

1380—1429 年中国东部雨涝期与气候系统内部变率的可能联系

彭友兵

西安交通大学 人居环境与建筑工程学院 地球环境科学系, 西安 710049

摘要: 利用重建数据和模拟数据探讨中国东部 1380—1429 年雨涝期与气候系统内部变率之间的联系。结果显示: 1380—1429 年全球大多数区域发生了严重的旱涝事件, 揭示了中国东部雨涝气候可能是对大尺度大气环流调整下的响应, 可能与该时期赤道太平洋类 La Niña 海温分布、太平洋年代际振荡 (PDO) 冷位相、北大西洋年代际振荡 (AMO) 暖位相、北大西洋涛动 (NAO) 正位相相关。全球海气耦合模式尽管能够模拟出该时期非洲和欧洲区域的干湿空间分布状况, 但模拟的中国东部、北美和南美的干湿状况与重建相反。其可能的原因或许是模式虽正确模拟出了 NAO 正位相及弱的印度洋偶极子 (IOD) 负位相, 但无法正确刻画赤道太平洋类 La Niña 海温分布、北太平洋 PDO 冷位相及北大西洋 AMO 暖位相。

关键词: 雨涝; 中国东部; ENSO; PDO; NAO

The possible role of the internal variability of the climate system in hydroclimate over eastern China during 1380—1429

PENG Youbing

Department of Earth Environmental Science, School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

Abstract: Background, aim, and scope The occurrence of severe persistent pluvials during the summer monsoon season is perhaps one of the most pressing climate concern that faces China today. However, few works have focused on understanding the occurrence of the severe persistent pluvials in China, although studies to date have revealed some severe persistent pluvials over the last thousand years. The proxy data show the most wet period occurring from 1330s to 1420s over eastern China during the last 1500 years. Here, we focus on pluvial occurring in this period to assess the possible role of the internal variability of the climate system in hydroclimate over eastern China. **Materials and methods** The role of the internal variability of the climate system in driving the pluvial over eastern China is assessed by using the model data and paleo-proxy records. **Results** Based on proxy data, one such pluvial have occurred from 1380 to

收稿日期: 2018-05-21; 录用日期: 2018-09-29; 网络出版: 2018-10-09

Received Date: 2018-05-21; Accepted Date: 2018-09-29; Online first: 2018-10-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41605046)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (41605046)

通信作者: 彭友兵, E-mail: youbingpeng@mail.xjtu.edu.cn

Corresponding Author: PENG Youbing, E-mail: youbingpeng@mail.xjtu.edu.cn

引用格式: 彭友兵. 2019. 1380—1429 年中国东部雨涝期与气候系统内部变率的可能联系 [J]. 地球环境学报, 10(3): 227–238.

Citation: Peng Y B. 2019. The possible role of the internal variability of the climate system in hydroclimate over eastern China during 1380—1429 [J]. Journal of Earth Environment, 10(3): 227–238.

1429 during this wet period. The hydroclimatic pattern in global which suggested by proxy records during 1380 to 1429 AD highlight relate regionally coherent climate changes with pluvials over eastern China. Such hydroclimatic pattern indicates coherent shifts in large-scale hydroclimatic patterns during this eastern China pluvial era which is similar with the climate dynamics associated with the internal variability of the climate system. These internal variability include persistent La Niña-like conditions in the tropical Pacific, the cool phase of the Pacific Decadal Oscillation (PDO), the warm phase of the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) and the positive North Atlantic Oscillation (NAO) index during this time. The CCSM2.0 simulations of climate for the period 1380—1429 AD are shown to reproduce many aspects of hydroclimate found in paleo-proxy records for much of the eastern Hemisphere, northern Eurasia, with the noticeable exception of North and South America and eastern China, which strongly linked to ENSO. For the internal variability conditions, the model could not produce the negative ENSO and its low-frequency counterpart PDO have been shown by proxy records, although it could roughly produce the positive NAO phase. **Discussion** The eastern China pluvial era as existing paleoclimatic archives are shown to be part of a global hydroclimatic regime linked to persistent La Niña-like conditions in the tropical Pacific, the cool phase of the Pacific Decadal Oscillation, the warm phase of the Atlantic Multidecadal Oscillation and the positive North Atlantic Oscillation index during this time. Furthermore, CCSM2.0 model driven by solar forcings and volcanic forcing does not display pluvial during 1380—1429 AD that would support the possibility suggested by the proxy-record that this pluvial may be related to internal variability. Finally, the model could not produce the pluvial during 1380—1429 AD over eastern China attribute to the model could not produce the climate dynamics associated with the ENSO and its low-frequency counterpart PDO. **Conclusions** Thus, we conclude both our analyses of reconstructions and simulations reveal the internal variability may play an important role in causing the pluvial during 1380—1429 AD over eastern China and could explain many features of global hydroclimate changes during this time. It is found that the ENSO and its low-frequency counterpart PDO may play an important role in determining hydroclimatic variability over China and North and South America. In addition, AMO and NAO may also have their own contributions to the pluvial during 1380—1429 AD over eastern China. **Recommendations and perspectives** However, additional high-resolution and absolutely-dated paleohydrological records are critically needed to expand their spatiotemporal coverage in order to definitively establish the more realistic hydroclimatic pattern during this period and to reveal more robust relationship between the internal variability of the climate system in hydroclimate over eastern China during 1380—1429.

Key words: pluvial; eastern China; ENSO; PDO; NAO

我国是世界上雨涝灾害频繁且严重的国家之一，雨涝灾害对我国的国民经济发展影响巨大，特别是持续多年、影响范围广泛的雨涝灾害可造成粮食减产，导致巨额的经济损失，破坏土地资源和生态环境，对社会经济和环境具有多方面的影响。利用历史文献记录、树轮、石笋、高分辨率湖泊沉积物等重要记录，科学家们重建了过去千年中国东部干湿变化序列，获得了大量的历史数据（中央气象局气象科学研究院，1981；Zhang，1988；刘禹等，2006；Zheng et al，2006；Zhang et al，2008；Tan et al，2009；Cook et al，2010）。重建资料揭示过

去千年严重的持续性雨涝事件多有发生，其中许多事件的严重程度甚至超过现代的记录（张德二，2004；Zheng et al，2006），其中 14 世纪 30 年代—15 世纪 20 年代雨涝事件时期是中国东部过去 1500 年来最为严重的雨涝期之一，在此期间发生了过去 1500 年来最严重的雨涝灾害，灾情惨重，为此明朝政府在一个省份放宽了农业赋税（Zheng et al，2006）。

