赵淑艳, 赵习方. 北京石花洞内CO₂的监测与评价[J]. *中国岩溶*, 1997, 16(4): 325—331.
- [12] Gentys D, Deflandre G. Drip flow variations under a stalactite of the Père Noël cave (Belgium). Evidence of seasonal variations and air pressure constraints [J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 211: 208—232.
- [13] Sondag F, Ruymbeke van M, Soubiès F et al. Monitoring present day climatic conditions in tropical caves using an Environmental Data Acquisition System (EDAS) [J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 273: 103—118.
- [14] 周运超, 王世杰. 贵州凉风洞滴水水文水化学过程分析[J]. *第四纪研究*, 2005, 25(2): 208—215.
- [15] 王新中, 班风梅, 潘根兴. 洞穴滴水地球化学的空间和时间变化及其控制因素——以北京石花洞为例[J]. *第四纪研究*, 2005, 25(2): 258—264.
- [16] 张平中, 陈一萌, Johnson K P, 等. 甘肃武都万象洞滴水与现代石笋同位素的环境意义[J]. *科学通报*, 2004, 49(15): 1529—1531.
- [17] Li B, Yuan D X, Qin J M et al. Oxygen and carbon isotopic characteristics of rainwater, drip water and present speleothems in a cave in Guilin area and their environmental meanings[J]. *Science in China (Series D)*, 2000, 43(3): 277—285.
- [18] 李红春, 顾德隆, 赵树森, 等. 北京石花洞地区水系氢氧同位素及氦含量研究——石花洞研究系列之一[J]. *地震地质*, 1996, 18 (4): 325—328.
- [19] 陈伟海. 洞穴研究进展综述[J]. *地质评论*, 2006, 52(6): 783—792.
- [20] 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.
- [21] Johnson K R, Hu C Y, Belshaw N S et al. Seasonal trace-element and stable-isotope variations in a Chinese speleothem: The potential for high-resolution paleomonsoon reconstruction [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 244: 394—407.
- [22] 刘浴辉, 胡超涌, 黄俊华, 等. 长江中游石笋年层厚度作为东亚夏季风强度代用指标的研究[J]. *第四纪研究*, 2005, 25(2): 228—234.
- [23] 刘浴辉, 胡超涌, 黄俊华. 石笋微层研究及其气候意义[J]. *地质科技情报*, 2005, 24(1): 30—34.
- [24] Li H C, Kub T L, Yuan D X, et al. Stable isotopic compositions of waters in the karst environments of China: Climatic implications [J]. *Applied Geochemistry*, 2007, 22(8): 1748—1763.
- [25] Brook G A, Ellwood BB, Railsback L B, et al. A 164 ka record of environmental change in the American Southwest from a Carlsbad Cavern speleothem [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 237: 483—507.
- [26] Treblea P C, Chappellb J, Gagan M K, et al. In situ measurement of seasonal $\delta^{18}\text{O}$ variations and analysis of isotopic trends in a modern speleothem from southwest Australia [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 233: 17—32.
- [27] 覃嘉铭, 袁道先, 程海, 等. 过去25万年黔桂地区千年尺度东亚季风气候的变化. *中国岩溶*, 2004, 23(4): 261—266.
- [28] 谭明, 李铁英. 北京石花洞全新世石笋微层生长层与稳定同位素气候意义初步研究. *中国岩溶*, 1997, 16(1): 1—10.

(下转第282页)

