第 33 卷 第 3 期
2013 年 5 月

第 四 纪 研 究
QUATERNARY SCIENCES

Vol. 33, No. 3
May, 2013

doi:10.3969/j.issn.1001-7410.2013.03.04

文章编号 1001-7410(2013)03-437-08

贵州荔波黑洞碎屑沉积物宇宙成因核素 $^{26}Al/^{10}Be$ 埋藏年龄*

刘 彧[①②] 王世杰[①③] 刘秀明[①③]
徐 胜[④] Derek Fabel[⑤] 罗维均[①③]

(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,贵阳 550002;②中国科学院大学,北京 100049;③中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站,普定 562100;④Scottish Universities Environmental Research Centre, East Kilbride, G750 QF, UK;⑤Department of Earth Science and Geography, University of Glasgow, Glasgow, G12 8QQ, UK)

摘要 河流下切在岩溶区形成的多级层状洞穴,记录了地体隆升和地貌演化历史,但由于测年手段的限制,国内在这方面的研究一直进展不大。近年来,运用宇宙成因核素得到洞穴碎屑沉积物埋藏年龄的方法,已成为反演山地区域构造-地貌演化的新途径。本文尝试运用宇宙成因核素 $^{26}Al/^{10}Be$ 埋藏测年技术,对属于贵州荔波地区 4 层洞穴系统的黑洞(第二层)碎屑沉积物进行年龄测定,假设样品进洞前无埋藏史,测年结果显示黑洞年龄至少有 1.06±0.23Ma,并且该地区三岔河流域的侵蚀速率为 55.1±2.3m/Ma。这是对该地区洞穴测年的一次新探索,体现出洞穴沉积物宇宙成因核素埋藏测年技术在我国晚新生代地质地貌演化研究方面具有良好的应用前景。

主题词 $^{26}Al/^{10}Be$ 埋藏测年 黑洞 贵州荔波

中图分类号 P597⁺.3, P931.5, P533 **文献标识码** A

1 引言

受晚新生代青藏高原强烈隆升的影响,贵州地区发生了间歇式构造抬升活动,形成自西向东掀斜的三级地貌格局。在此三级地貌单元内又形成多级层状地貌面(剥夷面、河流阶地和层状洞穴)。层状地貌面的年龄、高度、性质等是判断陆地抬升时间和幅度的重要证据,是国内外公认的研究高原隆升历史、地质地貌变迁极为重要的对象。但是,过去由于缺乏有效的测年物质和方法,对这些地貌面年龄的测定一直是研究的薄弱环节,所以对贵州晚新生代以来地貌演化情况的认识也很模糊。剥夷面的定年一直是年代学的难点之一,王世杰等[1]曾利用贵州红色风化壳中的次生石英进行裂变径迹测年尝试,但是该方法还在摸索中。而贵州主要河流的阶地多为侵蚀阶地,缺少合适的测年物质,因此对阶地的研究也难以得到突破。

河流强烈下切在岩溶区形成的多级层状洞穴记录了区域地体抬升历史,但由于测年手段的限制,有关洞穴年龄和河流下切速率的研究很少。前人曾对贵州独山神仙洞、六冲河岩溶峡谷层状洞穴以及赫章地区溶洞内次生化学沉积物(石笋等)进行铀系测年法的研究[2~4],因受测年范围的限制,仅得知高层洞的石笋年龄最老超过了 0.35Ma。洞穴次生化学沉积物可在溶洞形成若干年后才开始生长,因此用化学沉积物的铀系年龄可能会极大地低估溶洞的形成年龄,而高估河流的下切速率[5]。20 世纪 80 年代迅速发展起来的宇宙成因核素测年法[6~8],为解决上述问题提供了契机。近年来,国际上运用宇宙成因核素获取洞穴碎屑沉积物埋藏年龄的方法已成为反演山地区域构造-地貌演化历史的一条新途径[9~11]。而且与其他洞穴沉积物定年手段(如U-Th法和古地磁法)相比,宇宙成因核素测年法是目前研究洞穴发育最可靠的方法[5]。但是国内运用宇宙成因核素埋藏测年技术在这方面的研究至今还未见报道。

所以,我们首先尝试从层状洞穴沉积物入手,希望这种新测年法的应用能为贵州晚新生代地貌演化

第一作者简介:刘 彧 女 27 岁 博士研究生 环境地球化学专业 E-mail:adeline__416@163.com

* 中国科学院战略性先导科技专项项目(批准号:XDA05070400)、中国科学院知识创新工程方向性项目(批准号:KZCX2-YW-306)和国家重点基础研究发展规划项目(973 项目)(批准号:2006CB403200)共同资助

2012-08-21 收稿,2012-11-25 收修改稿

历史提供一些新的认识。但前期工作仅在黔西北的六冲河流域和黔东南的荔波等地区找到少数几个洞穴沉积物样品适用于宇宙成因核素 $^{26}Al/^{10}Be$埋藏测年研究。本文以贵州省荔波县洞塘乡的黑洞碎屑沉积物为研究对象,利用宇宙成因核素 ^{26}Al和 ^{10}Be进行埋藏年龄测定,简要探讨这些年龄数据的地质意义以及洞穴沉积物宇宙成因核素埋藏测年在我国的应用前景。

2 研究区概况

荔波位于贵州高原向广西岩溶丘陵和平原过渡的斜坡上缘地带(图 1a),大地构造上属于黔南南北向构造带。特殊的地质背景与气候环境条件导致区内岩溶地貌极为发育,以峰丛洼地为主,局部地区为峰林谷地。荔波地区已查明的溶洞有 50 多个,并且溶洞发育表现出极强的选择性、方向性和成层性[12]。首先,这些溶洞主要发育在质纯、层厚的下二叠统茅口组和上石炭统的马坪群灰岩中;其次,这些溶洞无论是单体洞穴还是组合排列的延伸展布方向,均与区域构造带的方向一致;再次,区内溶洞发育常与河谷阶地和剥夷面相对应,在垂向上呈现多层性特征,反映出该区构造运动的阶段性。荔波地区的溶洞主要可以分为 4 层,分别集中在海拔 900 ~ 800m(Ⅳ),700 ~ 650m(Ⅲ),580 ~ 520m(Ⅱ)和 500m 以下(Ⅰ)[12]。

