

崔古月, 杨勋林, 方默勤, 等. 全新世早期石笋灰度序列记录的气候环境信息分析: 以重庆羊口洞石笋为例[J]. 中国岩溶, 2017, 36(2): 171-178.

DOI: 10.11932/karst20170203

全新世早期石笋灰度序列记录的气候环境信息分析 ——以重庆羊口洞石笋为例

崔古月, 杨勋林, 方默勤, 孙喜利, 史志超, 王宝艳

(1. 岩溶环境开放实验室/西南大学地理科学学院, 重庆 400715; 2. 国土资源部岩溶生态环境—重庆南川野外基地, 重庆 408435)

摘要: 以采自重庆南川区金佛山羊口洞中一支石笋 YK719 为研究对象, 利用精确的²³⁰Th 测年数据、 $\delta^{18}\text{O}$ 数据和灰度数据重建了重庆地区早全新世古气候变化序列。将石笋 YK719 灰度序列和 $\delta^{18}\text{O}$ 记录进行对比后发现, 在弱季风时段, 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏重, 石笋灰度值较高, 灰度序列表现出“谷”构造; 反之亦然。分析显示羊口洞石笋灰度序列与树轮 $\Delta^{14}\text{C}$ 数据、太阳黑子数据具有较高的相关性, 说明太阳活动是驱动石笋灰度序列变化的一个重要因素。太阳活动可能通过温度和季风降水两方面来影响石笋灰度的变化: 温度升高促使土壤微生物活动量增加, 土壤中可溶性有机碳和 CO_2 含量增加, 从而形成较为纯净的方解石沉积物, 石笋颜色暗而透明, 反之, 石笋表现为不透明乳白色; 北大西洋浮冰变化在早全新世可能通过季风—欧亚大陆雪盖耦合来间接地影响亚洲季风降水变化, 从而影响石笋灰度的变化。

关键词: 石笋; 灰度; 全新世早期; 东亚季风; 太阳活动

中图分类号: P532

文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2017)02-0171-08

2016年夏季,我国东部地区普降暴雨,部分城市发生内涝,极端的气候再一次引起社会对于气候变化的广泛关注。洞穴石笋记录因其高分辨率、定年精确等优点,在全球气候变化研究中担任着越来越重要的角色^[1]。由于长期以来,人们主要关注石笋碳氧同位素的研究^[2-7],而对于石笋中其他的气候环境替代指标,如微量元素、纹层特征和灰度等^[8-12]的研究则不够重视;而且,目前对于氧同位素关于气候环境意义的解释仍存在争议,加之石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录采样成本较高,实验周期长,数据的采集受到采样点分布等限制,需要将其其他指标引入研究中来,对已存在的指标加以佐证^[3,5,13]。随着数字成像技术的日臻成熟,使得通过数字扫描得到高分辨率的石笋剖面灰度数据成为可能,并且可以从中分析出更加准确的古气候信息^[14],与石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录相比,灰度数据的采集具有

采样方便、实验周期短,且能够在不损坏石笋样本的前提下得到高分辨率数据等优点。本文以采自重庆金佛山羊口洞的一根石笋为研究对象,利用数字图像技术对其进行分析,获得了全新世早期高分辨率的石笋灰度序列,并结合石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录进行对比研究,通过分析石笋灰度序列、 $\delta^{18}\text{O}$ 记录、树木年轮 $\Delta^{14}\text{C}$ 数据和太阳黑子数之间的关系,初步探讨石笋灰度序列指示的气候环境意义。

1 地质地理背景和样品实验分析方法

本文研究所采用的石笋 YK719 采自重庆市南川区金佛山羊口洞。金佛山地处四川盆地东南边缘与云贵高原北缘交界带,属大娄山北端(图 1)。金佛山顶以二叠系灰岩为主,岩溶发育强烈。山顶存在着一

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0502301);国家自然科学基金项目(41572158,41272192,41072141);中央高校基本科研业务费项目重大项目(XDJK2012A003)

第一作者简介:崔古月(1989—),男,硕士研究生,研究方向:全球变化和资源与环境演变。E-mail:fallonleaves@163.com。

通信作者:杨勋林(1974—),男,副教授,博士,主要从事古气候重建与生态环境演变研究工作。E-mail:xlyang9999@163.com。

收稿日期:2016-10-04

个庞大复杂的地下洞穴系统。羊口洞洞口海拔高程 2 140 m,全长 2 245 m,洞穴通道空间规模较大,宽度一般为 15~20 m,高度一般为 8~12 m,洞底面积约 35 000 m²[15]。该地区受到西南季风和东南季风的共同影响,夏季风影响期间,降水量大,水汽主要来自于印度洋和西太平洋,多年平均气温为 14.5 °C,多年降水量为 1 434 mm,月均降水量在 100 mm 以上有 7 个月,即 4~10 月,占全年降水量的 83%。该地区是典型的亚热带湿润性季风气候区。从山脚到山顶气候垂直变化明显,温差可达 5~6 °C,年均相对湿度在 90% 以上[16]。



