

东亚季风区最近 1 000 a 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 空间变化特征及气候意义研究^①

鄢应燃, 刘睿恺, 杨勋林, 吕春艳, 张日萍, 张 瑞

西南大学 地理科学学院/三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715

摘要: 利用重庆市丰都水鸣洞石笋 NSM03 精确定年数据和 $\delta^{18}\text{O}$ 数据建立的高分辨率石笋记录, 结合其他已经发表的亚洲季风区石笋氧同位素记录, 探讨洞穴石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值过去 1 000 a 的空间变化特征以及指示的气候环境意义。结果显示: 亚洲季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值过去 1 000 a 在空间上呈现出与大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值相似的纬度效应和海陆效应, 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值沿水汽输送路径不断衰减, 逐渐变轻, 表明印度洋是中国季风降水的主要水汽源区; 水鸣洞 NSM03 石笋记录与南亚季风区瓦什卡洞的 WBS 石笋记录以及中国藏南波密—林芝地区的树轮记录存在明显的相关关系, 也进一步地表明中国东部季风区的水汽主要来自印度洋; 亚洲季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录在过去 1 000 a 的变化趋势基本一致, 但是中国东部季风区降水变化存在很大的空间差异, 这表明季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录不一定都能指示当地降水量的变化; 因此, 中国季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录主要指示是东亚季风环流的信息, 当东亚季风环流强的时候, 季风区石笋氧同位数偏轻; 反之亦然。

关 键 词: 石笋; 氧同位素; 季风环流; 水鸣洞; 中国东部

中图分类号: P532

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2021)04-0098-07

石笋具有高分辨率和精确定年等优势, 是当前国际古气候研究领域的重要研究方向之一。目前, 石笋作为记录古气候环境变化的历史档案, 在探讨亚洲季风变迁历史、驱动因素等方面取得了很大进展^[1-6]。Wang^[7]研究了湖北神农架石笋氧同位素, 认为石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值反映的是东亚季风的强弱变化; Yang 等^[8]认为石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 在短时间尺度上的轻重变化主要反映季风降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的信息, 指示了西南季风的年际变化; Maher^[9]认为东亚季风区除了东部沿海受东亚季风影响外, 其余季风区都受西南季风影响, 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 可能反映了水汽来源而非雨量; Pausata 等^[10]的模拟显示中国季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 可能指示了印度季风强度而非东亚季风区降水量; 谭明^[11]也认为中国季风区石笋氧同位素 10~100 a 尺度变化为“环流效应”, 记录了不同年代海气环流转换造成的中国季风区水汽来源比例变化; Clemens 等^[12]指出, 中国石笋氧同位素所指示的降水氧同位素有不同环流的夏季风降水、冬季风降水和春季源自太平洋水汽降水的 3 种水汽来源组分, 最终确定石笋同位素记录是上述 3 种降水的混合结果。综上所述, 由于影响石笋氧同位素值变化的因素较多, 目前, 人们对东亚季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 所指示的气候意义争议较大, 争论可概括为 2 类观点, 一类观点认为, 石笋氧同位素能够记录夏季风强度或者季风降水量变化, 可以用来重建亚洲夏季风的变化; 另一类观点则认为, 石笋氧同位素指示水汽来源、路径或者不同水源水汽比例的变化, 并不能反映亚洲夏季风的强弱变化。近年来, 随着大量高分辨率石笋记录研究的发表, 为从空间角度对比分析提供了基础数据。因此本文利用丰都水鸣洞石笋 NSM03 精确定年数据和 $\delta^{18}\text{O}$ 数据建立高分辨率石笋记录, 并结合其他已经发表的亚洲季风区石笋氧同位素记录, 分析过去 1 000 a 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值的空间变化特征和变化趋势, 进一步明确东亚季风区石笋氧同位素的气候意义。

① 收稿日期: 2019-11-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971109); 中央高校基本科研业务费重大项目(XDJK2012A003)。