黑洞(25°18.850′N,108°02.821′E)位于荔波县

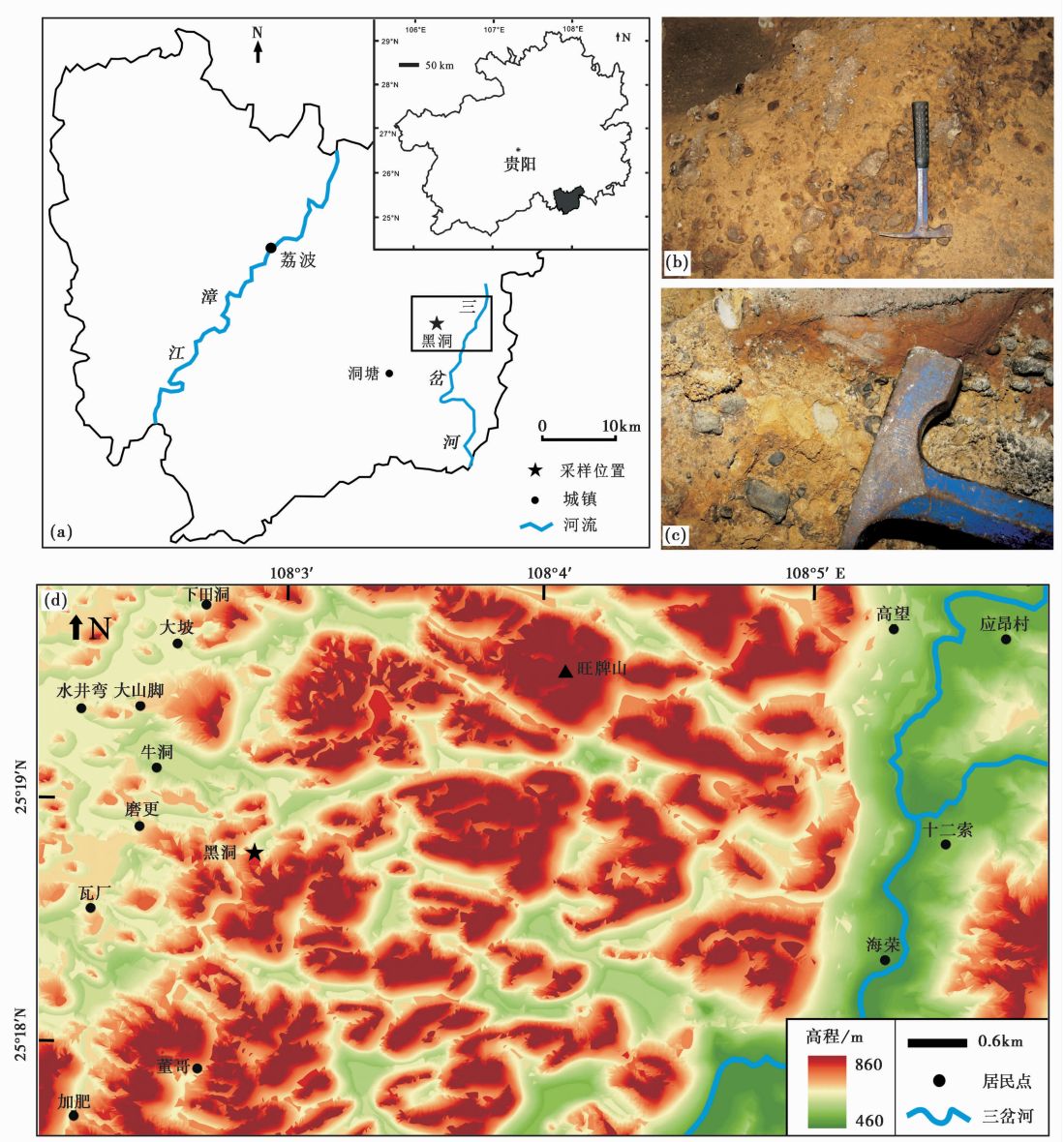

图 1 贵州荔波黑洞位置图以及采样点样品照片

Fig. 1 Map of Guizhou Libo showing location of Black Cave and the field impression of sampled site in the cave

城东南部洞塘乡磨更村东约 1km 处(图 1d)。该洞发育在上石炭统的马坪群灰岩中,洞长 250m 左右,洞口海拔 608(±5)m,洞穴顶板厚度大于 30m,洞内崩塌强烈,次生沉积物发育。黑洞所在地区为浅切割峰丛低山区,最高峰在茂兰保护区东北的旺牌山,海拔 868.2m(图 1d)。地貌类型以峰丛洼地、漏斗为主,峰洼之间相对高差 50~100m。因受东部三岔河侵蚀基面(海拔约 480m)控制,地下水水力坡度较大。该区域内发育有 3 层溶洞,在高程上分别可与荔波 4 层溶洞的下面 3 层洞穴相对应。上层洞(海拔约 700m)有洞腮五眼桥的黑洞-神仙洞-九洞天的高位水平穿洞体系(海拔约 715m)和董哥洞上层洞(海拔约 709m)等;中层洞(海拔约 600m)有五眼桥的金狮洞(海拔约 600m),董哥洞中层洞(海拔约 580m)和本研究的黑洞,这两层洞属于高位旱洞与现今水系已无联系;下层洞(海拔约 500m)有董哥洞下层洞(海拔约 490m)和五眼桥处的杉木凹洞(海拔约 500m)等,是现代地下河通道。

