过去 2000 年全球典型暖期的形成机制及其影响

葛全胜^①, 华中^{①②}, 郑景云^{①*}, 方修琦^{③①}, 萧凌波^①, 刘健^④, 杨保^⑤

① 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101;

② 中国科学院大学, 北京 100049;

③ 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875;

④ 南京师范大学地理科学学院教育部虚拟地理环境重点实验室, 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023;

⑤ 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000

* 联系人, E-mail: zhengjy@igsrr.ac.cn

2014-12-02 收稿, 2015-03-25 接受, 2015-05-27 网络版发表

全球变化研究国家重大科学研究计划(2010CB950100)、中国科学院战略性先导科技专项(XDA05080100)和科技基础性工作专项(2011FY120300)资助

摘要 通过对中国不同地区气候序列重建与暖期气候特征、气候驱动因子变化分析与典型暖期成因机制模拟诊断、暖期气候对中国社会经济的影响与人类适应、北半球温度变化及典型暖期协同特征等问题的研究, 发现: (1) 20 世纪气候增暖在过去 2000 年中并非空前, 但 20 世纪气候增暖在北半球几乎同步, 而中世纪增暖在空间上则存在幅度和位相差异; 这主要是因为 20 世纪全球增暖主要受温室气体增加驱动的“大气稳定机制”、而中世纪增暖主要受太阳短波辐射变化驱动的“海洋恒温机制”所致. (2) 与 2008 年初中国南方“雨雪冰冻”相似的极端寒冷事件可能对温度年代际变化有早期预警意义, 当前的“增暖停滞”可能是自然变率导致的气候由暖转冷的一个早期信号. (3) 中国历史上的社会经济波动与气候变化之间存在“冷抑暖扬”的对应特征; 但与暖期相伴的社会经济发展与人口膨胀也增加了对资源与环境的压力, 使得在出现温度下降、降水减少等重大气候转折时, 容易导致人地关系失衡、甚至触发社会危机. 这些结果增进了对年代至百年尺度气候变化特征与机制的理解, 也对我国适应未来气候变化具有参考价值.

关键词

过去 2000 年
典型暖期
气候变化机制
驱动机制
影响与适应

在全球变化研究领域, 过去 2000 年气候变化及其影响研究是一个独特的重要方向. 在这一时段内, 人类活动对气候系统的影响逐渐加剧, 同时社会自身发展也受到气候变化的强烈影响^[1]. 研究过去 2000 年的气候变化, 特别是暖期的气候特征及影响, 不仅对揭示年代-百年尺度的地球系统动力学机制至关重要, 而且对深入理解人类与气候变化的相互作用机制也有独特意义. 因此, 中国“全球变化研究国家重大科学研究计划”在 2010 年启动了“过去 2000 年全球典型暖期的形成机制及其影响研究”项目. 5 年来, 项目组开展了中国不同地区气候序列重建与暖期气候特征、气候驱动因子变化分析与典型暖期成因

机制模拟诊断、暖期气候对中国社会经济的影响与人类适应、北半球温度变化及典型暖期协同特征等问题的研究, 取得一批新成果. 本文拟根据这些新成果, 阐述项目在若干热点问题上所得到的新认识, 以期对深入理解和应对全球气候变化提供参考.

1 20 世纪增暖的千年历史地位

国际学术界关于 20 世纪气候增暖的千年历史地位之争由来已久, 因著名的“曲棍球杆曲线”^[2]而愈演愈烈. 根据该曲线, 在过去 1000 年中的前 900 年, 全球温度缓慢下降, 而后的 20 世纪快速上升, 20 世纪是过去 1000 年、甚至 2000 年的最暖世纪. 该曲线一发表,

引用格式: 葛全胜, 华中, 郑景云, 等. 过去 2000 年全球典型暖期的形成机制及其影响. 科学通报, 2015, 60: 1727–1734

Ge Q S, Hua Z, Zheng J Y, et al. Forcing and impacts of warm periods in the past 2000 years (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 1727–1734, doi: 10.1360/N972014-01298

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N972014-01298>

就被联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第3次气候评估报告^[3]反复引用,作为其论证20世纪全球增暖归因问题的独特证据,从而压倒其他学者对过去千年温度变化的不同认识.然而对该曲线的质疑一直未曾中断^[4].过去10多年,国际学术界在新增资料和改进方法基础上,新建了多条过去千年全球或半球温度序列(图1(a))^[5].其中本项目集成重建的过去1000年分辨率为年的北半球温度序列^[6],是首次被IPCC评估报告^[5]采用的中国学者发表的序列.

