

doi:10.3799/dqkx.2015.020

中国东部季风区与西北干旱区 降水变化的石笋记录对比

胡超涌,汪颖钊,李骛扬,廖金,谢树成

中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室,湖北武汉 430074

摘要: 中国东部季风区和西北干旱区分别受控于季风和西风环流,是全球变化响应的敏感区域.过去50年全球升温,西北干旱区降水显著增加,而东部季风区的降水变化不明显.在未来全球继续变暖的情况下,两个地区降水将如何变化尚不清楚.利用湖北神农架三宝洞和新疆特克斯科桑洞的石笋生长速率记录,考察它们对降水变化的响应,研究冰期—间冰期旋回中两地的降水变化及其差异,为未来气候变暖下的中国降水模型预测提供一个验证实例.研究表明,500 ka以来中国东部季风区和西部干旱区降水呈现冰期—间冰期波动变化,气温偏高的间冰期降水量大.但是,中国西北干旱区降水的响应滞后于东部季风区,指示两地降水对温度变化的响应可能并非完全同步.

关键词: 降水;洞穴沉积物;生长速率;三宝洞;科桑洞;气候变化.

中图分类号: P467 **文章编号:** 1000—2383(2015)02—0268—07 **收稿日期:** 2014—10—08

Speleothem-Based Rainfall Records: A Comparison of the Arid Region of Northwest China to the Monsoon Region of the Eastern Part of China

Hu Chaoyong, Wang Yingzhao, Li Aoyang, Liao Jin, Xie Shucheng

State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The monsoon region of the eastern part of China and the arid region of western part of China are the sensitive areas of global change, which are separately controlled by monsoon and westerly circulation. In the past 50 years, due to global warming, the precipitation of the arid region of Northwest China has significantly increased while the precipitation of the monsoon region of the eastern part of China shows no obvious variation. The future trend of two regional precipitations remains uncertain under the conditions of continuous global warming. Based on the speleothem growth rate records from Sanbao Cave, Shennongjia, Hubei, and Kesang Cave, Tekesi County, Xinjiang, we investigate the responses of those records to precipitation and the precipitation variations as well as distinctions of the two regions on glacial-interglacial scale, providing a case for precipitation forecasts from climatic models in future warming in China. It is found that the precipitation of the eastern part of China and the northwestern part of China fluctuate during glaciation-interglaciation, with an abundant precipitation in both two regions during interglacial period, corresponding to higher temperatures. Nevertheless, the precipitation of Northwest China lags behind that of the eastern part of China, implying the correlation between precipitation and temperature of the two regions are probably not completely simultaneous.

Key words: precipitation; speleothem; growth rate; Sanbao Cave; Kesang Cave; climate change.

气候观测和模拟表明,随着气候变暖,大气保持的水汽增多,全球降水增加,但降水的变化率增大,区域差异增强,极端天气出现的频率增加.因而,研究全球变暖下的降水时空变化特征,准确预测未来

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973”项目(No.2011CB808800);国家自然科学基金项目(Nos.41371216,41030103,41130207).
作者简介: 胡超涌(1964—),男,教授,主要从事过去全球变化.E-mail:chyhu@cug.edu.cn

引用格式: 胡超涌,汪颖钊,李骛扬,等,2015.中国东部季风区与西北干旱区降水变化的石笋记录对比.地球科学——中国地质大学学报,40(1): 268—274.

区域降水,有利于人类在生产和生活方面的规划,从而提高人类对全球升温的适应能力,实现社会、经济和环境的可持续、协调发展。

中国地域广大,气候分带性强,季风和西风等环流并存,导致中国降水对全球变化的响应存在区域上的差异。Wang *et al.* (2004) 利用树轮、史料、冰芯建立了中国西部的年降水序列,指出 20 世纪后半叶西部降水的增加趋势非常显著,与东部降水的变化趋势不一致。陆龙骅和和张德二(2013)分析了 1951—2010 年中国 652 个站年降水的变化趋势,发现西部地区的降水增加趋势较为显著,而在广大的东南地区,除零星站点外,大部分地区均无明显的变化趋势。周连童和黄荣辉(2003)分析了我国夏季气候的年际变化特征,发现自 1977 年起气温均上升,但华北地区降水减少导致严重干旱,而西北地区则降水增多,长江流域夏季降水也明显增加。我国降水对全球变暖空间差异响应的认识是基于过去 50 年的资料而获得的,是全球升温约 0.6 °C 的结果,那么在未来全球持续增温的情况下,中国降水是否能保持现有的格局?

