

南京汤山洞穴石笋稳定同位素指示的气候与环境意义

汪永进¹⁾ 吴江滢¹⁾ 许汉奎²⁾ 穆西南²⁾

1) 南京师范大学地理科学学院, 210097; 2) 中国科学院南京地质古生物研究所, 210008

内容提要 对南京汤山葫芦洞南壁钙板上支长 82 mm 石笋进行了高精度热电离质谱 (TIMS) 定年及氧碳同位素分析。结果表明, 该支短石笋生长时段长达 300 ka 左右 (距今 463~159 ka), 其底部年龄进一步证实南京直立人生存时代早于 450 ka BP。δ¹⁸O 值变化反映了研究区域冰期与间冰期年均温差可达 10°C 以上, 代表了中国东部冬夏季风环流强度显著增强时期。δ¹³C 值在 MIS6/7 界线上的显著漂移揭示了一次土壤侵蚀事件, 结束了洞穴文化层的堆积历史。

关键词 石笋 氧碳同位素 TIMS 年代 南京汤山

自南京汤山直立人头骨化石发现以来 (穆西南等, 1993), 对其生存时代及其当时的气候环境已有诸多报道。徐钦琦等 (1993) 根据哺乳动物化石组合特征, 推测出其生存年代相当于氧同位素 6 段 (12.7~18.3 ka BP)。陈铁梅等 (1996) 以 ESR 和铀系法确定南京直立人的年龄为 350 ka BP 左右。汪永进等 (1992) 根据一支具有地层学意义的石笋的铀系不平衡法测年, 认为南京直立人化石层位可能属于氧同位素 12 段。鉴于南京直立人在研究早期古人类演化史上的重要地位, 有必要进一步深入探讨其生存时代和环境。因此, 笔者于 1997 年 3 月在该洞南壁剖面上采集到一支石笋, 通过 TIMS 精确定年及稳定同位素地球化学的研究, 对南京直立人生存时代和洞穴环境有了进一步的认识。

1 样品与测试方法

葫芦洞位于南京市汤山镇西雷公山北麓 (穆西南等, 1993), 石笋样品 MS-1 采集于该洞大厅南侧钙板层之上, 其地层时代显然晚于南京直立人 I 号头骨化石层位 (图 1)。该石笋长 82 mm, 沿生长轴方向切开, 可见细密的生长条带, 条带呈现乳白、黄褐色, 明暗宽窄不等。方解石结晶颗粒细小, 纯净致密, 没有明显的重结晶现象。氧碳同位素分析样品以刻刀平行于生长纹层取样, 样距 1 mm, 样量 30 mg, 共采样 82 个。每隔 9 个样品有 1 个标准样监测, 由南京地质古生物研究所同位素实验室完成。磷酸反应法制取 CO₂, MAT-251 质谱仪检测, PDB 标准, 误差 < ±0.2‰。测年样品用切片机切割成薄片, 并进一步磨制成厚 0.5 mm 薄片状。测试方法采用高精度热电离质谱铀系测年技术 (TIMS), 由美国明尼苏达大学地质地球物理系同位素实验室完成。测试仪为 Finnigan MAT262-RPQ 质谱仪。样品预处理, U、Th 的分离纯化及测试流程与 Edwards 等 (1987) 相同, 年代误差为 ±2σ 测量统计误差。

注: 本文为南京汤山早期古人类遗址综合研究课题组的部分成果。

本文 1999 年 5 月收到, 11 月改回, 刘淑春编辑。

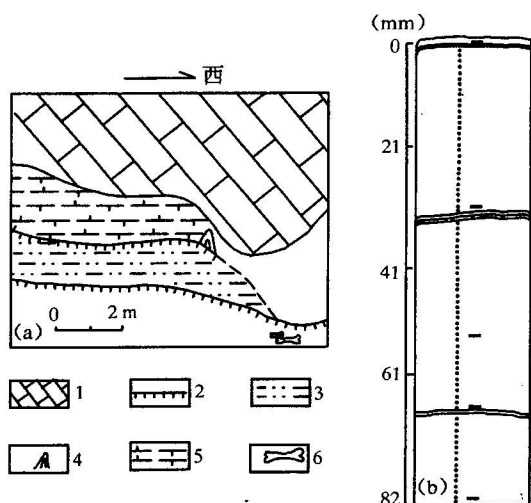


图1 南京汤山葫芦洞南壁剖面及 MS-1 石笋采集位置(a)和样点图(b)