认识持续性雨涝事件的成因机制是非常重要的，因为在未来有可能会发生类似的持续性雨涝事件。近年来的研究发现气候系统内部变率在中

国降水异常事件中扮演着重要的角色，热带太平洋异常冷（La Niña 事件）、太平洋年代际振荡（PDO）冷位相、北大西洋年代际振荡（AMO）暖位相、北大西洋涛动（NAO）正位相和印度洋偶极子（IOD）负位相通常使中国东部夏季风降水增加（王永波和施能，2001；肖莺等，2009；李双林等，2009；Qian and Zhou, 2014；Chen et al, 2015）。反之，El Niño 事件、PDO 暖位相、AMO 冷位相、NAO 负位相和 IOD 正位相则使降水减少。这些研究为认识和理解中国东部区域环境干湿变化与气候系统内部变率间的联系提供了重要证据，但这些研究往往局限于探讨中国东部区域降水与全球各区域海温变化及大气环流模态间的联系，多半是孤立的。事实上，显著的海温变化及环流模态调整往往会影响周边区域甚至是全球大部分区域的降水，如 ENSO 事件具有全球效应，可以影响全球超过 75% 区域的气候变化（Kiladis and Diaz, 1989）；AMO 可以影响欧亚大陆、北美、巴西东北部、西非等区域气候（Knight et al, 2006），IOD 可以影响非洲东部、印度大陆、中国东部和澳大利亚等地区（Saji et al, 1999；Meyers et al, 2007；Ummenhofer et al, 2009）。意味着与全球海温及大气环流模态变化相联系的中国东部降水异常事件，应当并非局部现象，而是与全球另一些区域的降水异常事件具有同步性。以往研究印证了这样的假设，比如受 El Niño 影响下 1875—1878 年中国东部发生极端干旱事件时期，Aceituno et al (2009) 指出全球降水均出现异常；Shen et al (2007) 的研究表明与 El Niño 相关联的中国东部三次超级干旱事件也与印度和美国发生的干旱事件相同步；1976/1977 伴随 PDO 位相的转变，中国东部降水空间分布型态发生了变化，这次年代际变化对应着环太平洋区域的气候年代际异常（Arblaster et al, 2002；Huang et al, 2005）。特别是，已有模拟研究工作发现仅考虑全球 SST 变化就能够解释重建数据所反映的中世纪暖期和小冰期之间全球大部分区域干湿状况的差异（Burgman et al, 2010；Graham et al, 2011a），说明了全球海温变化对降水区域尺度分布和差异的重要性。因此，需要从全球视野研究中国东部与其他区域之间内在的本质联系以及区域差异的机理，从而探讨中国东部异常降水的可能原因。14 世纪 30 年代—15 世纪 20 年代

的雨涝事件发生在太阳辐照度处于正常区且也没有强火山喷发的时期，为分析中国东部持续性雨涝事件与气候系统内部变率的联系提供了可能。

随着全球各区域重建资料越来越丰富，为从全球尺度探讨中国东部过去 1500 年来最为严重的 14 世纪 30 年代—15 世纪 20 年代年中国东部雨涝期与海温及大气环流模态之间的联系提供了可能。因此，首先利用重建和模拟数据分析 14 世纪 30 年代—15 世纪 20 年代中国气候演变情况；在此基础上，从全球尺度出发，利用重建资料分析中国东部雨涝期间全球其他区域相关联的干湿变化现象，并通过对比同时期 ENSO、PDO、AMO 及 NAO 指数，初步判定气候系统内部变率在此次事件中的重要性；最后利用全球海气耦合模式的模拟结果检验模式对该时期全球降水变化的模拟能力，并进一步探讨此次雨涝灾害与气候系统内部的可能联系。

1 资料来源

表 1 列出了文中所用的全球旱涝重建资料。由于该时期重建资料稀少，所以采用多种代用资料重建数据，既包括树轮、冰芯、石笋、历史记录等高分辨率的代用资料，也包括湖泊海洋沉积物等低精度的代用资料。为了减小湖泊、海洋沉积物代用资料的误差，一方面在已有资料中选取具有最高分辨率的重建序列，另一方面适当延长湖泊、海洋沉积物代用资料中相关时期的干湿对应，从而减少由于其大的定年误差所带来的不确定性。其中中国东部干湿重建资料除了来自 Cook et al (2010) 利用树轮资料计算的过去 700 年帕尔默干旱指数（PDSI），还有 Zheng et al (2006) 利用历史记录重建的过去 1500 年 10 年精度的中国东部旱涝指数（DWI）资料。

本文用到以下重建海温和大气涛动指数资料：PDO：MacDonald and Case (2005) 利用北美西南部及加拿大两个地区的树木年轮重建的 AD 993—1996 年的 PDO 序列；AMO：Mann et al (2009) 利用多种代用资料重建的 AMO 序列；还分析了 NAO 指数，来自 Trouet et al (2009) 利用摩洛哥树木年轮及苏格兰石笋重建的 1050 年以来的 NAO 序列。由于 ENSO 重建序列较多，没有选取单一的 ENSO 重建序列来反映该雨涝期赤道东太平洋海温分布，而是对它们进行了综合讨论。

表 1 文中图 2 所引用的全球旱涝气候代用资料
Tab.1 Description of the paleoclimatic archive sites shown in Fig.2

	引用文献 Citation	位置 Location	代用资料类型 Archive type	相关时期 Periods
1	Cook et al, 2010	亚洲季风区 Monsoon Asia	树木年轮 Tree-ring record	1380—1429
2	Hanssan, 2011	尼罗河, 埃及 Nile River, Egypt	尼罗河洪水记录 Historical Nile floods	1350—1470
3	Verschuren et al, 2000	奈瓦沙湖泊, 肯尼亚 Lake Naivasha, Kenya	湖泊沉积物 Sedimentary lake record	1380—1420
4	Johnson et al, 2002	马拉维湖泊, 马拉维共和国 Lake Malawi, Malawi	湖泊沉积物 Sedimentary lake record	1380—1420
5	Holmgren et al, 1999	马卡潘斯盖谷洞, 南非 Makapansgat Valley, South Africa	石笋 Speleothem $\delta^{18}\text{O}$	1380—1420
6	Touchan et al, 2011	非洲西北部 Northwestern Africa	树木年轮 Tree-ring record	14 世纪末期 Late 14th century
7	Benito et al, 2003	塔古斯河谷, 西班牙 Tagus river basin, Spain	历史记录 History document	1380—1429
8	Büntgen et al, 2010	德国中部 Central Germany	树木年轮 Tree-ring record	1400—1430
9	Helama et al, 2009a	芬兰东南部 South-eastern Finland	树木年轮 Tree-ring record	1388—1402
10	Cook et al, 2004	北美 North America	树木年轮 Tree-ring record	1380—1420
11	Curtis et al, 1996	尤卡坦半岛, 墨西哥 Yucatan Peninsula, Mexico	湖泊沉积物 Sedimentary lake record	1368—1429
12	Haug, et al, 2001	卡里亚科盆地, 委内瑞拉 Cariaco basin, Venezuela	海洋沉积物 Sedimentary sea record	1350—1430
13	Moy et al, 2002	厄瓜多尔南部 Southern Ecuador	湖泊沉积物 Sedimentary lake record	1350—1430
14	Thompson et al, 1988	奎尔卡亚冰帽, 秘鲁 Quelccaya ice cap, Peru	冰芯 Ice core	1384—1410
15	Villalba, 1994	智利中部 Central Chile	树木年轮 Tree-ring record	1380—1450

模拟资料来自 CCSM2.0 模式在综合自然外界强迫（太阳活动、火山活动、轨道强迫）和人类活动外界强迫（温室气体）驱动下 1000 年连续积分模拟试验结果（Peng et al, 2009）。本文选取 1000—1999 年 5—9 月平均降水量在中国东部（25°—40°N, 105°—122°E）区域平均作为中国东部过去千年的模拟降水序列。所有模拟数据的距平都相对于 1000—1999 年平均值计算得到。模式对中国东部现代和过去千年降水变化模拟的可靠性已得到验证（彭友兵和徐影, 2009; Peng et al, 2009; Shen et al, 2009）。

