

桂林响水洞 6.00 ka B P 以来 石笋高分辨率的气候记录

张美良 袁道先 林玉石 覃嘉铭 章程

(中国地质科学院岩溶地质研究所,岩溶动力学开放研究实验室,广西桂林 541004)

程海

(美国明尼苏达大学地质与地球物理系,美国 MN55455)

摘要 通过对桂林响水洞的石笋进行高精度的 TIMS-U 系测年和 C、O 同位素分析,建立了中全新世 6.00 ka B P 以来桂林地区高分辨率的古气候变化时间序列。石笋剖面的 C、O 同位素记录揭示,桂林地区中全新世(6.00 ka B P)以来的季风气候变化,大致可分为 2 个气候期:6.00~3.57 ka B P 为气候适宜期,显示东亚夏季风由强盛逐渐变为减弱的趋势,为气候温暖湿润期;3.57~0.37 ka B P 为降温期,显示东亚夏季风减弱,冬季风增强以及气候的大幅度波动。在这一降温期,间夹多次短暂的温暖期。石笋同位素记录的研究结果表明,在 6.00~0.37 ka B P 间的中全新世——气候适宜期, $\delta^{18}\text{O}$ 值由偏负逐渐向偏正的变化趋势,反映东亚夏季风由强变弱,降雨由多变少,气温由高变低的变化趋势。

关键词 石笋 TIMS 年龄 气候记录 桂林响水洞

High Resolution Climatic Records of Stalagmite from Xianshui Cave in Guilin since 6.00 ka B P

ZHANG Meiliang YUAN Daoxian LIN Yushi QIN Jiaming ZHANG Cheng

(Karst Dynamics Laboratory, Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi, 541004)

CHENG Hai

(Geographics Department, Minnesota University, MN55455, USA)

Abstract The time sequence of high resolution paleoclimatic change since the middle Holocene——6.00 ka B P has been reconstructed by ages of the high precision TIMS-U series and an analysis of carbon and oxygen isotopes of stalagmite from Xianshui cave in Guilin. Carbon and oxygen isotopic records of stalagmite section reveal that the monsoon climate changes since the middle Holocene——6.00 ka B P can be divided approximately into two climate periods: ① Climate optimum time of 6.00~3.57 ka B P, during which the East Asian (or Southeast) Monsoon changed gradually from strong to weak and the climate was warm and humid; ② Temperature-falling period of 3.57~0.37 ka B P, when the East Asian Summer Monsoon became weak, the Winter Monsoon became strong and the climate experienced considerable variation. This temperature-falling period was intercalated with many short warm periods. Isotope records of stalagmite show that $\delta^{18}\text{O}$ values of stalagmite change from negative to positive, suggesting that, during the middle Holocene climate optimum period(6.00~0.37 ka B P), the East Asian Summer Monsoon evolved from strong to weak, the Winter Monsoon changed from weak to strong, the rainfall gradually decreased, and the air temperature gradually fell.

Key words stalagmite ages of TIMS-U series climate record Xianshui cave of Guilin

本文由 IGCP-48 国际对比项目、科技部攀登项目“全球岩溶生态系统对比”(编号:2000-026)和国家自然科学基金项目(编号:4052002)资助。

改回日期:2002-4-15,责任编辑:宫月萱。

第一作者:张美良,1956年生,高级工程师,区域岩溶与古环境研究,E-mail: mlzh@karst.edu.cn。

全新世是第四纪最近一次冰川消融期,又称冰后期,也有人认为是一次新的间冰期,它与人类的生存与发展密切相关(刘嘉麒等,2001)。其气候和环境变化的研究日益受到各国研究者的重视。关于全新世气候和环境变化的研究,在海洋、冰心、湖泊沉积物和黄土等沉积物中,已做了比较详细的研究,并取得了较为满意的成果(刘东升等,1985;孙建中等,1991;刘泽纯等,1991)。国外利用洞穴石笋对全新世气候和环境变化做了较多的研究,如 Jones 等(1995)探讨了美国 Iowa 东北 6.00 ka 以来 cold water cave 石笋的生长条带的发光性以及年层或季节沉积变化;Dorale-Jeffrey(1992)利用洞穴方解石的同位素记录,探讨了美国 Iowa 东北的全新世气候变化;Genty-Dominique 等(2001)探讨了现代石笋年内和年际的生长速率,国内的研究相对较少,主要有 Li-Bin 等(1996)利用桂林盘龙洞石笋的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素记录,重建了桂林地区 36.00 ka 以来的气候变化记录;李红春等(1997)利用石花洞石笋的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素记录,重建了北京地区 3.00 ka 以来的古气候和古环境变化;林玉石等(2001)利用云南泸沽湖仙人洞的 2 个石笋的 TIMS-U 系年龄和 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素记录,重建了云南宁蒗泸沽湖地区 9.00 ka 以来的气候变化记录;Cai Yanjun 等(2001)利用贵州七星洞石笋的同位素记录,对贵州地区 7.70 ka 以来的季风气候变化进行了探讨。本文根据响水洞石笋的 TIMS-U 系测年和 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素记录,重建了桂林地区 6.00 ka 以来的季风气候变化序列,探讨了东亚季风气候变化对桂林地区中全新世以来气候变化的影响作用。