作者简介: 鄢应燃, 硕士研究生, 主要从事石笋记录与全球变化的研究。

通信作者: 杨勋林, 副教授。

1 研究区和研究方法

丰都水鸣洞位于重庆长江中上游地区, 属于亚热带湿润型季风气候, 受东亚季风和西南季风的共同作用, 对季风变化敏感, 是研究季风的理想区域。水鸣洞石笋 NSM03 在近 500 a 内共测得碳氧同位素 490 个, 平均分辨率达到 1 年。氧同位素分析测试在西南大学同位素实验室完成, 分析仪器为 Kiel-IV 碳酸盐自动进样装置联动 Delta V plus 质谱仪, V-PDB 标准, $\delta = [(R_{\text{sample}} - R_{\text{std}}) - 1] \times 1\,000$, 其中 $R = {}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}$, 分析误差 $n \leq \pm 0.06\text{‰}$ 。在石笋抛光面上沿着生长轴方向用 5 mm 钻头取得 7 个年代样品, 单个样品质量约 100~200 mg; 年代样品 NSM31 和 NSM37 在台湾大学地质系高精度质谱与环境变迁实验室测试, 其余样品在美国明尼苏达大学地质与地球物理系同位素实验室测试; 测试仪器为 MC-ICP-MS Neptune, 按 Shen 等^[13]方法, 年龄误差 $a \leq 1\%$ (2σ)。

为探讨亚洲季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 在 AD(Anno Domini, 公元)1 000~2 000 a 时段内的空间变化规律, 本文在季风区选取同一水汽通道的 8 个洞穴进行空间和时间对比分析, 除长江中上游地区水鸣洞外的其他 7 个洞穴分别是位于阿拉伯海沿岸卡夫迪佛洞^[15]、孟加拉湾沿岸丹达克洞^[17]和祝玛尔洞^[16]、印度东北部瓦什卡洞^[17]、中国华南地区董哥洞^[18], 以及秦岭地区万象洞^[19]和黄爷洞^[20], 这 8 个洞穴石笋记录都具有高分辨率、精确定年的特征。为了进行相关计算分析, 探讨不同区域石笋记录的空间联系, 需要将 2 列不同分辨率的原始石笋序列在 Mac OS X 系统使用 AnalySeries 2.0.4 软件^[21]重新插值为新的具有相同分辨率和数据年代逐一对应的 2 列新序列, 这种方法不会改变原有数列模式, 适合于不同分辨率的数据进行比较, 并已广泛用于比较古气候时间序列^[22]的研究。

2 结果与讨论

2.1 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 空间分布特征

田红等^[23]利用 NCEP/NCAR 的 1958—1998 年再分析资料研究夏季东亚季风区水汽输送特征, 结果显示夏季输送到中国东部季风区的水汽主要有来自低纬的 3 条水汽通道, 即西南通道、南海通道和东南通道, 分别体现了南亚季风(印度季风)、南海季风、副热带季风。本研究所选取的 8 个洞穴正好沿着三大水汽通道中的西南水汽通道分布, 尽管受海拔高度、温度等因素影响, 但近 1 000 a 以来, 亚洲季风区洞穴石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值沿着西南水汽通道由低纬向高纬、沿海向内陆逐渐变轻, 与现代降水雨水氧同位素分布规律基本一致: 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值呈现出随着纬度的升高, 距离海洋距离增加, 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值和变化范围都逐渐偏轻, 呈现出与大气降水相似的纬度效应和海陆效应(表 1, 表 2)。位于印度洋西岸的阿曼石笋卡夫迪佛洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值可达 -0.58‰ , 印度次大陆的记录较轻, 而中国最东面的石笋氧同位素最轻, $\delta^{18}\text{O}$ 平均值都小于 -7‰ 。中国东部季风区内部也存在较大的差异^[24-25]: 我国华南地区较重, 董哥洞的 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值为 -7.38‰ ; 长江中上游地区较轻, 水鸣洞的 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值偏轻至 -8.05‰ ; 秦岭地区最轻, 黄爷洞的 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值偏轻至 -9.15‰ 。根据瑞利分馏原理可知, 对于来自大洋水汽源地的降水, 降水中氧同位素沿水汽输送路径不断衰减。亚洲季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值分布特征显示中国季风区的水汽主要来自印度洋, 也表明中国季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值在短时间尺度上主要受西南季风影响。