图 1 重庆市南川区羊口洞地理位置

Fig. 1 Geographical location of Yangkou Cave, Nanchuan, Chongqing

羊口洞石笋 YK719 氧稳定同位素数据提取:先沿着石笋生长轴方向将石笋切开,用抛光机打磨石笋切割面,沿着石笋生长轴中心线采用直径为 0.5 mm 的牙钻约每 0.5 mm 采一个样,共取得 206 个氧稳定同位素样品。根据石笋沉积速率变化挑选 186 个样品进行 δ¹⁸O 数据测试。全部分析在西南大学地球化学与同位素实验室完成,采用 Delta-V-Plus 型质谱与碳酸盐自动进样装置(Kiel IV)联机测试,每 9 个样品中加测一个标准样品;实验中标准控制样 δ¹⁸O 的值进行多次分析,其偏差 < 0.1‰,石笋平行样品的分析 < 0.2‰,结果均相对于 VPDB(Vienna Pee Dee Belemnite)标准。石笋 YK719 共测试了 11 个 ²³⁰Th 年代数据(见表 1),根据建立的生长模型得出覆盖年龄时段为 8.3~11.5 ka BP。从表 1 可以看出,所有年龄数据都按石笋沉积先后秩序排列,说明数据可信。年龄误差最大为 84 a,最小为 39 a,平均误差约为 51.5 a,这些年代数据均在美国明尼苏达大学地球科学系同位素实验室完成,采用多接收电感耦合等离子质谱(MC-ICP-MS)测定。

灰度序列的提取:将抛光过的石笋剖面用酒精和超纯水擦洗过后,在暗室里对其进行扫描,而后再用古气候记录图像软件对数字化后的灰度矩阵进行分析,其值介于 0~255 之间,数值越大表示反光越强,表示石笋颜色也更浅,颜色上呈现出乳白色,透光性差;反之,则表示石笋颜色偏暗、较透明,为纯净的方解石构造。

表 1 YK719 石笋 U、Th 同位素组成和 ²³⁰Th 年龄

Table 1 Isotopic composition of U/Th and ²³⁰Th dating results of stalagmite YK719

样品 编号	deep /mm	²³⁸ U/×10 ⁻⁹	²³² Th/×10 ⁻¹²	²³⁰ Th / ²³² Th /atomic×10 ⁻⁶	δ ²³⁴ U * (measured)	²³⁰ Th Age/a (corrected)
719-1RR	3.50	6 618±13	2 340±51	4 332±96	246 ±3	8 424 ±44
719-2RR	8.50	6 442±13	2 896±60	3 463±73	241±3	8 599±43
719-3RR	17.00	6 994±14	2 657±56	4 188±88	235±3	8 838±39
719-4RR	25.50	6 957±15	3 403±71	3 323 ±72	232 ±3	9 063 ±56
719-5RR	33.50	7 585 ±16	9 094 ±184	1 411±29	225 ±3	9 483 ±53
719-6RR	41.00	6 802 ±11	8 443 ±170	1 403±29	226 ±2	9 772 ±44
719-2R	49.00	7 072 ±13	4 309 ±87	2 901±60	227 ±3	9 928 ±59
719-7RR	60.50	7 693 ±14	3 930 ±81	3 566 ±74	222 ±3	10 292 ±48
719-8RR	70.50	7 682 ±15	2 259 ±50	6 245 ±146	222 ±3	10 386 ±84
719-9RR	78.50	8 686 ±16	3 641 ±76	4 527 ±96	214 ±2	10 820 ±52
719-10RR	85.00	7 222 ±13	7 190 ±145	2 033 ±41	218 ±2	11 528 ±46

注:衰变常数取值为 λ₂₃₀ = 9.157 7 × 10⁻⁶ · a⁻¹; λ₂₃₈ = 2.826 3 × 10⁻⁶ · a⁻¹; λ₂₃₅ = 1.551 25 × 10⁻¹⁰ · a⁻¹; δ²³⁴U = ([²³⁴U/²³⁸U]_{activity} - 1) × 1 000, δ²³⁴U 初始值是根据 ²³⁰Th 年龄获得,即 δ²³⁴U_{初始值} = δ²³⁴U_{测量值} × e^{λ₂₃₄ × T}; 初始 ²³⁰Th 年龄校正采用地壳 ²³⁰Th/²³²Th 平均比值: 4.4 ± 2.2 × 10⁻⁶[17]。

2 结果和讨论

2.1 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录

多数研究显示东亚季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 主要反应东亚季风信息。Wang 等^[18]指出石笋氧同位素记录反映了与夏季风强弱变化相联系的冬夏季降水的比率; Yuan 等^[2]认为石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录主要反映了水汽由源区向内陆移动的过程中水汽冷凝比率的多寡,进而反映了夏季风强度的变化; Cai 等^[4]指出影响石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的因素有多种,在不同的时间尺度和气候边界条件下,影响石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值及其与气候要素值的关系也会不同。Liu 等^[19]在 2014 年进行的模拟研究表明:在轨道和千年尺度上,季风环流强弱应该是影响石笋氧同位素组成的主要因素。虽然尚有其他许多影响因素,但在小尺度上(例如小冰期),石笋氧同位素记录的解释则需要更加谨慎^[5]。