1 样品采集和分析

1.1 采样洞穴概况

响水洞位于灌阳县观音阁镇东北 2.5 km 处,是桂平岩-观音阁 NE 的孤峰化峰簇洼地山区的东北缘,洞口高程 400 m(图 1)。成洞围岩为中泥盆统泥晶生物屑灰岩、泥晶颗粒灰岩、白云岩化层孔虫灰岩、灰岩和中-细晶白云岩。洞穴发育受 NNE 和近 EW 向的断裂、裂隙控制,洞体主要呈 NE、NNE 向展布,局部呈近 EW 向转折,为一裂隙状峡谷型洞道。洞长 366.5 m,宽 3~5 m,最宽 11 m,最窄 1 m,高 10~13 m,最高 22.7 m,最低 0.5 m,主洞道呈贯通式层楼结构,洞顶覆盖层厚大于 100 m。洞穴沉积物较发育,化学沉积物有石笋、石柱、壁流石、石花、石葡萄等;碎屑沉积物有砾卵石层、钙结砾

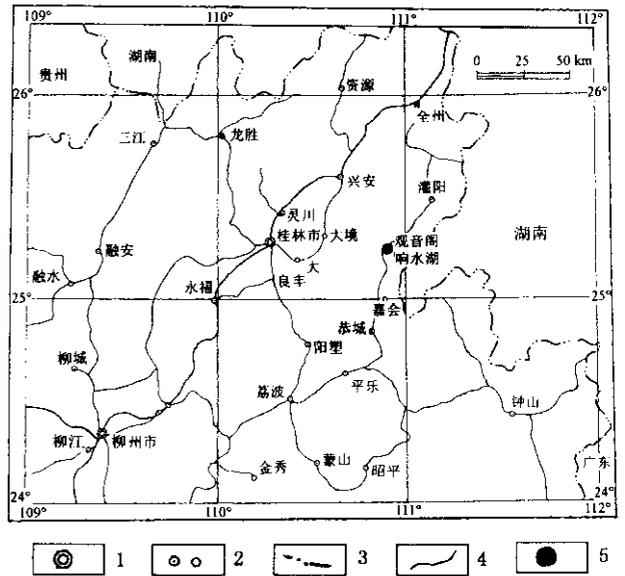


图 1 研究区区域位置及洞穴位置图

Fig. 1 The regional location and distribution place of cave in the research area

- 1-主要城市 2-县、镇 3-省界 4-公路 5-洞穴位置
1-main city 2-county and town;
3-provincial boundaries 4-highway 5-cave location

石层和粘土砾石层等。

此次研究的石笋采自距洞口 300 m 处的峡谷型洞道顶部,笋高 70 cm;笋径 10~15 cm,呈锥柱状;笋顶 3~4 cm,现仍在生长,形成 0.5~1.5 cm 厚的雪白色方解石壳(纹)层,呈不对称叠复。石笋底部钙华层厚 10~25 cm,砾石层厚 75~150 cm,其下为深 100 cm 的峡谷型洞道,谷宽 50 cm 左右,谷底水深约 20 cm,石笋无受浸泡痕迹。

1.2 样品采集

响水洞石笋沿中心轴切开后,内部年轮或纹层清晰,根据石笋剖面的结构构造特点,可以分出 7 个沉积旋回,每个旋回厚 5~12 cm。每个旋回还有 3~6 个微纹(壳)层组或亚旋回,石笋基本为连续沉积。石笋表现为灰色-灰白色,结晶较好,呈致密状,由 0.1~1.5 mm 厚的微粒-针状方解石纹层组成,沉积纹层清晰,无明显的重结晶现象。