3　洞穴沉积物 $^{26}Al/^{10}Be$ 埋藏测年的基本原理和方法

3.1　层状洞穴沉积物测年意义

喀斯特洞穴(溶洞)是流水沿着可溶性岩石的层面、节理或裂隙等溶蚀形成,常是地表水接近区域潜水面的最快途径,洞穴发育被基准面高度严格控制。在渗流区(基准面以上)流水会以最快的方式向下达到潜水区(基准面附近),而在潜水区流水会沿着区域基准面近乎水平的侵蚀洞穴。在构造平静期,流水塑造出大型、与河水面高程近似的水平通道;而当构造抬升或其他事件使区域潜水面下降,增加的水力梯度使原洞穴内流水迅速下切,在新的基准面附近形成水平洞穴以达到水力梯度平衡。如此循环,如果地体发生多次抬升事件,那么在碳酸盐岩地区的河谷剖面上就会形成多层溶洞。溶洞之间的高程将记录每次地体抬升而导致的河谷下切的幅度。上层洞被废弃后,洞道内沉积的外源碎屑物可代表洞穴与当地水力体系的最后一次联系。如果潜水面下降后,上层被废弃洞穴仍处于最大洪水高度内,则洪水期过后在上层废洞内可能会沉积一些砂泥物质,因此,建议尽可能采集砾石等原生地下河流沉积物,其测年结果将更接近洞穴形成时间。这些沉积下来的砾石多被后期钙质胶结,所以,相较阶地样品来说,洞穴高程和沉积物样品受到的风化作用影响很小,更加真实客观的记录了地质历史中潜水面的变化信息,为反演区域构造抬升或河流下切历史提供较为准确的证据。

3.2　$^{26}Al/^{10}Be$ 埋藏测年的基本原理

$^{26}Al/^{10}Be$ 埋藏测年的原理可简单解释为:暴露在地表的岩石长期接受宇宙射线的照射形成宇宙成因核素(核素生成量与衰变和侵蚀量平衡),如果某次地质事件将地表岩石埋入地下或是通过流水带入洞穴,屏蔽了宇宙射线照射,那么宇宙成因核素将停止生成,并开始根据自身性质与时间呈指数衰变,测量现今岩石中的核素剩余量,可获悉岩石被埋藏的时间。

目前,石英是用作 $^{26}Al/^{10}Be$ 埋藏测年最理想的矿物,因为石英由 SiO_2 构成,物质成分和晶体结构简单;是地表常见矿物,使全球核素埋藏研究可对比;同时具有 ^{26}Al 和 ^{10}Be 的靶核;^{27}Al 含量很低,有利于精确测量 ^{26}Al。另外,石英稳定的物理化学性质使大气生成的 ^{10}Be 难以渗入,而原地生成的 ^{26}Al 和 ^{10}Be 又不易淋失。假设石英颗粒在一个稳定侵蚀(侵蚀速率为 ε)的地表暴露了时间 T,生成足够量的 ^{10}Be 和 ^{26}Al 可作加速器质谱(AMS)测试,那么 T 时间内 ^{10}Be 和 ^{26}Al 生成的浓度 $N_{10}(0)$ 和 $N_{26}(0)$ 分别为(此处考虑了 μ 介子生成量):

$$N_{10}(0)=\frac{P_{n,10}}{(1/\tau_{10}+\rho\varepsilon/\Lambda_{n,10})}+\frac{P_{\mu,10}}{(1/\tau_{10}+\rho\varepsilon/\Lambda_{\mu,10})} \quad (1)$$

$$N_{26}(0)=\frac{P_{n,26}}{(1/\tau_{26}+\rho\varepsilon/\Lambda_{n,26})}+\frac{P_{\mu,26}}{(1/\tau_{26}+\rho\varepsilon/\Lambda_{\mu,26})} \quad (2)$$

公式(1)和(2)中,$P_{n,10}$ 是 ^{10}Be 中子生成率(4.5atom/a·g[8]),$P_{n,26}$ 是 ^{26}Al 中子生成率(31.1atom/a·g[13]);$P_{\mu,10}$ 是 ^{10}Be μ 介子生成率(0.10atom/a·g[14]),$P_{\mu,26}$ 是 ^{26}Al μ 介子生成率(0.80atom/a·g[14]);τ 是核素的平均年龄($\tau=T_{1/2}/\ln 2$,$T_{1/2}26=0.71Ma$[15],$T_{1/2}10=1.39Ma$[16,17]),ρ 是岩石密度(假设为2.7g/cm^3),ε 是地表平均侵蚀速率(cm/a),Λ_n 和 Λ_μ 分别是中子和介子在岩石中的穿透长度($\Lambda_n\approx160g/cm^2$[18],$\Lambda_\mu\approx1300g/cm^2$[19])。

后来,石英颗粒被河流等带入洞穴并屏蔽了宇宙射线的照射,那么宇宙成因核素停止生成并开始衰变,埋藏 t 时间后,^{10}Be 和 ^{26}Al 的浓度变为:

$$N_{10}=N_{10}(0)e^{-t/\tau_{10}} \quad (3)$$

$$N_{26}=N_{26}(0)e^{-t/\tau_{26}} \quad (4)$$

由于 ^{26}Al 的衰变速度比 ^{10}Be 快近 2 倍,样品被埋

藏前的初始浓度$(N_{26}/N_{10})_0$将随时间呈指数减小，所以上述公式可写为：

$$N_{26}/N_{10}=(N_{26}/N_{10})_0 e^{-t(1/\tau_{26}-1/\tau_{10})} \quad (5)$$

N_{26}和N_{10}是通过 AMS 测得的^{26}Al和^{10}Be的核素浓度。通过数学迭代法，利用上述 5 个公式可计算得出样品埋藏年龄 t 以及埋藏前侵蚀速率 ε。