2 结果分析

2.1 1330—1430 年中国东部干湿气候演变

本文首先利用中国东部过去 1500 年重建 DWI

资料（Zheng et al, 2006）和模拟数据，对比分析了整个中国东部夏季降水在 1330—1430 年的气候演变特征。DWI 重建数据（图 1）显示：在这 100 年间，雨涝气候发生时期集中在后 50 年，且在 1400 年左右中国东部夏季降水曾经一度接近正常，之后又迅速转为雨涝，而前 50 年间中国东部干湿状况交替出现，1350 年以前气候接近正常状态，在 1350—1379 年为短期干旱时期，在此期间发生了持续性严重干旱事件（1354—1359 年）（Zheng et al, 2006）。中国东部夏季降水的演变与同时期夏季风的演变同步，甘肃万象石笋记录显示亚洲季风在 1340—1360 年存在突变，使得 1350—1380 年中国东部夏季风异常弱，之后季风除在 1400 年之外均偏强（Zhang et al, 2008）。在太阳活动、

火山活动强迫因子驱动下 CCSM2.0 模式能够再现 1330—1380 年中国东部干湿气候变化, 如能模拟出 1350—1379 年偏干的气候状态, 然而对于 1380—1429 年雨涝气候的模拟能力较差 (图 1)。对于 1350—1379 年的干旱气候状态在 Peng et al (2014) 有讨论, 本文主要关注 1380—1429 年雨涝气候。利用 CCSM2.0 模式模拟过去千年气候变化, 以往的研究表明无论是外强迫 (太阳活动和火山活动) 还是气候系统内部变率 (ENSO、PDO 和 NAO) 均可以显著影响过去千年中国东部降水变化。太阳活动处于极小期和强的火山活动会导

致中国东部降水减少, 甚至出现干旱事件 (Peng et al, 2010, 2014)。ENSO、PDO 以及 NAO 正位相会导致中国华北降水显著减少, 反之则降水增加 (Peng et al, 2015, 2018; Peng, 2018)。但由于 1380—1429 年的雨涝事件发生时太阳辐照度处于正常区 (葛全胜等, 2016) 且该时期也没有强的火山喷发 (Peng et al, 2010), 说明可能存在除了该时期太阳活动和火山活动之外的其他因子, 如气候系统内部变率, 因而造成了此时期中国东部的异常湿润气候, 而 CCSM2.0 模式没能正确地反映。

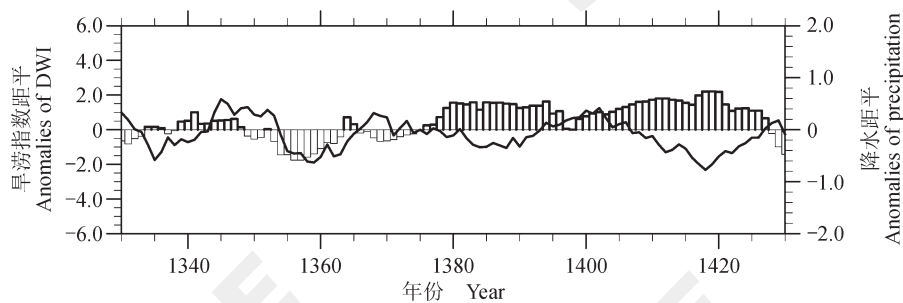


图 1 1330—1439 年中国东部区域重建旱涝等级距平序列 (柱状线) 与模拟夏季 5—9 月降水量距平标准化序列 (实线) 11 年滑动平均曲线

Fig. 1 11-year running mean curve of the standardized anomaly serial of simulated summer (May—September) precipitation (solid line) and the serial of drought and flood index (bars) over eastern China

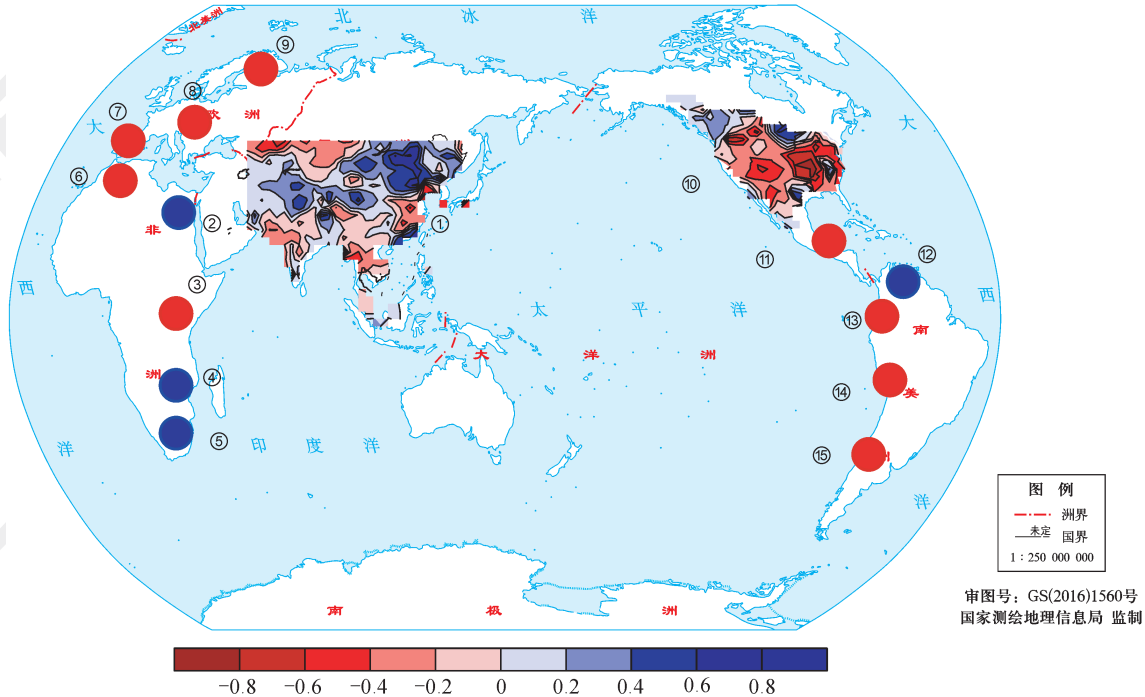
2.2 重建数据反映的中国东部 1380—1429 年雨涝期与气候系统内部变率间的可能联系

如前所述, 气候系统内部变率中显著的海温变化及环流模态调整往往会影响周边区域甚至是全球大部分区域的降水, 因此为了分析该时期中国东部降水异常变化是否与气候系统内部变率有关, 首先利用重建数据分析了该时期全球干湿分布, 来验证中国东部的降水异常是否与全球另一些区域的降水异常事件具有同步性。图 2 显示中国东部 1380—1429 年的严重雨涝气候并不是一个局部现象。靠近赤道的东非区域高精度湖泊沉积物表明 1380—1429 年肯尼亚发生了严重的干旱事件, 尽管湖泊沉积物具有大的定年误差, 但该事件得到了湖泊周边区域精度较高的历史记录印证 (Verschuren et al, 2000)。与此同时, 非洲东北部、东南部和南部发生严重的雨涝事件 (Johnson et al, 2002; Hassan, 2007), 导致非洲东南部马拉维湖泊的水位达到过去 1700 年来最高 (Johnson et al, 2002), 开罗地区尼罗河洪水记录也达到仅

