中国科学: 地球科学 2018 年 第 48 卷 第 5 期: 617 ~ 627
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

太平洋年代际振荡对中国东部季风区降水影响的新证据

姚嘉惠[1], 肖林翔[1], 苟萌萌[1], 李超[1,2*], 连尔刚[3], 杨守业[1,2]

1. 海洋地质国家重点实验室, 同济大学, 上海 200092;
2. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室, 青岛 266061;
3. 国家海洋局第三海洋研究所, 厦门 361005
* 通讯作者, E-mail: cli@tongji.edu.cn

收稿日期: 2016-11-24; 收修改稿日期: 2017-08-02; 接受日期: 2017-11-15; 网络版发表日期: 2018-02-28
国家自然科学基金项目(批准号: 41676035)、全球变化与海气相互作用专项项目(编号: GASI-GEOGE-03)和同济大学大学生创新实践训练计划项目(编号: SITP10)资助

摘要 简要介绍了太平洋年代际振荡(PDO)的研究历史. 在此基础上, 选择两个分别来自长江下游和黄河口的钻孔沉积记录, 探索百年以来沉积物粒径变化对PDO波动的响应. 研究结果表明, 来自河口附近的两个钻孔沉积物粒径变化与PDO波动有显著的相关性. 主要原因是PDO在年代际尺度上影响了东亚季风区的降水, 进而改变了长江和黄河流域的水动力条件, 并最终体现在沉积物粒度的变化上. 进一步分析显示, PDO处于不同位相时期, 受降雨中心移动的影响, 长江和黄河沉积物粒度呈现出不同的变化规律. 同时, 本文还选择中国东部其他代表性高分辨率地质环境替代指标, 如石笋和树轮, 对比研究多种环境指标对PDO波动响应的差异. 结合重建的PDO数据, 本文发现近二百年以来钻孔沉积物粒度对PDO波动同样有一定的响应, 未来可以作为研究PDO对中国东部地区降水影响的新证据. 本文从地质学角度比较了PDO与中国东部降水之间的关系, 再次印证了前人关于PDO影响中国东部气候环境的研究成果, 为PDO的研究提供了一种新的指标, 对年代际尺度上中国东部地区气候环境演化历史的重建和未来气候预测都具有一定的指导意义.

关键词 沉积记录, 石笋氧同位素, 降水, 太平洋年代际振荡(PDO), 东亚季风

1 引言

太平洋年代际振荡是一种与El Niño-Southern Oscillation(ENSO)类似但具有更长周期的气候变化强信号, 由北美水产学家Mantua等在研究三文鱼产量时发现(Mantua等, 1997; Zhang等, 1997; Mantua和Hare, 2002). 通常情况下, 北太平洋三文鱼产量在阿拉斯加高而西北太平洋低, 但在20世纪60~70年代情况却发生了颠倒. Mantua等(1997)认为这种异常并不是偶然现象, 也不仅仅存在于北太平洋三文鱼产量的记录中. 后续研究显示, 北太平洋地区在1976/1977年前后经历了一次大规模气候年代际跃变, 这种变化影响了北美

中文引用格式: 姚嘉惠, 肖林翔, 苟萌萌, 李超, 连尔刚, 杨守业. 2018. 太平洋年代际振荡对中国东部季风区降水影响的新证据. 中国科学: 地球科学, 48: 617–627, doi: 10.1360/N072016-00380
英文引用格式: Yao J H, Xiao L X, Gou M M, Li C, Lian E G, Yang S Y. 2018. Pacific decadal oscillation impact on East China precipitation and its imprint in new geological documents. Science China Earth Sciences, 61: 473–482, https://doi.org/10.1007/s11430-016-9146-2

© 2018 《中国科学》杂志社

地区气候和太平洋生态系统. 类似于20世纪70年代中后期的气候突变还发生在20世纪20年代和40年代(Mantua等, 1997; Zhang等, 1997; Hare和Mantua, 2000). 这种现象被Mantua等命名为太平洋年代际振荡(Pacific Decadal Oscillation, PDO). PDO指数是对PDO波动强弱的定量表述, 其定义为北太平洋20°N以北月平均海表温度异常经验正交函数分析(EOF)第一模态的时间系数(Hare和Mantua, 2000). 以太平洋海温异常作为指示, PDO具有显著的两极性, 可分为冷位相和暖位相(图1). 当PDO指数为正值时, 为暖位相, 此时热带中东太平洋海水水温异常暖, 北太平洋中部异常冷, 北美西岸异常暖; 当PDO指数为负值时, 为冷位相, 此时热带中东太平洋海水水温异常冷, 北太平洋中部异常暖, 北美西岸异常冷(Mantua等, 1997; Mantua和Hare, 2002).

PDO对于北美地区气候产生的影响已经得到大量研究的证实(MacDonald和Case, 2005; Kirby等, 2010; Shimoda等, 2011; Di Lorenzo等, 2013; St. George, 2014; Newman等, 2016). 近年来, 国内学者在气象学和海洋学领域同样发现PDO对东亚地区气候变化有非常重要的影响(杨修群等, 2004; Li等, 2010; Ouyang等, 2014; Shi等, 2015). 例如, 朱益民和杨修群(2003)发现, PDO暖位相期, 冬季海平面气压场上阿留申低压和蒙古高压年代际同步变化, 是PDO影响东亚大气环流的重要途径. 周连童和黄荣辉(2003)发现, 热带中东太平洋的海表温度有明显的年代际变化, 从1976年以后热带中东太平洋海水明显增暖, 呈现出“年代际的El Niño现象”. 这种海温异常分布减弱了亚洲夏季风, 从而减少了热带太平洋、中国南海和孟加拉湾向东亚的水汽输送. Fu等(2008)提出太平洋年代际振荡通过影响东亚冬、夏季大气环流, 引起季风和洋流的异常, 从而影响到东亚气候. Li等(2010)根据1950~2000年由PDO引起的热带太平洋海域海表温度异常升高, 揭示了PDO对减弱东亚夏季风起到显著作用. Li和Ma (2012)则指出PDO对西北太平洋影响最为剧烈, 暖位相时对应低降水率和高温, 冷位相时对应高降水率和低温.

