南京汤山洞穴碳酸盐沉积物的 电离质谱铀系年代

汪永进 Hai Cheng^④ 陆从伦 夏应菲
 吴江滢 陈 骏^④

(南京师范大学地理科学学院, 南京 210097; ④Minnesota Isotope Laboratory, Department of Geology and Geophysics,
University of Minnesota, Minneapolis, MN 55455, USA; ④南京大学地球科学系, 南京 210093)

摘要 应用热电离质谱仪(TIMS)技术,测定了南京汤山2个溶洞数层钙板和石笋的年龄,其年代分布范围跨越了距今500~20 ka. 根据这些洞穴碳酸盐的年代及其与堆积地层的关系,建立了该处第四纪洞穴沉积物的年代地层框架. 从南京直立人头骨化石赋存层位及其顶底板铀系年代分析,2具头骨化石分属于不同的地质时段,iv号头骨顶层钙板及其石笋的年龄说明其年代应大于500 kaBP, ⑤号头骨年龄落于500~240 kaBP之间.

关键词 洞穴碳酸盐 铀系年代 直立人 南京

至今关于南京直立人化石时代的报道都是基于经典的 α 谱仪铀系测年方法^[1,2]. 近期,作者又多次详细考察了南京直立人化石产出的洞穴地层,比较系统地采集了可供铀系测年的钙板和石笋样品,应用近年发展起来的高精度热电离质谱铀系测年技术(简称TIMS),取得了一批地层年代数据,对南京直立人的生存年代有了新的认识.

1 样品与方法

样品采集于南京市汤山镇西雷公山北麓2个石灰岩溶洞内. 其中葫芦洞产有2具较为完整的直立人头骨化石^[1,2]. 另一洞穴(暂称炼灰洞)位于葫芦洞西1 km左右,其内第四纪洞穴堆积层富含中更新世哺乳动物化石,可以为研究南京直立人的生态环境提供有价值的资料. 2个洞穴第四纪堆积剖面中均夹有数层钙板和石笋,其年代的测定可以可靠地判定南京直立人的生存时代和洞穴地层的对比关系.

在野外采样时,挑选相对纯净、致密又未发生重结晶的石笋和钙板样品,从而避免碎屑钍的引入,确保样品对铀的封闭性. 经显微镜下薄片鉴定,发现这些洞穴碳酸盐均由结晶良好的细小针粒状方解石矿物组成. 粉晶X射线物相分析表明,测试样品均为纯净的低镁方解石,未见文石和粘土等杂质矿物. 铀系测年工作由美国Minnesota大学地质地球物理系同位素实验室完成. 测试仪器为Finnigan MAT262-RPQ质谱仪. 样品预处理,U和Th的分离纯化以及测试流程同文献[3],年代误差为 $\pm 2\sigma$ 测量统计误差.

2 测量结果

表1给出了上述2个洞穴第四纪堆积层中不同层次钙板和石笋的铀系年代测量数据. 样品的铀含量较低,在100~700 ng/g范围内波动. 但在TIMS定年技术条件下可以测至0.5 Ma左右的洞穴碳酸盐沉积年龄. 表1中各样品的²³²Th含量变化较大,最大者可达(111.4 $\pm$ 0.49) ng/g,最低者仅为(0.04 $\pm$ 0.006) ng/g. 由于较高的²³²Th产生较低的电离效率,因而导致被测样品年代误差的增大. 如石笋MS-6样品,其底部层位²³²Th含量最高,实测年代误差达15%左

右. 相反, 对于钙板 XF-1 样品, 其 ^{232}Th 含量较低, 在形成年代大于 0.5 Ma 时间尺度上, 测量误差控制在 6% 左右. 对于形成年代为数万年的洞穴碳酸盐, 其 TIMS 年代测量精度更高, 可以达到小于 1% 的年代精度(如 MS-5B, HL-7, 见表 1), 远优于 α 能谱仪所能实现的精度.