气候模拟是预测未来降水变化的重要技术手段之一。赵宗慈(1990)模拟了二氧化碳增加对气候变化的影响,发现温室气体效应将导致高纬度亚洲季风区年降水及中纬度冬季降水增加;秦大河(2002)的气候模拟发现,到 2050 年中国总体降水呈增加趋势,尤其西北地区降水增加明显;施雅风等(2003)指出全球气候变暖下中国西北降水有增加的总趋势,21 世纪上半期气候向暖湿转变;Huang *et al.* (2013)利用研究了中纬度亚洲降水变化的空间差异,发现西风控制的中亚干旱区和季风控制的华北地区,其年降水呈现相反的变化趋势。Solomon *et al.* (2007)指出,未来 100 年,北美和欧洲次极地降水增加,亚热带降水减少,但亚洲出现亚热带变干不太明显的现象。然而,气候模拟也存在不确定性,需要实例予以验证。

中国过去降水的时空变化是验证气候模型的一个良好实例。An *et al.* (2000)提出全新世以降水为主要特征的东亚夏季风具有穿时性:季风边缘区在早全新世时期季风最强盛,从而其推断夏季风能够影响到的干旱区,气候变湿润,之后季风衰退南撤,干旱区东部边缘变干。Hong *et al.* (2005)对比了印度季风和东亚季风区泥炭记录,发现 $\delta^{13}\text{C}$ 指示的干湿变化存在负相关关系。Chen *et al.* (2008)利用 11 个具有准确定年的湖泊记录,考察了中亚干旱区的全新世的湿度变化,发现与东亚季风区存在错时相。这些研究都证明了区域降水对全球变暖的差异性响

应,但受年代学的限制,现有的区域降水对比主要集中在全新世,其他时段的记录较少。

洞穴石笋具有定年精确、分辨率高、时间跨度长等优点,是第四纪陆地气候重建的理想材料。近十年来,我国科学家围绕东亚季风演变开展了石笋古气候学的研究,挖掘了大量的分辨率石笋记录(Wang *et al.*, 2001; Yuan *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2008; 吴江莹等, 2011; Cheng *et al.*, 2012; 姜修洋等, 2012)。这些记录遍布我国的东南西北,为了解全球变暖的区域响应及其差异提供了可能。Cai *et al.* (2010)比较了末次冰消期以来中国东部石笋的氧同位素记录,认为东亚季风降水变化并非等时;Cheng *et al.* (2012)在新疆科桑洞挖掘出长达 500 ka 的石笋氧同位素记录,发现当地气候呈现岁差周期变化,太阳辐射强时氧同位素偏负,指示亚洲季风及其水汽的侵入。但是,石笋氧同位素受多种气候因子的影响,其对当地降水量的指示尚存在不确定性(Hu *et al.*, 2008; Maher, 2008; Clemens *et al.*, 2010; Dayem *et al.*, 2010; Pausata *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2014),有待其他指标的验证。

本研究利用前人发表的 2 个洞穴(湖北神农架三宝洞和新疆科桑洞)石笋年龄数据(Wang *et al.*, 2008; Dong *et al.*, 2010; Cheng *et al.*, 2012),获取了 500 ka 以来的石笋生长信息,并论证了石笋生长与气候的关系,接着讨论了东亚季风区和西北干旱区的干湿变化及其对全球变化的响应。

1 材料和方法

三宝洞(31°40'N, 110°26'E, 海拔 1 900 m)和科桑洞(42°52'N, 81°45'E, 海拔 2 000 m)分别位于中国东部的湖北神农架自然保护区和中国西北部的新疆特克斯县(图 1)。湖北神农架自然保护区位于长江三峡段北岸,与黄土高原南缘相邻,主要受东亚季风的影响,年均温度为 8~9 °C,年降水 1 900~2 000 mm,其中夏季降水占年总降雨量的 80% 以上;新疆特克斯县位于我国西北部的干旱区,主要受西风影响,年平均温度为 4~5 °C,年降水总量约 500 mm,其中 400 mm 来自夏季的降水。三宝洞和科桑洞所处的地理位置和气候特征使其分别成为中国东部季风区和西北干旱区的典型代表。