但是任何一项测年技术都有其适用条件，应用$^{26}Al/^{10}Be$埋藏测年的要求有：1）洞内碎屑沉积物必须是从洞外带入的外源物质，不然无宇宙成因核素初始量；2）对于埋藏百万年以上的样品来说，埋深必须至少达到 20m[20]，尽管该测年法可测量埋深较浅的样品，但是会提高结果的不确定性；3）由于核素半衰期和仪器测试精度的限制，该方法的测年范围为 0.1～5.0Ma[6]；4）碎屑物被快速带入洞穴，进洞前无埋藏历史，否则计算得到的埋藏年龄是综合年龄，不能代表其在洞穴中的年龄。尽管用现今技术手段难以准确识别这一条件，但是可以综合其他资料进行判断。

3.3 样品采集与分析

我们于 2009 年 1 月对荔波地区的溶洞进行地质考察，在黑洞内距洞口约 80m 处的洞腔左侧一因垮塌而暴露出来的剖面中采集了 1 份样品（10～20 个砾石）（表 1）。剖面高约 40～50cm，宽约 50～60cm；剖面主要由砂岩、灰岩和泥岩砾石构成，磨圆度次棱至次圆不等，大小混杂分选不好，黄色砂泥质胶结，胶结较好基本可排除后期被扰动破坏的可能；样品（BC）为直径 1～5cm、磨圆较好的砂岩砾石，物源可能为二叠系砂页岩地层，显然为外来成分（图 1b 和 1c）。样品要求石英颗粒粒径一般在 0.25～0.50mm，以确保用酸去除石英表面大气成因^{10}Be和杂质过程中颗粒不会全部溶解。

样品在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经清洗、研磨、过筛和磁选等工作后，送至英国格拉斯哥大学所属苏格兰大学环境研究中心（SUERC）完成化学处理、加速器质谱（AMS）测试和^{27}Al含量测试工作。化学处理主要步骤为：1）在样品中加入 2% HF+2% HNO_4，置于超声波浴中加热 72 小时，用以去除残留的非石英矿物和大气成因^{10}Be；2）用电感耦合等离子体发射光谱仪（ICP-OES）检验石英纯度，纯石英要求 Al 的总量小于 200ppm，若达不到要求重复第一步操作；3）量取 20～30g 纯石英，加入 250～300 μg ^{9}Be载体，加入 40% HF 加热溶解；4）石英完全溶解后，蒸干转制成 HCl 溶液；5）先后用阴、阳离子交换法和选择性沉淀分离和纯化 Al 和 Be；6）用氨水析出 Al 和 Be 的氢氧化物沉淀 $Al(OH)_3$ 和 $Be(OH)_2$；7）高温（约 800℃）加热 2 小时，使氢氧化物分别氧化成 Al_2O_3 和 BeO，分别加入 Ag 粉（Al_2O_3：Ag 重量比 1：2）和 Nb 粉（BeO：Nb 重量比为 1：6）送加速器质谱测试。

第一步中有效去除大气成因^{10}Be是此方法测年成功与否的关键，实验室主要通过 HF 淋滤来完成，下面将详细介绍该过程。HF 淋滤不仅可以溶解石英颗粒表面杂质，还可以侵蚀裂纹，而裂纹是大气成因^{10}Be的主要富集场所。国内外不同实验室在处理过程中有一些差异，本文介绍的是 SUERC 实验室采用的处理方法。在通风橱中，在 500ml Teflon 塑料瓶中（约 60g 样品）加入约 480ml 2% HF+2% HNO_3 溶液。盖紧瓶盖，摇匀之后将瓶子置于超声波浴中加热 72 小时，每天超声振荡 3 次，每次 99 分钟。然后在通风橱中，小心将残酸倒入 HF 废物容器中（注意不要倒出样品），用 RO 水（逆渗透水）彻底冲洗残留颗粒 3～5 次。然后，在瓶子中的 RO 水溶液中继续加入 2% HF+2% HNO_3 溶液，重复上述操作 2～3 次。然后检查样品：合格石英样品有均匀的外观，不会在瓶子底部结成块；不纯的样品常呈斑点状，可能包含氟化物沉淀。如果样品不纯，再重复一次 3 天周期处理过程。如果样品已经合格，在 MQ 水（超纯水）中用 2% HF+2% HNO_3 重复淋滤。然后用 MQ 水冲洗样品至少 3 遍，尽量冲洗掉任何微量的乳白色氟化物。放入烘箱干燥样品（约 70℃），装入标记好的密封袋进行下一步处理。

此外，1 个^{10}Be和^{26}Al空白样的制取分别与样品同步进行，以确定实验本底对样品中^{10}Be和^{26}Al浓度的影响。在 SUERC 加速器质谱的端电压 5 MV 和 4 MV条件下分别进行$^{10}Be/^{9}Be$和$^{26}Al/^{27}Al$比值测定。

表 1 黑洞碎屑沉积物宇宙成因核素浓度和计算结果

Table 1 Cosmogenic nuclide concentrations, burial age and pre-burial erosion rate from Black Cave

样品	海拔高度/m	拔河高度/m	Al/ppm	$^{10}Be/\times10^3 atom\cdot g^{-1}$	$^{26}Al/\times10^3 atom\cdot g^{-1}$	$^{26}Al/^{10}Be$	埋藏年龄/Ma	侵蚀速率*/$m\cdot Ma^{-1}$
黑洞（BC）	608±5	128±5	201.0	33.50±2.31	138.2±12.67	4.12±0.47	1.06±0.23	55.1±2.3

