黄土高原西缘在 AD 1875~2003 期间石笋氧同位素记录的季风降水变化与海气系统的联系

刘敬华, 张平中*, 程海, 陈发虎, 杨勋林, 张德忠, 周静, 贾继红, 安春雷, 桑文翠, Kathleen R. Johnson

兰州大学资源环境学院西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000;

Department of Geology and Geophysics, University of Minnesota, Minneapolis, MN 55455, USA;

西南大学地理科学学院, 重庆 400715;

Department of Earth System Science, University of California, Irvine, CA 92697, USA

* 联系人, E-mail: pzzhang@lzu.edu.cn

2008-03-31 收稿, 2008-05-23 接受

国家自然科学基金(批准号: 40471137)、国家自然科学基金创新群体(批准号: 40421101)和教育部博士点基金(编号: 20040730025)资助项目

摘要 基于黄土高原西部甘肃武都万象洞中一根石笋 0~16 mm 之间的 5 个高精度 ^{230}Th 年代和 103 个 $\delta^{18}\text{O}$ 数据, 重建了亚洲季风边缘区过去 100 多年来高分辨率的季风降水变化历史。通过与武都器测降水数据对比发现, 最近 50 多年来石笋氧同位素组成受降雨量效应的影响, 指示了亚洲季风的强弱变化及其带来的降水量信息。近 100 多年来亚洲季风的变化历史可分为季风降水增强期(AD 1875~1900)、季风降水减弱期(AD 1901~1946)和季风降水再次增强期(AD 1947~2003) 3 个气候段, 而且这 3 个季风变化阶段与通过历史文献记载建立的旱涝指数变化相似。近 100 多年来万象洞石笋氧同位素记录的季风强度变化与太平洋年代际振荡(PDO)密切相关, 年代际时间尺度上 PDO 暖(冷)相位与季风降水的减少(增加)对应; 但在 1977 年之后出现了季风降水变化和 PDO 的反相位关系, 很可能是北太平洋在 1976/1977 年前后发生的年代际气候跃变的反映。说明现代亚洲季风强度及季风降水变化通过海气相互作用与太平洋密切相关。这种关系将有助于亚洲季风区水循环的预测, 而且可以利用洞穴观测数据来提高气候模型的预测能力。

关键词

万象洞石笋
氧同位素
季风强度与降水
黄土高原西部
亚洲季风

亚洲季风系统是全球气候系统的重要组成部分, 它通过海-陆-气相互作用对亚洲季风区的气候变化产生显著影响。研究表明^[1~4], 太平洋和印度洋海气系统的年际和年代际时间尺度上的变化能够导致亚洲季风环流和降水的年际和年代际变化, 如 Krishnan 和 Sugi^[1]发现近百年来在太平洋海表面温度(SST)10 a 波动和印度季风降水之间显示出一致的负相关, 即太平洋年代际振荡(Pacific Decadal Oscillation, PDO)的暖(冷)相位表现为季风降水的减少(增加)和印度次大陆表面空气温度的相应增加(减少)。季风环流带来的降水对占世界人口 60% 的人类生存和农

业发展起到至关重要的作用^[5], 因此亚洲季风降水在年际-年代际时间尺度上变化的研究将有助于更好地了解在目前人类活动排放温室气体引起自然气候剧烈波动的背景下季风降水的变化模式。由于中国季风区大部分地区的现代器测降水资料不超过 60 a, 对理解和探索季风降水的变化趋势显得过短, 因此需要高精度定年的、高分辨率的、能够准确指示季风降水变化的气候替代指标来延长气象记录和检验当代的气候模型。洞穴石笋由于对气候变化的高度敏感性和适于精确定年等优势已经被广泛应用于季风气候的研究^[6~14], 而且在冰期/间冰期尺度上季

风的变迁历史、强度^[7~11,13,14]以及季风与太阳辐射变化的关系^[7~9,11,13~16]等方面均取得了重要成果. 特别是最近发现反映热带-亚热带降水的石笋氧同位素组成可以记录亚洲季风的年际变化^[17]和历史时期出现的一些严重的饥荒事件^[18], 即这些饥荒事件与季风降水的减弱时期相对应, 而且季风降水与太平洋和北大西洋海气系统有密切联系如太平洋年代际振荡(PDO)、厄尔尼诺/南方涛动(ENSO)^[15]和北大西洋涛动^[19].