Fig. 1 The profile of south wall, locality of the stalagmite MS-1 in Hulu Cave, at Tangshan, Nanjing (a) and subsamples taken from the stalagmite (b)

(a): 1—灰岩; 2—钙板; 3—碎屑层; 4—石笋; 5—疏松多孔状碳酸盐; 6—骨化石; (b): ·—氧碳同位素采样点; —TIMS 测年点
(a): 1—Limestone; 2—calcareous top; 3—debris sediments; 4—stalagmite; 5—spongy cave carbonate; 6—fossil of animal bone; (b): ·—subsamples for stable isotope analyses; —subsamples for TIMS-U series dating

2 TIMS 年代

表 1 给出了该石笋从顶至底 5 个层位的 U、Th 同位素成分和 ^{230}Th 年龄。从实测年代结果来看, TIMS 年龄不仅比传统的 α 能谱具有较高的测量精度, 而且所测时限范围可达 500 ka BP, 因此被认为是当前第四纪测年的重要手段之一(彭子成, 1997)。根据年龄-深度作图(图 2)可知, 该石笋生长速率比较稳定和缓慢, 其平均值为 0.27 mm/ka。为进一步验证 TIMS 年龄的可靠性, 我们把石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线与深海 659 孔氧同位素曲线进行了对比(详见后述), 获得石笋剖面氧同位素段各界点的对比年代。这些对比年代点基本上落于图 2 所示的石笋生长曲线附近, 说明绝对测年与气候对比年代基本一致。目前我们还尚难解释本研究石笋为什么具有 300 ka 左右的生长时段和极其缓慢的沉积速率, 也很难证实其间是否存在长时段的沉积间断。但从实测年龄分布点以及氧同位素曲线来看, 该石笋基本上包含了 4 个完整旋回的冰期一间冰期古气候信息。根据图 1 所示的石笋分布层位分析, 石笋核心年龄(463^{+44}_{-43} ka BP)可以代表南京直立人 I 号头骨化石年龄的上限, 进一步证实了南京直立人生存时代不晚于 450 ka 这一观点(汪永进等, 1992)。

表 1 石笋 MS-1 U、Th 同位素成分和 ^{230}Th 年龄

Table 1 U, Th isotopic compositions and ^{230}Th ages from the stalagmite MS-1

样号	$^{238}\text{U}(\times 10^{-9})$	$^{232}\text{Th}(\times 10^{-9})$	$\delta^{234}\text{U}$ (测量值)	$^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ (活度比)	年龄(ka)
MS-1-01	154.2 ± 0.3	8.325 ± 0.078	1.3811 ± 0.0038	1.1150 ± 0.0073	159 ± 2
MS-1-02	70.4 ± 0.1	0.190 ± 0.013	1.3384 ± 0.0080	1.2990 ± 0.0077	258 ± 8
MS-1-03	152.1 ± 0.2	1.604 ± 0.010	1.2127 ± 0.0034	1.2323 ± 0.0040	348 ± 10
MS-1-04	248.2 ± 0.2	11.868 ± 0.131	1.1689 ± 0.0014	1.1987 ± 0.0044	398^{+14}_{-13}
MS-1-05	167.9 ± 0.3	2.615 ± 0.043	1.1639 ± 0.0050	1.2101 ± 0.0042	463^{+44}_{-43}

3 氧同位素古气候意义

洞穴古气候的重建在很大程度上有赖于对石笋氧同位素的研究。若 $\text{CaCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ 两相体系中同位素交换抵达平衡, 则可根据 O'Neil 测温方程(O'Neil et al., 1969)计算出石笋生长时的温度。该温度代表当地地表一年或多年均温(Hendy, 1971a, b)。在东亚季风区, 石笋同位素的长时段变化趋势往往反映了洞穴古温度的变化(李红春等, 1998a, b)。但若要从石笋氧同位素值计算古温度时, 必须测定各时期古岩溶水的同位素成分。近年来, 以现代岩溶水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值

(朱洪山, 1992; Talma et al., 1992)取代方解石晶体中液相包裹体水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值(李彬, 1986; 洪阿实等, 1995), 也被广泛应用于古温度的测试。