C、O 同位素样品主要沿石笋的中心轴,按 1 cm 的间隔,用小型可调速钻机直径为 1.5 mm 钻头钻取 20~40 mg 碳酸盐粉样,取样 74 个,其中 4 个为平行样。TIMS-U 系测年样,按石笋沉积中心部位,用直径为 8 mm 取心钻头钻取,每件样品约为 400 mg,取样厚度约为 0.5~1.0 cm,取测年样 4 个。

1.3 样品分析和测试

年龄样品采用 TIMS-U 系年代测定,由美国明尼苏达大学地质与地球物理系同位素实验室完成,

稀释剂采用²²⁹Th-²³³U-²³⁶U,同位素分析采用 Finnigan MAT262-RPQ 质谱仪,年龄误差多数小于 1% (2σ, 以下同),万年级以来的样品年龄误差一般为几百年至百年内,百年级的样品年龄误差大致为几十年或在 10 a 内。

C、O 同位素由国土资源部岩溶地质研究所实验室完成。一般采用 20 mg 左右的碳酸盐粉末与 100% 磷酸反应生成 CO₂,经纯化后于 MM-903E(英国 VG 公司)进行同位素分析,δ¹³C 与 δ¹⁸O 值为相对于 PDB 标准,系统误差小于 0.1‰。

2 时间标尺建立

响水洞石笋的 TIMS-U 系测定年龄如下表所示(表 1),石笋形成年龄在 6.00~0.37 ka B P 之间,经历了 5.63 ka 的沉积或生长时间。石笋生长较快,平均沉积速率为 12.44 mm/100a,属中全新世的产物。

石笋沉积剖面的结构构造、岩性和纹层形态特征显示当时洞顶滴水较均匀,但滴水点稍有摆动,石笋基本为连续沉积。根据 4 个 TIMS-U 系年龄,采

表 1 桂林灌阳响水洞石笋铀系年龄值

Table 1 The dating ages of TIMS-U series from Xianshui cave stalagmite of Guanyang, Guilin

样品号	距石笋顶/cm	²³⁸ U/10 ⁻⁶	²³² Th /10 ⁻⁶	δ ²³⁴ U 测量值	²³⁰ Th/ ²³⁸ U 活度比	δ ²³⁴ U 初始值	²³⁰ Th t/ka
XU-1	2.80	69.0±0.2	923±8	503.2±4.6	0.0103±0.0005	503.9±4.6	0.49±0.14
XU-2	38.0	55.7±0.1	687±8	505.2±2.5	0.0370±0.0007	509.1±2.5	2.48±0.13
XU-3	64.0	173.1±0.5	1956±13	433.9±3.1	0.0715±0.0009	440.5±3.2	5.35±0.14
XU-4	69.5	110.0±0.5	1711±8	420.0±5.2	0.0800±0.0011	427.1±5.3	6.00±0.18

注 λ₂₃₀=9.1577×10⁻⁶ y⁻¹; λ₂₃₄=2.8263×10⁻⁶ y⁻¹; λ₂₃₈=1.55125×10⁻⁶ y⁻¹; 石笋 TIMS U-系年龄,由美国明尼苏达大学地质地球物理系同位素实验室完成。

用线性内插方法获得该石笋时间标尺。

3 C、O 同位素记录

根据石笋沉积剖面的岩性特征,C、O 同位素样品主要沿石笋的中心轴,按 1 cm 的间隔采取,全笋总共取样为 74 个(其中 4 件为平行样),每件样品所代表的平均年龄分辨率为 0.087 ka。

C、O 同位素记录的变化曲线如图 2 所示(图 2,表 2),呈现锯齿状的波动特征,与石笋沉积旋回具有较好的对应关系。在 6.00 ka B P 以来的中全新世 δ¹⁸O 的平均值为 -6.15‰,δ¹³C 的平均值为 -8.29‰,与 1997 年测得的现代洞穴滴水 δ¹⁸O (-6.16‰~-6.66‰)和现代沉积碳酸盐的 δ¹³C (-8.96‰)非常接近。所以,可以 δ¹⁸O 的此平均值代表 6.00 ka B P 的平均正常气候条件,当大于这一平均值的时期指示气候变冷或变凉,显示降水减少或相对偏干,反之,显示降水增多,气候变暖。δ¹³C 平均值可作为 C3、C4 植物相对丰度的分界点。