表 1 亚洲季风区过去 1 000 年石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 空间变化

洞 穴	石笋	纬度	经度	$\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围	$\delta^{18}\text{O}$ 平均值
① 卡夫迪佛洞 ^[15]	S3	17°07'N	54°05'E	-1.67~0.40	-0.58
② 祝玛尔洞 ^[16]	JHUMAR	18°52'N	81°52'E	-5.50~-3.12	-4.24
③ 丹达克洞 ^[17]	D 27	19°00'N	82°00'E	-5.03~2.95	-4.16
④ 瓦什卡洞 ^[17]	WSB	25°15'N	91°52'E	-4.66~-7.24	-5.86
⑤ 董哥洞 ^[18]	DA	25°02'N	108°05'E	-8.14~-6.64	-7.38
⑥ 水鸣洞	SM3	29°47'N	107°47'E	-8.79~-7.60	-8.05
⑦ 万象洞 ^[19]	WX42B	33°19'N	105°00'E	-8.64~-7.50	-8.08
⑧ 黄爷洞 ^[20]	HY3	33°35'N	105°07'E	-9.73~-8.76	-9.15

亚洲季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值空间分布特征显示印度洋是东亚季风区水汽的重要来源, 这也得到现代器测数据的支持, 现代器测数据显示中国东部季风区的降水主要来自印度洋^[14,23,27]。观测数据显示夏季输送到

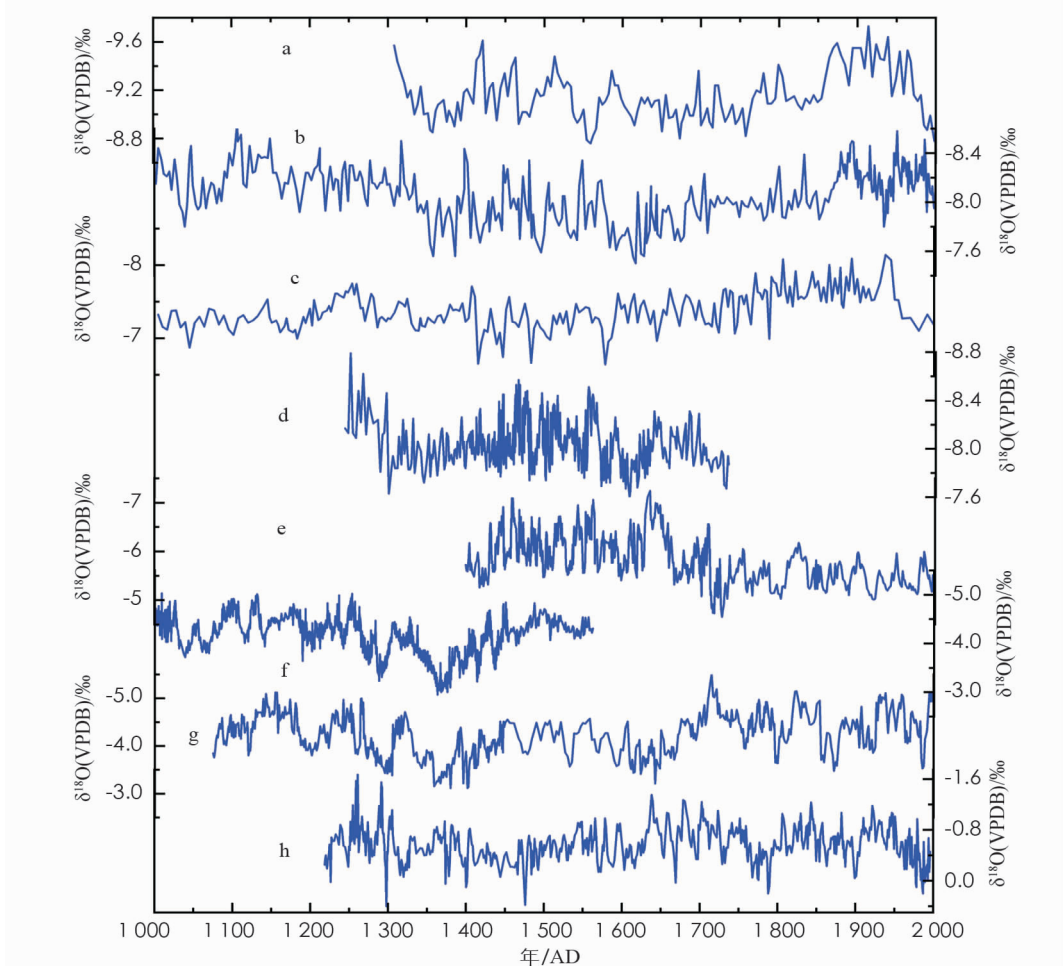
中国东部季风区的水汽经西南通道(来自印度洋)向中国大陆输送水汽的平均强度大约是东南通道(来自太平洋)的 2 倍,但后者的变率较大,这说明印度洋不仅是中国季风区的主要来源,而且是稳定来源^[23,26]. 亚洲及印度洋和太平洋整层大气积分夏季平均水汽输送数据显示,中国大陆夏季水汽主要来自印度洋,部分水汽来自太平洋^[14]. Cheng 等^[28]指出,南亚季风和东亚季风构成一个巨大的亚洲季风环流系统,南亚季风区位于亚洲季风环流的前端,南亚季风深入东亚季风区,东亚季风区位于亚洲季风环流的尾部,东亚季风区更多的是地理区域概念.