最近 10 年,南京师范大学的汪永进教授和西安交通大学的程海教授及其团队分别在三宝洞和科桑洞开展了石笋古气候研究,获取了长达 500 ka 的古

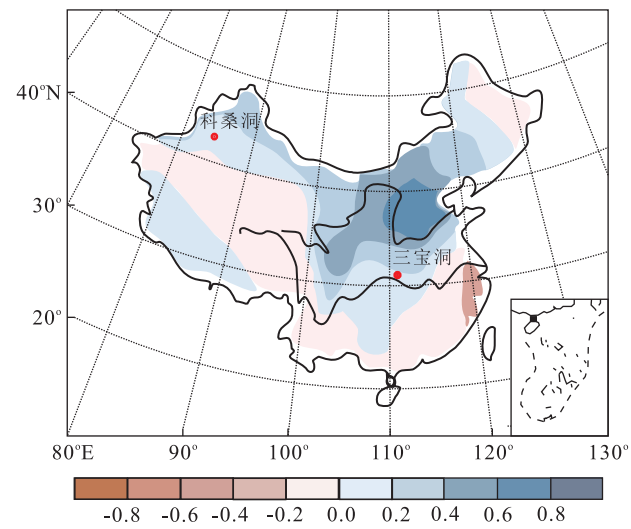


图 1 三宝洞和科桑洞的地理位置

Fig.1 Geographic locations of Sanbao Cave and Kesang Cave

不同颜色条带表示中国区域降水与华北降水的相关系数(据王绍武等, 2006).三宝洞和科桑洞与华北降水的相关性相似(0.2~0.4),说明两地的近代降水具有相似的变化模式

气候记录,在 *Nature*、*Science* 等期刊上发表了重要的成果.迄今为止,三宝洞公开发表的石笋记录有 17 个,最老的年龄为 509 ± 7 ka BP (Wang *et al.*, 2008; Dong *et al.*, 2010),而科桑洞已经挖掘的石笋记录共 8 个,最老的年龄是 499 ± 18 ka BP (Cheng *et al.*, 2012).所有的记录均拥有准确可靠的 U-Th 绝对年龄,为了解 2 个洞穴的石笋生长及区域气候变化提供了基本资料.

本研究中,笔者依据三宝洞和科桑洞石笋的定年样品编号、位置及 U-Th 年龄等信息(数据来源: <http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/speleothem.html>),计算其生长速率.计算的方法为差值法,即将同一个石笋中相邻两个定年点的深度(距顶部位置)相减得到间距,除以年龄的差值,获得生长速率,单位为 mm/ka.石笋生长期间出现沉积间断,导致计算的生长速率减小.然而,考虑到沉积间断本身就是降水减少的一个标志,与生长速率的指示意义相似;因而,计算沉积速率时,沉积间断并未做处理.此外,鉴于研究聚焦于轨道尺度的石笋生长速率与降水关系,关注的是长时间尺度气候变化,即重趋势轻细节,所以计算生长速率时没有考虑测年误差.

2 结果

湖北神农架三宝洞和新疆特克斯科桑洞石笋的

生长速率如图 2.三宝洞 17 个石笋的平均生长速率为 34.5 mm/ka,最大值为 410.0 mm/ka (SB25, 约 130 ka BP),最小值为 0.3 mm/ka (SB24, 约 178 ka BP).500 ka 以来,该洞穴石笋的生长速率呈现较为明显的周期变化,在距今 420~400 ka、220~200 ka、130~100 ka 和 14~8 ka 附近表现出较为快速的生长特征;值得注意的是,该洞穴同一时段生长的石笋,具有相似的生长速率变化模式.例如,在 10 ka BP 和 120 ka BP 附近,多个石笋均表现比其他时段更快的生长速率;科桑洞 8 个石笋的平均生长速率为 1.64 mm/ka,最大值为 19.60 mm/ka (SB24, 约 173 ka BP),最小值为 0.02 mm/ka (KS08, 约 230 ka BP).同样,石笋生长速率也表现出较为明显的周期变化,快速生长的时段出现在距今 320~300 ka、230~200 ka、120~80 ka 和 6~0 ka 附近;与三宝洞相似,科桑洞同一时段不同石笋的生长速率也可以对比,如 KS08-1 和 KS08-2 均展示出冰期生长慢、间冰期快的特征,即具有平行生长的特点.

笔者经对比发现,西北干旱区科桑洞石笋的生长速率(1.64 mm/ka)明显小于东部季风区三宝洞石笋的生长速率(34.50 mm/ka),即三宝洞石笋的生长速率约为科桑洞的 20 倍,反映了两地气温和降水及其植被的差别.与科桑洞相比,三宝洞所在地降水丰沛,气温较高,植被丰茂,更有利于石笋的生长.科桑洞和三宝洞的年均温度分别为 4.2 °C (Cheng *et al.*, 2012)和 8.0~9.0 °C (Wang *et al.*, 2008),大约 4.0 °C 的温差对碳酸盐沉积速率的直接影响有限