本文将以位于中国青藏高原和黄土高原过渡带(黄土高原西缘)的万象洞中采集的一根石笋的顶部为主要研究对象, 在高精度 ^{230}Th 定年的基础上, 进行高分辨率的石笋氧同位素分析, 结合最近 50 多年来的器测降水数据和 100 多年来历史文献记载, 研究最近 100 多年来亚洲季风降水变迁的历史及其与太平洋海气系统在年代际时间尺度上的关系.

1 样品与实验

1.1 洞穴概况与采样方法

研究用的石笋 WX42B 采自甘肃武都万象洞(33°19'N, 105°00'E, 海拔 1200 m)中, 该洞处于中国青藏高原和黄土高原过渡带(即青藏高原东部和黄土高原西缘之间)的较低海拔地区, 发育在石炭纪灰岩中, 接近现代夏季风降水区的北界, 是典型季风系统交互作用的地带, 对亚洲季风系统的进退消长十分敏感, 是非常重要的气候地理位置. 洞穴上覆约 30~250 m 的石灰岩和约 10 m 厚的黄土; 整个地区的天然植被主要由暖温带森林-灌木类型的 C_3 植物组成. 洞内次生碳酸盐比较发育, 而且大量的现代沉积^[11,20,21].

WX42B 高约 116 mm, 结晶非常致密, 主要以白色为主, 夹有一些浅灰色条带, 无重结晶现象. 在 2003 年 5 月采集 WX42B 时, 洞穴顶板上仍有滴水且样品顶部有大量的水膜, 再经铀系定年证明, 其为目前仍在生长的石笋. 我们将其沿生长轴切开, 并沿生长轴在约 10 mm×10 mm 的采样面上用刻刀精细磨取石笋方解石样品(20 个样品/mm), 然后进行同位素分析, 为了避免样品的交叉混层, 采用间隔取样分析^[17]. 同时, 选择了生长纹层比较清晰的 4 层采集了 Hendy 测试样品. 研究层段内石笋 ^{230}Th 定年样品由 0.3 mm 的医用牙钻钻取, 采样层厚跨度约在 0.6~0.8 mm 之间, 样品的采集工作在美国明尼苏达大学地质与地球物理系超洁净实验室内完成.

1.2 分析方法

石笋 WX42B 方解石的氧同位素分析采用磷酸法^[22]. 将所选石笋方解石样品于前处理系统内与 100% 的磷酸反应, 所产生的 CO_2 气体由兰州大学西部环境教育部重点实验室的 Finnigan Delta Plus 稳定同位素质谱仪测定. 氧同位素结果以 VPDB 标准给出, $\delta^{18}\text{O}=[(^{18}\text{O}/^{16}\text{O}_{\text{样品}}/^{18}\text{O}/^{16}\text{O}_{\text{标准}})-1]\times 1000$, 分析误差 $< \pm 0.1\text{‰}$. 研究层段内获得的 5 个 ^{230}Th 年代样品由美国 Minnesota 大学地质和地球物理系地质年代学同位素实验室测定, 测试方法见文献^[23,24], 分析仪器为 MC-ICP-MS, 年龄误差为 $\pm 2\sigma$ (表 1).

2 结果与讨论

2.1 石笋 WX42B 的 ^{230}Th 年代模式

WX42B 顶部 0~16 mm 之间的 5 个 ^{230}Th 年代(表 1)表明, 我们的研究层段覆盖了大约在 1875~2003 AD 之间生长的石笋. 其中在 0~1, 1~4, 4~8.1, 8.1~13.2 和 13.2~16 mm 的沉积速率分别为 0.08, 0.15, 0.15, 0.11, 0.10 mm/a, 平均生长速率为 0.12 mm/a(图 1), 说明在我们的研究层段内, 各时段的沉积速率差异不大, 平均生长速率较高, 特别是在研究的主要层段 1~13.2 mm 之间沉积速率基本稳定, 而且该石笋铀含量非常高, 其中 ^{238}U 含量在 $(7454.3\sim 10847.7)\times 10^{-9}$ 之间, 平均值约为 9162.0×10^{-9} ; 钍含量较低, ^{232}Th 在 $(264\sim 2235)\times 10^{-12}$ 之间, 平均值约为 867.4×10^{-12} . 因此获得的 ^{230}Th 测年数据精度非常高, 测年误差极小, 平均误差仅为 ± 1 a(表 1). 我们采用分段线性内插法, 建立了研究层段内的年代模型(图 1).