4 古气候变化记录

据石笋的 TIMS-U 系年龄和 O、C 同位素曲线的波动形式,可将 6.00 ka B P 以来的气候变化,划

分为 2 个曲线段的气候类型:①6.00~3.57 ka B P 期间稳定的气候适宜期;②3.57~0.37 ka B P 期间相对波动的降温期,在其内包括若干个由干冷到暖湿或由暖湿到干冷的气候变化亚期。根据同位素曲线的变化趋势,大致可将桂林地区近 6.00 ka B P 来的古气候环境演化序列初步建立如下。

4.1 6.00~3.57 ka B P 期间稳定的气候适宜期

在 6.00~3.57 ka B P 期间,位于石笋剖面 70~48 cm 层段,δ¹⁸O 平均值为 -6.41‰,δ¹³C 为 -8.45‰,与 6.00 ka B P 以来石笋的 δ¹⁸O、δ¹³C 平均值以及现代洞穴滴水和现代沉积碳酸盐的 δ¹⁸O、δ¹³C 值相比,均趋向于偏负。δ¹⁸O 显示东亚夏季风相对较强,有效降水相对较大,表明气候相对稳定,为温暖湿润的气候环境。而 δ¹³C 值在约 5.00 ka B P 左右有一个低谷区(或高值区为 -6.93‰),正好对应于 61.5 cm 处的沉积旋回分界面上,δ¹³C 值的增加可能与界面上富含泥质物对碳的相对富集有关,该阶段利于木本植被生长,主要为 C3 植物。该阶段是全新世大暖期相对暖湿气候特征的延续,在总体上,气候表现为从温暖湿润环境逐渐向冷凉环境转换。

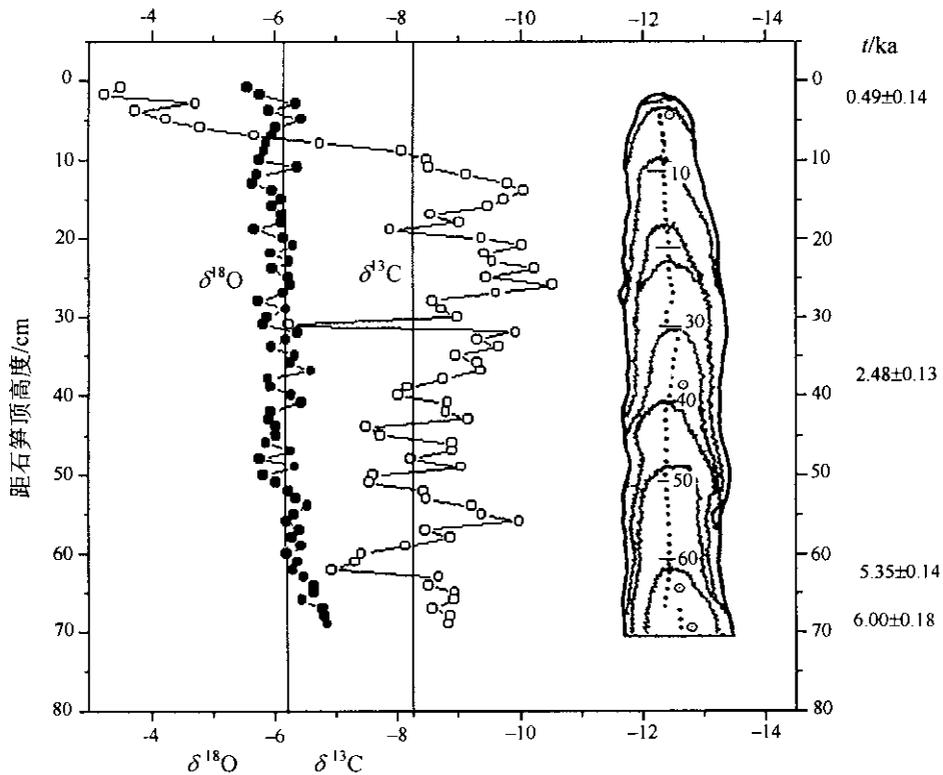


图2 灌阳县响水洞石笋 C、O 同位素记录

Fig.2 Records of carbon and oxygen isotope from stalagmite of Xianshui cave, Guanyang