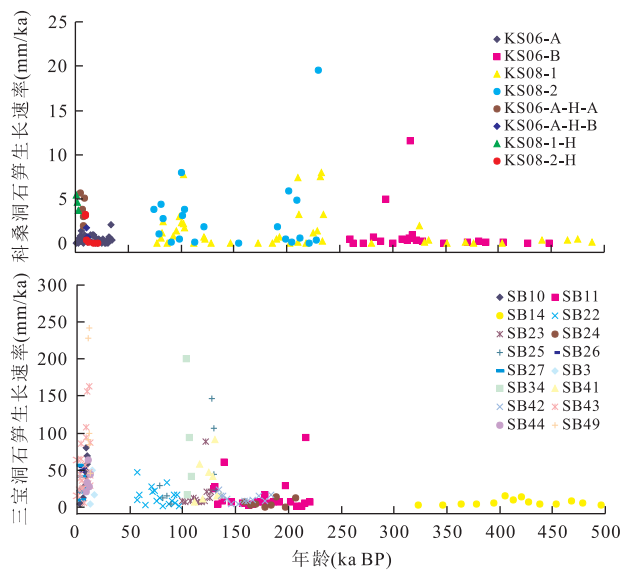


图 2 三宝洞和科桑洞石笋生长速率变化

Fig.2 Growth rate variations of Sanbao Cave and Kesang Cave

(约 20%),然而温度升高和降水增加所导致的土壤湿度改善,会增强植物的呼吸和土壤微生物对有机物的分解,进而提高岩溶滴水 CO₂ 的分压,后者对石笋生长速率会产生重要的影响(Kaufmann, 2003).这就不难理解无论是科桑洞还是三宝洞,石笋快速生长时段均对应于地球表层温暖时期(间冰期),而生长速率低的对应于冰期(其中最低生长速率均出现在距今约 175 ka 左右寒冷时期).

3 讨论

3.1 末次冰消期以来科桑洞和三宝洞石笋生长速率变化及其对降水的指示意义

石笋生长速率与气候密切相关.温度和降水通过物理、化学和生物作用过程,可以改变岩溶滴水化学组成(Ca²⁺ 浓度、HCO₃⁻ 浓度、pH、CO₂ 分压等)和碳酸钙沉积过程(CO₂ 脱气和晶体生长等),进而影响石笋的生长速率.温暖、潮湿的气候促进洞穴上覆土壤发育和植被生长,提升了岩溶系统的驱动力,有利于石笋的快速生长(Jo *et al.*, 2014).现有的研究表明,石笋生长速率除了与降水量成正相关(Brook *et al.*, 1999; Burns *et al.*, 2002; Fleitmann *et al.*, 2004)外,还与温度变化有关(Tan *et al.*, 2003; Ruan and Hu, 2010),说明了石笋生长具有温度和降水的双重控制性质.因而,解译石笋生长速率的气候信息时,需要利用当地其他记录进行验证.

与洞穴沉积物一样,泥炭作为一种记录过去全

球变化的重要信息载体,具有分辨率高、定年相对准确等优点.泥炭纤维素碳同位素组成稳定,抗成岩作用性强,是一个反映过去湿度变化的良好指标(Hong *et al.*, 2005),可以示踪区域降水的变化.为此,笔者分别利用三宝洞和科桑洞所在地湖北神农架大九湖(马春梅等, 2008)和新疆乌鲁木齐附近柴窝堡(Hong *et al.*, 2014)泥炭 $\delta^{13}\text{C}$ (PDB‰) 记录,考察石笋生长速率的气候意义(图 3).笔者发现无论是三宝洞,还是科桑洞,末次冰消期以来石笋的生长速率与反映湿度的泥炭 $\delta^{13}\text{C}$ 具有相似的变化特征,说明石笋生长速率以响应降水变化为主.

中国东部季风区 15.0 ka 以来的气候呈现干湿波动主要特征:15.0~11.5 ka BP, $\delta^{13}\text{C}$ 值升高,石笋生长速率下降,指示湿度降低的过程;11.5~8.5 ka BP, $\delta^{13}\text{C}$ 下降,石笋快速生长,均反映了降水丰沛和相对湿度高的气候状况;8.5 ka BP 以来, $\delta^{13}\text{C}$ 值增高和石笋生长变慢,意味着本地的干旱化趋势;尤其是 7.5~6.5 ka BP,碳同位素和石笋生长速率均指示一个较为明显的干旱时间,与区域降水的减少(Hu *et al.*, 2008)有关.与中国东部季风区气候由潮湿转向干旱不同,末次冰消期以来西北干旱区气候逐渐变湿.科桑洞石笋冰消期生长缓慢,进入全新世后逐渐加快,并在中全新世达到顶峰;即使是全新世晚期,石笋仍以较快的速率生长.石笋生长速率指示降水变化与泥炭 $\delta^{13}\text{C}$ (Hong *et al.*, 2014) 和湖泊(Chen *et al.*, 2008)记录的湿度变化基本一致.由此可见,中国东部季风区和西北干旱区末次冰消