为了判别石笋 YK719 的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录能否真实地反映古气候信息,故对其氧同位素序列进行重现性检验(图 2)。本文把石笋 YK719 和阿曼地区的 Qunf 洞的 Q5 石笋^[20-21]进行对比分析,在相同研究时段内,通过对 Q5 石笋中的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录通过线性内插处理后对两个洞穴的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 数据进行了重现性分析,发现两个洞穴的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录变化趋势基本一致($r=0.74, n=186$),具有较好的可重复性,说明石笋 YK719 的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录动力分馏不明显,可以记录气候环境变化。

石笋 YK719 的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录变化大体以 9.7 ka BP 为拐点分为前后两个阶段:(1)在早全新世开始阶段,石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值表现为波动起伏大,整体逐渐偏轻的趋势,在 10.3 ka BP 和 9.7 ka BP 分别出现了两次弱季风事件,这两次弱季风事件则和北大西洋浮冰事件 7 和 6 相对应^[22]。羊口洞石笋 YK719 和 Qunf 洞石笋 Q5 的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录虽然在整体变化趋势上基本一致,但是也存在一定的区别,特别是在气候事件上,石笋 YK719 较清晰的记录了 9.7 ka BP 弱季风事件,而石笋 Q5 记录的则不够明显;同时,由于分辨率的原因,石笋 YK719 则没有显示出 9.3 ka BP 弱季风事件,而石笋 Q5 序列则有明显记录,这说明对气候事件的研究需要来自不同研究点更多记录的验证。(2)在 9.7 ka BP 以后,石笋 YK719 的 $\delta^{18}\text{O}$ 分辨率较低,整体趋势较为平稳,石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值逐渐偏轻,显示早全新世季风逐渐增强。石笋 YK719 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值的整体变化趋势随北半球夏季辐射升高而逐渐偏轻,暗示随着

太阳辐射加强,ITCZ 位置逐渐偏北,北半球夏季风逐渐增强^[23],气候相对稳定,总体为温暖湿润的气候环境^[24],同时,石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的波动显示了东亚季风也受到北大西洋 Bond^[22] 旋回的影响。

2.2 石笋灰度序列

石笋灰度蕴含着丰富的气候环境信息,洞穴上覆植被状况、碳酸钙沉淀、微生物、降水以及渗流管道等都有可能对其产生影响。Shopov 和刘东生等^[25-26]在石笋荧光强度和微层厚度序列中发现了与太阳黑子活动类似的 11 年周期的记录。秦小光等^[27-28]认为石笋微层的灰度变化主要由滴水携带和原地生长的有机物造成,北京地区石笋灰度反映了印度季风变化的同时也可以作为气温的指代性指标。汪永进等^[29]认为灰度的变化可以揭示洞穴湿度的变化过程。大量研究表明,石笋灰度序列同石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录具有较好的相关性,共同记录了降水对季风变化的响应以及亚洲季风强度的变化^[30-32];杨勋林等^[13]对湖北仙女山隧洞内一根生长周期为 9 年的石笋进行了研究,发现石笋灰度蕴含了气温和降水的信息;Duan 等^[33]指出,石笋灰度和 $\delta^{13}\text{C}$ 记录共同反映了洞穴上覆地区植被状况的变化,而植被的变化又与当地的气温与降水有关。可见,在东亚季风区,石笋灰度基本能够反映季风降水和温度信息。

对比石笋 YK719 灰度序列、 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线以及阿曼 Qunf 洞 Q5 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线(图 2)发现,当 $\delta^{18}\text{O}$ 记录表现出偏重趋势,石笋灰度值也偏大;反之亦然。特别是在季风偏弱的时段,例如,在全新世早期经历的 9.7 ka BP 和 10.3 ka BP 附近弱季风事件中,石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 偏重,灰度值偏大,即表现出一个“谷”构造。弱季风事件时期对应的石笋微层显示为乳白色,这种现象在南京葫芦洞的石笋中也很常见,乳白色的层位对应于气候条件比较干冷的时期^[29],原因可能是:(1)来自洞顶滴水中可溶性和非可溶性的物质,特别是在弱季风时期,气候较为干旱,由于地表雨水在土壤带和渗滤通道滞留的时间较长^[34],夹带了高含量的杂质(如黏土等);(2)由于气候干旱,滴水速率下降,导致附着于石笋表面的薄膜水失去了来自洞穴顶板滴水的频繁扰动,形成了较为稳定的薄膜水,在菌藻类微生物以及通过薄膜水张力牵引而来的洞内尘粒物质发生了沉积,导致方解石的光学特征受到了影响。当石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录处于偏轻时段,灰度序列往往呈现出“峰”构造,表现在石笋剖面上为色泽偏暗、较透明;反之,石笋剖面则呈现出偏亮、不透明的特征。