4.2 3.57~0.37 ka B P 期间相对波动的降温期

在 3.57~0.37 ka B P 期间, $\delta^{18}\text{O}$ 平均值为 -5.9‰ , $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -8.25‰ , 与 6.00 ka B P 以来石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值以及现代洞穴滴水 and 现代沉积碳酸盐的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 值相比, 趋向于偏正或偏重。 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的变化曲线呈不稳定的波动特征, 经历了多次由干冷到暖湿或由暖湿到干冷的气候变化, 反映本阶段东亚夏季风强度明显减弱, 东亚冬季风增强, 有效大气降水相对减少, 气候表现为以寒冷或冷凉为主, 间夹短暂的温暖期。

4.2.1 相对冷凉期 (3.56~2.48 ka B P) 在 3.56~2.48 ka B P 期间, 位于石笋剖面 49~38 cm 层段, $\delta^{18}\text{O}$ 平均值为 -6.04‰ , $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -8.45‰ , 其 $\delta^{18}\text{O}$ 趋向于偏正或偏重, 而 $\delta^{13}\text{C}$ 值则显示偏负或偏轻, 表明东亚冬季风增强, 夏季有效降水减少, 冬季有效降水增大, 利于木本植被生长, 以 C3 植物为主。气候相对稳定, 表现为冷湿或冷凉的气候环境, 相当于第三新冰期 (徐馨等, 1990), 寒冷高峰在 2.97 ka B P。此外, 在其内间夹短暂的温暖阶段 (2.80~2.69 ka), 随后气温再次下降。

4.2.2 相对温暖期 (2.48~2.13 ka B P) 在 2.48~2.13 ka B P 期间, 位于石笋剖面 38~32 cm

层段, $\delta^{18}\text{O}$ 平均值为 -6.29‰ , $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -9.43‰ , 其 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 均趋向于偏负或偏轻, 表明东亚夏季风有所增强, 夏季有效降水增大, 利于木本植被生长, 主要为 C3 植物。气候相对稳定, 表现为暖湿的气候环境。

4.2.3 相对波动的冷暖期 (2.14~1.31 ka B P)

在 2.14~1.31 ka B P 期间, 位于石笋剖面 31~17 cm 层段, $\delta^{18}\text{O}$ 平均值为 -6.05‰ , $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -9.15‰ 。其 $\delta^{18}\text{O}$ 趋向于偏正或偏重, $\delta^{13}\text{C}$ 均趋向于偏负或偏轻, 反映东亚季风不稳定的波动特征, 夏季风与冬季风交替演变。该阶段同位素记录反映, 气候由冷湿→温湿→冷湿→温湿呈交替变化特征。

4.2.4 相对冷湿期 (1.31~0.73 ka B P) 在 1.31~0.73 ka B P 期间, 位于石笋剖面 17~7 cm 层段, $\delta^{18}\text{O}$ 平均值为 -5.89‰ , $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -9.02‰ 。其 $\delta^{18}\text{O}$ 趋向于偏正或偏重, $\delta^{13}\text{C}$ 均趋向于偏负或偏轻, 表明东亚冬季风增强, 夏季有效降水减少, 冬季有效降水增大, 利于木本植被生长, 以 C3 植物为主。气候相对稳定, 表现为冷湿或冷凉的气候环境。但是从 0.78 ka 开始, $\delta^{13}\text{C}$ 从 -9.02‰ 突然增大到 -6.75‰ , 反映当时人口的增多, 农业区的迅速扩

表 2 灌阳县响水洞石笋 C、O 同位素

Table 2 Values of carbon and oxygen isotope from stalagmite of Xianshui cave Guanyang