图 1 石笋 WX42B 顶部的年代模式

黑点表示测年点位置; 黑点上下的短线间距表示误差范围

表1 石笋 WX42B 顶部的 ^{230}Th 年代结果^{a)}

样品号	深度/mm	^{238}U ($\times 10^{-9}$)	^{232}Th ($\times 10^{-12}$)	$^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ 原子比 ($\times 10^{-6}$)	$\delta^{234}\text{U}$ 测量值	$^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 活度比	^{230}Th 年龄/a 未校正	^{230}Th 年龄/a 校正
WX42B-2-2	1	9034.4 $\pm$ 1.2	990 $\pm$ 21	56 $\pm$ 2	1927.2 $\pm$ 0.9	0.000370 $\pm$ 0.000006	13.8 $\pm$ 0.2	12.7 $\pm$ 0.6
WX42B-1	4	10847.7 $\pm$ 1.4	503 $\pm$ 21	317 $\pm$ 14	1884.4 $\pm$ 0.6	0.000891 $\pm$ 0.000009	33.7 $\pm$ 0.3	33.3 $\pm$ 1.0
WX42B-2-3	8.1	9955.3 $\pm$ 1.1	2235 $\pm$ 29	121 $\pm$ 2	1878.9 $\pm$ 0.7	0.001648 $\pm$ 0.000010	62.5 $\pm$ 0.4	60.2 $\pm$ 1.2
WX42B-2	13.2	8518.2 $\pm$ 1.1	345 $\pm$ 19	1135 $\pm$ 64	1846.4 $\pm$ 0.8	0.002782 $\pm$ 0.000012	106.7 $\pm$ 0.5	106.3 $\pm$ 0.5
WX42B-2-4	16	7454.3 $\pm$ 0.7	264 $\pm$ 17	1640 $\pm$ 105	1833.4 $\pm$ 0.7	0.003523 $\pm$ 0.000016	135.8 $\pm$ 0.6	135.5 $\pm$ 0.6

a) ^{230}Th 的衰变常数 $\lambda_{230}=9.1577\times 10^{-6}\text{ a}^{-1}$; ^{234}U 的衰变常数 $\lambda_{234}=2.8263\times 10^{-6}\text{ a}^{-1}$; ^{238}U 的衰变常数 $\lambda_{238}=1.55125\times 10^{-6}\text{ a}^{-1}$; $\delta^{234}\text{U}=[(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})_{\text{activity}}-1)\times 1000$; 校正的 ^{230}Th 年龄是假定初始的 $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ 原子比为 $(4.4\pm 2.2)\times 10^{-6}$

2.2 现代洞穴碳酸盐-水同位素体系与石笋氧同位素记录检验

影响洞穴石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 变化的因素很多, 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录能否作为指示气候环境信息的载体, 需要从以下 2 个主要方面来检验: () 现代洞穴滴水 and 大气降水氧同位素的一致性以及石笋样品没有明显的后生变化; () 石笋形成在碳酸盐-水同位素平衡分馏条件下.

研究表明, 万象洞洞穴滴水主要来自于当地的大气降水, 滴水的氧同位素组成特征反映了当地大气降水的同位素组成变化, 且洞内次生碳酸盐沉积时与滴水达到了同位素平衡^[11,20]. 石笋 WX42B 紧密结晶, 无明显的后生变化, 同时我们从垂直于 WX42B 生长轴的 4 个不同层位各采集了 6 个石笋样品进行了 Hendy 检验^[25]. 由于 WX42B 纹层呈圆弧状且纹层很不明显, 同一层采样可能造成 C 层的 $\delta^{18}\text{O}$