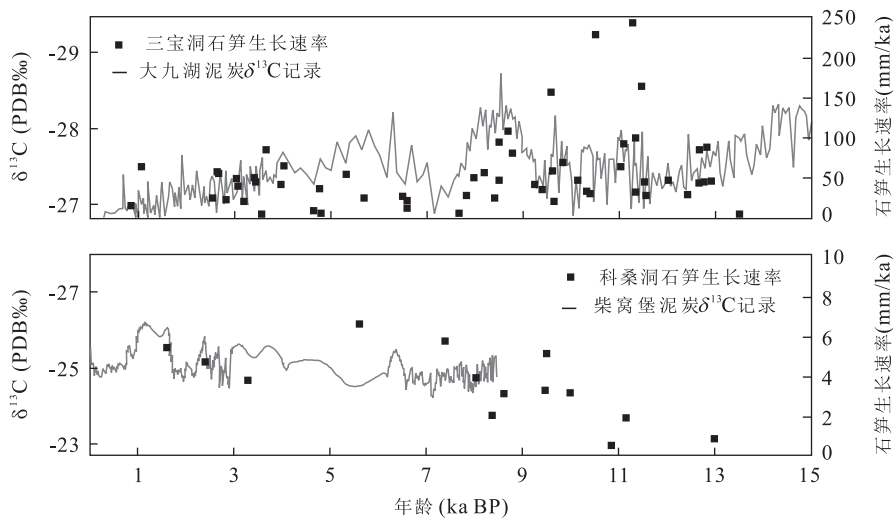


图 3 末次冰消期以来三宝洞和科桑洞石笋生长速率及其与当地泥炭记录的对比

Fig.3 Comparison of speleothem records from Sanbao Cave and Kesang Cave to the peat $\delta^{13}\text{C}$ from Dajiuhe and Chaiwobao respectively since last deglaciation

期以来的干湿变化是不同步的,说明两地降水对全球变化的响应存在差异.

3.2 500 ka 以来中国东部季风区和西北干旱区降水及对比

第四纪以来,伴随着太阳辐射的周期变化,地球进入冰期一间冰期多次交替的阶段:冰期太阳辐射量低,地球温度下降,高纬度冰川发育;而间冰期冰盖面积缩小,温度升高,全球处于相对温暖阶段.过去 500 ka 以来,海洋有孔虫氧同位素(图 4a)、南极冰芯同位素(图 4b)和 CO₂ 浓度(图 4c)均显示出 5 个冰期一间冰期旋回,温差明显.考察冰期一间冰期旋回过程中中国降水的区域差异对理解未来全球变暖下的中国降水分布格局具有重要的参考价值.

图 4 展示了三宝洞和科桑洞 500 ka 以来的石笋生长速率在冰期一间冰期的变化.可见,三宝洞石笋和科桑洞石笋在间冰期的生长远比冰期快的多,尤其是末次间冰期和全新世最为明显.由于石笋生长速率主要响应降水变化,因而间冰期三宝洞和科桑洞石笋的快速生长表明,无论是东部季风区还是西北干旱区,其降水都有不同程度的增加.这意味着在未来全球变暖的情况下,两地的降水均有增多的可能,这与气候模拟的结果相吻合(施雅风等,

2003).

与末次冰消期—全新世两个洞穴石笋生长速率对全球变暖的非同步响应一样,三宝洞和科桑洞石笋对末次间冰期全球温度升高的响应也存在错时.三宝洞石笋快速生长出现在 140~100 ka BP,对应于末次间冰期之前的冰消期,是全球温度上升并达到最高(约 129 ka BP)的时期;而科桑洞石笋的生长峰值在 120~80 ka BP 之间,处于全球温度下降时期,明显滞后于三宝洞.除此之外,在倒数第 2 和第 3 个间冰期,科桑洞石笋快速生长阶段也都是在降温阶段,但由于缺失同期的三宝洞石笋记录,无法进行区域对比.然而,地质历史上最近的 2 个高温期(全新世和末次间冰期)的洞穴石笋记录具有相似的时空变化特征,至少说明了中国东部季风区降水与西北干旱区的降水错时并非偶然.

4 结论

笔者利用湖北神农架三宝洞和新疆特克斯科桑洞的石笋生长速率记录,考察了中国东部季风区和西北干旱区降水的时空变化,认识了它们对全球变化响应的差异性.研究表明:(1)三宝洞和科桑洞石笋生长同时受温度和降水影响,但降水的作用胜过温度,是决定石笋生长速率的主要因素;(2) 500 ka 以来中国东部季风区和西部干旱区降水呈现冰期一间冰期波动变化,冰期降水少,气候干旱,间冰期降水增加,气候湿润;但是两地降水对全球温度变化的响应不是同步的,存在错时;下一步研究应集成更多的石笋记录,揭示中国降水的时空变化.