次于 19 世纪的历史高值 (Hassan, 2007)。同一时期欧洲西南部区域 (Benito et al, 2003; Büntgen et al, 2010)、非州西北部均处于干旱状态, 其中芬兰、非洲西北部在 14 世纪末期均发生严重干旱事件 (Helama and Lindholm, 2003; Touchan et al, 2011)。在北美, 树轮记录显示其处于显著干旱时期, 其中 1379—1388 年是 14 世纪北美中部最为干旱的十年 (Cook et al, 2004; Cook et al, 2007)。湖泊沉积物显示墨西哥尤卡坦半岛在 1368—1429 年经历严重干旱事件 (Curtis et al, 1996)。南美干湿分布情况显示其北部委内瑞拉湿润 (Haug et al, 2001), 而西部大部分区域干旱 (Thompson et al, 1988; Villalba, 1994; Moy et al, 2002), 其中湖泊沉积物显示厄瓜多尔南部降水异常偏少 (Moy et al, 2002), 冰芯数据显示秘鲁南部高原在 1384—1410 年发生严重干旱事件 (Thompson et al, 1988), 树木年轮数据显示智利中部处于干旱时期 (Villalba, 1994)。同受亚洲季风影响的印度大陆、东南亚地区其气候状态与

同时期中国东部相反，为干旱气候，特别是来自印度中部的石笋记录 (Sinha et al, 2007) 和越南南部的树轮记录 (Buckley et al, 2010) 均显示两地

自 1400 年后有严重干旱事件发生。由此可见，在 1380—1429 年中国东部严重雨涝时期全球大多数区域都发生了严重的旱涝事件。



本图基于自然资源部标准地图服务网 (<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/>) 下载的审图号为GS(2016)1560号的标准地图制作，底图无修改。

图中数字对应表 1 所列代用资料，红色圆点表示干旱，蓝色圆点表示湿润。

Map showing the sites of paleo-climatic archives mentioned in the text. Circles represent locations of proxy records giving evidence of wet (blue) or dry (red) conditions. Refer to Table 1 for a description of the numbered archives.

图 2 1380—1429 年中国东部雨涝时期全球干湿分布

Fig.2 The global context of the eastern China pluvial during 1380—1429 AD

值得注意的是，非洲东北部、东南部和南部涝，而赤道东部干旱的干湿空间分布状态是典型的受 La Niña 影响下的分布格局 (Allan et al, 1996)。Tyson et al (2002) 将过去千年非洲南部和东部反位相的干湿变化与 ENSO 联系起来，认为赤道东部干旱而南部湿润是 La Niña 影响下的分布状态。然而也应指出印度洋西部海温变化对非洲赤道东部降水有重要影响，印度洋西部海温偏冷将导致非洲赤道东部干旱 (Tyson et al, 2002)。在探讨 1350—1470 年尼罗河洪水泛滥的原因时，一些研究工作也强调除 ENSO 外的西印度洋、北大西洋中高纬度海温和相关大气环流模态通过加强中纬度地区西风带和促使热带辐合带 (ITCZ) 北移对此次事件的重要影响 (Hassan, 2011)。同时期从非洲西北部起至欧洲东北部沿西南—东北方向干旱带分

布的情况符合 NAO 正位相使得欧洲风暴轴北移，地中海西部地区 (包括非洲西北部、欧洲西南部、中部) 降水减少的情况 (Trouet et al, 2009)。然而，也有研究指出该地区持续性干旱事件可能受热带太平洋持续性 La Niña 状态、北太平洋 PDO 冷位相、印度洋西部海温偏冷及北大西洋 AMO 暖位相影响 (Touchan et al, 2011)。近年来，观测数据、重建数据和模拟结果均指出北美干旱事件与热带太平洋海温变化存在显著联系，研究表明当热带太平洋海温维持为准 La Niña 状态时美国将发生持续性的干旱事件 (Seager et al, 2005; Seager et al, 2008)，同时也有研究指出不可忽略 AMO 和 NAO 正位相对北美和墨西哥干旱事件的重要性 (Seager et al, 2007)。因此，该时期北美和墨西哥持续性干旱可能与热带太平洋海温呈现 La Niña

状态及AMO和NAO持续正位相有关。南美北部是降水受ENSO显著影响的区域(Aceituno et al, 2009), 当热带太平洋区域为准La Niña状态时, 该区域异常湿润, 相反秘鲁北部和厄瓜多尔南部则异常干旱。假设ENSO与南美降水空间区域分布的关系是稳定的, 那么根据南美北部重建数据反映的情况, 该时期南美干湿分布显然与热带太平洋La Niña状态有关。然而, 按照现代气候研究所揭示的秘鲁南部高原地区与ENSO间的联系(Aceituno et al, 2009), 冰芯所反映的秘鲁南部干旱可能与El Niño状态有关。因此, 该时期南美降水异常与La Niña状态还是El Niño状态有关, 不能获得确切的定论, 这与后面将要讨论的该时期热带太平洋海温状态存在的争议是一致的。根据已有的研究结果, 印度洋IOD负位相会导致东亚偏湿而印度大陆干旱(Saji et al, 1999; Meyers et al, 2007; Ummenhofer et al, 2009), 因此1380—1429年印度大陆、东南亚地区的气候状态与同时期中国东部相反, 可能是受到IOD负位相影响。

对比各区域海温和大气涛动指数重建数据(图3), 可以发现1380—1429年全球干湿状态异常与气候系统内部变率状态相对应。在此期间, PDO为冷位相, AMO为暖位相, NAO为正位相。然而对于该时期热带太平洋海温状态究竟是暖还是冷, 目前仍有争议。来自厄瓜多尔南部(Moy et al, 2002)和加拉帕戈斯群岛破火山湖(Conroy et al, 2008)的记录显示在1380—1420年El Niño发生频率急剧减少, 表明热带太平洋东部冷的温度分布, 与太平洋中部帕迈拉环礁珊瑚氧同位素所揭示的1320—1462年海温持续偏冷相一致(Cobb et al, 2003)。然而, 另一些研究则认为该时期属于El Niño高发期。比如秘鲁西部海岸岩屑物质指示El Niño在这一时期有较弱的增加(Rein et al, 2004)。由于IOD指数的重建序列不够长, 致使前面关于印度大陆、东南亚与中国东部干湿变化相反与IOD相关的讨论无法得到有效验证。

综上所述, 重建数据所反映的该时期全球干湿异常可能与热带太平洋La Niña状态(南美秘鲁高原地区除外)、北太平洋PDO冷位相、北大西洋AMO暖位相、印度洋IOD负位相及NAO正位相相关。意味着此时期发生在中国东部的雨涝或许是大尺度大气环流调整影响下的部分响应, 而并非只是受局地的、小范围变化的影响。已有的研究表明, 东热带太平洋类La Niña状态可以通过对流动