值变化幅度较大(约为 0.3‰)外, 其他的 3 个层位的 $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围几乎不超过 0.2‰, 说明在每一层的 $\delta^{18}\text{O}$ 值应该基本一致(图 2(a)), 而且在单个生长层内 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 之间没有明显的正相关关系(图 2(b)). 图 3 也呈现出 WX42B 中 59 个石笋方解石样品的和 MAT253 相连碳酸盐装置 Kiel 氧同位素测定数据与 Delta Plus 测试数据的对比, 表明 WX42B 的整体结果可靠无误, 而且两者的变化几乎都处于误差范围之内. 因此, 上述检验结果说明万象洞石笋氧同位素是在平衡分馏条件下沉积的, 指示了当时降水的同位素组成和洞穴温度的变化^[25,26], 适于古气候重建.

2.3 近半个世纪石笋氧同位素记录与器测数据的关系

在亚洲季风区, 石笋氧同位素变化在冰期/间冰期、千年和百年等大时间尺度上, 主要反映了季风降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化的信息^[7-9,11,13,14,27]. 最近的研究也表

图2 万象洞石笋 WX42B 的 Hendy 检验结果

(a) 距离顶部不同深度各层位的 $\delta^{18}\text{O}$ 值, A~D 层分别距离顶部 22, 35, 48 和 70 mm; (b) A~D 层中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 的关系

图3 万象洞石笋 WX42B 的 Finnigan Delta Plus MS 和 Kiel IV-MAT253 MS 测试数据的对比

Kiel IV-MAT253 MS 测试所用标准为 NBS-19, 误差为 $\pm 0.06\text{‰}$

明^[12,17,28,29], 在短时间尺度上石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值与降水量存在显著的负相关关系, 即受雨量效应的影响. Johnson 和 Ingram^[30]的研究却认为现代中国降水同位素体系变化在空间和时间上存在较大的变率, 即降水量对降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的影响由季风区向非季风区逐渐减小, 温度的作用逐渐加强. 万象洞靠近现代夏季风的北部界限, 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化不仅受大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的控制, 同时也受到温度的影响. Johnson 和 Ingram^[30]研究表明, 万象洞地区温度在方解石-水同位素分馏体系中对方解石 $\delta^{18}\text{O}$ 值的负影响($-0.23\text{‰}/^{\circ}\text{C}$)^[31], 与温度对大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的正影响($0.24\text{‰}/^{\circ}\text{C}$)趋势相反^[32], 且程度相近相互抵消, 所以万象洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化应该主要继承了当地大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的特征. 为了更进一步确定万象洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值指示的气候环境意义以及在短时间尺度上与季风变化的关系, 有必要将 WX42B 最近 50 多年来的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录(其变化范围在 -8.6‰ ~ -7.9‰ 之间, 变化幅度为 0.7‰)与万象洞所在地武都气象站记录的器测降水数据(1951~2003 年)进行对比, 结果显示: 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录与降水量呈负相关(图 4(a), 相关系数 $R = -0.30$, 置信度为 95%); 为了消除最近 50 多年来石笋 ^{230}Th 定年与器测记录年对年的偏差, 将器测数据和石笋 WX42B $\delta^{18}\text{O}$ 值进行

了 5 a 滑动平均后, 两者之间的相关系数达到 -0.64 (图 4(b), 置信度为 99%). 上述分析表明, 夏季风强弱带来的降水量变化是影响万象洞石笋氧同位素组成的主要因素, 而且短时间尺度上石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值的轻重变化主要反映了亚洲季风强弱变化及季风带来的降水量信息.

全球降水稳定同位素调查早已查明, 季风区以及中低纬度地区, 降水中稳定同位素具有显著的降水量效应, 即降水中稳定同位素比率与降水量存在显著的负相关关系^[33~36], 而且受季风环流影响的中国大部分地区, 夏季降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏负, 春季偏正^[37]. 对于万象洞地区, 我们在 1999, 2001, 2002 年 3 个年份不同季节收集的万象洞洞穴滴水氧同位素数据也显示出: 1999~2002 年夏季洞穴滴水氧同位素变化范围在 -9.59‰ ~ -8.70‰ (VSMOW)之间, 平均值为 -9.11‰ (VSMOW), 相对富集 ^{16}O , 而春季变化范围则在 -9.37‰ ~ -7.98‰ (VSMOW)之间, 平均值为 -8.82‰ (VSMOW), 相对富集 ^{18}O , 说明现代万象洞地区的降水仍然起源于季风环流的变化. 最近对高海拔祁连山西段 2002 年的大气降水稳定同位素研究^[38]也表明, 降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 变化不存在温度效应, 而显示出明显的降水量效应, 这种降水起源于季风环流.