回顾过去几十年, 关于PDO对东亚地区气候影响的研究工作大都集中在大气科学或海洋学领域, 缺少系统的历史资料(气象观测多集中在20世纪50年代之后). 目前通过实测数据计算的PDO只有近百年的历史, 而百年以来PDO只出现了约两个周期, 因此有限的实测PDO数据限制了对其周期性发生规律的进一步认识. 虽然借助一些气象模型可以预测较长时间上气象参数变化的规律, 但又缺乏直接证据的检验.

高分辨率的地质记录, 能够还原过去历史时期的气候变化情况. 对比高分辨率地质环境替代指标和PDO的变化, 可以探究PDO在地质历史上对气候的影响; 另一方面, 借助较长时间尺度的地质记录, 还可以追溯PDO的演化历史, 实现较长时间尺度上PDO的重建. 目前国际上开展较多的PDO与地质环境替代指标的比较主要集中于北美地区的树轮(MacDonald和Case, 2005; Trouet和Taylor, 2010; DeRose等, 2014; St. George, 2014; Labotka等, 2016)和太平洋地区的珊瑚(Felis等, 2010; Rodriguez-Ramirez等, 2014; Watanabe等, 2014; Brenner等, 2016). 相比国际上的研究, 目前国内该方面的工作也已逐步开展, 并在树轮(Shen等, 2006; He等, 2007; Wang等, 2015; 史江峰等, 2015; Cai和Liu, 2016)和石笋记录(Liu等, 2008; 何璐瑶等, 2009; Tan等, 2014; Zhao等, 2015)研究中发现了较明显的PDO影响. 总的来说, 以上研究都在不同时间和空间的高分辨率地质记录中发现了PDO对东亚地区气温、降水的影响. 受此启发, 本文收集整理了中国东部季风区长江下游和黄河口的钻孔沉积记录, 探索钻孔记录中是否也有类似PDO的影响, 同时与其他代表性高分辨率地质环境替代指标, 如石笋和树轮, 进行了对比. 在更广的空间分布上, 综合研究不同代表性古环境替代指标与PDO之间的内在联系, 进一步检验气象模型对PDO和东亚地区气候变化关系的预测, 弥补直接气象观测的不足, 丰富东亚地区代际时间尺度上气候演化规律的研究.

2 数据来源和计算

本文所选河口地区沉积物分别来自长江下游的镇江扬中江心洲和黄河口的莱州湾(图2). 扬中长江沉积物钻孔长2m, 采样间距1~2cm, 共获得101个样品, 沉积物年代框架由^{210}Pb确定(Zhan等, 2010). 黄河口钻孔水深18m, 以1cm间距采样共获得157个样品, 年代框架通过^{137}Cs和^{210}Pb测定完成(Wu等, 2015). 本文所选两组钻孔数据, 均有较好的工作基础, 其样品分辨率都可达到年分辨率以上. 为更全面地比较不同地质记录对PDO的响应, 本文还分别选取中国东部其他较典型的3组

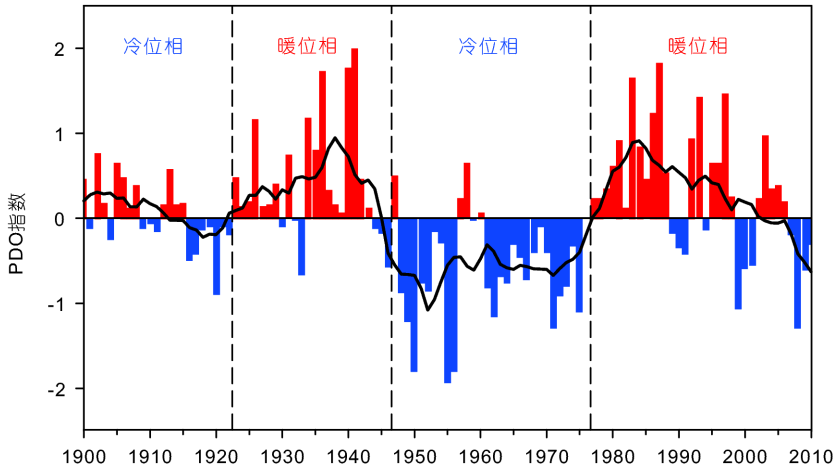

图 1　**百年以来的PDO波动**

黑色实线是9年平滑后的曲线

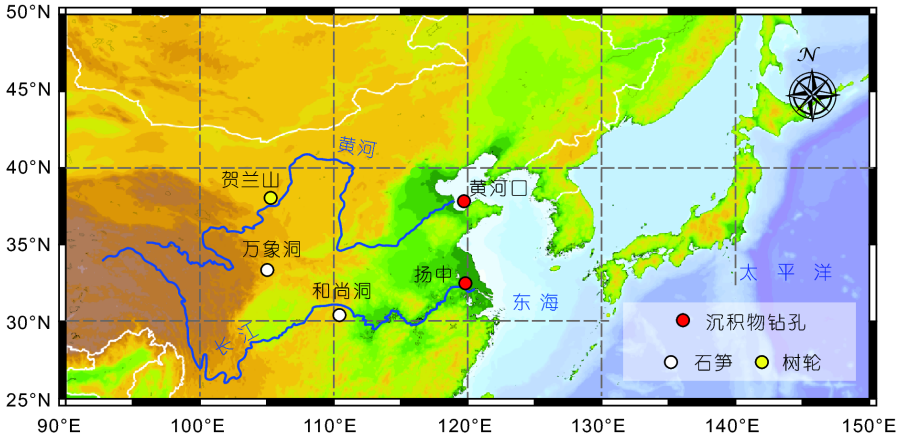

图 2　**样品分布图**

地质环境替代指标, 如石笋和树轮, 进行对比研究(图2). 本文中所使用的PDO指数来自http://research.jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest, 各地质环境样品及指标的相关具体信息参见表1及相应文献出处.

为进一步定量描述各环境地质记录参数与PDO指数波动之间的关系, 本文对所收集的文献数据与PDO进行了统一的相关性分析和检验. 由于各地质环境参数采样密度与时间分辨率各有不同, 相关性分析前首先对各环境参数进行线性差分, 使其不同环境指标的样品分辨率达到统一的逐年标准. 在此基础上, 本文进一步对逐年变化的各环境指标进行了9年的滑动平均, 以期达到消除短期或个别偶然气候事件对整体波动趋势的影响, 而尽可能保留代际波动信息, 从而确保相关性统计的真实和可靠. 相关性分析的具体结果见表2.