力作用影响北大西洋地区, 使得NAO呈现正位相(Graham et al, 2011b)。印度洋IOD与ENSO有共生关系, 东热带太平洋类La Niña状态与印度洋IOD负位相可以联合发生(Sinha et al, 2011)。而北太平洋PDO冷位相是热带太平洋类La Niña状态年代际时间尺度上的背景态。因此该时期全球干湿异常可能是热带太平洋类La Niña状态驱动大气环流调整下的结果, 而中国东部雨涝气候只是其部分响应。在过去千年, ENSO与NAO、IOD、PDO间的联系是否都遵循上述物理机制, 全球气候干湿异常分布是否都遵从上述大气环流调整下的响应, 还是1380—1429年中国东部雨涝气候以及该时期的全球干湿异常与气候系统内部变率之间的联系只是过去千年气候变化的一次偶然, 有待开展更多的研究工作去佐证。根据重建资料所反映的结果, 认为CCSM2.0模式不能够很好地模拟1380—1429年中国东部异常偏湿气候的原因或许源于模式对该时期大气涛动模拟能力不足, 不能够完整再现该时期全球大气环流模态的分布。

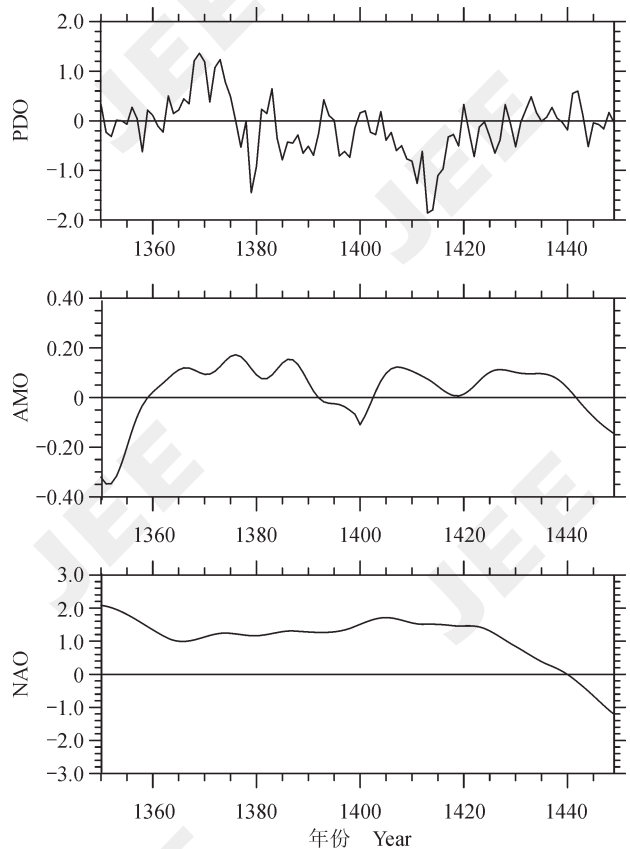


图3 1350—1450年重建的海温和大气涛动指数演变
Fig.3 Sea surface temperature reconstructions and reconstructions of large-scale oscillations during AD 1350—1450

2.3 模拟数据反映的中国东部 1380—1429 年雨涝期与气候系统内部变率的可能联系

图 4a、b 分别为模式模拟的 1380—1429 年全球陆面降水和全球海温分布图。模式没有模拟出中国东部、北美和南美真实的气候状态（图 4a），而这些区域也正是模拟的过去千年降水变化显著受 ENSO 及 PDO 影响的区域，相关分析表明 ENSO 及 PDO 正位相将导致中国华北、南美北部降水减少、北美及南美南部降水则增加（Peng et al, 2015, 2018）。因此，模式不能再现此时期中国东部、北美和南美真实的气候状态（图 4a），或许正是源于模式没有模拟出该时期一些重建资料所反映的热带太平洋 La Niña 海温分布以及 PDO 冷位相和 AMO 暖位相（图 4b），模拟结果间接支持了该时期热带太平洋为 La Niña 海温分布的重建结论。模式能够反映出该时期非洲南部、赤道东部、北部呈现湿—干—湿的空间分布状态，非洲西北部和欧洲西南部及墨西哥的干旱气候状态（图 4a），也能再现 IOD 负位相及 NAO 正位相模态对应的海温分布（图 4b）。模拟结果结合重建结果说明对于中国东部、北美和南美降水而言，热带太平洋 La Niña 海温分布以及 PDO 冷位相和 AMO 暖位相或许是决定这些区域 1380—1429 年降水特征的更为重要的因子，而对于非洲和欧洲降水而言，或许北大西洋类 NAO 正位相海温分布和印度洋弱的 IOD 负位相则更为重要，但太平洋 La Niña 事件、PDO 冷位相和 AMO 暖位相或许会对这些区域降水异常有放大作用，这或许也是模式虽然能够正确模拟出非洲和欧洲区域分布特征但却低估了其降水异常程度的原因。该结果与前人的研究结果保持一致。马柱国和符淙斌（2007）在研究 20 世纪下半叶全球干湿变化与大尺度背景的联系时，就曾指出与 ENSO 紧密相连的 SO 和全球干湿变化的关系最为紧密；PDO 与北美大陆和非洲大陆的关系最为密切；与 NAO 相关最显著的地区仅是欧亚大陆。Seager et al（2007）和 Graham et al（2011a）研究发现仅考虑热带太平洋持续性冷事件，模式可以再现 PDO 冷位相和 AMO 暖位相状态，且模式可以很好地反映南、北美洲中纬度地区干旱气候和赤道地区湿润气候，但无法完全解释中世纪暖期全球干湿变化，如赤道非洲东部、东南亚部分区域的干旱，中亚、南亚和东亚降水的增加，以及与 NAO 正位相相关的地中海西部干

旱 - 欧洲西北部湿润的气候状态分布。而在考虑了印度洋海温变化后（Graham et al, 2011a），可以再现中世纪暖期 NAO 正位相及相关的欧洲和北非的干湿分布以及印度大陆、东南亚和中国部分区域的降水增加状态。