从表 1 所示的年代结果来看, 2 个洞穴碳酸盐形成年代分布范围较宽, 最老的钙板形成于 0.5 Ma 以前, 最新的钙板年龄为 120 ka 左右, 其间还分布有 240 和 450 ka 左右的 2 层钙板. 在葫芦洞内 4 支石笋的发育时段几乎覆盖了 0.5 Ma 以来的中晚更新世, 其中生长时段最长的石笋(MS-1)跨越了 0.3 Ma 左右时段, 其底部年龄为 460 ka 左右, 顶层为 159 ka 左右. 其间还实测了 3 个层位的年龄, 从老至新依次为 $(398 \pm 14/-13)$ 、 (348 ± 10) 和 (258 ± 8) ka (未列于表 1 中), 与该石笋生长层层序相符.

表 1 南京汤山洞穴碳酸盐 U, Th 同位素成分和年龄

洞穴名称	样品层位	样号	$^{232}\text{U}/\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	$^{232}\text{Th}/\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	$\delta^{234}\text{U}$ (测量值)	$^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ (活度比)	年龄/ka
葫芦洞	支洞 层顶	钙板 XF-1	251.0 ± 0.1	0.04 ± 0.006	1.244 ± 0.002	1.332 ± 0.0039	$529 \pm 32/-27$
	大厅南壁底层	石笋 MS-1(T) ^{a)}	154.2 ± 0.3	8.325 ± 0.078	1.3811 ± 0.0038	1.1150 ± 0.0073	159 ± 2
		石笋 MS-1(B)	167.9 ± 0.3	2.615 ± 0.043	1.1639 ± 0.005	1.2101 ± 0.0042	$463 \pm 44/-34$
	大厅钙板层	钙板 ST-2	105.4 ± 0.1	1.12 ± 0.01	1.147 ± 0.002	1.0536 ± 0.0042	239 ± 3.6
	大厅 层顶	石笋 MS-5	696.8 ± 0.5	0.454 ± 0.006	1.2697 ± 0.0011	0.2320 ± 0.0011	21.885 ± 0.120
		石笋 MS-6(T)	244.0 ± 0.2	81.3 ± 1.0	1.064 ± 0.001	0.5885 ± 0.0092	$78 \pm 10/-9$
炼灰洞		石笋 MS-6(B)	202.8 ± 0.4	111.4 ± 0.49	1.045 ± 0.005	0.6996 ± 0.0163	$103 \pm 17/-15$
	大厅西侧	石笋 HL-7	348.9 ± 0.4	0.214 ± 0.004	1.034 ± 0.002	0.2305 ± 0.0010	27.5 ± 0.16
	洞顶壁	钙板 LST-1	188.0 ± 0.5	10.4 ± 0.2	1.475 ± 0.12	1.0337 ± 0.0277	$120 \pm 23/-16$
	剖面顶层	钙板 LST-2	326.8 ± 1.0	3.81 ± 0.4	1.002 ± 0.005	1.0052 ± 0.0042	$452 \pm 71/-46$
	距顶 1.10m	钙板 LST-3	284.0 ± 0.3	1.180 ± 0.005	1.009 ± 0.001	1.0034 ± 0.0031	$512 \pm 45/-34$
	距顶 5.89m	钙板 LST-4	272.2 ± 0.7	2.68 ± 0.03	1.012 ± 0.003	1.0102 ± 0.0043	$548 \pm 150/-75$