致谢:两位匿名审稿人为提供论文质量提出建设性的修改意见,在此表示感谢!

References

An, Z. S., Porter, S. C., Kutzbach, J. E., et al., 2000. Asynchronous Holocene Optimum of the East Asian Monsoon. *Quaternary Science Reviews*, 19 (8): 743 – 762. doi:10.1016/S0277-3791(99)00031-1

Brook, G. A., Rafter, M. A., Railsback, L. B., et al., 1999. A High-Resolution Proxy Record of Rainfall and ENSO since AD 1550 from Layering in Stalagmites from An-johibe Cave, Madagascar. *The Holocene*, 9 (6): 695 – 705. doi:10.1191/095968399677907790

Burns, S. J., Fleitmann, D., Mudelsee, M., et al., 2002. A 780-Year Annually Resolved Record of Indian Ocean Monsoon Precipitation from a Speleothem from South

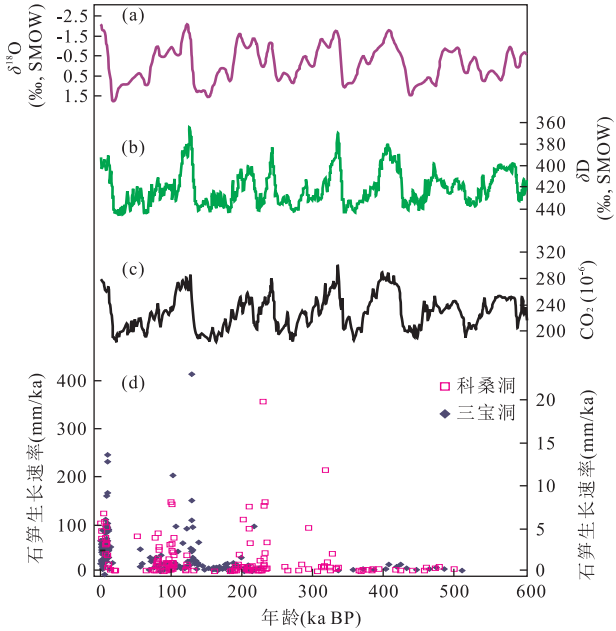


图 4 科桑和三宝洞石笋生长速率指示的区域降水变化
Fig.4 Regional precipitation variations indicated by speleothem growth rates of Sanbao Cave and Kesang Cave

a.海洋氧同位素(据 Imbrie *et al.*, 1984); b, c.南极冰芯同位素大气 CO₂ 浓度(据 Siegenthaler *et al.*, 2005); d. 三宝洞和科桑洞石笋生长速率(据 Wang *et al.*, 2008; Cheng *et al.*, 2012)