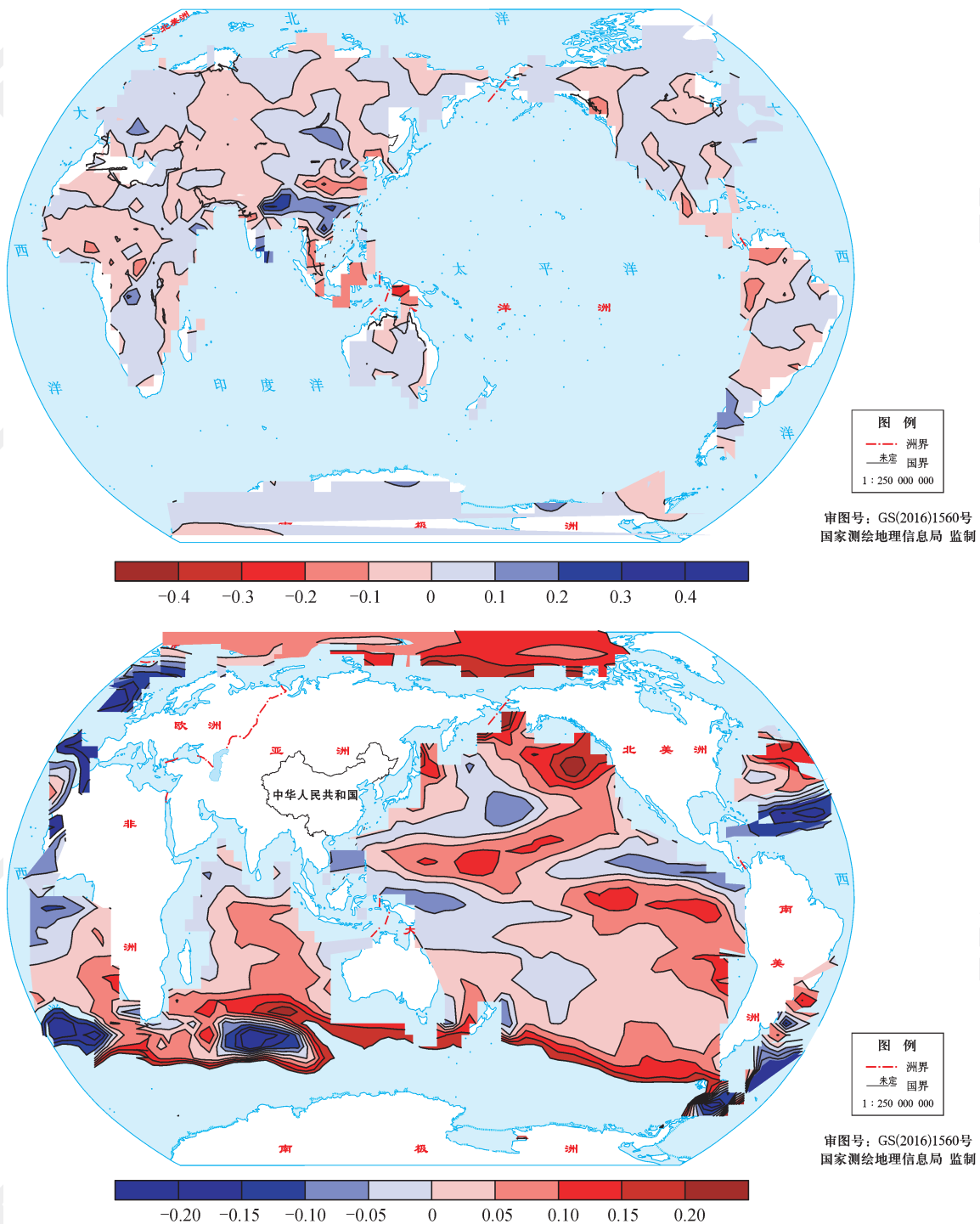
需要指出的是，CCSM2.0 模式对 1380—1429 年 ENSO 及 PDO 位相模拟能力不足并非偶然。Peng et al（2015, 2018）将过去千年（850—1850 AD）ENSO 与 PDO 模拟序列与重建序列进行了对比，发现 CCSM2.0 模式对百年尺度上 ENSO 及 PDO 位相变化也无法正确反映，如无法再现一些重建序列所揭示的中世纪暖期 ENSO、PDO 为冷位相而小冰期为暖位相的特征。有研究强调了太阳活动和火山活动通过海气动力反馈过程从而激发中世纪暖期 ENSO、PDO 为冷位相而小冰期为暖位相的重要作用（Cane, 2005; Misios and Schmidt, 2012）。但 CCSM2.0 模式对这一动力反馈过程刻画强度较弱，模拟的过去千年 ENSO 变化在百年尺度上虽也受太阳活动和火山活动的影响，但 ENSO 位相变化特征与重建结果相反，即中世纪暖期较高的太阳辐照度导致 ENSO 为暖位相，而小冰期较低太阳辐照度导致 ENSO 为冷位相（Peng et al, 2015, 2018）。其他全球海气耦合模式如 CCSM4 和 MPI-ESM-P 也表现出类似 CCSM2.0 对过去千年 ENSO 与 PDO 位相变化的模拟特征，即在太阳活动和火山活动影响下 ENSO 呈现在中世纪暖期为冷位相而在小冰期为暖位相的变化特征（Xu et al, 2018）。在更短的时间尺度上，Le（2017）则指出过去千年太阳活动与 ENSO 间的联系并不紧密，ENSO 变化主要是缘于 ENSO 系统自身的动力过程或者火山活动的影响。因此，CCSM2.0 模式对 1380—1429 年 ENSO 及 PDO 位相模拟能力不足，究竟是因为模式对外强迫影响下的 ENSO 变化模拟不足还是对 ENSO 系统自身动力过程模拟不足，还有待未来利用 CCSM2.0 模式以及其他更多模式的结果进一步分析。

3 结论

本文利用重建资料和模拟数据，探讨了中国东部 1380—1429 年雨涝期与气候系统内部变率之间的联系。结果显示：同时期全球大多数区域发生了严重的旱涝事件，包括非洲东北部—东部—南部的涝—旱—涝的分布，地中海西部、北美及墨西哥的干旱，南美北涝西旱的分布，南亚、东

南亚的干旱。重建数据显示同时期全球海温和大气环流模态包括热带太平洋 La Niña 状态、北太平洋 PDO 冷位相、北大西洋 AMO 暖位相及 NAO 正位相与该时期全球干湿状况相关，说明该时期

全球范围的旱涝异常事件或许与气候系统内部变率有关，意味着此时期中国东部雨涝气候可能是大尺度大气环流调整影响下的部分响应，而并非只是受局地的、小范围变化的影响。



本图基于自然资源部标准地图服务网 (<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/>) 下载的审图号为GS(2016)1560号的标准地图制作，底图无修改。

图 4 模式模拟的 1380—1429 年陆面降水距平 (a) 和全球海温距平 (b) 分布
 Fig.4 Global land distribution of precipitation anomalies (a) and sea surface temperature anomalies (b) in simulation during AD 1380—1429

由于模式能够正确模拟出该时期北大西洋 NAO 正位相,且在印度洋为弱的 IOD 负位相,与 NAO 相关最显著的欧洲和非洲西北部的降水分布呈现典型的 NAO 正位相影响下的状态,即欧洲东北部湿润而地中海西部干旱,受印度洋海温影响显著的非洲赤道东部地区的降水受弱 IOD 负位相影响呈干旱气候状态。但由于重建数据所反映的赤道太平洋 La Niña 状态,北太平洋冷位相和北大西洋 AMO 暖位相,模式没有模拟出来,因此模拟结果也显示与它们相关最显著的美洲降水分布与重建数据相反,对中国东部降水的模拟也较差。模拟结果验证了该时期全球范围的旱涝异常事件与气候系统内部变率的可能联系,进一步指出气候系统内部变率特别是赤道太平洋 La Niña 状态和 PDO 冷位相可能与 1380—1429 年中国东部雨涝发生密切相关。1380—1429 年中国东部雨涝发生及全球干湿分布可能与气候系统内部变率密切相关,表明未来提升全球海气耦合模式对气候系统内部变率的模拟能力,将有助于提升其对全球和区域降水的模拟能力。