3　PDO对百年以来中国东部地区降水的影响

3.1　河流沉积物粒度变化对PDO波动的响应

河口地区钻孔沉积物粒径的变化, 主要受河流水动力环境强弱、沉积物搬运距离和源区岩性等的影响, 反映流域水文环境的演化. 长江和黄河作为东亚地区最大的两条河流, 流域面积广阔, 所流经的地区覆盖了东亚主要气候带, 其下游(河口)地区的钻孔沉积物记录了东亚的水文、气象以及人类活动等综合演化信息. 沉积物的中值粒径大小反映了其沉积时水动力环

表 1　地质环境记录样品分布和参数情况统计

样品	样品位置	测试指标	时间	数据来源
沉积物	雷公嘴(32°18′N, 119°45′E)	中值粒径	AD1858~AD2006	Zhan等, 2010
	莱州湾(37°41′N, 119°49′E)	中值粒径	AD1810~AD2005	Wu等, 2015
石笋	万象洞(33°19′N, 105°00′E)	$\delta^{18}O$	AD192~AD2003	Zhang等, 2008
	和尚洞(30°27′N, 110°25′E)	$\delta^{18}O$	7520BC~AD2002	Hu等, 2008
树轮	贺兰山(38°27′N, 105°45′E)	$\delta^{18}O$	AD1961~AD1989	Liu等, 2004

表 2　各地质环境替代指标与PDO的相关性

	显著性	R	$p(\alpha)$	N	时间
中值粒径 长江沉积物	显著相关	≥0.392	≤0.01	108	1900~2007
中值粒径 黄河沉积物	显著相关	≥0.492	≤0.01	106	1900~2005
石笋$\delta^{18}O$ 万象洞	显著相关	≥0.476	≤0.01	104	1900~2003
石笋$\delta^{18}O$ 和尚洞	显著相关	≥0.199	≤0.05	103	1900~2002
树轮$\delta^{18}O$ 贺兰山树轮	显著相关	≥0.898	≤0.01	29	1961~1989

境的强弱, 在较强水动力环境中, 沉积颗粒较粗, 而在较弱的水动力环境中沉积物的粒度则偏细. 张瑞等(2011)对近50年来的长江入海月均径流量序列和PDO序列进行EMD分量相关性的研究, 发现两者在年代际变化中有较高的相关性, 这表明在50年来的年代际变化中PDO对长江入海径流有着显著影响. 本文选择长江下游雷公嘴(Zhan等, 2010)和黄河口(Wu等, 2015)的两处钻孔沉积记录, 从更长时间尺度上对比钻孔沉积物的中值粒径和PDO波动(图3), 结果发现长江钻孔沉积物的粒度波动曲线与PDO指数表现出较显著的相关性(N=108, $p(\alpha)$≤0.01, R≥0.392; 图3a和b). 与长江钻孔沉积物类似, 黄河口钻孔沉积记录与PDO波动的相关性也十分显著(N=106, $p(\alpha)$≤0.01, R≥0.492; 图3a和d). 值得注意的是, 在Wu等(2015)的研究中认为黄河口钻孔沉积物粒度波动与黄河口的几次改道密切相关. 本文所选钻孔岩芯样品所处位置, 恰位于沿岸流主要流经处. 1855年以来, 尽管黄河入海口位置有所摆动, 但这些泥沙入海后最终在沿岸流的影响下, 在所选钻孔处形成沉积记录. 因此该钻孔沉积物仍然蕴含了丰富的流域季风降水信息, 为我们讨论PDO对中国东部季风区(黄河流域)的影响, 提供了一种可能的证据.

为进一步揭示PDO与长江钻孔沉积物粒度之间的内在联系, 我们参考Yang等(2010)所整理的1950年以来长江流域22个站点加权平均的降水资料(图3c), 比较了钻孔沉积物粒度、流域平均年降水量和PDO指数三者之间的关系. 相关性分析结果显示三者之间存在显著的正相关关系(表3). Yang等(2005)的研究已经表明, 长江流域的径流与降水的相关系数高达0.835, 说明径流与降水的关系十分密切. 因此, 我们认为PDO与长江下游钻孔沉积物粒度之间联系, 主要还是通过影响降水, 进而影响径流, 从而改变水动力环境所建立起来的. 以PDO位于暖位相为例, 此时夏季海平面气压在北太平洋的负异常较弱, 而在东亚大陆的正异常较强, 东亚夏季风偏弱, 减少了水汽从热带太平洋、中国南海及孟加拉湾向东亚的输送(周连童和黄荣辉, 2003), 使华北地区降水异常偏少而长江中下游、东北和西北地区降水异常偏多(Hu等, 2003; 朱益民和杨修群, 2003; Yu等, 2004; Li等, 2010). 长江流域异常增加的降水致使径流增加, 水动力增强, 所以导致长江沉积物钻孔粒度变粗. 而对应于PDO冷位相期, 上述情况则刚好相反(图3). 因此, 通过控制降水, PDO的波动在沉积物粒度信息中得以记录和保存. 而钻孔沉积物粒度、流域平均降水量和PDO指数三者的同步变化, 再次证实了PDO对中国东部季风区降水有明显的控制