- Oman, *Journal of Geophysical Research*, 107 (D20): ACL9-1—ACL9-9. doi: 10.1029/2001JD001281
- Cai, Y. J., Tan, L. C., Cheng, H., et al., 2010. The Variation of Summer Monsoon Precipitation in Central China since the Last Deglaciation. *Earth and Planetary Science Letters*, 291(1—4): 21—31. doi: 10.1016/j.epsl.2009.12.039
- Chen, F. H., Yu, Z. C., Yang, M. L., et al., 2008. Holocene Moisture Evolution in Arid Central Asia and Its Out-of-Phase Relationship with Asian Monsoon History. *Quaternary Science Reviews*, 27(3—4): 351—364. doi: 10.1016/j.quascirev.2007.10.017
- Cheng, H., Zhang, P. Z., Spötl, C., et al., 2012. The Climatic Cyclicity in Semiarid-Arid Central Asia over the Past 500,000 Years. *Geophysical Research Letters*, 39(1): L01705. doi: 10.1029/2011GL050202
- Clemens, S. C., Prell, W. L., Sun, Y. B., 2010. Orbital-Scale Timing and Mechanisms Driving Late Pleistocene Indo-Asian Summer Monsoons: Reinterpreting Cave Speleothem $\delta^{18}\text{O}$. *Paleoceanography*, 25(4): PA4207. doi: 10.1029/2010PA001926
- Dayem, K. E., Molnar, P., Battisti, D. S., et al., 2010. Lessons Learned from Oxygen Isotopes in Modern Precipitation Applied to Interpretation of Speleothem Records of Paleoclimate from Eastern Asia. *Earth and Planetary Science Letters*, 295(1—2): 219—230. doi: 10.1016/j.epsl.2010.04.003
- Dong, J. G., Wang, Y. J., Cheng, H., et al., 2010. A High-Resolution Stalagmite Record of the Holocene East Asian Monsoon from Mt Shennongjia, Central China. *The Holocene*, 20(2): 257—264. doi: 10.1177/0959683609350393
- Fleitmann, D., Burns, S. J., Neff, U., et al., 2004. Palaeoclimatic Interpretation of High-Resolution Oxygen Isotope Profiles Derived from Annually Laminated Speleothems from Southern Oman. *Quaternary Science Reviews*, 23(7—8): 935—945. doi: 10.1016/j.quascirev.2003.06.019
- Hong, B., Gasse, F., Uchida, M., et al., 2014. Increasing Summer Rainfall in Arid Eastern-Central Asia over the Past 8 500 Years. *Nature Scientific Reports*, 4: 5279. doi: 10.1038/srep05279
- Hong, Y. T., Hong, B., Lin, Q. H., et al., 2005. Inverse Phase Oscillations between the East Asian and Indian Ocean Summer Monsoons during the Last 12 000 Years and Paleo-Ei Niño. *Earth and Planetary Science Letters*, 231(3—4): 337—346. doi: 10.1016/j.epsl.2004.12.025
- Hu, C. Y., Henderson, G. M., Huang, J. H., et al., 2008. Quantification of Holocene Asian Monsoon Rainfall from Spatially Separated Cave Records. *Earth and Planetary Science Letters*, 266(3—4): 221—232. doi: 10.1016/j.epsl.2007.10.015
- Huang, W., Chen, F. H., Feng, S., et al., 2013. Interannual Precipitation Variations in the Mid-Latitude Asia and Their Association with Large-Scale Atmospheric Circulation. *Chinese Science Bulletin*, 58(32): 3962—3968. doi: 10.1007/s11434-013-5970-4
- Imbrie, J., Hays, J. D., Martinson, D. G., et al., 1984. The Orbital Theory of Pleistocene Climate: Support from a Revised Chronology of The Marine $\delta^{18}\text{O}$ Record. In: Berger, A. L., Imbrie, J., Hays, J., et al., eds., *Milankovitch and Climate (Part 1)*. Reidel Publishing Company, Dordrecht, 269—305.
- Jiang, X. Y., Li, Z. Z., Li, J. Q., et al., 2012. Stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ Record from Yuhua Cave over the Past 500 Years and Its Regional Climate Significance. *Scientia Geographica Sinica*, 32(2): 207—212 (in Chinese with English abstract).
- Jo, K. N., Woo, K. S., Yi, S., et al., 2014. Mid-Latitude Inter-hemispheric Hydrologic Seesaw over the Past 550 000 Years. *Nature*, 508(7496): 378—382. doi: 10.1038/nature13076
- Kaufmann, G., 2003. Stalagmite Growth and Palaeo-Climatic: The Numerical Perspective. *Earth and Planetary Science Letters*, 214(1—2): 251—266. doi: 10.1016/S0012-821X(03)00369-8
- Liu, Z. Y., Wen, X. Y., Brady, E. C., et al., 2014. Chinese Cave Records and the East Asia Summer Monsoon. *Quaternary Science Reviews*, 83(1): 115—128. doi: 10.1016/j.quascirev.2013.10.021
- Lu, L. H., Zhang, D. E., 2013. Spatio-Temporal Variation of Annual Precipitation in China and Its Relationship with the East Asian Summer Monsoon. *Quaternary Sciences*, 33(1): 97—107 (in Chinese with English abstract).
- Ma, C. M., Zhu, C., Zheng, C. G., et al., 2008. High-Resolution Geochemistry Records of Climate Change since the Late-Glacial from Dajihu Peat in Shennongjia Mountains, Central China. *Chinese Science Bulletin*, 53 (Suppl. I): 26—37 (in Chinese).
- Maher, B. A., 2008. Holocene Variability of the East Asian Summer Monsoon from Chinese Cave Records: A Re-Assessment. *The Holocene*, 18(6): 861—866. doi: 10.1177/0959683608095569
- Pausata, F. S. R., Battisti, D. S., Nisancioglu, K. H., et al., 2011. Chinese Stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ Controlled by Changes in the Indian Monsoon during a Simulated Heinrich Event. *Nature Geoscience*, 4(7): 474—480. doi: 10.1038/NCEO1169