为了判定本研究石笋同位素是否抵达平衡, 我们根据石笋剖面上 82 个 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值进行了相关分析(图 3)。较低的相关系数($r=0.5892$)说明 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 之间缺乏较强的相关性, 按 Hendy (1971) 准则, 该石笋沉积时达到了同位素交换平衡状态, 可以反映洞穴古气温的变化。石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化范围从 -6.381‰ ~ -8.838‰ , 最大变幅为 2.4‰ , 平均值为 -7.624‰ 。根据实测年代, 我们将石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线与北大西洋 659 孔深海氧同位素曲线进行对比(图 4), 两者之间具有极其相似的变化规律, 说明石笋氧同位素古气候记录具有全球性的演化特征。更为重要的是, 我们从石笋氧同位素曲线上检出了东亚季风区气候变化的区域性特征: ① 从 463~159 ka BP 期间, 即相当于深海氧同位素(MIS)13~6 阶段, 石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线峰值逐步变小, 说明各间冰期洞穴古温度有逐渐下降的趋势, 在中国黄土高原堆积序列中, 对应 MIS13 段的 S5 层古土壤, 其磁化率代用指标指示了较强的成壤作用强度。而其上三层古土壤(S4—S2)显示了相对较弱的成壤作用强度(陈骏等, 1998)。这种成壤作用的差异反映了东亚夏季季风环流强度有逐渐衰弱的趋势。由此看来, 中国东部洞穴石笋记录与黄土高原古气候记录有着相似的变化趋势。② 冰期与间冰期温差变化较大。据研究, 在 0.6~0.1 Ma BP 期间东亚季风环流达到了最强盛时期, 冰期中气候极端寒冷, 间冰期气候非常暖湿(潘保田等, 1995)。这种冰期—间冰期古气候的鲜明对比在石笋氧同位素记录中表现较为明显。若假定洞穴岩溶水的同位素组成在地质历史时期基本不变, 那么, 我们可以根据石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 值计算冰期—间冰期温度变幅。计算表明这种温差变幅最大可达 10.2℃ , 反映 0.6~0.1 Ma 间加强的冬夏季季风环流强度也深刻地影响中国东部沿海地区。中晚更新世南京地区的下蜀黄土堆积地层是这一季风气候特征的相关沉积证据。

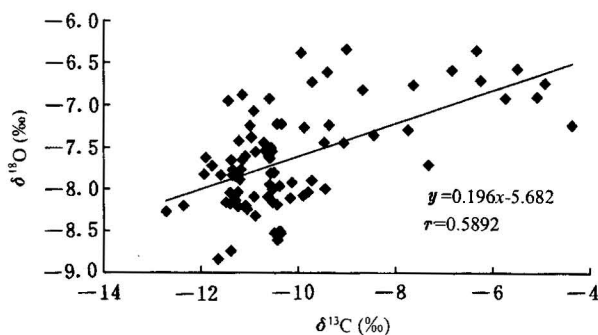


图 3 MS-1 石笋氧碳同位素相关分析图

Fig. 3 Correlation analyses of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values of the stalagmite

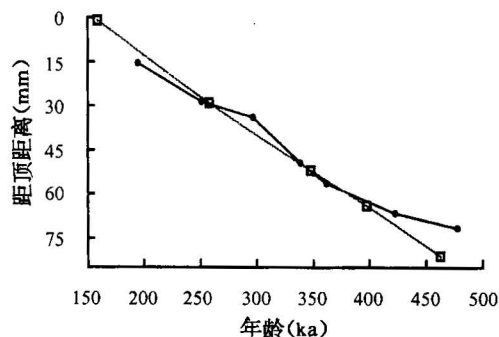


图 2 南京汤山葫芦洞 MS-1 石笋生长速率图

Fig. 2 Growth rate of the stalagmite MS-1

- 与深海氧同位素曲线对比的界点年龄;
- TIMS 实测年龄
- Ages correlated from the marine isotope stages;
- TIMS dated ages

4 $\delta^{13}\text{C}$ 漂移事件

石笋的碳同位素组成通常被认为反映了洞穴上部的植被特征。因为洞穴上部 C_3 、 C_4 植被的丰度决定了土壤 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 而在很多情况下, 土壤 CO_2 中 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化将直接反映在石笋中(Dorale et al., 1992)。在温带地区, 湿润森林以 C_3 型植被占优势, 通过 Calvin-Beson 光合作用途径, 使土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 值达 -27‰ ~ -24‰ , 而以 Hatch-Slack 为光合作用途径的 C_4 型植被则更适于生长在干暖环