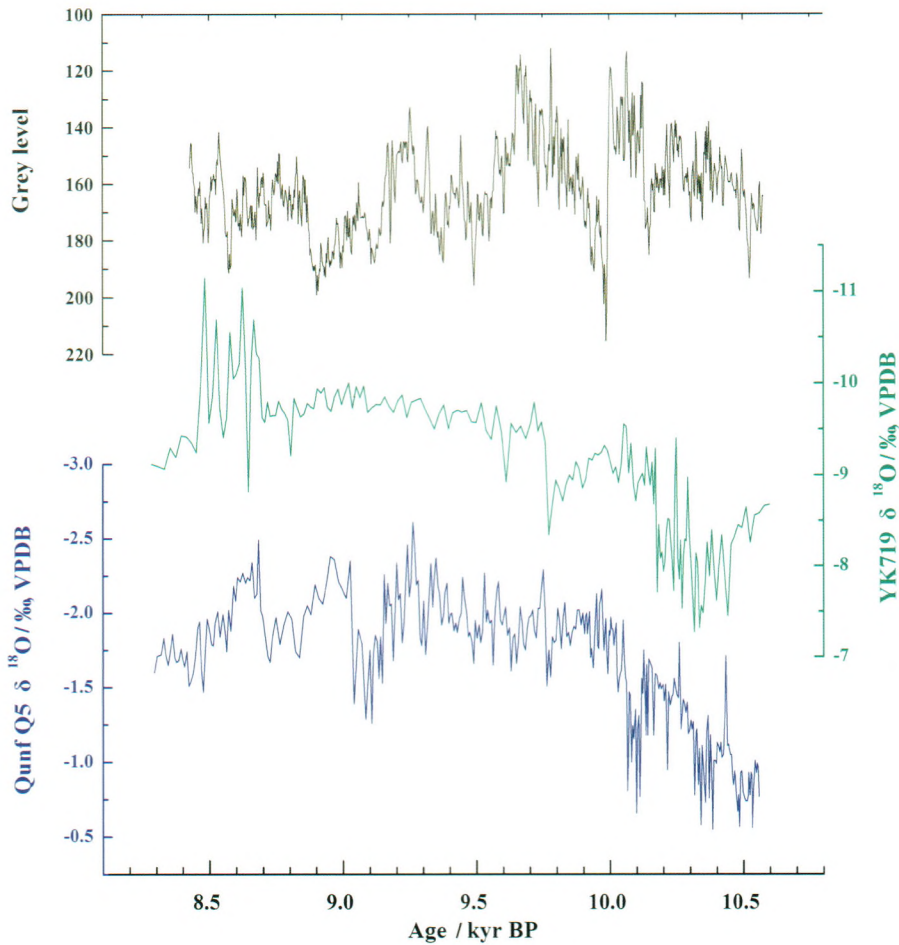


图2 羊口洞石笋灰度序列和氧同位素曲线及阿曼 Qunf 洞 Q5 石笋氧同位素曲线对比图

Fig. 2 Comparison of gray scale sequence and oxygen isotope curves of Yangkou cave and oxygen isotope records of stalagmite Q5 from Qunf Cave, Oman

与石笋 YK719 的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录相比,灰度序列的振荡幅度要更加明显,呈现出了若干个“峰、谷”旋回构造,但其整体数值均在 160 附近波动,没有明显的增大或者减小;但是,石笋 YK719 的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录在研究时段内则呈现出波动偏轻的特征,这可能暗示了两者受控于不同的驱动因素,石笋灰度变化在短时间尺度上可能主要受控于太阳活动引起的太阳能量变化的影响。