参考文献

- 葛全胜,刘路路,郑景云,等. 2016. 过去千年太阳活动异常期的中国东部旱涝格局 [J]. *地理学报*, 71(5): 707–717. [Ge Q S, Liu L L, Zheng J Y, et al. 2016. Spatial patterns of drought/flood over eastern China in the periods of anomalous solar activity during the past millennium [J]. *Acta Geographica Sinica*, 71(5): 707–717.]
- 李双林,王彦明,郜永祺. 2009. 北大西洋年代际振荡 (AMO) 气候影响的研究评述 [J]. *大气科学学报*, 32(3): 458–465. [Li S L, Wang Y M, Gao Y Q. 2009. A review of the researches on the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) and its climate influence [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 32(3): 458–465.]
- 刘禹,安芷生,马海州,等. 2006. 青海都兰地区公元 850 年以来树轮记录的降水变化及其与北半球气温的联系 [J]. *中国科学 (D 辑: 地球科学)*, 36(5): 461–471. [Liu Y, An Z S, Ma H Z, et al. 2006. Precipitation variation in the northeastern Tibetan Plateau recorded by the tree rings since 850 AD and its relevance to the Northern Hemisphere temperature [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 49(4): 408–420.]
- 马柱国,符滨斌. 2007. 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 [J]. *中国科学 (D 辑: 地球科学)*, 37(2): 222–233. [Ma Z G, Fu C B. 2007. Global aridification in the second half of the 20th century and its relationship to large-scale climate background [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 37(2): 222–233.]
- 彭友兵,徐影. 2009. 过去 530 年中国东部旱涝事件模拟研究初探 [J]. *第四纪研究*, 29(6): 1095–1103. [Peng Y B, Xu Y. 2009. A modeling study on drought and flood events of the last 530 years in east China [J]. *Quaternary Sciences*, 29(6): 1095–1103.]
- 王永波,施能. 2001. 夏季北大西洋涛动与我国天气气候的关系 [J]. *气象科学*, 21(3): 271–278. [Wang Y B, Shi N. 2001. The North Atlantic Oscillation in relation to summer weather-climate anomaly in China and east Asian summer monsoon [J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 21(3): 271–278.]
- 肖莺,张祖强,何金海. 2009. 印度洋偶极子研究进展综述 [J]. *热带气象学报*, 25(5): 621–627. [Xiao Y, Zhang Z Q, He J H. 2009. Progresses in the studies on Indian Ocean Dipoles [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 25(5): 621–627.]
- 张德二. 2004. 中国历史气候记录揭示的千年干湿变化和重大干旱事件 [J]. *科技导报*, (8): 47–49. [Zhang D E. 2004. Variation of dry-wet climate and severe drought events as revealed in the climate records of China over the past 1000 years [J]. *Science and Technology Review*, (8): 47–49.]
- 中央气象局气象科学研究所. 1981. 中国近五百年旱涝分布图集 [M]. 北京: 地图出版社. [Chinese Academy of Meteorological Sciences. 1981. Yearly charts of dryness/wetness in China for the last 500-year period [M]. Beijing: SinoMaps Press.]
- Aceituno P, Prieto M R, Solari M E, et al. 2009. The 1877–1878 El Niño episode: associated impacts in South America [J]. *Climatic Change*, 92(3/4): 389–416.
- Allan R, Lindsay J, Parker D. 1996. El Niño Southern Oscillation and climate variability [M]. Australia: CSIRO Publishing.
- Arblaster J M, Meehl G A, Moore A M. 2002. Interdecadal modulation of Australian rainfall [J]. *Climate Dynamics*, 18(6): 519–531.
- Benito G, Diez-Herrero A, Fernández de Villalta M. 2003. Magnitude and frequency of flooding in the Tagus Basin (Central Spain) over the last millennium [J]. *Climatic Change*, 58(1/2): 171–192.
- Buckley B M, Anchukaitis K J, Penny D, et al. 2010. Climate as a contributing factor in the demise of Angkor, Cambodia [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(15): 6748–6752.
- Büntgen U, Trouet V, Frank D, et al. 2010. Tree-ring indicators

- of German summer drought over the last millennium [J]. *Quaternary Science Reviews*, 29(7/8): 1005–1016.
- Burgman R, Seager R, Clement A, et al. 2010. Role of tropical Pacific SSTs in global medieval hydroclimate: a modeling study [J]. *Geophysical Research Letters*, 37: L06705. DOI: 10.1029/2009GL042239.
- Cane M A. 2005. The evolution of El Niño, past and future [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 230(3/4): 227–240.
- Chen J H, Chen F H, Feng S, et al. 2015. Hydroclimatic changes in China and surroundings during the Medieval Climate Anomaly and Little Ice Age: spatial patterns and possible mechanisms [J]. *Quaternary Science Reviews*, 107: 98–111.
- Cobb K M, Charles C D, Cheng H, et al. 2003. El Niño/Southern Oscillation and tropical Pacific climate during the last millennium [J]. *Nature*, 424(6946): 271–276.
- Conroy J L, Overpeck J T, Cole J E, et al. 2008. Holocene changes in eastern tropical Pacific climate inferred from a Galápagos Lake sediment record [J]. *Quaternary Science Reviews*, 27(11/12): 1166–1180.
- Cook E R, Anchukaitis K J, Buckley B M, et al. 2010. Asian monsoon failure and megadrought during the last millennium [J]. *Science*, 328(5977): 486–489.
- Cook E R, Seager R, Cane M A, et al. 2007. North American drought: reconstructions, causes, and consequences [J]. *Earth-Science Reviews*, 81(1/2): 93–134.
- Cook E R, Woodhouse C A, Eakin C M, et al. 2004. Long term aridity changes in the western United States [J]. *Science*, 306(5698): 1015–1018.
- Curtis J H, Hodell D A, Brenner M. 1996. Climate variability on the Yucatan Peninsula (Mexico) during the past 3500 years, and implications for Maya Cultural Evolution [J]. *Quaternary Research*, 46(1): 37–47.
- Graham N E, Ammann C M, Fleitmann D, et al. 2011a. Support for global climate reorganization during the “Medieval Climate Anomaly” [J]. *Climate Dynamics*, 37(5/6): 1217–1245.
- Graham N E, Ammann C M, Fleitmann D, et al. 2011b. Evidence for global climate reorganization during medieval times [J]. *Past Global Changes*, 19(1): 9–10.
- Hassan F A. 2007. Extreme Nile floods and famines in Medieval Egypt (AD 930—1500) and their climatic implications [J]. *Quaternary International*, 173/174: 101–112.
- Hassan F A. 2011. Nile flood discharge during the medieval climate anomaly [J]. *Past Global Changes*, 19(1): 30–31.
- Haug G H, Hughen K A, Sigman D M, et al. 2001. Southward migration of the Intertropical Convergence Zone through the Holocene [J]. *Science*, 293(5533): 1304–1308.
- Helama S, Lindholm M. 2003. Droughts and rainfall in south-eastern Finland since AD 874, inferred from Scots pine ring-widths [J]. *Boreal Environment Research*, 8(2): 171–183.
- Holmgren K, Karlén W, Lauritzen S E, et al. 1999. A 3000-year high-resolution stalagmite-based record of palaeoclimate for northeastern South Africa [J]. *The Holocene*, 9(3): 295–309.
- Huang H P, Seager R, Kushnir Y. 2005. The 1976/77 transition in precipitation over the Americas and the influence of tropical sea surface temperature [J]. *Climate Dynamics*, 24(7/8): 721–740.
- Johnson T C, Brown E T, McManus J, et al. 2002. A high-resolution paleoclimate record spanning the past 25,000 years in southern East Africa [J]. *Science*, 296(5565): 113–132.
- Kiladis G N, Diaz H F. 1989. Global climatic anomalies associated with extremes in the Southern Oscillation [J]. *Journal of Climate*, 2(9): 1069–1090.
- Knight J R, Folland C K, Scaife A A. 2006. Climate impacts of the Atlantic Multidecadal Oscillation [J]. *Geophysical Research Letters*, 33: L17706. DOI: 10.1029/2006GL026242.
- Le T. 2017. ENSO response to external forcing in CMIP5 simulations of the last millennium [J]. *Global and Planetary Change*, 148: 105–112.
- MacDonald G M, Case R A. 2005. Variations in the Pacific Decadal Oscillation over the past millennium [J]. *Geophysical Research Letters*, 32: L08703. DOI: 10.1029/2005GL022478.
- Mann M E, Zhang Z H, Rutherford S, et al. 2009. Global signatures and dynamical origins of the little ice age and medieval climate anomaly [J]. *Science*, 326(5957): 1256–1260.
- Meyers G, McIntosh P, Pigot L, et al. 2007. The years of El Niño, La Niña, and interactions with the tropical Indian Ocean [J]. *Journal of Climate*, 20(13): 2872–2880.
- Misios S, Schmidt H. 2012. Mechanisms involved in the amplification of the 11-yr solar cycle signal in the tropical Pacific Ocean [J]. *Journal of Climate*, 25(14): 5102–5118.
- Moy C M, Seltzer G O, Rodbell D T, et al. 2002. Variability of El Niño/Southern Oscillation activity at millennial timescales during the Holocene epoch [J]. *Nature*, 420(6912): 162–165.
- Peng Y B, Cheng H, Shen C M, et al. 2018. Past millennium contrasting hydroclimate patterns between monsoonal northern China and arid central Asia: a modeling study [J]. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 54(3): 445–455.
- Peng Y B, Shen C M, Cheng H, et al. 2014. Modeling of severe persistent droughts over eastern China during the last millennium [J]. *Climate of the Past*, 10(3): 1079–1091.
- Peng Y B, Shen C M, Cheng H, et al. 2015. Simulation of the