石笋高度/cm	$\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})\text{‰}$	石笋高度/cm	$\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})\text{‰}$
1	-3.52	-5.57	36	-9.32	-6.27
2	-3.24	-5.78	37	-9.37	-6.6
3	-4.73	-6.35	38	-8.75	-5.9
4	-3.75	-5.92	39	-8.16	-5.94
5	-4.24	-6.44	40	-8.02	-6.28
6	-4.8	-6.02	41	-8.83	-6.45
7	-5.68	-5.97	42	-8.8	-5.95
8	-6.75	-5.87	43	-9.17	-5.91
9	-8.08	-5.84	44	-7.5	-6.03
10	-8.49	-5.78	45	-7.73	-6.02
11	-8.52	-6.38	46	-8.89	-5.87
12	-9.13	-5.72	47	-8.9	-6.26
13	-9.8	-5.65	48	-8.24	-5.77
14	-10.07	-5.98	49	-9.05	-6.34
15	-9.76	-6.11	50	-7.62	-5.83
16	-9.5	-5.97	51	-7.56	-6.02
17	-8.56	-6.12	52	-8.43	-6.23
18	-9.02	-6.12	53	-8.47	-6.35
19	-7.89	-5.67	54	-9.23	-6.54
20	-9.38	-6.16	55	-9.38	-6.33
21	-10.04	-6.31	56	-10	-6.2
22	-9.43	-5.94	57	-8.46	-6.41
23	-9.56	-6.25	58	-8.86	-6.3
24	-10.25	-5.97	59	-8.14	-6.45
25	-9.46	-6.23	60	-7.42	-6.21
26	-10.55	-6.27	61	-7.32	-6.38
27	-9.62	-6.14	62	-6.93	-6.31
28	-8.58	-5.74	63	-8.68	-6.49
29	-8.72	-6.19	64	-8.52	-6.64
30	-8.99	-5.89	65	-8.95	-6.65
31	-6.23	-5.82	66	-8.94	-6.46
32	-9.94	-6.39	67	-8.58	-6.79
33	-9.31	-6.19	68	-8.88	-6.83
34	-9.66	-5.96	69	-8.84	-6.87
35	-8.97	-6.34	70	-6.72	-5.75

张 森林被大量砍伐,开荒耕植,由于人类活动的影响,造成 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏重。

4.2.5 相对温暖期(0.73~0.61 ka B P) 在 0.73~0.61 ka B P 期间,位于石笋剖面 7~5 cm 层段 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值为 -6.23‰ , $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -4.52‰ 。其 $\delta^{18}\text{O}$ 趋向于偏负或偏轻、 $\delta^{13}\text{C}$ 趋向于偏正或偏重,反映东亚夏季风有所增强,夏季有效降水增大,表现为暖湿的气候环境,相当于中国近 5.00 ka B P

的第四次暖期。此阶段由于人类活动频繁,使森林植被遭受大量砍伐,垦荒耕植造成 $\delta^{13}\text{C}$ 偏重。

4.2.6 相对寒冷期(0.61~0.37 ka B P) 在 0.61~0.37 ka B P 期间,位于石笋剖面 4~0 cm 层段 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值为 -5.91‰ , $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -3.81‰ 。其 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 均趋向于偏正或偏重,反映东亚夏季风强度减弱,东亚冬季风增强,有效大气降水相对减少,表现为寒冷或冷凉的气候环境,相当于中国历史

记录中近 0.50 ka B P 来的第一次冷阶段。可与北极地区 Devon 岛冰帽 0.50 ka B P O 同位素记录的公元 1430 年、1520 年和 1560 年 3 个冷期相对应 (Baker 等, 1990)。

5 讨论和结论

(1) 桂林响水洞石笋的 TIMS-U 系年龄和 C、O 同位素记录揭示, 桂林地区中全新世 (6.00 ka B P) 以来的季风气候变化表现为 6.00~3.57 ka B P 为气候适宜期, 显示东亚夏季风由强盛逐渐变为减弱的趋势, 夏季有效降水也表现出有逐渐减弱的趋势, 该阶段表现为温暖湿润气候环境; 3.57~0.37 ka B P 为降温期, 显示气温缓慢而波动地下降, 东亚夏季风减弱, 冬季风增强, 气温降低, 降水减少等特点。在这一降温期, 记录了气候由冷湿→温湿→冷湿→温湿呈交替变化的特征, 而气候波动的频率却在增加, 越到现代冷温变化时间更趋缩短, 变化幅度则渐渐变小。

(2) C 同位素记录表明, 6.00 ka B P 到 0.78 ka B P 期间, $\delta^{13}\text{C}$ 均趋向于偏负或偏轻, 表明森林植被茂盛, 主要为 C3 植物。但在此阶段仍存在有 4 个高值点, 均位于石笋沉积旋回间的界面上, $\delta^{13}\text{C}$ 显示偏正或偏重, 这可能是在沉积旋回间界面上的泥质成分较高对 C 的相对富集有关。从 0.78~0.37 ka B P, $\delta^{13}\text{C}$ 从 -9.02% 突然增大到 -6.75% ~ -3.81% , $\delta^{13}\text{C}$ 值突然偏重, 是由于人类活动的影响造成的, 反映当时人口增多, 森林被大量砍伐, 大量垦荒耕植, 此阶段以 C4 植物为主。