境,在其作用下,土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 值介于 -14‰ ~ -12‰ 之间。石笋的 $\delta^{13}\text{C}$ 当然还受到其他因素的控制,如大气 CO_2 等。特别是近来 Baker 等(1997)指出,石笋表面滴水速率的变化等对 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响往往大于 C_3/C_4 植被变化,有时甚至完全掩盖其作用。

从图 4 所示 $\delta^{13}\text{C}$ 变化曲线,其波动特征与 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线具有一定的相关性,如对应于 MIS13 段,石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏负,最低达到 -8.838‰ , $\delta^{13}\text{C}$ 值均为 -12‰ 左右,反映这一时期气候较适宜,洞穴外以 C_3 型森林植被占优势。葫芦洞支洞内的钙板沉积,也反映了这种间冰期环境。进入氧同位素 12 段后, $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 值均升高,表明随着气温的下降,降水也逐步减少,冷干的气候条件使洞穴上覆土壤带植被不发育或 C_4 型植被占有相当比例,共存的孢粉组合(刘金陵等,1998)及哺乳动物群组合特征(徐钦琦等,1997)均反映了这一寒冷气候。

令人更为感兴趣的是,石笋的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在距顶 12 mm 处(对应于 MIS6/7 界面)发生了显著正向漂移。在 MIS6/7 界面以下层段,石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 值的波动幅度较小,基本在 -13‰ ~ -9‰ 范围内。但在 MIS6/7 界面附近, $\delta^{13}\text{C}$ 值突然增至 -4‰ ~ -6‰ 。 $\delta^{13}\text{C}$ 值的显著漂移很难用植被类型更替机制来解释。我们认为,这种 $\delta^{13}\text{C}$ 值突变现象反映了一次显著的洞穴地貌演化事件。从洞穴碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化的机制分析,只有当洞穴上覆土壤带被侵蚀殆尽时,来自大气降水的地表水体(其 $\delta^{13}\text{C}$ 一般为 -6‰ ~ -7‰)直接渗入本区洞穴基岩——奥陶系海相灰岩裂隙或管道中,发生地表雨水与海相灰岩的碳同位素平衡交换,从而产生 $\delta^{13}\text{C}$ 值更为正偏的岩溶渗透水,致使洞穴次生碳酸盐沉积物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著增高。因此,石笋记录的 $\delta^{13}\text{C}$ 漂移可能指

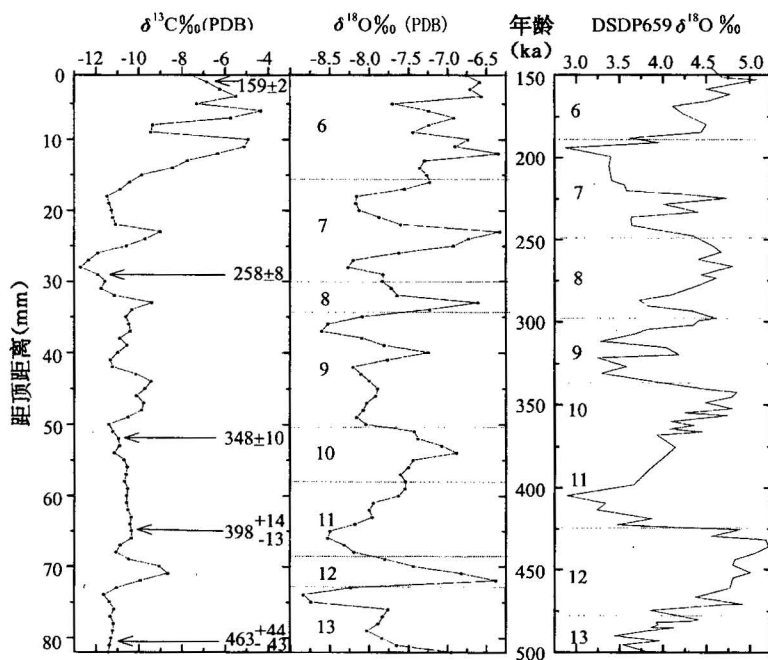


图 4 MS-1 石笋碳、氧同位素与西北非洲 Verde Plateau 海岬 659 孔 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线对比图