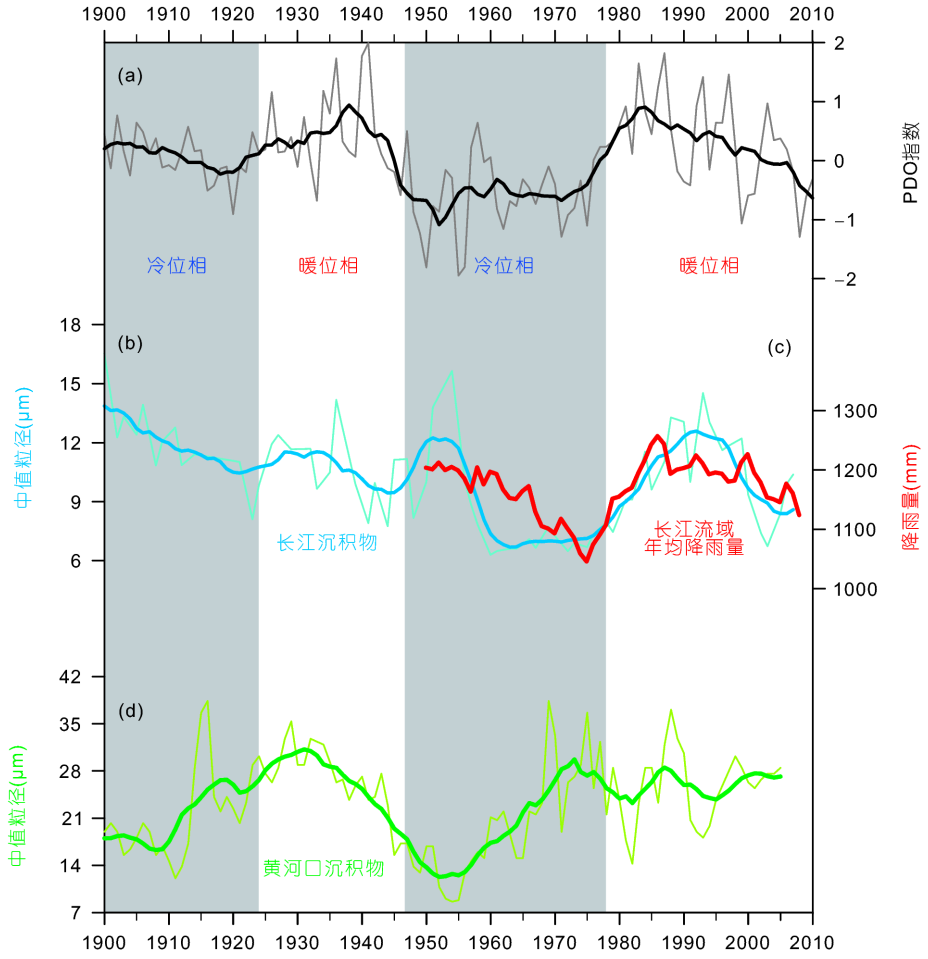

图 3　**PDO(a)与长江下游(b)和黄河口(d)钻孔沉积物中值粒径以及长江流域年平均降水(c)波动的关系**

所有实线是9年滑动平均后的曲线

作用.

尽管整体上PDO波动与长江和黄河沉积物粒度变化之间有较密切的关系, 但从细节上看, 在PDO不同位相时, 长江和黄河沉积物粒度的变化还是呈现出一些不同的波动规律. 我们按照PDO不同位相分段对长江和黄河沉积物粒度进行相关性分析, 结果见表4. 在PDO冷位相时期, 长江沉积物和黄河沉积物的粒度显示了相反的变化规律; 而当PDO处于暖位相时期, 两者粒度的变化相似(1925~1946年)或没有明显规律(1977年之后)(图3). 对于这一现象, 我们初步认为是PDO驱动中国东部季风区降雨中心区偏移所导致的. PDO冷位相期, 东亚夏季风偏强, 降雨锋面深入到华北地区, 降雨核心区较往年北移, 造成黄河流域降雨增加(Li等, 2010); 而此时长江流域由于偏离了降雨中心地区, 降水相对往年减少, 与黄河流域形成了此消彼长的模式, 此时两个钻孔沉积物粒径呈显著负相关(表4). 当PDO处于暖位相时期, 东亚夏季风减弱, 降雨中心南移. 但长江与黄河钻孔粒度变化在百年来的两个暖位相期间, 表现却有所不同, 我们认为这是由于两次雨带南移的幅度不同所导致的.

在第一个暖位相(1925~1946年)期间, 长江与黄河的钻孔沉积物粒度呈显著正相关. 结合沉积物粒度变化趋势分析, 我们推断此时雨带中心可能处于长江和黄河流域之间, 对长江和黄河降水影响程度相似, 因此两钻孔粒度变化十分一致(图3). 此后进入冷位相, 雨带中心北移. 到第二个暖位相早期(1977~1990s初), 受PDO影响, 东亚季风减弱, 雨带中心再次南移至长江流域, 导致水汽辐聚于长江流域, 而黄河流域降水较往年减少(Hu等, 2003; Zhou和Yu, 2005); 此时长江钻孔沉积物粒度明显变粗(图3). 20世纪90年代后期,

表 3　长江沉积物中值粒径、流域年均降雨量和PDO之间的相关性[a)]

		长江沉积物中值粒径	长流域江年均降水量	PDO
长江沉积物中值粒径	*R*	1	0.725*	0.389*
	显著性(双侧)	–	0.000	0.003
长流域江年均降水量	*R*	0.725*	1	0.394*
	显著性(双侧)	0.000	–	0.002
PDO	*R*	0.389*	0.394*	1
	显著性(双侧)	0.003	0.002	–

a) *, 在0.01水平(双侧)上显著相关; *N*=58(1950~2007)

表 4　长江雷公嘴与黄河口沉积物钻孔粒度分段相关性统计

	PDO位相	相关性	*R*	*p*(α)	*N*
1900~1924	冷	显著负相关	≥−0.828	≤0.01	25
1925~1946	暖	显著正相关	≥0.948	≤0.01	22
1947~1976	冷	显著负相关	≥−0.806	≤0.01	30
1977~2005	暖	无显著相关性	–	–	–

雨带中心继续南移至长江以南，来自太平洋和印度洋的水汽集中在长江以南，长江沉积物粒度开始变细而该时期黄河沉积物粒度没有明显变化. 这也解释了该暖位相期间, 两钻孔沉积物粒度没有相关性的现象.

以上猜测与丁一汇等(2013)总结的过去五十年中国东部降雨模式的变迁高度吻合. 丁一汇等的研究发现，1951~1978年间(即对应PDO冷位相时期)，中国东部季风区的降雨区主要位于华北和华南沿海地区；而1979~1992年间(即PDO暖位相时期)，季风降水区逐渐向南移动至江淮地区；1993~2004年间，主雨带继续移动到长江流域以南. 其研究认为导致中国东部季风区雨带偏移的主要原因就是热带中东太平洋海表温度的年代际变化，我们认为该年代际变化即本文所讨论的PDO. 因此，该研究成果与本文根据沉积物粒度时间序列推断的雨带偏移的构想不谋而合. 诚然，以上推测还有待进一步推敲, 期待更多数据和资料的检验.