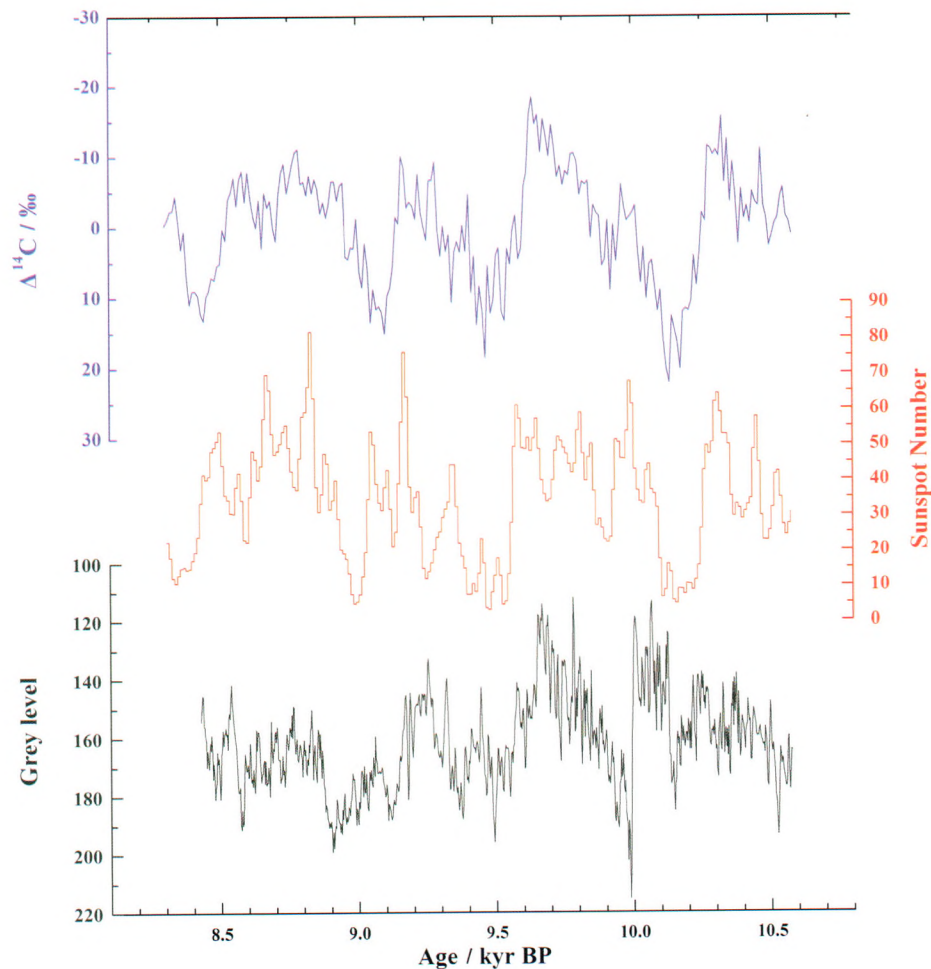
2.3 石笋 YK719 灰度驱动因素分析

为进一步分析羊口洞石笋 YK719 灰度变化的驱动因素,本文把灰度记录和表征太阳活动变化的记录进行对比。图 3 中, $\Delta^{14}\text{C}$ 数据来源于树木年轮^[35],在选取了相应的时间序列后,发现石笋 YK719 的灰度序列和 $\Delta^{14}\text{C}$ 数据呈现出较好的相关性;同时与太阳黑子数据在相同研究时段的变化趋势也基本一致。

Eddy^[36] 研究发现在太阳活动减弱的蒙德极小

期,太阳黑子数很少,极光也很少出现,而这一时期恰好对应于气候变化的小冰期。从图 3 中可以看出,石笋灰度数据和树木年轮 $\Delta^{14}\text{C}$ 数据在整体变化趋势上基本一致,表现出相似的若干个旋回构造:当灰度值处于高值时, $\Delta^{14}\text{C}$ 值也相应地处在偏正的位置,反之,当灰度值在低值处波动时, $\Delta^{14}\text{C}$ 值也在偏负的位置波动。同样的,灰度序列值和同时期的太阳黑子数目也存在着较好的对应关系,从整体研究时段上看,当太阳黑子数较多时,灰度序列值较小,在石笋剖面颜色显示为偏暗、较透明;而太阳黑子数较少时,灰度序列值较大,在石笋剖面表现为颜色偏亮、不透明的特征。

这可能是因为,当太阳黑子数增加时,太阳活动增强,太阳辐射量增加,使得地表温度升高,进而促使微生物的活动量增加,大量的有机质被分解出来,增加了石笋剖面中暗色物质的来源^[27];另外,温度升高

图 3 $\Delta^{14}\text{C}$ 、太阳黑子数和羊口洞石笋灰度序列曲线对比Fig. 3 Comparison of $\Delta^{14}\text{C}$ ^[39], sunspot number^[43], and gray scale sequence of Yangkou cave

会使微生物加大繁殖速度,加快对生物遗体的分解,而增加渗水中有机质含量,土壤可溶性有机碳含量随温度升高而增加^[37],土壤中 CO_2 含量增加,会加速溶解基岩,从而形成较为纯净的方解石沉积物,石笋颜色暗而透明。袁道先的研究显示,在亚洲季风区,土壤中生物成因 CO_2 的含量在夏季达到高峰,冬季则为低谷,与气温变化一致^[38]。灰度序列值的变化与树木年轮 $\Delta^{14}\text{C}$ 数据、太阳黑子有着很好的对应关系,另一种解释是由于气候系统内部的相互作用放大了太阳活动引起的辐照量的变化^[32]。太阳活动和季风密切相关的相关性被来自阿曼南部的更长时间的 Q5 记录石笋所证实,太阳活动诱导的北大西洋浮冰变化在早全新世可能通过季风—欧亚大陆的雪盖耦合来间接地影响亚洲季风降水的变化,这种相关性显示了在季风增强后,北半球主要的冰盖消失导致北大西洋的温盐循环变得更加稳定,与北大西洋向北的热传递变化和大洋深水作用相比,亚洲季风对太阳驱动变化的