* 该侵蚀速率是埋藏前侵蚀速率，可反映样品被带入洞穴埋藏前所在流域的平均侵蚀速率

标准样品的重复测定结果表明,测量的 $^{10}Be/^{9}Be$ 本底值为 3×10^{-15},精度 3%; $^{26}Al/^{27}Al$ 本底值为 1×10^{-15},精度 3%。AMS 和 ICP-OES 的测试结果详见表 1。

4　结果

黑洞碎屑沉积物宇宙成因核素 ^{26}Al 和 ^{10}Be 浓度和计算结果表明,该洞碎屑沉积物埋藏年龄为 1.06±0.23Ma,样品被藏前侵蚀速率为 55.1±2.3 m/Ma(表 1和图 2)。

为判断洞穴样品进洞前有无埋藏历史,现今研究常采集洞外地表或者现代河滩砂岩砾石测试

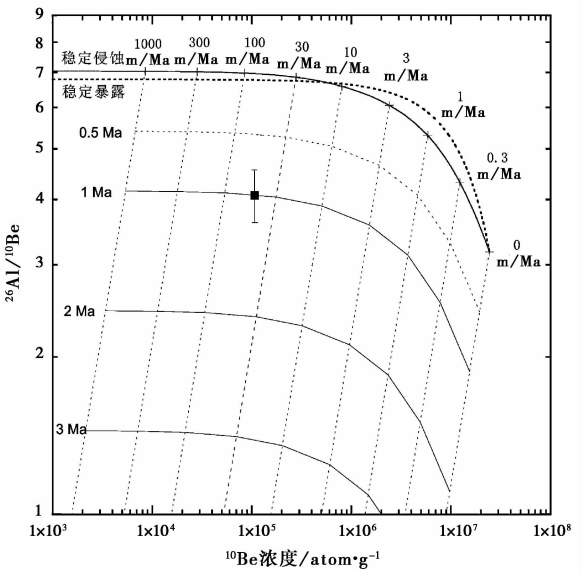

图 2　黑洞碎屑沉积物 $^{26}Al/^{10}Be-^{10}Be$ 浓度关系

稳定侵蚀曲线(实线)由公式(1)和(2)生成,石英埋藏前的 $^{26}Al/^{10}Be$ 值应落于此线上,线上的点表示沉积物源区的侵蚀速率 ε; 稳定暴露曲线(虚心曲线)由公式(3)和(4)生成,表示样品突然暴露于宇宙射线中的 $^{26}Al/^{10}Be$ 值; 下面与稳定侵蚀曲线平行的是等埋藏年龄线; 一旦样品被埋藏,$^{26}Al/^{10}Be$ 将沿着或平行于虚心直线(由公式(5)计算得到)成指数衰减

Fig. 2　Cosmogenic nuclides data from Black Cave sediments, shown on a logarithmic graph of $^{26}Al/^{10}Be$ versus ^{10}Be concentration. The solid steady erosion curve generated by equation(1) and (2), $^{26}Al/^{10}Be$ in quartz that prior to burial should fall on this curve, at a point determined by the erosion rate of the sediment's source area. The dashed constant exposure curve generated by equation (3) and (4), which shows $^{26}Al/^{10}Be$ expected for a sample suddenly exposed to cosmic radiation. The curve that parallel to the solid steady erosion curve is burial isochrones. Once buried, $^{26}Al/^{10}Be$ of sample decreases exponentially, parallel to the dashed lines which generated by equation(5)

$^{26}Al/^{10}Be$ 浓度,以了解洞穴样品中继承核素的情况。但这不是绝对的评判标准,如有研究显示,距河面高约 55m 的阶地,埋深 2.1m 和 4.3m 的样品埋藏年龄分别可达 1.50±0.27Ma 和 2.00±0.29Ma,如果 25% ~50% 这样的物质进入现代河流沉积物中,可能造成样品有埋藏年龄[21]。因此,这种方法只能对判断样品进洞前埋藏历史提供参考。由于前期采样没有发现合适的现代河滩砂岩样品,所以不清楚洞穴样品中继承核素的浓度情况,但是这对洞穴年龄数据的解释影响不大。张美良等[12]推测荔波地区中-晚期溶洞层(标高 580 ~520m)于第四纪早-中期形成,支持了黑洞(中层洞) $^{26}Al/^{10}Be$ 年龄为 1.06Ma 的可信度。沉积物被埋藏前的侵蚀速率可代表流域内的平均侵蚀速率,或沉积物被河流系统搬运过程中的侵蚀速率[22]。考虑到喀斯特地区河流特征(河水 $CaCO_3$ 处于过饱和状态,具有沉积性)[23],在此认为 55.1±2.3m/Ma 代表的是流域平均侵蚀速率。但是该侵蚀速率要远高于乌江(六冲河)流域层状洞穴沉积物所反映的流域侵蚀速率(4.55 ~19.90m/Ma,笔者未发表数据)以及其他地区用相同方法计算得到的流域侵蚀速率[9,11,21],可能与荔波地区较高的气温和降雨量有关。

5　讨论与展望

5.1　与邻区溶洞年龄对比

在荔波以北的独山县城东南 18km 处发育有一系列洞穴,其中神仙洞洞穴系统在海拔 900m 至 1100m 发育有 4 层,张寿越等[2]应用 $U^{234}-Th^{230}$ 方法对各层洞穴的次生化学沉积物(石笋等)进行年龄测定,得到碉堡洞(1100m)年龄为 0.17 ~0.25Ma、穿洞(1050m)年龄为 0.081 ~0.33Ma、神仙洞(970m)年龄为 0.11 ~0.26Ma 以及水洞(900m)年龄约为 9ka。因在地理位置上同处黔中高原向广西丘陵和平原的过渡地带,神仙洞洞穴系统可与荔波地区的的 4 层溶洞相对应,即黑洞可对应于第二层的神仙洞。理论上两个洞穴的年龄应该是相近的,但是黑洞的 $^{26}Al/^{10}Be$ 埋藏年龄要远大于神仙洞的铀系年龄。如前所述,石笋等洞穴次生化学沉积物可能在洞穴形成后的若干阶段形成,所以用铀系测年法可能极大地低估洞穴年龄,相较而言 $^{26}Al/^{10}Be$ 埋藏测年则可更加真实的反映洞穴形成年代。