3.2　石笋氧同位素和树轮记录对PDO波动的响应

石笋样品中的氧同位素记录了地质历史时期该区域季风降雨的强弱, 结合高分辨率的取样和测年, 可以还原季风降水的演化过程，是古环境研究中常用的指标(Wang等, 2001, 2005; Yuan等, 2004). 前人研究已经发现, 石笋氧同位素的波动明显受PDO波动的控制, 如刘敬华等(2008)研究甘肃陇南的万象洞石笋发现其氧同位素曲线与PDO的波动有着密切的关系，年代际时间尺度上PDO暖(冷)位相与季风降水的减少(增加)对应. 而万象洞的记录来自于东亚季风的边缘地带, 其结论是否具有普遍性，需要东亚季风区内其他地点的典型石笋记录的验证. 因此，何璐瑶等(2009)研究了湖北省长阳县鱼峡口镇清江南岸的和尚洞石笋氧同位素, 结果显示，近百年来和尚洞石笋的氧同位素值与当地年总降水量和年均温度的相关性并不显著，但与指示东亚季风环流特征的西太平洋副热带高压指数以及PDO相关性较好.

本文同时比较了万象洞和和尚洞石笋氧同位素与PDO的关系，相关性分析结果显示万象洞石笋氧同位素与PDO显著相关(*N*=104，$p(\alpha)\leq 0.01$，$R\geq 0.476$)(图4a), 和尚洞石笋氧同位素与PDO相关性较弱(*N*=103, $p(\alpha)\leq 0.05$，$R\geq 0.199$)(图4b). 两处石笋均对PDO有响应, 但响应程度不同，可能是因为两处洞穴石笋δ^{18}O反应的信息不同. 万象洞由于地理位置特殊，处于中国青藏高原和黄土高原过渡带的较低海拔地区，是典型季风系统交互作用的地带，对亚洲季风系统进退消长十分敏感，且洞穴滴水同位素组成主要受当地的大气降水的同位素组成控制(刘敬华等, 2008). 而和尚洞与当地降水量相关性并不显著，但与指示东亚季风环流特征的西太平洋副热带高压指数(WPSH)以及相对应的PDO相关性好(何璐瑶等, 2009). 而另一方面，1977年

之后和尚洞石笋δ^{18}O变化趋势与PDO一致，而万象洞石笋氧同位素则呈现出与PDO相反的变化趋势. 可能是由于1976/1977年发生的年代际气候跃变，出现年际异常的海温关键区发生年代际转移造成(李峰和何金海, 2000). 以上问题的存在, 再次显示了中国季风区石笋氧同位素的气候环境指示意义的复杂性(周厚云等, 2016)，在未来较短的时间尺度上(如年代际尺度、百年际尺度)开展不同石笋氧同位素记录之间比较研究时务必慎重.

在古气候的研究中, 树轮因具有高精度, 高分辨率和连续性强的特征，成为内陆地区古环境重建的重要指标. 目前东亚地区已有多篇报道讨论树轮指标波动与PDO之间的关系(Shen等, 2006; He等, 2007; 史江峰等, 2015). 本文参考Liu等(2004)对贺兰山树轮样品的氧同位素测试结果，比较树轮氧同位素与PDO波动之间的关系. 结果表明，树轮氧同位素波动与PDO变化之间的相关性系数非常显著(N=29，$p(\alpha)\leq$0.01，$R\geq$0.898，图4c). 树轮的宽度对温度的响应非常灵敏，是古温度研究中常用的指标，少数研究区的树轮还可以指示降雨信息(Shi等，2010). Liu等(2004)的研究显示，位于贺兰山的树轮氧同位素与当地降雨量之间有非常显著的相关性. 本文研究结果显示树轮氧同位素与PDO之间也存较高的相关性，这说明PDO与中国北方地区的降雨量也存在密切的联系.

3.3　PDO对中国东部降水的影响

东亚季风环流系统是影响东亚地区气候环境的重要因素，气象研究表明其与印度洋季风存在相互作用(Zhang和Lin，1992; Wang，2006). 中国东部地区的降水主要是来自东亚夏季风从太平洋和印度洋带来的水汽. PDO正是通过改变东亚夏季风强弱, 从而影响中国东部地区降水(朱益民和杨修群，2003). 本文通过比较河流钻孔沉积记录与PDO波动之间的关系，结合其他地质环境指标的综合比较，我们认为百年以来各种不同地质环境记录指标都不同程度上受到PDO波动的影响. 以上对比结果, 有力地支持了气象模型对PDO和中国东部地区气候变化关系的预测，弥补直接气象观测的不足，加深了对中国东部短时间尺度上气候演化规律的认识.