响应要更大^[20]。

为了进一步研究灰度序列变化的影响因素,特对其进行了功率谱分析(图 4),通过分析发现其有 431 a、196 a、52 a、31 a、24 a、20 a 等周期。其中,431 a 周期和大气 $\Delta^{14}\text{C}$ 产率记录所指示的较长时期的太阳周期 420 a 较为接近^[39],暗示了灰度序列记录的变化可能受控于太阳黑子变化和太阳风磁场变化。196 a 与太阳活动的双世纪大周期相似,31 a 的周期接近树轮记录的 ^{14}C 活动周期^[35],而 24 a、20 a 则更接近于太阳活动的双海尔周期,Cai 等^[4]在对九仙洞石笋的研究中发现了明显的 23 a 周期,20 a 的周期在先前对东石崖洞石笋 DSY09 的研究中也被发现^[40]。这说明太阳活动对石笋灰度序列值的影响很大,这也许可以为石笋灰度序列成为短尺度太阳活动的代用记录提供一个佐证。52 a 与太平洋十年涛动指数(PDO)的 50~70 a 周期一致,曾有研究指出,PDO 能够通过影响西太平洋副热带高压气带的位置,进而影响东亚季

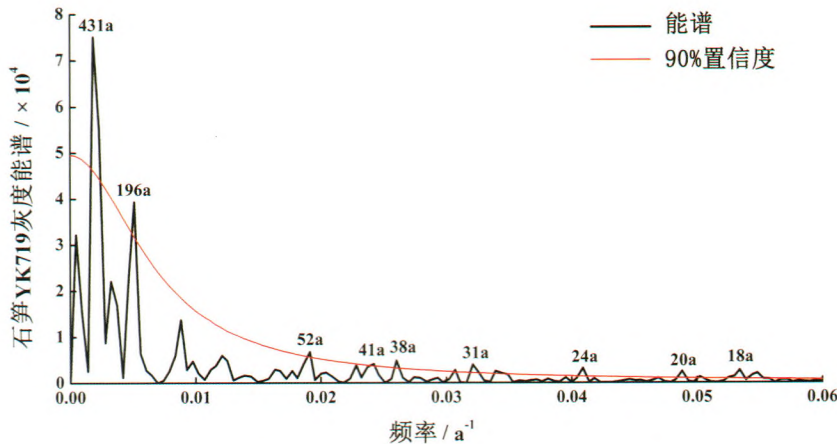


图4 羊口洞石笋 YK719 灰度序列功率谱分析

Fig. 4 Power spectral analysis of grey scale sequence from stalagmite YK719, Yangkou cave

风的强度^[41]。

以上分析显示石笋 YK719 灰度序列除了直接响应太阳活动周期外,对于 PDO 的变化也有很好的响应,这说明影响石笋灰度的因素比较复杂,也从侧面印证了低纬度地区短尺度季风气候直接响应太阳辐射能量变化这一观点^[42]。

3 结论

本文通过对采自重庆南川地区金佛山羊口洞中一根石笋 YK719 进行研究,利用石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 数据和灰度数据重建了重庆地区早全新世古气候变化序列,分析发现:

(1)在全新世开始阶段,石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值起伏波动较大,整体呈现偏轻趋势。在 10.3 ka BP 和 9.7 ka BP 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值突然偏重,石笋灰度值也同时偏大,分别指示了两次弱季风事件,这两次弱季风事件在发生时间与北大西洋浮冰事件 7 和 6 相对应。北大西洋浮冰变化可能在早全新世通过季风-欧亚大陆雪盖耦合来间接地影响亚洲季风降水变化,从而影响石笋灰度的变化。

(2)本文发现石笋灰度序列在变化过程中主要响应太阳活动的变化,更多地受到太阳活动所趋动的太阳辐射能量变化的影响。石笋灰度序列值、太阳黑子数和树轮 $\Delta^{14}\text{C}$ 数据在整体变化趋势上具有较高的相关性,这表明当太阳黑子数相对较多时,太阳活动较强,从而使得地面温度升高,植被更加发育,微生物的活动也更加活跃,分解有机质的能力更强,在灰度序列上则表现为数值越小,其颜色也越暗,反之,其颜色越亮。

(3)石笋灰度序列的功率谱分析也支持上述观点,这为石笋灰度序列在短时间尺度上能够表征太阳活动提供了一种新的可能性的解释。由于影响石笋灰度序列的因素较为复杂,因此,关于石笋灰度的影响因素和驱动机制还需要进一步的深入研究。

致谢:感谢张月明、黄帆、李辰丝、吕春艳和李国军等研究生参与野外采样和实验分析工作;十分感谢审稿专家和编辑部老师提出的宝贵评审意见和修改建议,帮助提高和完善了本文。