5.2　$^{26}Al/^{10}Be$ 埋藏测年应用前景

目前,国内利用宇宙成因核素进行洞穴碎屑沉

积物埋藏测年研究新生代地质地貌演化的工作还鲜有报道。主要难点在于样品十分难找,现在$^{26}Al/^{10}Be$测年物质要求是石英,所以首先要求在碳酸盐岩地区要有外源的物源地层;其次石英粒径要求达到0.25mm以上,样品要求较苛刻;再次,样品很多都被后期发育的次生化学沉积物覆盖,难以发现,这些因素都限制了相关研究的开展。尽管如此,我国丰富的研究资料,使该测年技术有良好的研究前景。我国西南地区碳酸盐岩地层出露较多,是全球喀斯特地貌发育的核心区域之一,具备基本的成洞条件,该地区内有数以万计的洞穴资源。以贵州地区为例,在岩溶峡谷区,溶洞在垂直分布上常具多层性,或同一洞穴常具多层性,一些规模较大的洞穴,通常都有3~4层以上。这些水平通道形态结构和规模千差万别,但大都具有地下河或潜流洞的性质,是研究区域构造抬升和河流下切历史的理想对象;其次,很多地区都有物源地层出露,为测年法的运用提供了物质来源。宇宙成因核素埋藏测年技术坚实的理化基础、可靠的测量技术,在国外已受到普遍应用[9~11,24~27],虽然国内对该方法的应用才刚起步,但是已取得了一些重要的认识和发现[28~34],体现出极大地潜力与发展前景。特别是针对贵州这样缺乏第四纪沉积记录,用传统测年方法难以研究的地区,洞穴沉积物宇宙成因核素埋藏测年技术对研究薄弱的贵州晚新生代地貌演化历史更是具有重要意义。另外,近几年宇宙成因稳定核素^{21}Ne的加入是对传统$^{26}Al/^{10}Be$测年法的重要补充[35~37]。$^{26}Al-^{21}Ne$和$^{10}Be-^{21}Ne$的埋藏测年总误差比$^{26}Al/^{10}Be$小;$^{10}Be-^{21}Ne$可应用于中新世以来(约15Ma)的埋藏测年[38]。所以,相信宇宙成因核素埋藏测年技术能脱颖而出,成为我国今后研究晚新生代地质地貌演化问题的重要工具。

6 结论

本文首次使用宇宙成因核素$^{26}Al/^{10}Be$埋藏测年技术,对贵州荔波的黑洞碎屑沉积物进行定年尝试(假设样品经历单一的"暴露-埋藏"过程),结果显示沉积物埋藏年龄为1.06±0.23Ma,该年龄亦代表了黑洞最小形成年龄;而样品所反映的三岔河流域平均侵蚀速率为55.1±2.3m/Ma。尽管本研究只采集了一个样品,但这是国内运用宇宙成因核素$^{26}Al/^{10}Be$进行洞穴年龄研究的首个数据,可为今后进一步工作提供参考。宇宙成因核素$^{26}Al/^{10}Be$埋藏测年技术在黑洞的成功运用,是国内洞穴年龄研究的一次新探索,预示着该方法在我国晚新生代地质地貌演化研究中的良好应用前景。

致谢 野外工作得到熊红福和曾广能的大力协助;审稿专家及编辑对本文提出的建设性修改意见,特致谢意!

参考文献(References)

1 王世杰,刘秀明,张 峰.贵州碳酸盐岩红色风化壳次生石英的裂变径迹测年研究.地球化学,2005,**34**(1):33~40
Wang Shijie, Liu Xiuming, Zhang Feng. Fission track dating of secondary quartz in red weathering crust of carbonate rocks in Guizhou Province. *Geochimica*,2005,**34**(1):33~40

2 张寿越,赵树森.贵州独山神仙洞的沉积物放射性年代及发育历史.见:中国地理学会地貌专业委员会.喀斯特地貌与洞穴.北京:科学出版社,1985.113~116
Zhang Shouyue, Zhao Shusen. Radioactive dating of Shenxian Cave sediments from Dushan, Guizhou. In: Topography Professional Committee of Geographical Society of China ed. Karst Landform and Cave. Beijing: Science Press,1985.113~116

3 杨明德.岩溶峡谷区溶洞发育特征及水动力条件.贵州地质,1998,**15**(1):17~25
Yang Mingde. Development of cavities in karstic valley in respondent to hydrodynamics. *Geology of Guizhou*,1998,**15**(1):17~25

4 李明琴,王智勇,钱 嵘等.新构造运动对贵州西部岩溶石漠化演化的影响.贵州大学学报(自然科学版),2007,**24**(3):322~326
Li Mingqin, Wang Zhiyong, Qian Rong *et al*. Evolution of karst desertification in response to neotectonism in western Guizhou. *Journal of Guizhou University* (Natural Sciences), 2007, **24** (3): 322~326

5 Stock G M, Granger D E, Sasowsky I D *et al*. Comparison of U-Th, paleomagnetism, and cosmogenic burial methods for dating caves: Implications for landscape evolution studies. *Earth and Planetary Science Letters*,2005,**236**(1~2):388~403

6 Granger D E, Muzikar P F. Dating sediment burial with *in-situ* produced cosmogenic nuclides: Theory, techniques, and limitations. *Earth and Planetary Science Letters*,2001,**1888**(1~2):269~281