Fig. 4 Curves of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ on the profile of the stalagmite MS-1 and their correlation with the $\delta^{18}\text{O}$ record of the core 659 from the Cape Verde Plateau off northwest Africa

图中左栏箭头标号旁数字代表对应石笋层位的测年值(ka BP);右两栏中数字(6~13)代表深海氧同位素段

Left one column—the number on the arrows represents the dated age (ka BP) corresponding to indicating layer of the stalagmite. Right two columns—the number (6~13) represents the marine isotope stages

示了洞穴上覆土壤侵蚀事件。我们推测,这种土壤侵蚀事件与前期洞穴局部崩塌作用密切相关。据钙板和石笋 TIMS-铀系年代测定结果(汪永进等,1999),位于葫芦洞大厅中部厚达 10 余米的崩塌堆积物发生于 MIS6 段(经典的 Riss 冰期)。发生于这一时期的洞穴崩塌作用,不仅导致了洞穴地貌的显著变化,使洞穴上覆土壤层易遭侵蚀;而且造成了原始洞口的封闭或堵塞,自此洞内缺失来自洞外的风化残积碎屑物和生物化石,结束了洞穴文化层的发育。

5 结论

根据石笋的 TIMS 测年数据和洞穴地层的对比,再次证实了南京直立人生存时代早于 450 ka B P。石笋氧同位素曲线反映了 463~159 ka 期间内发生 8 次大的气温波动过程,大致对应于氧同位素的 6~13 段。但氧同位素曲线同时也反映出东亚季风区鲜明的气候特色,即:夏季风环流强度具有逐渐衰减趋势,冰期—间冰期冷暖、干湿变化更为显著。石笋碳同位素记录指示了洞穴环境在 MIS6/7 界线附近发生了巨大变化,反映出一次洞穴上覆土壤侵蚀事件,这一事件的发生可能与 MIS6 阶段的洞穴崩塌作用有关。

感谢美国明尼苏达大学地质地球物理系同位素实验室程海博士为本文测定 TIMS 年龄。

参 考 文 献

- 陈骏,安芷生,汪永进等. 1998. 最近 800 ka 洛川黄土剖面中 Rb/Sr 分布和古季风变迁. 中国科学, 28(6):498~504.
- 陈铁梅,杨全,胡艳秋. 1996. 南京人化石地点年代测定报告,南京人化石地点. 北京:文物出版社, 254~258.
- 洪阿实,彭子成,李平等. 1995. 福建宁化天鹅洞石笋晚第四纪同位素古温度研究. 地球化学, 24(2):138~144.
- 李彬. 1986. 日本名古屋大学中井信子教授来我所访问讲学. 中国岩溶, 5(4):232.
- 李红春,顾德隆,陈文寄等. 1998a. 高分辨率洞穴石笋中稳定同位素应用——北京元大都建立后对森林资源的破坏—— $\delta^{13}\text{C}$ 记录. 地质论评, 44(5):456~463.
- 李红春,顾德隆,Lowel D S 等. 1998b. 高分辨率洞穴石笋稳定同位素应用之一——京津地区 500 a 来的气候变化—— $\delta^{18}\text{O}$ 记录. 中国科学, 28(2):181~186.
- 刘金陵,穆西南,许汉奎等. 1998. 关于南京猿人生存时期的气候环境讨论. 地层学杂志, 22(1):60~64.
- 穆西南,许汉奎,穆道成等. 1993. 南京汤山古人类化石的发现及其意义. 古生物学报, 32(4):393~400.
- 潘保田,李吉均. 1995. 东亚季风演变与青藏高原隆起的关系研究. 见:孙鸿烈主编. 青藏高原形成演化、环境变迁与生态系统研究. 北京:科学出版社, 273~281.
- 彭子成. 1997. 第四纪年龄测定的新技术——热电离质谱铀系的发展近况. 第四纪研究, (3):258~264.
- 汪永进,陈琪,刘泽纯. 1992. 南京猿人洞石笋年代学研究及其古气候记录. 地理科学, 19(1):82~87.
- 汪永进, Hai Cheng, 陆从伦等. 1999. 南京汤山洞穴碳酸盐沉积物的 TIMS 铀系年代. 科学通报, 44(14):1548~1551.
- 徐钦琦,穆西南,许汉奎等. 1993. 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, 38(15): 1403~1406.
- 徐钦琦,张宏,许汉奎. 1997. 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, 35(3): 217~223.
- 朱洪山. 1992. 44 万年来北京地区石笋古温度记录. 科学通报, 37(21):1880~1883.
- Baker A, Ito E, Smart P R, et al. 1997. Elevated and variable values of $\delta^{13}\text{C}$ in speleotherms in British Cave System. Chemical Geology, 136:263~270.
- Dorale J A, Gonzalez L A, Reagan M K, et al. 1992. A high-resolution record of Holocene climate change in speleothem calcite from Cold Water Cave, Northeast Iowa. Science, 258: 1626~1630.
- Edwards R L, Chen J H, Wasserburg G I. 1987. ^{238}U - ^{234}U - ^{230}Th - ^{232}Th systematic and the precise measurement of time over the past 500,000 year. Earth and Planetary Science Letters, 81 (1986/87): 175~192.
- Hendy C H. 1971a. The isotopic geochemistry of speleothems. Part 1. The calculation of the effects of different modes of formation on the isotopic composition of speleothems and their applicability as paleoclimatic indicators. Geochimica et Cosmochimica Acta, 35: 801~824.
- Hendy C H. 1971b. The isotopic geochemistry of speleothems and its application to the study of past climates. (Ph. D. Thesis): Wellington New Zealand, Victoria Univ., 476.
- O'Neil J R, Clayton R N, Mayeda T K. 1969. Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates. J. Chem. Phys., 51