众所周知，ENSO是热带太平洋海区最强的年际气候变率信号，它对中国东部地区气候变化起着举足

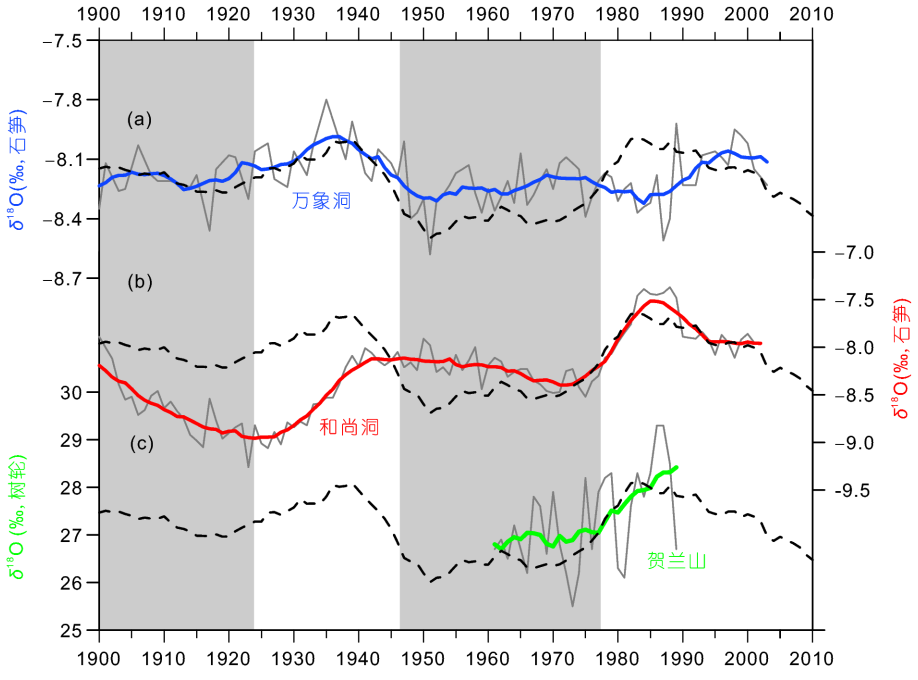

图 4　石笋氧同位素((a)和(b))、树轮氧同位素(c)波动曲线与PDO的关系

相关性统计结果见表2; 背景虚线是PDO的波动情况; 灰色实线是各参数的实际波动情况, 彩色实线是9年滑动平均后的曲线

轻重的作用(Trenberth, 1997; Wang等, 2017). El Niño和La Niña则是ENSO冷暖两种不同位相的异常状态，其周期约为2~7年. 有学者注意到，ENSO对中国气候的影响并不稳定，而是具有年代际特征. 这些年代际变化大都出现在20世纪70年代晚期，恰好与太平洋年代际振荡(PDO)位相由冷位相转为暖位相的转变时期一致(Mantua等, 1997; Zhang等, 1997). 因此, PDO在年代际尺度上的位相转变对ENSO起到了至关重要的调制作用，进而在ENSO基础上影响了东亚地区的气候变化(朱益民和杨修群, 2003; Wang等, 2008). 受样品分辨率的限制，本文没有尝试在各种地质记录中寻找ENSO的影响. 但为避免ENSO信号的干扰，本文采用了9年滑动平均的方式，尽量过滤掉短周期波动的影响, 从而提取更加真实的PDO波动信号.

气候变化是一个非常复杂的过程，从十几万年的轨道尺度到年际尺度，气候的变化受控于多种复杂的因素. 毫无疑问，ENSO是目前所发现的在年际尺度上与太平洋地区气候变化最为直接的因素，而PDO的提出，则解释了在年代际尺度上气候波动的原因. 两者相互叠加，共同作用和主导了短时间尺度上中纬度太平洋及周边地区的气候演化.

4 长江、黄河沉积物粒度与重建PDO指数相关性的探索

如前文所述，基于仪器观测数据直接计算得到的PDO指数只有一百多年的历史，显然不能满足古环境研究的需要. 在过去十几年里，许多学者基于重建的海表温度、压强和各种高分辨率地质环境指标(如树轮、珊瑚)开展了一系列的PDO重建工作(Kaplan等, 1987; Mantua等, 1997; Biondi等, 2001; MacDonald和Case, 2005; Shen等, 2006). 为进一步检验本文所发现的长江、黄河沉积物粒度与百年来PDO之间的规律，我们将两钻孔沉积物粒度的完整资料与重建得到的PDO指数进行对比分析，探究在更长时间范围内二者的关系.

通过对比1800年以来长江、黄河沉积物粒度完整资料与MacDonald和Case(2005)重建的PDO指数，两者在近二百年来与PDO的相关系数分别为0.33(N=139, p≤0.01)和0.48(N=187, p≤0.01)，为显著相关(图5). 可见，在更长时间尺度上沉积物粒度同样较好地响应了PDO的波动. 值得注意的是，本文引用MacDonald和Case(2005)基于北美地区树轮重建的PDO指数，与基

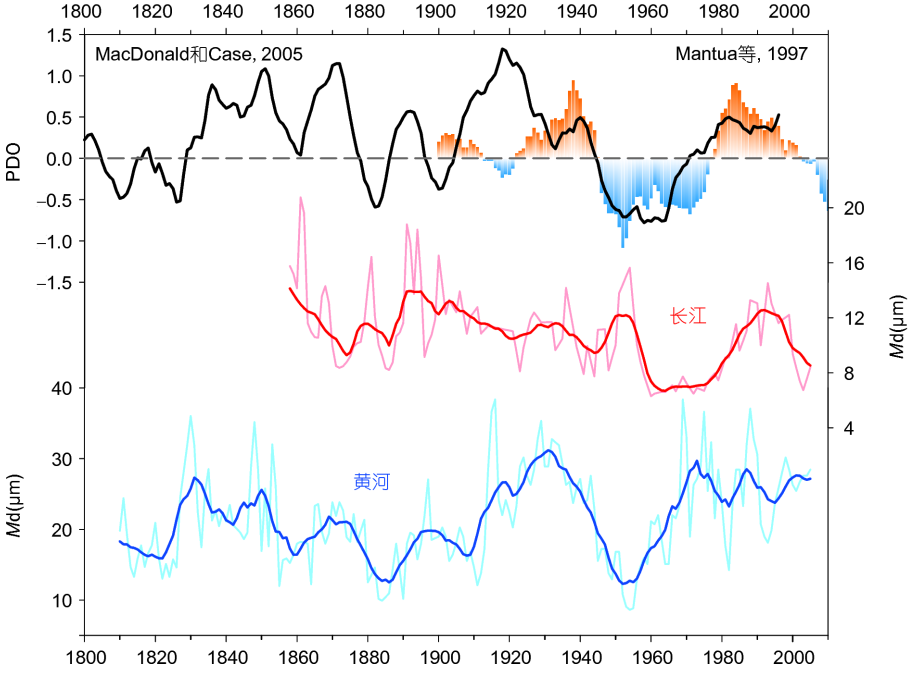

图 5 长江、黄河沉积物粒度与重建PDO关系的比较

黑色实线是MacDonald和Case(2005)重建的PDO; 彩色柱状图是Mantua等重建的PDO指数; 各粗实线都进行了9年的滑动平均

于观测数据直接计算得到的PDO指数(Mantua等, 1997)仍然存在一些差异, 尤其是1900~1930年期间, 二者甚至出现了近似相反的波动趋势. 这种差异的出现, 主要还是由于地质指标对气候变化响应的灵敏度及样品所在地局部环境不同造成的(Mantua和Hare, 2002; MacDonald和Case, 2005). 而基于不同地质参数此所重建的PDO指数在不同时间点、时间区间和内部结构上均存在一定差异, 因此在利用重建PDO指数进行古环境演化研究时, 合理选择PDO指数非常关键. 尽管如此, 近200年时间范围上长江、黄河沉积物粒度与重建得到的PDO指数存在显著的相关性, 进一步支持和验证了本文所发现的百年以来沉积物粒度与PDO之间的密切关系. 当然, 由于钻孔沉积物资料的限制, 本文对较长时间范围内沉积物粒度与PDO关系的验证也仅仅局限在近二百年的时间内. 未来沉积物粒度是否可以成为古环境研究中PDO的有效重建指标, 除了沉积物在时间尺度上满足要求, 还取决于样品的采样分辨率和定年技术的精确度等因素.