参考文献

- [1] Fairchild I J, Smith C L, Baker A, et al. Modification and preservation of environmental signals in speleothems[J]. *Earth Science Reviews*, 2006, 75(1): 105-153.
- [2] Yuan D X, Cheng H, Edwards R L, et al. Timing, duration, and transitions of the Last Interglacial Asian Monsoon[J]. *Science*, 2004, 304(5670): 575-578.
- [3] Hu C Y, Henderson G M, Huang J H, et al. Quantification of Holocene Asian monsoon rainfall from spatially separated cave records[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 266(3/4): 221-232.
- [4] Cai Y J, Tan L C, Cheng H, et al. The variation of summer monsoon precipitation in central China since the last deglaciation [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 291(1): 23-31.
- [5] 程海, 艾思本, 王先锋, 等. 中国南方石笋氧同位素记录的重要意义[J]. *第四纪研究*, 2005, 25(2): 157-163.
- [6] 杨勋林, 张平中, 袁道先, 等. 黄龙洞年轻石笋的 ^{210}Pb 测年研究[J]. *地质论评*, 2010, 56(4): 543-548.
- [7] 谭明, 南素兰. 中国季风区降水同位素年际变化的“环流效应”初探[J]. *第四纪研究*, 2010, 30(3): 620-622.
- [8] 林玉石, 张美良, 程海, 等. 贵州荔波第四纪晚期石笋地质年表与气候事件[J]. *地学前缘*, 2010, 10(2): 341-350.

- [9] Hu C Y, Huang J H, Fang N Q, et al. Adsorbed silica in stalagmite carbonate and its relationship to past rainfall [J]. *Geochimica Etcosmochimica Acta*, 2005, 69(9): 2285-2292.
- [10] Zhou H Y, Wang Q, Zhao J X, et al. Rare earth elements and yttrium in a stalagmite from Central China and potential paleoclimatic implications [J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2008, 270(1):128-138.
- [11] Zhou H Y, Feng Y X, Zhao J X, et al. Deglacial variations of Sr and $87\text{Sr}/86\text{Sr}$ ratio recorded by a stalagmite from Central China and their association with past climate and environment [J]. *Chemical Geology*, 2009, 268(3):233-247.
- [12] 周厚云, 王悦, 黄柳苑, 等. 氧同位素阶段 5c~d 时期川东北石笋 Mg, Sr 和 Ba 记录及其意义[J]. *中国科学*, 2011, 56(33): 2791-2796.
- [13] 杨勋林, 袁道先, 张月明, 等. 湖北仙女山人工隧洞现代石笋气候学: 灰度及其指示意义[J]. *中国岩溶*, 2012, 31(3): 248-252.
- [14] 孙东怀, 刘禹, 谭明. 古环境记录的数字图像分析及应用[J]. *科学通报*, 2002, 47(21):1613-1621.
- [15] 张任, 朱学稳, 韩道山, 等. 重庆市南川金佛山岩溶洞穴发育特征初析[J]. *中国岩溶*, 1998, 17(3): 196-211.
- [16] 王建力, 袁道先, 李廷勇, 等. 气候变化的岩溶记录[M]. 北京: 科学出版社, 2009, 96-97.
- [17] Cheng H, Adkins J, Edwards R L, et al. U-Th dating of deep-sea corals[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(14): 2401-2416.
- [18] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. A high-resolution absolute-dated Late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China[J]. *Science*, 2001, 294(5550): 2345-2348.
- [19] Liu Z Y, Wen X Y, Brady E C, et al. Chinese cave records and the East Asian Summer Monsoon[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 83: 115-128.
- [20] Fleitmann D, Burns S J, Mudelsee M, et al. Holocene Forcing of the Indian Monsoon Recorded in a Stalagmite from Southern [J]. *Science*, 2003, 300(5626): 1737-1739.
- [21] Fleitmann D, Burns S J, Mangini A, et al. Holocene ITCZ and Indian monsoon dynamics recorded in stalagmites from Oman and Yemen (Socotra) [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2007, 26(1):170-188.
- [22] Bond G, Showers W, Cheseby M, et al. A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and Glacial Climate [J]. *Science*, 1997, 278(5341):1257-1266.
- [23] 汪品先. 全球季风的地质演变[J]. *科学通报*, 2009, 54(5): 535-556.
- [24] 张美良, 程海, 林玉石, 等. 贵州荔波 1.5 万年以来石笋高分辨率古气候环境记录[J]. *地球化学*, 2004, 33(1): 65-74.
- [25] Shopov Y Y, Ford D C, Schwarcz H P. Luminescent microbanding in speleothems: high-resolution chronology and paleoclimate[J]. *Geology*, 1994, 22(5):407-410.
- [26] 刘东生, 谭明, 秦小光, 等. 洞穴碳酸钙微层理在中国的首次发现及其对全球变化研究的意义[J]. *第四纪研究*, 1997(1):41-51.
- [27] 秦小光, 刘东生, 谭明, 等. 北京石花洞石笋微层灰度变化特征及其气候意义: I 微层显微特征[J]. *中国科学(D辑)*, 1998, 28(1):91-96.
- [28] 秦小光, 刘东生, 谭明, 等. 北京石花洞石笋微层灰度变化特征及其气候意义: II 灰度的年际变化[J]. *中国科学(D辑)*, 2000, 30(3):239-248.
- [29] 汪永进, 孔兴功, 邵晓华, 等. 末次盛冰期百年尺度气候变化的南京石笋记录[J]. *第四纪研究*, 2002, 22(3): 243-251.
- [30] 袁野. 甘肃武都万象洞石笋灰度—微层特征及其古气候意义[D]. 兰州: 兰州大学, 2011.
- [31] 张德忠, 白益军, 桑文翠, 等. 末次冰消期亚洲季风强度变化的黄土高原西部万象洞石笋灰度记录[J]. *第四纪研究*, 2011, 31(5):791-799.
- [32] 马乐, 蔡演军, 秦世江. 贵州七星洞石笋记录的最近 2300 年气候和环境变化[J]. *地球环境学报*, 2015, 6(3): 135-144.
- [33] Duan W H, Tan M, Ma Z B, et al. The palaeoenvironmental significance of $\delta^{13}\text{C}$ of stalagmite BW-1 from Beijing, China during Younger Dryas intervals inferred from the grey level profile[J]. *Boreas*, 2013, DOI 10.1111/bor.12034: 243-250.
- [34] Dreybrodt W. Deposition of calcite from thin films of natural calcareous solutions and the growth of speleothems[J]. *Chemical Geology*, 1980, 29(1-4):89-105.
- [35] Stuiver M, Paula J R, Edouard B, et al. Intcal98 radiocarbon age calibration, 24,000-0 cal B.P. [J]. *Radiocarbon*, 1998, 40(3): 1041-1083.
- [36] Eddy J A. The Maunder minimum[J]. *Science*, 1976, 192: 1189-1202.
- [37] Martin J C, Mark B D. Temperature and moisture effects on the production of dissolved organic carbon in a spodosol[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1996, 28(9):1191-1199.
- [38] 袁道先. 中国岩溶学[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [39] Stuiver M, Braziunas T F, Becker B. Atmospheric ^{14}C and century-scale solar oscillation[J]. *Nature*, 1989, 338: 405-408.
- [40] Cai B G, Edwards R L, Cheng Hai, et al. A dry episode during the Younger Dryas and centennial-scale weak monsoon events during the early Holocene: A high-resolution stalagmite record from southeast of the Loess Plateau, China[J]. *Geophysical Research Letters*. 2008, 35(2): L02075, doi: 10.1029/2007GL030986.
- [41] Qian C, Zhou T J. Multidecadal Variability of North China Aridity and Its Relationship to PDO during 1900-2010 [J]. *Journal of Climate*, 2014(4):1209-1222, doi: 10.1175/JCLI-D-13-00235.1.
- [42] 覃嘉铭, 袁道先, 林玉石, 等. 公元八世纪以来贵州荔波石笋高分辨率的气候变化记录[J]. *中国岩溶*, 2008, 27(3): 266-272.
- [43] Solanki S K, Ksosskin I G, Kromer B, et al. Unusual activity of the Sun during recent decades compared to the previous 11,000 years[J]. *Nature*, 2004, 431(7012): 1084-1087.