表 2 中国季风区各地区站点降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化范围^[26]

地区	$\delta^{18}\text{O}$ 值范围/‰	$\delta^{18}\text{O}$ 降水量加权平均值/‰	
		2005 年	2006 年
南部地区	-16.2~0.38	-6.5	-5.94
华北地区	-19.07~-0.80	-8.46	-6.72
东北地区	-28.21~-0.99	-13.70	-11.66

2.2 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录对比

卡夫迪佛洞、祝玛尔洞、丹达克洞和瓦什卡洞位于印度洋沿岸,是典型的南亚季风区,水汽主要来源于印度洋,来源单一且离水源近,因此影响南亚季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化的因素相对简单,石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值气候意义比较明确. 前人^[15]研究表明印度洋沿岸大部分洞穴石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 值主要受雨量效应的影响,石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录反映南亚季风强弱和季风降水量,当南亚季风强的时候,季风降水增多,石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏轻,反之亦然. 中国东部季风区在水汽来源、水汽通道和下垫面性质等方面都比较复杂,石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值的气候意义争议也较大. 分析对比隶属于不同区域的洞穴石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化趋势(图 1),探讨南亚季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录和东亚季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的关系,有利于明确东亚季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的气候意义.



a. 黄谷洞^[20]; b. 万象洞^[19]; c. 董哥洞^[18]; d. 水鸣洞; e. 瓦什卡洞^[17]; f. 丹达克洞^[17]; g. 祝玛尔洞^[16]; h. 卡夫迪佛洞^[15].

图 1 亚洲季风区过去 1 000 a 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录对比图

尽管上述 8 个洞穴石笋记录的地理位置、定年误差和分辨率不同,但是通过对比分析可以发现它们在相同生长期内石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值具有相似的变化趋势:石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 AD 1 300 a 附近开始迅速偏重,可能暗示小冰期的开始,在随后的 500 a 里石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 高频振荡,显示气候的不稳定性;多数石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 AD 1 900 a 附近迅速偏轻,显示小冰期的结束; $\delta^{18}\text{O}$ 值在 AD 1 900~2 000 a 期间逐渐加重趋势明显,与现代暖期相对应。

为了进一步探讨东亚季风区和南亚季风区石笋记录的相互关系,我们对东亚季风区的水鸣洞 NSM03 石笋和属于典型印度季风区瓦什卡洞的 WSB 石笋记录进行相关分析。WSB 这一石笋所在地瓦什卡洞位于印度洋沿岸,在南亚季风的核心区,水汽来源于印度洋,而水鸣洞则在东亚季风的核心季风区。水鸣洞石笋 NSM03 $\delta^{18}\text{O}$ 记录与印度瓦什卡洞石笋 WSB $\delta^{18}\text{O}$ 记录在 AD 1 400~1 750 a 期间的相关系数为 0.16 ($n=250$, 达到 99.0% 置信水平),由于受石笋定年的限制,2 个洞穴石笋记录相关系数并不是很高,但从整体趋势上来看,二者呈现出相似的变化趋势,都存在着一系列的气候波动。同时我们把水鸣洞 NSM03 石笋记录与典型南亚季风区的中国藏南波密—林芝地区的树轮进行对比,位于中国西藏东南部的波密—林芝地区也属于典型的南亚季风区,年降水主要集中在夏季,季风带来的降水占全年降水的 85% 以上,也是西南水汽进入中国的途径之一。对比水鸣洞石笋记录和波密—林芝地区的树轮记录^[29]发现,在 AD 1 380~1 750 a 时段,2 个记录在变化趋势上具有相似性,相关系数为 -0.22 ($n=130$, 达到 99.0% 置信水平)。在 AD 1 560~1 570 a 这 20 年间,藏南树轮指数升高,树轮宽度增加,说明这一时间藏南温度升高,降水增多,雨热条件适宜;同时水鸣洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值大幅度偏轻,与树轮记录中趋势一致,显示水鸣洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化与南亚季风相关。