5　结论与展望

本文通过分析百年以来中国东部季风区长江下游和黄河口的沉积记录对PDO波动的响应, 发现两大河流河口附近钻孔沉积记录中的粒径变化与PDO的波动之间具有较好的一致性. PDO位于不同位相时期, 受降雨中心区移动的影响, 长江和黄河沉积物粒度呈现出不同的变化规律. 本文研究结果为PDO研究提供了新的地学证据, 进一步印证了前人在气象学和海洋学领域关于PDO影响中国东部气候环境的结论. PDO是与ENSO类似的一种气候变率信号, 两者在不同时间尺度上主导着东亚的气候发展过程, 未来研究应该加强多样化地质环境指标综合比较分析和更长时间范围内PDO的重建与检验.

致谢　感谢刘忠方、黄湘通、张悦、张艳伟、马文涛、王跃等对本文相关性计算等提供的技术指导. 感谢两位审稿人对本文提出的建设性修改建议.

参考文献

丁一汇, 孙颖, 刘芸芸, 司东, 王遵娅, 朱玉祥, 柳艳菊, 宋亚芳, 张锦. 2013. 亚洲夏季风的年际和年代际变化及其未来预测. 大气科学, 37: 253–280

何璐瑶, 胡超涌, 黄俊华, 谢树成, 王焰新. 2009. 石笋氧同位素指示东亚季风大尺度环流特征. 第四纪研究, 29: 950–956

李峰, 何金海. 2000. 北太平洋海温异常与东亚夏季风相互作用的年代际变化. 热带气象学报, 16: 260–271

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. 2008. 黄土高原西缘在AD1875~2003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. 科学通报, 53: 2801–2808

史江峰, 李玲玲, 韩志勇, 侯鑫源, 史逝远. 2015. 湖南道吾山树轮记录的1815~2013年6~9月平均温度及其与PDO和ENSO的联系. 第四纪研究, 35: 1155-1164

杨修群, 朱益民, 谢倩, 任雪娟, 徐桂玉. 2004. 太平洋年代际振荡的研究进展. 大气科学, 28: 979–992

张瑞, 汪亚平, 潘少明. 2011. 近50年来长江入海径流量对太平洋年代际震荡变化的响应. 海洋通报, 30: 572–577

周厚云, 刘淑华, 彭小桃, 邓肖敏, 陈琼, 米小建. 2016. 中国季风区石笋氧同位素气候指示意义: 主要争议与几个重要问题. 热带地理, 36: 448–456

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: 274–290

朱益民, 杨修群. 2003. 太平洋年代际振荡与中国气候变率的联系. 气象学报, 61: 641–654

Biondi F, Gershunov A, Cayan D R. 2001. North Pacific decadal climate variability since 1661. J Clim, 14: 5–10

Brenner L D, Linsley B K, Dunbar R B, Wellington G. 2016. Coral δ^{18}O evidence for Pacific Ocean mediated decadal variability in Panamanian ITCZ rainfall back to the early 1700s. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 449: 385–396

Cai Q F, Liu Y. 2016. Two centuries temperature variations over subtropical southeast China inferred from Pinus taiwanensis Hayata tree-ring width. Clim Dyn, 48: 1813–1825

DeRose R J, Wang S Y, Buckley B M, Bekker M F. 2014. Tree-ring reconstruction of the level of Great Salt Lake, USA. Holocene, 24: 805–813

Di Lorenzo E, Combes V, Keister J E, Strub P T, Thomas A C, Franks P J, Ohman M D, Furtado J C, Bracco A, Bograd S J, Peterson W T, Schwing F B, Chiba S, Taguchi B, Hormazabal S, Parada C. 2013. Synthesis of Pacific Ocean climate and ecosystem dynamics. Oceanography, 26: 68–81

Felis T, Suzuki A, Kuhnert H, Rimbu N, Kawahata H. 2010. Pacific decadal oscillation documented in a coral record of North Pacific winter temperature since 1873. Geophys Res Lett, 37: L14605

Fu C, Jiang Z, Guan Z, He J, Xu Z. 2008. Interdecadal climate variability in China associated with the Pacific Decadal Oscillation. In: Fu C, Jiang Z, Guan Z, eds. Regional Climate Studies of China. Berlin: Springer. 97–117

Hare S R, Mantua N J. 2000. Empirical evidence for North Pacific regime shifts in 1977 and 1989. Prog Oceanogr, 47: 103–145

He X, Chen Z, Chen W, Shao X, He H S, Sun Y. 2007. Solar activity, global surface air temperature anomaly and pacific decadal oscillation recorded in urban tree rings. Ann For Sci, 64: 743–756

Hu C, Henderson G M, Huang J, Xie S, Sun Y, Johnson K R. 2008. Quantification of Holocene Asian monsoon rainfall from spatially separated cave records. Earth Planet Sci Lett, 266: 221–232

Hu Z Z, Yang S, Wu R. 2003. Long-term climate variations in China and global warming signals. J Geophys Res, 108: 4614

Kaplan A, Kushnir Y, Cane M A. 1987. Reduced space optimal interpolation of historical marine sea level pressure: 1854–1992. J Clim, 13: 2987–3002

Kirby M E, Lund S P, Patterson W P, Anderson M A, Bird B W, Ivanovici L, Monarrez P, Nielsen S. 2010. A Holocene record of Pacific decadal oscillation (PDO)-related hydrologic variability in southern California (Lake Elsinore, CA). J Paleolimn, 44: 819–839

Labotka D M, Grissino-Mayer H D, Mora C I, Johnson E J. 2016. Patterns of moisture source and climate variability in the south-eastern United States: A four-century seasonally resolved tree-ring oxygen-isotope record. Clim Dyn, 46: 2145–2154

Li C, Ma H. 2012. Relationship between ENSO and winter rainfall over Southeast China and its decadal variability. Adv Atmos Sci, 29: 1129–1141

Li H, Dai A, Zhou T, Lu J. 2010. Responses of East Asian summer monsoon to historical SST and atmospheric forcing during 1950–2000. Clim Dyn, 34: 501–514

Liu W, Feng X, Liu Y, Zhang Q, An Z. 2004. $\delta^{18}O$ values of tree rings as a proxy of monsoon precipitation in arid Northwest China. Chem Geol, 206: 73–80

MacDonald G M, Case R A. 2005. Variations in the Pacific Decadal Oscillation over the past millennium. Geophys Res Lett, 32: L08703

Mantua N J, Hare S R. 2002. The Pacific decadal oscillation. J Oceanogr, 58: 35–44