图4 万象洞石笋 WX42B 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与武都 AD1951~2003 期间器测降水记录的相互关系
(a) 降水量与 WX42B $\delta^{18}\text{O}$ 值的关系; (b) 降水量与 WX42B $\delta^{18}\text{O}$ 值 5 a 滑动后的关系

2.4 1875~2003 AD 期间 WX42B 记录的季风降水变化与历史文献记载的关系

万象洞石笋 WX42B $\delta^{18}\text{O}$ 值在 AD1875~2003 年时段内的变化范围为 $-8.6\text{‰} \sim -7.8\text{‰}$, 平均值为 -8.2‰ (图 5(a)), 变化幅度约为 -0.8‰ . 我们将近 100 多年来 WX42B $\delta^{18}\text{O}$ 记录的季风强度变化分为 3 段: () AD 1875~1900, 这一时期 $\delta^{18}\text{O}$ 值基本上都偏负于平均值, 是 100 多年来季风最强、降水最多的时期; () AD 1901~1946, $\delta^{18}\text{O}$ 值变得相对偏正, 说明季风相对减弱及降水减少, 降水量基本上都在平均值以下; () AD 1947~2003, $\delta^{18}\text{O}$ 值再次变得偏负, 指示季风降水再次增多, 但增加的幅度仍小于第一时期.

夏季风减弱期间, 降水减少, 粮食产量降低甚至引起严重的饥荒, 而在夏季风异常强的年份, 将出现洪涝灾害^[5]. 为此, 我们将石笋 WX42B 记录的季风降水变化(图 5(a))和利用历史文献资料^[39-41]建立的万象洞所在地—武都地区 100 多年来的旱涝变化序列(图 5(b))进行了对比. 发现, 在整个时间序列上, 季风降水与旱涝指数具有非常一致的变化趋势(图 5(a)和(b)), 季风降水强弱变化的 3 个典型气候段在旱涝指数曲线上有很好的体现. 在 AD1875~1900 季风降水增强期, 涝和偏涝的年份占 46.1%, 旱和偏旱年份只占 11.5%; 而在季风降水减弱期(AD 1901~1946), 夏季

平均降水量减少, 旱和偏旱年份所占比例明显增加, 达到 33%, 而且这一时期发生庄稼歉收和大规模饥荒的年份明显多于季风增强期; 在 AD 1947~2003 季风降水再次增强时期, 发生旱和偏旱的年份与涝和偏涝的年份所占比例基本相等.

在石笋的 ^{230}Th 定年误差和定年样品采样层厚度引起的年龄误差(5 a 左右)范围之内, 季风降水的减弱和增强年份明显对应于历史文献记载的饥荒和洪涝事件. 虽然某些时段上季风降水和旱涝指数两条曲线之间出现小的偏移. 特别是在武都文献资料^[40]中, 在 AD1875~2003 期间, 一些典型干旱事件(AD 1878, AD 1900, AD 1926~1930, AD 1936~1938, AD 1955, AD 1970~1971 和 AD 1996~1998)和洪涝事件(AD 1879, AD 1889, AD 1917, AD 1947, AD 1962, AD 1984 和 AD 1990)与 WX42B $\delta^{18}\text{O}$ 记录的降水变化之间几乎有一一对应的关系.

2.5 近百年来亚洲季风降水变化与太平洋海气系统的联系

亚洲季风系统(包括东亚和印度洋两大季风体系)的变化是由于海-陆间的热力差异所引起的, 那么它必然与太平洋和印度洋的环流变化存在着联系.