(3) 桂林地区近 6.00 ka B P 以来的古气候环境演化, 不仅具有特殊的区域性特点, 同时也具有与全球性冷暖变化的一致性。

参 考 文 献

- 刘嘉麒, 倪云燕, 储国强. 2001. 第四纪的主要气候事件. 第四纪研究, 21(3): 239~248.
- 刘东升, 卢滨涛, 郑洪汉等. 1985. 黄土与环境. 北京: 科学出版社, 44~113.
- 刘泽纯, 孙世英, 王建等. 1991. 第四纪沉积与环境变迁. 南京: 东南文化杂志社, 31~62.
- 李红春, 顾德隆, 陈文奇等. 1997. 利用洞穴石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 重建 3 000 a 以来北京地区古气候和古环境: 石花洞研究系列之三. 地震地质, 19(1): 77~86.

- 林玉石, 张美良, 覃嘉铭. 2001. 云南宁蒗泸沽湖地区的古环境重建. 中国岩溶, 20(3): 174~182.
- 孙建中, 赵景波. 1991. 黄土高原第四纪. 北京: 科学出版社, 186~205.
- 徐馨, 沈志达. 1990. 全新世环境. 贵阳: 贵州人民出版社, 1~86.

References

- Baker R S. 1990. Holocene paleoclimatology of the Queen Elizabeth islands, Canadian, Arctic. Quaternary Science Reviews, 9: 365~384.
- Cai Yanjun, Zhang Meiliang, Peng Zicheng et al. 2001. The $\delta^{18}\text{O}$ variation of a stalagmite from Qixing cave, Guizhou province and indicated climate change during the Holocene. Chinese Science Bulletin 46(22): 1094~1098.
- Dorale-Jeffrey A. 1992. Holocene climatic change in Northeast Iowa as inferred from speleothem calcite. University of Iowa. Iowa City, IA, United States. 46.
- Genty-Dominique, Baker-Andy, Vokal-Barbara. 2001. Intra- and inter-annual growth rate of modern stalagmites. Chemical Geology, 176(1~4): 191~212.
- Jones M C, Gonzalez L A, Hanson L et al. 1995. A 6 000 year stalagmite growth banding record for cold water cave, northeastern Iowa; annual and seasonal precipitation changes. Geological Society of America 27(6): 55.
- Liu Jiaqi, Ni Yunyan, Chu Guoqi. 2001. Main paleoclimatic events in the Quaternary. Quaternary Science, 21(3): 239~248 (in Chinese with English abstract).
- Liu Dongshen, Lu Yanchou, Zheng Honghan et al. 1985. Loss and environment. Beijing: Science Press 44~113 (in Chinese).
- Liu Zechun, Sun Shiyang, Wang Jing et al. 1991. Quaternary sediment & environment changes. Nanjing: Southeast Culture Printing House 31~62 (in Chinese).
- Li Bin, Yuan Daoxian, Qin Jiaming et al. 1996. A high resolution record of climate change in a stalagmite from Panlong Cave of Guilin since 36 000 years B P. Karst Water Institute Special Publication (2): 93~96.
- Li Hongchun, Gu Delong, Chen Wenji et al. 1997. Isotope studies of Shihua cave-III: Reconstruction of paleoclimate and paleoenvironment of Beijing during the last 3 000 years from $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ records in stalagmite. Seismology and Geology, 19(1): 77~86 (in Chinese with English abstract).
- Lin Yushi, Zhang Meiliang, Qin Jiaming. 2001. The record of paleoclimatic environment in Lugu lake area of Linlan county, Yuannan. Carsologica Sinica, 20(3): 174~182 (in Chinese with English abstract).
- Sun Jianzhong, Zhao Jingbo. 1991. Quaternary of Loess plateau in China. Beijing: Science Press, 186~205 (in Chinese).
- Xu Xin, Shen Zhida. 1990. The Holocene environment. Guiyang: Printing House of Guizhou People, 1~86 (in Chinese).