Climatic implications of stalagmite grey scale sequence during the Early Holocene from the Yangkou cave, Chongqing

CUI Guyue, YANG Xunlin, FANG Moqin, SUN Xili, SHI Zhichao, WANG Baoyan

(1. Chongqing Key Laboratory of Karst Environment, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Karst Environment Laboratory, Southwest University, Chongqing 408435, China)

Abstract One stalagmite (YK719) from the Yangkou cave at the Jinpo Mountains, Nanchuan in Chongqing is used as the research object in this article. The purpose is to reconstruct the climate change in the early Holocene with accurate ^{230}Th dating results, $\delta^{18}\text{O}$ and grey scale data. Comparison of the grey scale sequence and $\delta^{18}\text{O}$ suggests that $\delta^{18}\text{O}$ value was heavier during the weak monsoon period. Accordingly, the grey scale sequence shows a “trough-shaped” pattern. However, it showed “a crest” pattern when the monsoon was powerful. Furthermore, the grey scale value has a good correlation with the tree ring $\Delta^{14}\text{C}$ data and the sun-spot number, suggesting the solar activity is an important factor in controlling the variation of grey scale values. Solar activity might affect the grey scale value variation via temperature and monsoon precipitation, (1) The increase of temperature leads to the rise of soil microbial activity and a large amount of decomposed organic matter. Meanwhile, rock would be dissolved faster for the rise in the dissolved organic carbon and soil CO_2 . Thus, the relatively pure calcite would be deposited with darkish and transparent appearance. Otherwise, it would be opaque and milky; (2) Solar activity-induced changes in the North Atlantic floating ice may indirectly affect the Asian monsoon precipitation variation through the coupling of the monsoon and Eurasian snow cap in the early Holocene, so as to affect the change of grey scale values of stalagmites.

Key words stalagmite, grey scale value, early Holocene, east Asian monsoon, solar activity

(编辑 张玲)