为探寻亚洲季风降水与太平洋年代际振荡之间的联系, 我们将相同时段内 WX42B $\delta^{18}\text{O}$ 记录(图 6(a))的季风降水变化与 AD 1900~2003 年期间的 PDO

图 5 万象洞石笋 WX42B $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化与旱涝指数的对比

(a) WX42B $\delta^{18}\text{O}$ 值; (b) 旱涝指数: 1-涝, 2-偏涝, 3-正常, 4-偏旱, 5-旱. 图中的横线分别指示了 $\delta^{18}\text{O}$ 值和旱涝指数的平均值, (a)和(b)中的点线分别是 WX42B 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值和旱涝指数的 5 点滑动平均曲线

图 6 万象洞石笋 WX42B $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化(a)与年均 PDO 指数^[42](b)的对比

图中的 ~ 分别代表了季风相对加强/减弱期与 PDO 指数的冷/暖相位的对应关系; PDO 指数数据来源于 <http://jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest>, 图中点线分别为 $\delta^{18}\text{O}$ 值和 PDO 指数 5 a 滑动曲线

指数^[42]进行比较分析(图 6(b)), 进行 5 a 平滑处理后, 它们变化趋势具有较好的一致性. 1977 年之前正相关系数达到 0.71%(99%的置信度), 其中() AD 1900~

1924/1925 和() AD1947~1976/1977 期间的 2 个 PDO 指数冷相位均对应于 WX42B 记录的季风降水增强期, 而() AD1925~1946/1947 期间的 PDO 指数的暖相位

则与季风减弱期相对应。这种季风加强/减弱期与PDO指数的冷/暖相位对应关系,分别指示了中西北太平洋异常低的海温变化和东亚大陆在中高纬度形成的海陆温度的对比差异增大、北太平洋区域海温异常偏高和赤道中东太平洋海温偏冷之间的关系^[43],说明太平洋海气系统至少在5 a以上时间尺度(包括年代际)的振荡可导致东亚季风长达数年的持续异常^[44],能直接造成太平洋及其周边地区(包括中国)气候的年代际变化,这种结果也与现代海洋观测相吻合^[45,46]。此外,北太平洋在1976/1977年前后(图6中的)经历了一次显著的年代际气候跃变,即PDO从冷相位转成暖相位,而在这期间石笋WX42B氧同位素记录的季风降水变化趋势与PDO的变化趋势不一致,可能是由于1976年以前北太平洋海温异常起主要作用,而1976年以后,北太平洋海温异常与东亚夏季风关系不明显,赤道中东太平洋变得更重要,出现所谓年际异常的海温关键区发生年代际转移^[43],导致1976年之后季风降水变化和PDO指数之间呈反相位关系。

3 结论

在短时间尺度上,位于季风边缘区的万象洞石

笋 $\delta^{18}\text{O}$ 灵敏地记录了亚洲季风强度及所带来降水量的信息。

在AD 1875~2003期间的100余年,亚洲季风强度变化在AD 1875~1900和AD 1947~2003期间显示出季风加强且降水增多,而在AD 1901~1946期间季风相对减弱。在最近50多年来,WX42B石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化与当地降水量负相关;通过AD 1875以来石笋WX42B氧同位素记录的季风强度变化与利用历史文献记载建立的旱涝指数对比,发现在 ^{230}Th 定年误差范围内历史时期的旱涝变化与季风降水有良好的对应关系。

石笋WX42B氧同位素记录的最近100多年亚洲季风强度的变化与PDO密切相关,年代际时间尺度上PDO暖(冷)相位与季风降水的减少(增加)对应;但是1977年之后出现了季风降水变化和PDO的反相位关系,很可能是北太平洋在1976/1977年前后发生的年代际气候跃变的反映。说明现代亚洲季风强度及季风降水变化通过海气相互作用与太平洋密切相关。这种关系将有助于亚洲季风区水循环的预测,而且可以利用洞穴观测数据来提高气候模型的预测能力。