7 Granger D E. A review of burial dating methods using ^{26}Al and ^{10}Be. *Geological Society of America Special Papers*,2006,**415**:1~16

8 Dunai T J. Cosmogenic Nuclides Principles, Concepts and Applications in the Earth Surface Sciences. New York: Cambridge University Press,2010.1~143

9 Granger D E, Fabel D, Palmer A N. Pliocene-Pleistocene incision of the Green River, Kentucky, determined from radioactive decay of cosmogenic ^{26}Al and ^{10}Be in Mammoth Cave sediments. *Geological Society of America Bulletin*,2001,**113**(7):825~836

10 Anthony D M, Granger D E. A Late Tertiary origin for multilevel caves along the western escarpment of the Cumberland Plateau, Tennessee and Kentucky, established by cosmogenic ^{26}Al and ^{10}Be. *Journal of Cave and Karst Studies*,2004,**66**(2):46~55

11 Wagner T, Fabel D, Fiebig M *et al*. Young uplift in the non-glaciated parts of the eastern Alps. *Earth and Planetary Science*

Letters,2010,**295**(1~2):159~169

12 张美良,林玉石,冉景丞等.贵州荔波岩溶洞穴发育特征.中国岩溶,2000,**19**(1):13~20
Zhang Meiliang, Lin Yushi, Ran Jingchen *et al*. The characteristics of karst caves development in Libo, Guizhou. *Carsologica Sinica*,2000, **19**(1):13~20

13 Stone J O. Air pressure and cosmogenic isotope production. *Geophysics Research*,2000,**105**(B10):23753~23759

14 Heisinger B, Lal D, Jull A J T *et al*. Production of selected cosmogenic nuclides by muons: 2. Capture of negative muons. *Earth and Planetary Science Letter*,2002,**200**(3~4):357~369

15 Nishiizumi K. Preparation of ^{26}Al AMS standards. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*,2004,**223~224**:388~392

16 Chmeleff J, Blanckenburg F, Kossert K *et al*. Determination of the ^{10}Be half-life by multicollector ICP-MS and liquid scintillation counting. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*,2010,**268**(2):192~199

17 Korschinek G, Bergmaier A, Faestermann T *et al*. A new value for the half-life of ^{10}Be by Heavy-Ion Elastic Recoil Detection and liquid scintillation counting. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*,2010,**268**(2):187~191

18 Masarik J, Reedy R C. Terrestrial cosmogenic nuclide production systematic calculated from numerical simulations. *Earth and Planetary Science Letters*,1995,**136**(3~4):381~395

19 Brown E T, Stallard R F, Larsen M C *et al*. Denudation rates determined from the accumulation of in situ-produced ^{10}Be in the Luquillo Experimental Forest, Puerto Rico. *Earth and Planetary Science Letters*,1995,**129**(1~4):193~202

20 Granger D E, Fabel D. Cosmogenic isotope dating of cave sediments. In: White W B, Culver D C eds. Encyclopedia of Caves (Second Edition). Waltham, Massachusetts, USA: Academic of Press,2012. 172~176

21 Granger D E, Kirchner J W, Finkel R C. Quaternary downcutting rate of the New River, Virginia, measured from differential decay of cosmogenic ^{26}Al and ^{10}Be in cave-deposited alluvium. *Geology*,1997, **25**(2):107~110

22 Granger D E, Kirchner J W, Finkel R C. Spatially averaged long-term erosion rates measured from *in situ*——Produced cosmogenic nuclides in alluvial sediment. *Journal of Geology*,1996,**104**(3): 249~257

23 刘丛强等.生物地球化学过程与地表物质循环——西南喀斯特流域侵蚀与生源要素循环.北京:科学出版社,2007. 151~152
Liu Chongqiang *et al*. Biogeochemistry Process and Surface Material Cycle——Karst Drainage Basin Erosion and Biogenic Factors Cycle of Southwestern China. Beijing: Science Press,2007. 151~152

24 Matmon A, Stock G M, Granger D E *et al*. Dating of Pliocene Colorado River sediments: Implications for cosmogenic burial dating and the evolution of the lower Colorado River. *Geological Society of America Bulletin*,2012,**124**(3~4):626~640

25 Matmon A, Ron H, Chazan M *et al*. Reconstructing the history of sediment deposition in caves: A case study from Wonderwerk Cave, South Africa. *Geological Society of America Bulletin*,2012,**124**(3~4):611~625

26 Erlanger E D, Granger D E, Gibbon R J. Rock uplift rates in South Africa from isochron burial dating of fluvial and marine terraces. *Geology*,2012,**40**(11):1019~1022

27 Haeuselmann P, Granger D E, Jennin P Y *et al*. Abrupt glacial valley incision at 0.8Ma dated from cave deposits in Switzerland. *Geology*,2007,**25**(2):143~146

28 Kong P, Granger D E, Wu F Y *et al*. Cosmogenic nuclide burial ages and provenance of the Xigeda paleo-lake: Implications for evolution of the middle Yangtze River. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009,**278**(1~2):131~141

29 Kong P, Zheng Y, Fu B. Cosmogenic nuclide burial ages and provenance of Late Cenozoic deposits in the Sichuan Basin: Implications for Early Quaternary glaciations in east Tibet. *Quaternary Geochronology*,2011,**6**(3~4):304~312

30 Shen G J, Gao X, Gao B *et al*. Age of Zhoukoudian *Homoerectus* determined with ^{26}Al/^{10}Be burial dating. *Nature*,2009,**458**:198~200

31 张　珂,蔡剑波.黄河黑山峡口最高阶地宇宙核素的初步年龄及所反映的新构造运动.第四纪研究,2006,**26**(1):85~91
Zhang Ke, Cai Jianbo. Preliminary result of the dating by TCN technique of the highest terrace of the Heishanxia Gorge Mouth, northeast margin of Tibetan Plateau and its expression of neotectonic movement in that area. *Quaternary Science*,2006,**26**(1):85~91