(12): 5547~5558.

Talma A S, Vogel J C. 1992. Late Quaternary Paleotemperatures derived from a speleothems from a Cango cave, Cape province, South Africa. *Quaternary Research*, 37: 203~213.

Palaeoclimatic and Environmental Significance as Indicated by the Stable Isotopic Composition of Cave Stalagmite in Tangshan, Nanjing

Wang Yongjin¹⁾ Wu Jiangying¹⁾ Xu Hankui²⁾ Mu Xinan²⁾

1) *Geography Department, Nanjing Normal University, Nanjing, 210097*

2) *Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, 210008*

Abstract

Stalagmite, secondary calcite deposits formed in caves, has long been used to infer climate histories based on the variation of the stable isotopic compositions. Here the discussion focuses on a long-term regional climate change and local cave environment evolutions based on the stable isotope records of a 82 mm-long stalagmite from Hulu Cave at Tangshan town, Nanjing city. Using the thermal ionization mass spectrometer techniques, five subsamples taken from the stalagmite were dated. The dated results with high precise suggested that the stalagmite developed from 463~159 ka BP, and that the fossils of Nanjing *Homo erectus* beneath the dated sample in the cave stratigraphy should be older than 450 ka BP. Oxygen isotope variation of the stalagmite, representing regional palaeoclimate changes above the cave, showed four cycles of glacial and interglacial periods matching the marine oxygen stages 13~6. The stalagmite-based climate signal gives a long-term cooling tendency from 463~159 ka BP. The authors estimated differences at mean annual temperatures between glacial and interglacial periods from the oxygen isotopic composition of stalagmite calcites, provided that the isotopic composition of the meteoric waters has not been changed since the deposition of the stalagmite. The dramatic difference at the average annual temperature with the maximum value of 10.2°C consequently confirms that the East Asian monsoon circulation in eastern China was strengthened during a geological period of 0.6~0.1 Ma B. P. Measurement of $\delta^{13}\text{C}$ in the stalagmite suggests that changes of plant cover above the cave took place at a slow rate of transition of glacial/interglacial stages. The dramatic shift of the $\delta^{13}\text{C}$ value at the boundary of MIS 6/7, from $-13\text{‰} \sim -9\text{‰}$ to $-4\text{‰} \sim -6\text{‰}$, could not be explained with the mechanism of vegetation change. We believed that the shift of $\delta^{13}\text{C}$ was indicative of an event that the soil cover above the cave has been eroded. Such conditions would favor a direct exchange of oxygen and carbon isotopic compositions between meteoric waters and wall rocks (marine limestones), producing heavily ^{13}C -enriched value in the cave stalagmite.

Key words: stalagmite; O and C isotopic composition; TIMS age; Tangshan in Nanjing

作 者 简 介

汪永进,男,1959年生。1987年毕业于南京大学地质系。现任南京师范大学地理科学学院副教授,长期从事第四纪气候与环境研究工作。通讯地址:210097,南京师范大学地理科学学院;电话:(025)3739725。