致谢 感谢张平宇工程师、徐其治和曹继秀高级工程师、代志波等参加了野外采样和实验室分析工作,作者感谢两位匿名评审人提出的有益建议。

参考文献

- Krishnan R, Sugi M. Pacific decadal oscillation and variability of the Indian summer monsoon rainfall. *Clim Dyn*, 2003, 21: 233—242[DOI]
- Dugam S S, Kakade S B, Verma R K. Interannual and long-term variability in the North Atlantic oscillation and Indian summer monsoon rainfall. *Theor Appl Climatol*, 1997, 58: 21—29[DOI]
- Chang C P, Zhang Y, Li T. Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and the tropical Pacific SSTs, Part I. Roles of the subtropical ridge. *J Clim*, 2000, 13: 4310—4325[DOI]
- Chan J C L, Zhou W. PDO, ENSO and the early summer monsoon rainfall over south China. *Geophys Res Lett*, 2005, 32(8): L08810, doi: 10.1029/2004GL022015[DOI]
- Webster P J, Magana V, Palmer T N, et al. Monsoons: Processes, predictability, and the prospects for prediction. *J Geophys Res*, 1998, 103: 14451—14510[DOI]
- Henderson G M. Caving in to new chronologies. *Science*, 2006, 313: 620—622[DOI]
- Yuan D X, Cheng H, Edwards R L. Timing, duration and transition of the last interglacial Asian Monsoon. *Science*, 2004, 304: 575—578[DOI]
- Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. A high-resolution absolute dated Late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China. *Science*, 2001, 294: 2345—2348[DOI]
- Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. The holocene asian monsoon: links to solar changes and North Atlantic climate. *Science*, 2005, 308: 854—857[DOI]
- Fleitmann D, Burns S J, Mudelsee M, et al. Holocene forcing of the Indian monsoon recorded in a stalagmite high-resolution speleothem $\delta^{18}\text{O}$ record from southern Oman. *Science*, 2003, 300: 1737—1739[DOI]
- Johnson K R, Ingram B L, Warren D S, et al. East Asian summer monsoon variability during marine isotope stage 5 based on speleothem $\delta^{18}\text{O}$ records from Wanxiang Cave, central China. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2006, 236: 5—19[DOI]