Mantua N J, Hare S R, Zhang Y, Wallace J M, Francis R C. 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. Bull Amer Meteorol Soc, 78: 1069–1079

Newman M, Alexander M A, Ault T R, Cobb K M, Deser C, Di Lorenzo E, Mantua N J, Miller A J, Minobe S, Nakamura H, Schneider N, Vimont D J, Phillips A S, Scott J D, Smith C A. 2016. The Pacific decadal oscillation, revisited. J Clim, 29: 4399–4427

Ouyang R, Liu W, Fu G, Liu C, Hu L, Wang H. 2014. Linkages between ENSO/PDO signals and precipitation, streamflow in China during the last 100 years. Hydrol Earth Syst Sci, 18: 3651–3661

Rodriguez-Ramirez A, Grove C A, Zinke J, Pandolfi J M, Zhao J. 2014. Coral luminescence identifies the Pacific Decadal Oscillation as a primary driver of river runoff variability impacting the southern Great Barrier Reef. Plos One, 9: e84305

Shen C, Wang W C, Gong W, Hao Z. 2006. A Pacific Decadal Oscillation record since 1470 AD reconstructed from proxy data of summer rainfall over eastern China. Geophys Res Lett, 33: L03702

Shi J, Cook E, Lu H, Li J, Wright W, Li S. 2010. Tree-ring based winter temperature reconstruction for the lower reaches of the Yangtze River in southeast China. Clim Res, 41: 169–176

Shi J, Lu H, Li J, Shi S, Wu S, Hou X, Li L. 2015. Tree-ring based February–April precipitation reconstruction for the lower reaches of the Yangtze River, southeastern China. Glob Planet Change, 131: 82–88

Shimoda Y, Azim M E, Perhar G, Ramin M, Kenney M A, Sadraddini S, Gudimov A, Arhonditsis G B. 2011. Our current understanding of lake ecosystem response to climate change: What have we really learned from the north temperate deep lakes? J Great Lakes Res, 37: 173–193

St. George S. 2014. An overview of tree-ring width records across the Northern Hemisphere. Quat Sci Rev, 95: 132–150

Tan L, An Z, Huh C A, Cai Y, Shen C C, Shiau L J, Yan L, Cheng H, Edwards R L. 2014. Cyclic precipitation variation on the western Loess Plateau of China during the past four centuries. Sci Rep, 4: 6381

Trenberth K E. 1997. The definition of El Niño. Bull Amer Meteorol Soc, 78: 2771–2777

Trouet V, Taylor A H. 2010. Multi-century variability in the Pacific North American circulation pattern reconstructed from tree rings. Clim Dyn, 35: 953–963

Wang B. 2006. The Asian Monsoon. Berlin: Springer. 787

Wang J, Yang B, Ljungqvist F C. 2015. A millennial summer temperature reconstruction for the eastern Tibetan Plateau from tree-ring width. J Clim, 28: 5289–5304

Wang L, Chen W, Huang R. 2008. Interdecadal modulation of PDO on the impact of ENSO on the east Asian winter monsoon. Geophys Res Lett, 35: L20702

Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, He Y, Kong X, An Z, Wu J, Kelly M J, Dykoski C A, Li X. 2005. The Holocene Asian monsoon: Links to solar changes and North Atlantic climate. Science, 308: 854–857

Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, An Z S, Wu J Y, Shen C C, Dorale J A. 2001. A high-resolution absolute-dated late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China. Science, 294: 2345–2348

Wang Z, Wei G, Chen J, Liu Y, Ma J, Xie L, Deng W, Ke T. 2017. El Niño-Southern Oscillation variability recorded in estuarine sediments of the Changjiang River, China. Quat Int, 441: 18–28

Watanabe T, Kawamura T, Yamazaki A, Murayama M, Yamano H.

2014. A 106 year monthly coral record reveals that the East Asian summer monsoon modulates winter PDO variability. Geophys Res Lett, 41: 3609–3614

Wu X, Bi N, Kanai Y, Saito Y, Zhang Y, Yang Z, Fan D, Wang H. 2015. Sedimentary records off the modern Huanghe (Yellow River) delta and their response to deltaic river channel shifts over the last 200 years. J Asian Earth Sci, 108: 68–80

Yang S L, Gao A, Hotz H M, Zhu J, Dai S B, Li M. 2005. Trends in annual discharge from the Yangtze River to the sea (1865–2004). Hydrol Sci J, 50: 825

Yang S L, Liu Z, Dai S B, Gao Z X, Zhang J, Wang H J, Luo X X, Wu C S, Zhang Z. 2010. Temporal variations in water resources in the Yangtze River (Changjiang) over the Industrial Period based on reconstruction of missing monthly discharges. Water Resour Res, 46: W10516

Yu R, Wang B, Zhou T. 2004. Tropospheric cooling and summer monsoon weakening trend over East Asia. Geophys Res Lett, 31: L22212

Yuan D, Cheng H, Edwards R L, Dykoski C A, Kelly M J, Zhang M, Qing J, Lin Y, Wang Y, Wu J, Dorale J A, An Z, Cai Y. 2004. Timing, duration, and transitions of the last interglacial Asian monsoon. Science, 304: 575–578

Zhan W, Yang S Y, Liu X L, Li J W, Choi M S. 2010. Reconstruction of flood events over the last 150 years in the lower reaches of the Changjiang River. Chin Sci Bull, 55: 2268–2274

Zhang J, Lin Z. 1992. Climate of China. New York: John Wiley & Sons. 376

Zhang P, Cheng H, Edwards R L, Chen F, Wang Y, Yang X, Liu J, Tan M, Wang X, Liu J, An C, Dai Z, Zhou J, Zhang D, Jia J, Jin L, Johnson K R. 2008. A test of climate, sun, and culture relationships from an 1810-year Chinese cave record. Science, 322: 940–942

Zhang Y, Wallace J M, Battisti D S. 1997. ENSO-like interdecadal variability: 1900–93. J Clim, 10: 1004–1020

Zhao M, Li H C, Liu Z H, Mii H S, Sun H L, Shen C C, Kang S C. 2015. Changes in climate and vegetation of central Guizhou in southwest China since the last glacial reflected by stalagmite records from Yelang Cave. J Asian Earth Sci, 114: 549–561

Zhou T J, Yu R C. 2005. Atmospheric water vapor transport associated with typical anomalous summer rainfall patterns in China. J Geophys Res, 110: D08104

(责任编委: 余克服)