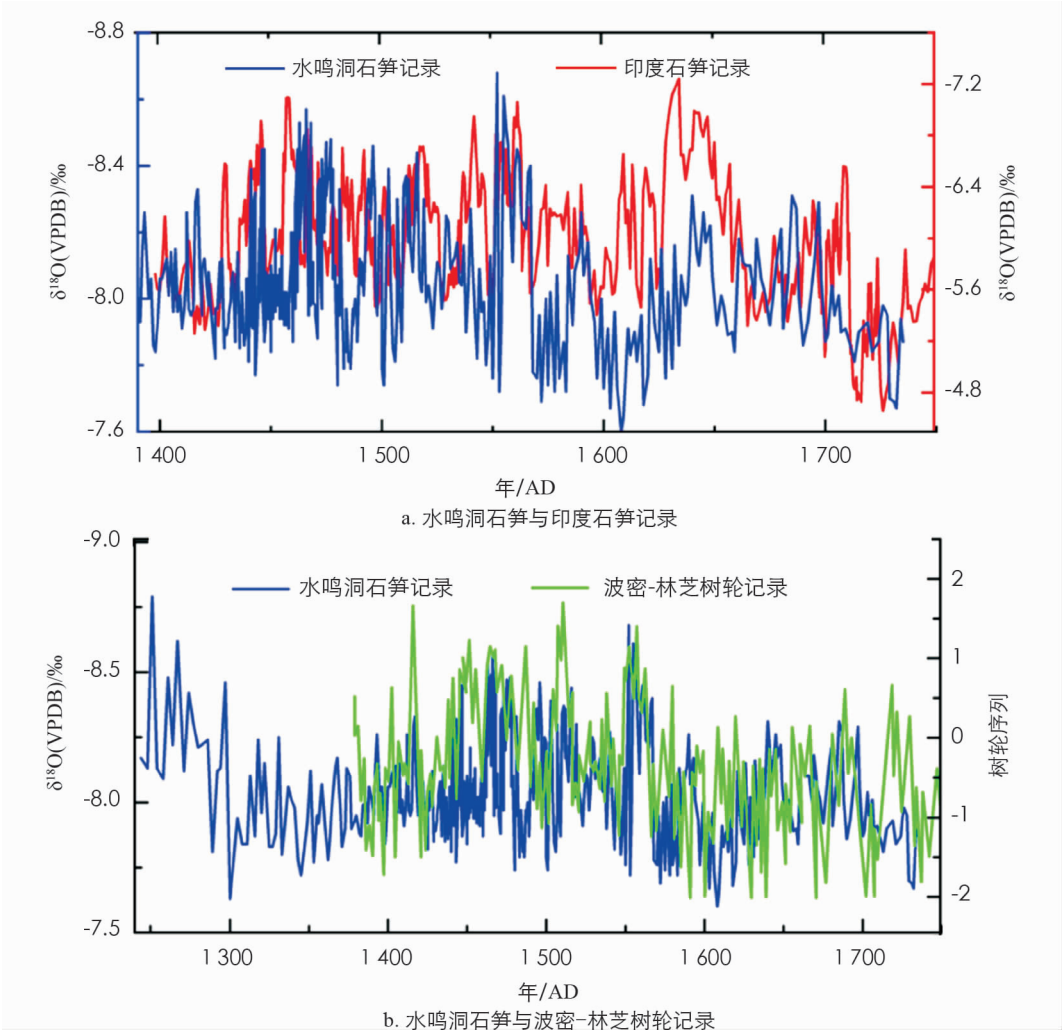


图 2 水鸣洞石笋 NSM03 $\delta^{18}\text{O}$ 记录(蓝色)与印度石笋 WSB $\delta^{18}\text{O}$ 记录(红色)^[17](a)以及水鸣洞石笋 NSM03 $\delta^{18}\text{O}$ 记录(蓝色)与波密—林芝树轮记录(绿色)^[29](b)对比