- Interdecadal Pacific Oscillation and its impacts on the climate over eastern China during the last millennium [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(15): 7573–7585.
- Peng Y B, Shen C M, Wang W C, et al. 2010. Response of rainy season precipitation over eastern China to large volcanic eruptions [J]. *Journal of Climate*, 23(3): 818–824.
- Peng Y B, Xu Y, Jin L Y. 2009. Climate changes over eastern China during last millennium in simulations and reconstructions [J]. *Quaternary International*, 208(1/2): 11–18.
- Peng Y B. 2018. Simulated interannual teleconnection between the summer North Atlantic Oscillation and summer precipitation in eastern China during the last millennium [J]. *Geophysical Research Letters*, 45(15): 7741–7747.
- Qian C, Zhou T J. 2014. Multidecadal variability of north China aridity and its relationship to PDO during 1900–2010 [J]. *Journal of Climate*, 27(3): 1210–1222.
- Rein B, Lückge A, Sirocko F. 2004. A major Holocene ENSO anomaly during the medieval period [J]. *Geophysical Research Letters*, 31: L17211. DOI: 10.1029/2004GL020161.
- Saji N H, Goswami B N, Vinayachandran P N, et al. 1999. A dipole mode in the tropical Indian Ocean [J]. *Nature*, 401(6751): 360–363.
- Seager R, Burgman R, Kushnir Y, et al. 2008. Tropical Pacific forcing of North American medieval megadroughts: testing the concept with an atmosphere model forced by coral-reconstructed SSTs [J]. *Journal of Climate*, 21(23): 6175–6190.
- Seager R, Graham N, Herweijer C, et al. 2007. Blueprints for medieval hydroclimate [J]. *Quaternary Science Reviews*, 26(19/20/21): 2322–2336.
- Seager R, Kushnir Y, Herweijer C, et al. 2005. Modeling of tropical forcing of persistent droughts and pluvials over western North America: 1856–2000 [J]. *Journal of Climate*, 18(19): 4065–4088.
- Shen C M, Wang W C, Hao Z X, et al. 2007. Exceptional drought events over eastern China during the last five centuries [J]. *Climatic Change*, 85(3/4): 453–471.
- Shen C M, Wang W C, Peng Y B, et al. 2009. Variability of summer precipitation over eastern China during the last millennium [J]. *Climate of the Past*, 5(2): 129–141.
- Sinha A, Cannariato K G, Stott L D, et al. 2007. 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*, 34: L16707. DOI:10.1029/2007GL030431.
- Sinha A, Stott L, Berkelhammer M, et al. 2011. A global context for megadroughts in monsoon Asia during the past millennium [J]. *Quaternary Science Reviews*, 30(1/2): 47–62.
- Tan L C, Cai Y J, Cheng H, et al. 2009. Summer monsoon precipitation variations in central China over the past 750 years derived from a high-resolution absolute-dated stalagmite [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 280(3/4): 432–439.
- Thompson L G, Davis M E, Mosley-Thompson E, et al. 1988. Pre-Incan agricultural activity recorded in dust layers in two tropical ice cores [J]. *Nature*, 336(6201): 763–765.
- Touchan R, Anchukaitis K J, Meko D M, et al. 2011. Spatiotemporal drought variability in northwestern Africa over the last nine centuries [J]. *Climate Dynamics*, 37(1/2): 237–252.
- Trouet V, Esper J, Graham N E, et al. 2009. Persistent positive North Atlantic Oscillation dominated the Medieval Climate Anomaly [J]. *Science*, 324(5923): 78–80.
- Tyson P D, Lee-Thorp J, Holmgren K, et al. 2002. Changing gradients of climate change in Southern Africa during the past millennium: implications for population movements [J]. *Climatic Change*, 52(1/2): 129–135.
- Ummenhofer C C, England M H, McIntosh P C, et al. 2009. What causes southeast Australia's worst droughts? [J]. *Geophysical Research Letters*, 36: L04706. DOI: 10.1029/2008GL036801.
- Verschuren D, Laird K R, Cumming B F. 2000. Rainfall and drought in equatorial East Africa during the past 1100 years [J]. *Nature*, 403(6768): 410–414.
- Villalba R. 1994. Tree-ring and glacial evidence for the medieval warm epoch and the little ice age in southern South America [J]. *Climatic Change*, 26(2/3): 183–197.
- Xu T T, Shi Z G, An Z S. 2018. Responses of ENSO and NAO to the external radiative forcing during the last millennium: results from CCSM4 and MPI-ESM-P simulations [J]. *Quaternary International*, 487: 99–111.
- Zhang D E. 1988. The method for reconstruction of the dryness/wetness series in China for the last 500 years and its reliability [M]// Zhang J C. The reconstruction of climate in China for historical times. Beijing: Science Press: 18–31.
- 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 [J]. *Science*, 322(5903): 940–942.
- Zheng J Y, Wang W C, Ge Q S, et al. 2006. Precipitation variability and extreme events in eastern China during the past 1500 years [J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 17(3): 579–592.