32 王亚军,孔　屏,那春光等.藏南错戳龙高湖面阶地的形成时间及相应的古降水量的计算.第四纪研究,2008,**28**(2):280~287
Wang Yajun, Kong Ping, Na Chunguang *et al*. Exposure ages of high lacustrine shorelines around the Cuochuolong Lake in south Tibet and related paleoprecipitation calculations. *Quaternary Sciences*, 2008,**28**(2):280~287

33 吕延武,顾兆炎,许　冰等.云南怒江丙中洛河段第三级阶地^{10}Be暴露年龄.第四纪研究,2012,**32**(3):403~408
Lü Yanwu, Gu Zhaoyan, Xu Bing *et al*. ^{10}Be dated boulders from the third terrace of Nujiang River at Bingzhongluo, Yunnan Province, China. *Quaternary Science*,2012,**32**(3):403~408

34 王　建,张志刚,徐孝彬等.青藏高原东南部稻城古冰帽南缘第四纪冰川活动的宇生核素年代研究.第四纪研究,2012,**32**(3): 394~402
Wang Jian, Zhang Zhigang, Xu Xiaobin *et al*. Cosmogenic isotopes dating of Quaternary glacial activity of the paleo Daocheng ice cape, on the southeastern part of Qinghai-Xizang Plateau. *Quaternary Science*,2012,**32**(3):394~402

35 Altmaier M, Herpers U, Georg D *et al*. Glaciation history of Queen Maud Land (Antarctica) reconstructed from in-situ produced cosmogenic ^{10}Be, ^{26}Al and ^{21}Ne. *Polar Science*,2010,**4**(1):42~61

36 Kong P, Huang F X, Liu X F *et al*. Late Miocene ice sheet elevation in the Grove Mountains, East Antarctica, inferred from cosmogenic ^{21}Ne-^{10}Be-^{26}Al. *Global and Planetary Change*,2010,**72**(1/2):50~54

37 Balco G, Shuster D L. Production rate of cosmogenic ^{21}Ne in quartz estimated from ^{10}Be, ^{26}Al, and ^{21}Ne concentrastions in slowly eroding Antarctic bedrock surfaces. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009,**281**(1~2):48~58

38 Balco G, Shuster D L. ^{26}Al-^{10}Be-^{21}Ne burial dating. *Earth and Planetary Science Letters*,2009,**286**(3~4):570~575

COSMOGENIC NUCLIDES ^{26}Al AND ^{10}Be BURIAL AGE OF BLACK CAVE SEDIMENTS, LIBO OF GUIZHOU, CHINA

Liu Yu[①②] Wang Shijie[①③] Liu Xiuming[①③] Xu Sheng[④] Derek Fabel[⑤] Luo Weijun[①③]

(① *State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang* 550002; ② *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049; ③ *Karst Ecosystem Observation and Research Station, Chinese Academy of Sciences, Puding* 562100; ④ *Scottish Universities Environmental Research Centre, East Kilbride, G*750 *QF, UK*; ⑤ *Department of Earth Science and Geography, University of Glasgow, Glasgow, G*12 8*QQ, UK*))

Abstract

We report the first cosmogenic nuclide burial age in Black Cave sediments from Libo at the southeastern margin of the Guizhou Plateau, SW China. For half a century, the landscape evolution of Guizhou during the Late Cenozoic has been a much debated topic in the Earth sciences due to poorly preserved surface materials and unsuitable dating methods. River downcutting in the karst area forms an abundance of multilevel caves, and provides an opportunity to integrate the cosmogenic ^{26}Al/^{10}Be burial dating method to determine the incision history of the river. It has been a new approach to invert the geological and landscape evolution of mountainous region in these years, by determining the cosmogenic nuclides concentrations in cave clastic sediments. There developed four level caves in Libo, and they could correspond with the fluvial terraces and deplanation surfaces. In general, the caves of altitude 800 ~ 900m (Ⅳ) are the highest level caves in this area, the cave passages at 650 ~ 700m (Ⅲ) are the third level, the cave passages at 520 ~ 580m (Ⅱ) are the second level. These cave levels are hydrologically abandoned and above the modern flood zone. The cave passages under 500m (Ⅰ) are hydrologically active and still within the modern flood zone.

The Black Cave (25°18.850′N, 108°02.821′E) is located in the 1km east of Mogen Village of Dongtang, which belongs to Libo of Guizhou Province (Fig. 1d). This cave is developed in the upper carboniferous limestones, the length of cave is approximately 250m, and the altitude of cave entrance is approximately 608 (±5) m, which belongs to the second level cave of Libo. One quartz pebbles sample is collected from the section at the left side of the channel and away from the entrance about 80m. The pebbles are consist of limestone, sandstone and mudstone, and good cemented by the argillo-arenaceous materials. The size of sample pebbles are approximately 1 ~ 5cm with rounded edge, the grain size of quartz is approximately 0.25 ~ 0.50mm and washed into the cave from the outside Permian stratums obviously. Physical preparation, including extraction and purification from bulk samples by magnetic and density separation, were performed at the State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences. Chemical treatments, AMS measurements and stable Al measurements were all performed at the laboratory of Scottish Universities Environmental Research Centre. The first cosmogenic ^{26}Al/^{10}Be burial dating results indicate that the age of Black Cave is 1.06±0.23Ma at least (assume the sample have no pre-burial history), and the pre-burial erosion rate of sample is 55.1±2.3m/Ma. This is a new exploration of cave dating in this area, and it also shows a well foreground in the studies of Late Cenozoic landscape evolution in our country by cosmogenic nuclides dating method in cave sediments.

Key words ^{26}Al/^{10}Be, burial dating, Black Cave, Guizhou Libo