以上分析显示中国季风区洞穴石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值沿着西南水汽通道向内陆逐渐变轻, 记录了中国季风区降水水汽来源及运动轨迹, 印度洋是东亚季风区降水水汽的重要来源, 亚洲季风区石笋记录存在着相似的变化趋势。但是, 器测数据和历史气候记录表明中国东部季风区降水在年际一年代际时间尺度上存在明显的空间差异, 季风强度与降水的关系也随地区的不同而异^[30]。Zhou 等^[31]的研究显示, 在过去 1 000 a 中国东部季风区在世纪尺度上也存在着北旱(涝)南涝(旱)的空间差异; Dayem 等^[32]的研究也显示中国东部季风区和印度东部地区年均降水和雨季降水的相关性小于 500 km, 但来自亚洲季风区不同洞穴石笋记录普遍具有相似性。可见, 中国季风区洞穴石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值与中国东部季风降水没有必然的联系, Pausata 等^[10]模拟结果显示的中国东部季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值并不指示东亚季风区降水量, 而是指示南亚季风强度; Liu 等^[33]的模拟也显示偏南季风增强是东亚季风增强的主要标志, 中国季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值主要反映上游水汽枯竭, 与南亚季风区主要受降水量效应不同。

综上所述, 中国东部季风区的水汽主要来源于印度洋, 作为南亚季风延伸的西南气流构成了东亚季风环流的主体; 中国东部季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值主要指示东亚季风环流强度; 当东亚季风环流强的时候, 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏轻; 反之亦然^[34-35]。

3 结 论

亚洲季风系统由南亚季风和东亚季风 2 个子系统组成, 相较于南亚季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值有比较明确的气候环境意义, 东亚季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值所指示的气候意义争议较大。本文通过对亚洲季风区石笋近 1 000 a 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值的空间分布特征和相关性分析, 初步得出以下结论:

1) 亚洲季风区洞穴石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值沿着西南水汽通道由低纬向高纬、沿海向内陆逐渐变轻, 记录了中国季风区降水水汽来源及运动轨迹, 印度洋是东亚季风区降水水汽的重要来源, 这也得到现代器测气象数据的支持。

2) 东亚季风区水鸣洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录和南亚季风区的瓦什卡洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录以及中国藏南树轮序列在 AD 1 250~1 750 a 时段内具有明显的相关性, 进一步表明东亚季风与南亚季风属于同一季风环流, 中国东部季风区的水汽主要来自印度洋。

3) 亚洲季风区洞穴石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录在过去 1 000 a 内具有相似的变化趋势, 但中国东部季风区降水存在着很大空间差异, 中国季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值是否能作为中国东部季风区降水量的替代指标还需进一步深入研究。中国东部季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值主要指示东亚季风环流强度; 当东亚季风环流强的时候, 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏轻; 反之亦然。

致 谢: 台湾大学沈川洲教授、吴忠哲博士和兰州大学张德忠博士为本文测试部分²³⁰Th 年龄, 在此一并致谢; 同时, 也十分感谢匿名评审人提出的有益建议。

参考文献:

- [1] 杨勋林, 陈发虎, 袁道先, 等. 高分辨率石笋记录的三峡库区小冰期气候变化 [J]. 地理科学, 2013, 33(5): 629-634.
- [2] WANG Y, CHENG H, EDWARDS R L, et al. Millennial-and Orbital-Scale Changes in the East Asian Monsoon over the Past 224, 000 Years [J]. Nature, 2008, 451(7182): 1090-1093.
- [3] 杨 琰, 袁道先, 程 海, 等. 末次冰消期亚洲季风突变事件的精确定年: 以贵州衙门洞石笋为例 [J]. 中国科学(D 辑), 2010(2): 199-210.
- [4] 姜修洋, 李志忠, 李金全, 等. 最近 500 年来福建玉华洞石笋氧同位素记录及气候意义 [J]. 地理科学, 2012, 32(2): 207-212.
- [5] LIU J H, ZHANG P Z, CHENG H, et al. Asian Summer Monsoon Precipitation Recorded by Stalagmite Oxygen Isotopic Composition in the Western Loess Plateau during AD1875-2003 and Its Linkage with Ocean-Atmosphere System [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(13): 2041-2049.
- [6] 张月明, 杨勋林, 黄 帆, 等. 重庆丰都高分辨率石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录与 AD1250-1750a 季风气候变化 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2013, 35(3): 117-123.
- [7] WANG Y J. A High-Resolution Absolute-Dated Late Pleistocene Monsoon Record from Hulu Cave, China [J]. Science, 2001, 294(5550): 2345-2348.
- [8] YANG X L, ZHANG P Z, CHEN F H, et al. Modern Stalagmite Oxygen Isotopic Composition and Its Implications of