a) 同一石笋的 T 和 B 分别代表该石笋的顶层和底层样品

3 讨论

3.1 南京直立人化石时代

图 1 展示了南京直立人头骨化石出土地点——葫芦洞内已揭露的洞穴地层堆积层序. 该洞穴由奥陶系灰岩溶蚀而成, 可以识别出 2 期不同发育阶段的洞穴填充物. 较老一期的洞穴堆积物已固结成岩, 主要分布于葫芦洞南端下方支洞四周及大厅西侧洞壁、洞顶, 其形成时代有待于进一步研究. 较新一期的洞穴堆积物富含中更新世哺乳动物化石, 南京直立人的 2 具头骨和 1 枚牙齿均发现于该套地层中^[2,4]. 如图 1 所示, 这套松散的第四纪洞穴堆积层, 可以进一步划分为 4 个不同的岩性段(图 1 中 ~ 段). 哺乳动物化石集中分布于第 1 层的中下段、第 ④层及第 2 层中的顶部, 构成 3 个层次有序的洞穴文化层. 由于 2 具直立人头骨均为当地农工挖掘所获, 其地层归位问题应该谨慎. 有些学者将这 2 具头骨笼统地归位于第 2 层中^[2,4], 显然是有疑问的. 作者多次走访了现场挖掘农工, 确认 2 具头骨化石分属于 2 个不同层位, 其中 iv 号女性头骨确应分布于第 2 层中, 而 ⑤号男性头骨则应归属于第 ④层, ⑦号头骨不仅在出土位置上与第 ④层相当, 而且该头骨出土时被钙质胶结的特征也佐证了这一点(第 ④

层为富含动物骨骼化石的钙质胶结角砾层)。由此,可以根据本文测年数据,重新认识南京直立人的生存时代问题。从葫芦洞支洞内第 ① 层上覆钙板的实测年代($529 \pm 32/-27$ ka)来看, I 号头骨的年龄至少老于 500 kaBP, 与陈铁梅等人^[2]测定的 350 ka 左右比较, 两者相差较大。我们认为, 本文测定的数据较可靠, 理由是: (i) TIMS 方法测定 U 和 Th 同位素成分的精度远大于 α 能谱仪, 因此, 对于大于 350 ka 左右的样品, α 能谱仪测试误差偏大, 而无法获得正确的结果。而 TIMS 方法可以取得 0.5 Ma 以来洞穴碳酸盐样品的较精确年龄, 并适合于古气候研究的需要^[5]; (ii) 位于该钙板层之上的石笋(MS-1)底部年龄为 $463(+44/-34)$ kaBP (见表 1), 也支持该钙板层的年代测定结果。从地层层序上判断, ③号头骨的年龄比 iv 号头骨年轻, 其年龄应该与第 ④层中灰岩角砾堆积时代一致。第 ④层顶部钙板(样号: ST-2)年代给出了 II 号头骨年龄的上限, 即不晚于 239 kaBP。尽管目前还无法确切判别 ③号头骨的形成时代, 但其年龄范围应该在 529~239 ka 之间。

图1 葫芦洞洞穴堆积物横剖面图

图中纵向比例尺同横向比例尺, 年龄数据指所在层位的钙板或石笋年龄. 1——斑杂状粘土层, 2——黄红色粘土和泥质物, 具纹层构造, 3——哺乳动物化石骨骼, 4——钙质胶结角砾层, 5——钙板和石笋, 6——杂色钙质砂泥岩, 7——奥陶系灰岩, 8——灰岩角砾层

3.2 洞穴环境演变

根据 2 个洞穴碳酸盐的年代测定结果和已发表的洞穴环境资料, 可以对本区第四纪洞穴沉积的环境变迁过程作一初步讨论。按刘金陵^[6]孢粉分析结果, 葫芦洞的第 ① 层显示了温带气候的孢粉组合特征, 应归属于一个冰期。由本次年代测定结果推测, 这一冰期相当于氧同位素 14 段, 按年代和岩性特征, 葫芦洞的第 ① 层可与炼灰洞剖面 3.51~6.05 m 岩性段对比。在这一时期, 2 处洞穴沉积都以水平层理状的细粒粘土为主, 红、黄色粘土条带呈薄互层交互, 显示了静水缓流的水动力条件, 反映了当时的洞底尚有积水。2 处洞穴尚处于潜水位下的低位洞穴发育阶段, I 号头骨及哺乳动物骨骼被洞外片流带入葫芦洞支洞沉积。在氧同位素 13 段 (524~478 ka), 葫芦洞支洞内发育一层边部厚、中心薄的钙板沉积, 披覆在第 ① 层沉积物之上。在炼灰洞 0.90~3.51 m 厚的同期沉积中, 表现为 2 层钙板夹红色粘土层沉积, 红色粘土层内