- Qin, D. H., 2002. The General Report on Environmental Evolution of West China (Volume II). Science Press, Beijing, 430 (in Chinese).
- Ruan, J. Y., Hu, C. Y., 2010. Seasonal Variations and Environmental Controls on Stalagmite Calcite Crystal Growth in Heshang Cave, Central China. *China Science Bulletin*, 55(34): 3929–3935. doi: 10.1007/s11434-010-4193-1
- Shi, Y. F., Shen, Y. P., Li, D. L., et al., 2003. Discussion on the Present Climate Change from Warm-Dry to Warm Wet in Northwest China. *Quaternary Sciences*, 23(2): 152–162 (in Chinese with English abstract).
- Siegenthaler, U., Stocker, T. F., Monnin, E., et al., 2005. Stable Carbon Cycle-Climate Relationship during the Late Pleistocene. *Science*, 310(5752): 1313–1317. doi: 10.1126/science.1120130
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., et al., 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.
- Tan, M., Liu, T. S., Hou, J. Z., et al., 2003. Cyclic Rapid Warming on Centennial-Scale Revealed by a 2 650-Year Stalagmite Record of Warm Season Temperature. *Geophysical Research Letters*, 30(12): 1617–1621. doi: 10.1029/2003GL017352
- Wang, S. W., Huang, J. B., 2006. The Instability of Summer Rainfall Teleconnection between North China and India. *Progress in Natural Science*, 16(8): 980–985 (in Chinese).
- Wang, S. W., Zhu, J. H., Cai, J. N., et al., 2004. Interdecadal Variability of Temperature and Precipitation in China since 1880. *Advances in Atmospheric Sciences*, 21(3): 307–313. doi: 10.1007/BF02915560
- Wang, Y. J., Cheng, H., Edwards, R. L., et al., 2001. A High-Resolution Absolute-Dated Late Pleistocene Monsoon Record from Hulu Cave, China. *Science*, 294(5550): 2345–2348. doi: 10.1126/science.1064618
- Wang, Y., Cheng, H., Edwards, R. L., et al., 2008. Millennial- and Orbital-Scale Changes in the East Asian Monsoon over the Past 224 000 Years. *Nature*, 451(7182): 1090–1093. doi: 10.1038/nature06692
- Wu, J. Y., Wang, Y. J., Dong, J. G., 2011. Changes in East Asian Summer Monsoon during the Holocene Recorded by Stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ Records from Liaoning Province. *Quaternary Sciences*, 31(6): 990–998 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, D. X., Cheng, H., Edwards, R. L., et al., 2004. Timing, Duration, and Transitions of the Last Interglacial Asian Monsoon. *Science*, 304(5670): 575–578. doi: 10.1126/science.1091220
- Zhang, P., Cheng, H., Edwards, R. L., et al., 2008. A Test of Climate, Sun, and Culture Relationships from an 1810-Year Chinese Cave Record. *Science*, 322(5903): 940–942. doi: 10.1126/science.1163965
- Zhao, Z. C., 1990. The Impact of Increased CO_2 on Climate Change by Simulation of Five Global Atmospheric-Oceanic Circulation Modelling. *Scientia Atmospherica Sinica*, 14(1): 118–127 (in Chinese).
- Zhou, L. T., Huang, R. H., 2003. Research on the Characteristics of Interdecadal Variability of Summer Climate in China and Its Possible Cause. *Climatic and Environmental Research*, 8(3): 274–290 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 姜修洋, 李志忠, 李金全, 等, 2012. 最近 500 年来福建玉华洞石笋氧同位素记录及气候意义. *地理科学*, 32(2): 207–212.
- 陆龙骅, 张德二, 2013. 中国年降水量的时空变化特征及其与东亚夏季风的关系. *第四纪研究*, 33(1): 97–107.
- 马春梅, 朱诚, 郑朝贵, 等, 2008. 晚冰期以来神农架大九湖泥炭高分辨率气候变化的地球化学记录研究. *科学通报*, 53(增刊 I): 26–37.
- 秦大河, 2002. 中国西部环境演变评估(第二卷). 北京: 科学出版社, 430.
- 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等, 2003. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨. *第四纪研究*, 23(2): 152–162.
- 王绍武, 黄建斌, 2006. 中国华北与印度夏季降水遥相关的不稳定性. *自然科学进展*, 16(8): 980–985.
- 吴江莹, 汪永进, 董进国, 2011. 全新世东亚夏季风演化的辽宁暖洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录. *第四纪研究*, 31(6): 990–998.
- 赵宗慈, 1990. 五个全球大气海洋环流模式模拟二氧化碳增加对气候变化的影响. *大气科学*, 14(1): 118–127.
- 周连童, 黄荣辉, 2003. 关于我国夏季气候年代际变化特征及其可能成因的研究. *气候与环境研究*, 8(3): 274–290.