- Climatic Change from a High-Elevation Cave in the Eastern Qinghai-Tibet Plateau over the Past 50 Years [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(9): 1238-1247.
- [9] MAHER B A. Holocene Variability of the East Asian Summer Monsoon from Chinese Cave Records: a Re-Assessment [J]. The Holocene, 2008, 18(6): 861-866.
- [10] PAUSATA F S R, BATTISTI D S, NISANCIOGLU K H, et al. Chinese Stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ Controlled by Changes in the Indian Monsoon during a Simulated Heinrich Event [J]. Nature Geoscience, 2011, 4(7): 474-480.
- [11] 谭明. 环流效应: 中国季风区石笋氧同位素短尺度变化的气候意义——古气候记录与现代气候研究的一次对话 [J]. 第四纪研究, 2009, 29(5): 851-862.
- [12] CLEMENS S C, PRELL W L, SUN Y B. Orbital-Scale Timing and Mechanisms Driving Late Pleistocene Indo-Asian Summer Monsoons: Reinterpreting Cave speleothem $\delta^{18}\text{O}$ [J]. Paleoceanography, 2010, 25(4): 页码不详.
- [13] SHEN C C, CHENG H, EDWARDS R L, et al. Measurement of Attogram Quantities of ^{231}Pa in Dissolved and Particulate Fractions of Seawater by Isotope Dilution Thermal Ionization Mass Spectroscopy [J]. Analytical Chemistry, 2003, 75(5): 1075-1079.
- [14] ZHOU T J, YU R C. Atmospheric Water Vapor Transport Associated with Typical Anomalous Summer Rainfall Patterns in China [J]. Journal of Geophysical Research, 2005, 110(D8): D08104.
- [15] FLEITMANN D, BURNS S J, NEFF U, et al. Palaeoclimatic Interpretation of High-Resolution Oxygen Isotope Profiles Derived from Annually Laminated Speleothems from Southern Oman [J]. Quaternary Science Reviews, 2004, 23(7-8): 935-945.
- [16] SINHA A, STOTT L, BERKELHAMMER M, et al. A Global Context for Megadroughts in Monsoon Asia during the Past Millennium [J]. Quaternary Science Reviews, 2011, 30(1-2): 47-62.
- [17] SINHA A, CANNARIATO K G, STOTT L D, et al. A 900-Year (600 to 1500 A. D.) Record of the Indian Summer Monsoon Precipitation from the Core Monsoon Zone of India [J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(16): 130-144.
- [18] HE Y Q. High Resolution Stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ Records over the Past 1000 Years from Dongge Cave in Guizhou [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(10): 1003.
- [19] ZHANG P, CHENG H, EDWARDS R L, et al. A Test of Climate, Sun, and Culture Relationships from an 1810-Year Chinese Cave Record [J]. Science, 2008, 322(5903): 940-942.
- [20] TAN L C, CAI Y J, AN Z S, et al. Centennial- to Decadal-Scale Monsoon Precipitation Variability in the Semi-Humid Region, Northern China during the last 1860 Years: Records from Stalagmites in Huangye Cave [J]. The Holocene, 2011, 21(2): 287-296.
- [21] PAILLARD D, LABEYRIE L, YIOU P. Macintosh Program Performs Time-Series Analysis [J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 1996, 77(39): 379.
- [22] ZHAO Y, YU Z C, CHEN F H, et al. Vegetation Response to Holocene Climate Change in Monsoon-Influenced Region of China [J]. Earth-Science Reviews, 2009, 97(1-4): 242-256.
- [23] 田红, 郭品文, 陆维松. 中国夏季降水的水汽通道特征及其影响因子分析 [J]. 热带气象学报, 2004, 20(4): 401-408.
- [24] TAN L C, CAI Y J, CHENG H, et al. Summer Monsoon Precipitation Variations in Central China over the Past 750 years Derived from a High-Resolution Absolute-Dated Stalagmite [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2009, 280(3-4): 432-439.
- [25] 谭明, 南素兰. 中国季风区降水氧同位素年际变化的“环流效应”初探 [J]. 第四纪研究, 2010, 30(3): 620-622.
- [26] 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等. 我国南部夏季季风降水水汽来源的稳定同位素证据 [J]. 自然资源学报, 2007, 22(6): 1004-1012.
- [27] 周晓霞, 丁一汇, 王盘兴. 夏季亚洲季风区的水汽输送及其对中国降水的影响 [J]. 气象学报, 2008, 66(1): 59-70.
- [28] CHENG H, SINHA A, WANG X F, et al. The Global Paleomonsoon as Seen through Speleothem Records from Asia and the Americas [J]. Climate Dynamics, 2012, 39(5): 1045-1062.
- [29] ZHU H F, SHAO X M, YIN Z Y, et al. August Temperature Variability in the Southeastern Tibetan Plateau since AD 1385 Inferred from Tree Rings [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2011, 305(1-4): 84-92.
- [30] ZHANG D E, LI H C, KU T L, et al. On Linking Climate to Chinese Dynastic Change: Spatial and Temporal Variations of Monsoonal Rain [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(1): 77-83.
- [31] ZHOU X J, ZHAO P, LIU G, et al. Characteristics of Decadal-Centennial-Scale Changes in East Asian Summer Mon-