- 12 Burns S J, Fleitmann D, Mudelsee M, et al. A 780-year annually resolved record of Indian Ocean monsoon precipitation from a speleothem from south Oman. *J Geophys Res*, 2002, 107(D20): 4434, doi: 10.1029/2001JD001281 [\[DOI\]](#)
- 13 Cheng H, Edwards R L, Wang Y J, et al. A penultimate glacial monsoon record from Hulu Cave and two-phase glacial terminations. *Geology*, 2006, 34: 217—220 [\[DOI\]](#)
- 14 Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. Millennial- and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 224000 years. *Nature*, 2008, 451: 1090—1093 [\[DOI\]](#)
- 15 Asmerom Y, Polyak V, Burns S J, et al. Solar forcing of Holocene climate: New insights from a speleothem record, southwestern United States. *Geology*, 2007, 35(1): 1—4 [\[DOI\]](#)
- 16 Neff U, Burns S J, Mangini A, et al. Strong coherence between solar variability and the monsoon in Oman between 9 and 6 kyr ago. *Nature*, 2001, 411: 290—293 [\[DOI\]](#)
- 17 杨勋林, 张平中, 陈发虎, 等. 近 50 a 来青藏高原东部高海拔洞穴现代石笋同位素组成及其含义. *科学通报*, 2007, 52(6): 698—706
- 18 Sinha A, Cannariato K G, Stott L D, et al. A 900-year (600 to 1500AD) record of the Indian summer monsoon precipitation from the core monsoon zone of India. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L16707, doi: 10.1029/GL030431 [\[DOI\]](#)
- 19 Beynen P E V, Asmerom Y, Polyak V, et al. Variable intensity of teleconnections during the late Holocene in subtropical North America from an isotopic study of speleothem from Florida. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L18703, doi: 10.1029/2007GL031046 [\[DOI\]](#)
- 20 张平中, 陈一萌, Johnson K R, 等. 甘肃武都万象洞滴水与现代石笋同位素的环境意义. *科学通报*, 2004, 49(15): 1529—1531
- 21 安春雷, 张平中, 代志波, 等. 中国黄土高原西缘甘肃万象洞 MIS5 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录与南方地区石笋记录的对比研究. *第四纪研究*, 2006, 26(6): 985—990
- 22 McCrea J M. On the isotopic chemistry of carbonates and a paleotemperature scale. *J Chem Phys*, 1950, 18: 849—857
- 23 Chen C C, Edwards R L, Cheng H. Uranium and thorium isotopic and concentration measurements by magnetic sector inductively coupled plasma mass spectrometry. *Chem Geol*, 2002, 185: 165—178 [\[DOI\]](#)
- 24 Cheng H, Edwards R L, Hoff J A, et al. The half-lives of uranium-234 and thorium-230. *Chem Geol*, 2000, 169: 17—33 [\[DOI\]](#)
- 25 Hendy C H. The isotopic geochemistry of speleothems—I. The calculation of the effects of different modes of formation on the isotopic composition of speleothems and their applicability as paleoclimate indicators. *Geochim Cosmochim Acta*, 1971, 35: 801—824
- 26 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. *第四纪研究*, 2005, 25(2): 157—163
- 27 何尧启, 汪永进, 孔兴功, 等. 贵州董哥洞近 1000 a 来高分辨率洞穴石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录. *科学通报*, 2005, 50(11): 1114—1118
- 28 Yadava M G, Ramesh R, Pant G B. Past monsoon rainfall variations in peninsular India recorded in a 331-year-old speleothem. *Holocene*, 2004, 14(4): 517—524 [\[DOI\]](#)
- 29 Fleitmann D, Stephen J B, Neff U, et al. Palaeoclimatic interpretation of high-resolution oxygen isotope profiles derived from annually laminated speleothems from Southern Oman. *Quat Sci Rev*, 2004, 23: 935—945 [\[DOI\]](#)
- 30 Johnson K R, Ingram B L. Spatial and temporal variability in the stable isotope systematics of modern precipitation in China: Implication for paleoclimate reconstructions. *Earth Planet Sci Lett*, 2004, 220(3-4): 365—377 [\[DOI\]](#)
- 31 O'Neil J R, Adami L H, Epstein S. Revised value for the ^{18}O fractionation factor between H_2O and CO_2 at 25°C . *United States Geol Survey Res*, 1975, (3): 623—624
- 32 郑淑惠, 侯发高, 倪葆龄. 中国大气降水的氢氧稳定同位素研究. *科学通报*, 1983, (13): 801—806
- 33 Vuille M, Werner C M, Bradley R S, et al. Stable isotopes in precipitation in the Asian monsoon region. *J Geophys Res*, 2005, 110: D23108, doi: 10.1029/2005JD006022 [\[DOI\]](#)
- 34 Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 1964, 16(4): 436—468
- 35 Jouzel J, Froehlich K, Schotterer U. Deuterium and Oxygen-18 in present-day precipitation: Data and modeling. *J Hydrol Sci*, 1997, 42(5): 747—763
- 36 Araguàs-Araguàs L, Froehlich K, Rozanski K. Stable isotope composition of precipitation over Southeast Asia. *J Geophys Res*, 1998, 103: 28721—28742 [\[DOI\]](#)
- 37 卫克勤, 林瑞芬. 论季风气候对中国雨水同位素组成的影响. *地球化学*, 1994, 23(1): 33—41
- 38 周石研, 中尾正义, 坂井亚规子, 等. 祁连山七一冰川积雪和大气降水中的氢氧稳定同位素变化. *科学通报*, 2007, 52(18): 2187—2193
- 39 袁林. 西北灾荒史. 兰州: 甘肃人民出版社, 1994
- 40 曾礼. 武都县志. 北京: 生活读书新知三联书店, 1998. 193—200
- 41 中央气象局气象科学研究所. 中国近五百年旱涝分布图集. 北京: 地图出版社, 1981. 208—260
- 42 Mantua N J, Hare S T. The Pacific decadal oscillation. *J Oceanogr*, 2002, 58: 35—44 [\[DOI\]](#)
- 43 李峰, 何金海. 北太平洋海温异常与东亚夏季季风相互作用的年代际变化. *热带气象学报*, 2000, 16(3): 260—271
- 44 Zhang Y, Wallace J M, Battisti D S. ENSO-like interdecadal variability: 1900~1993. *J Clim*, 1997, 10: 1004—1020 [\[DOI\]](#)
- 45 马柱国, 符淙斌. 20 世纪下半叶全球干旱化的事实及其与大尺度背景的联系. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37(2): 222—233
- 46 马柱国, 邵丽娟. 中国北方近百年干湿变化与太平洋年代际振荡的关系. *大气科学*, 2006, 30(3): 464—474