次生碳酸盐化显著,一般来说,这种洞穴碳酸盐沉积都与间冰期环境有关^[7].从2处洞穴钙板层底面干裂纹构造分析,洞穴已发生抬升而脱离地下潜水位.从炼灰洞碎屑沉积物顶层钙板(LST-2)的年代分析,该沉积层顶部0~0.9 m已落于氧同位素12段(478~423 ka)的寒冷气候环境,其岩性为含砾黄色砂土,粗细混杂,富含动物骨骼,其堆积密度之高,实属罕见.尽管在葫芦洞未取得标志氧同位素12段的年龄数据,但在第④层中灰岩角砾层应属寒冷气候条件下的堆积产物^[7],该层同样富含动物化石,其沉积年代应相当于氧同位素12段.由此推论,⑦号头骨的年龄应落于距今478~423 ka之间.在氧同位素11段(423~362 ka),富含CO₂的洞穴水流充填于葫芦洞第④层中灰岩角砾和动物骨骼之间,形成碳酸盐胶结物,并在第④层顶部覆盖0.5~2 cm厚的薄层钙板,而在炼灰洞剖面,氧同位素11段后缺乏碎屑沉积,仅在此后的氧同位素的奇数段内沉积薄层钙板.按ST-2号钙板年龄,葫芦洞第④层及其上覆厚层钙板(厚达20~30 cm),跨越了氧同位素7~10段.氧同位素7段属典型的间冰期,气候较暖湿,在葫芦洞大厅底部分布较广的厚层钙板及其上覆石笋的发育也是这一暖湿气候的沉积证据.氧同位素6段属经典的Riss冰期.其寒冷程度大于前期的氧同位素8和10段,在葫芦洞大厅内厚达6 m左右的第①层,主要以崩塌岩块、碎石为主,表明它们是寒冷情况下堆积的^[4],应归属氧同位素6段.氧同位素5段以后,葫芦洞处于封闭、半封闭环境,缺乏来自洞外的碎屑沉积,仅发育各种成因类型的洞穴次生碳酸盐,图1中第①层表层最老的石笋核心年龄(距今103 ka左右)提供了这一看法的年代学依据.

综上所述,本文提供了洞穴地层年代学数据与洞穴地层记录的气候环境变迁过程较为吻合,也从另一侧面证实本文测年数据的可靠性.葫芦洞3个层次的洞穴文化层均对应于寒冷的冰期,这一点与徐钦奇等人^[8,9]提出的观点“南京汤山动物群属于单调的北方型动物”是一致的.

致谢 本工作为南京早期人类遗址综合研究部分成果、国家杰出青年基金(批准号:49725307)资助项目.

参 考 文 献

- 1 汪永进,陈琪,刘泽纯,等.南京汤山溶洞石笋连续200 ka古气候记录.科学通报,1997,42(19):2093~2097
- 2 汤山考古发掘队.南京人化石地点.北京:文物出版社,1996.1~299
- 3 Edwards R L, Chen J H, Wasserburg G I. ²³⁸U-²³⁴U-²³⁰Th-²³²Th systematics and the precise measurement of time over the past 500000 years. Earth and Planetary Science Letters, 1987, 81 (1986/87): 175~192
- 4 俞锦标,张兆干,朱诚,等.南京直立人生存环境探讨.中国岩溶,1998,17(1):25~32
- 5 Winograd I J, Coplen T B, Landwehr J M, et al. Continuous 500000 year climate record from vein calcite in Devils hole, Nevada. Science, 1992, 258: 255~260
- 6 刘金陵,穆西南,许汉奎,等.关于南京猿人生存时期的气候环境讨论.地层学杂志,1998,22(1):60~64
- 7 刘泽纯.北京猿人洞穴堆积反映的古气候变化及气候地层学上的对比.人类学学报,1983,2(2):172~182
- 8 徐钦奇,穆西南,许汉奎,等.南京汤山溶洞中更新世哺乳动物群的发现及其意义.科学通报,1993,38(15):1403~1406
- 9 徐钦奇,张宏,许汉奎,等.关于徐州白云洞与南京汤山第1地点的哺乳动物化石.古脊椎动物学报,1997,35(3):217~223

(1998-08-19 收稿,1999-01-08 收修改稿)