- soon Circulation and Precipitation during the Medieval Warm Period and Little Ice Age and in the Present Day [J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(28-29): 3003-3011.
- [32] DAYEM K E, MOLNAR P, BATTISTI D S, et al. Lessons Learned from Oxygen Isotopes in Modern Precipitation Applied to Interpretation of Speleothem Records of Paleoclimate from Eastern Asia [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2010, 295(1-2): 219-230.
- [33] LIU Z Y, WEN X Y, BRADY E C, et al. Chinese Cave Records and the East Asia Summer Monsoon [J]. Quaternary Science Reviews, 2014, 83: 115-128.
- [34] YANG X L, YANG H, WANG B Y, et al. Early-Holocene Monsoon Instability and Climatic Optimum Recorded by Chinese Stalagmites [J]. The Holocene, 2019, 29(6): 1059-1067.
- [35] CHENG H, ZHANG H W, ZHAO J Y, et al. Chinese Stalagmite Paleoclimate Researches: a Review and Perspective [J]. Science China Earth Sciences, 2019, 62(10): 1489-1513.

On Spatial Variation and Its Implications of Stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ from East Asian Monsoon Region over the past 1000a

YAN Ying-ran, LIU Rui-kai, YANG Xun-lin,
LÜ Chun-yan, ZHANG Ri-ping, ZHANG Rui

Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir (Ministry of Education) / School of Geographical Sciences,
Southwest China University, Chongqing 400715, China

Abstract: High-resolution stalagmite absolute-dated and oxygen record by Shuiming Cave Stalagmite NSM03 from Fengdu has been studied in combination with other published in Asian monsoon region stalagmite oxygen isotope record, and the spatial variation and its implications of stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ from East Asian monsoon region over the past 1000a also been discussed. The result show that the stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ record change in Asian monsoon region have an obviously latitude effect and sea effect over the past 1000a, similar to atmospheric precipitation, along the water vapor transport path to decay, stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ become lighter; Asian monsoon region stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ recording trends within the past 1000a tends to be consistent; there is significant correlation between Shuiming cave NSM03 stalagmite record and the South Asian monsoon region Wah Shikar cave WBS stalagmite record and Bomi-Linzhi area tree ring records of Southern Tibet in China. The study indicated that China Eastern monsoon region water mainly from India ocean, the monsoon region China stalagmite is a record of the South Asian monsoon information, when the South Asian monsoon is strong, the East Asian monsoon region stalagmite oxygen isotope is relatively light; and vice versa.

Key words: stalagmite; oxygen isotope; Shuiming Cave; Asian monsoon region

责任编辑 胡 杨