中国过去2000年历史文献丰富、连续,有大量历史气候信息可供发掘;加之丰富的树轮、石笋、冰芯、湖泊沉积、珊瑚等各类自然代用资料,为重建高分辨率的气候变化历史提供了独特条件.在新增9000余条物候、冷暖事件记录,以及改进气候指示意义定量诊断方法基础上,项目新建了过去2000年分辨率为

10年的中国东中部地区温度变化序列^[7]以及过去500年分辨率为年的华北和长江中下游地区温度序列^[8];同时分别利用树轮新建了长达1000年以上的祁连山、德令哈、乌兰和昌都等地的温度变化序列^[9-11],分别利用湖泊纹层沉积和珊瑚新建了青藏高原可可西里的夏季温度^[12]和南海海区的海表温度^[13]序列.集成这些新序列和先前发表的高分辨率温度变化代用资料(共28条),笔者等人采用包络法,分别对东北、东中、东南、西北及青藏高原等5个区域的温度变化重建结果进行了不确定性评估,得到了各区可信用度最高的温度变化信号;并根据最小二乘回归(结合留一法验证)和主分量回归2种方法,集成重建了过去2000年中国温度变化序列(图1(b))^[7].与以往重建结果相比,这一新序列增加了代用资料覆盖,并通过对各不同代用序列间的不确定性(包络分析评估)及

图1 过去2000年温度变化. (a) Moberg和Mann等11个研究组集成重建的14条北半球温度(距1881~1980年平均)变化序列^[5];其中Sh13pcar为本项目集成重建的过去1000年北半球温度变化序列^[6]; (b) 集成新建的中国温度(距1851~1950年平均)变化序列^[7]

Figure 1 Temperature change during the last 2000 years. (a) 14 series of Northern Hemisphere temperature anomaly from the 1881–1980 mean reconstructed by 11 research groups (e.g., Moberg and Mann et al. etc.), which cited from IPCC^[5], in which the series of Sh13pcar was contributed by this research project^[6]. (b) China temperature anomaly from the 1851–1950^[7]

2种重建方法的结果比较与印证,提高了重建结果的代表性、可信度和精度。

这些新序列的发表,深化了学界对过去2000年温度变化特征和20世纪增暖历史地位的理解。最新重建成果(图1)表明:北半球及中国的温度变化在过去2000年均呈现冷、暖交替变化特征^[14]。多数北半球温度变化序列显示公元1~270年温暖;271~840年冷暖相间,但总体偏冷;841~1290年温暖;1291~1910年寒冷;1911年以后再次转为温暖。中国的冷暖阶段变化也大致与之对应,只不过中国在551~760年间温暖程度较北半球更显著;761~940年中国气候总体寒冷,而北半球并未明显寒冷。而且,北半球的多数序列和中国温度变化序列也均显示:中世纪期间的最暖百年和最暖30年的温度均与20世纪持平或略高^[15]。先前研究已发现“在中国东中部,20世纪很可能不是过去2000年中最暖世纪”^[16]。上述结果进一步证明:20世纪温暖程度在过去2000年中并非空前,不只出现在中国东中部。IPCC第5次报告也在确认“对北半球平均而言,1983~2012年很可能是过去800年最暖30年(高信度)、也可能是过去1400年最暖30年(中信度)”的同时,指出:从洲际尺度看,在年代尺度上,中世纪期间至少有部分地区的温暖程度与20世纪中叶或20世纪后期相当(高信度)^[5]。与其第四次报告结果,即“950~1100年间北半球气候较为温暖,1450~1900年寒冷,20世纪(特别是最后几十年)的温暖程度可能已超出过去1300年的任何时期”^[17]相比,这一新结果在可信度和对区域差异的认识上均有了显著进展。

2 20世纪暖期与历史暖期的不同成因机制

尽管过去2000年中曾出现过与20世纪温暖程度相仿的暖期,但区域温度重建结果和模拟均显示:20世纪气候增暖在北半球几乎同步,而中世纪增暖在空间上则存在幅度和位相差异。如在中世纪暖期(约950~1250年),中国东部尽管都有显著的温暖时段,但东北和东中部的暖期出现时间却不尽一致,同期青藏高原的温暖程度却极弱^[7,18];类似特征在北半球的各大洲也同样存在^[19]。然而,从现有的北半球温度重建结果看(图1(a)),不同作者重建的各条曲线之间温度变幅仍存在较大差异;特别是在公元500~1500年间的多数时段,这种差异更为显著;其中最高者和最低者仍达1℃以上,大于多数序列给出的其间最大温度变幅,说明现有重建结果仍然存在较大不

确定性;从而也会影响对中世纪增暖幅度与位相的空间差异认识。因而上述结果还需要下一步研究,特别是空间覆盖度和分辨率更高的研究成果予以深化和证实。

通过收集轨道参数、太阳辐射、火山活动等自然外强迫和温室气体含量、土地利用/覆盖变化等人为外强迫变化资料,项目组利用地球气候系统模式CESM,在国际上率先开展了单因子、自然因子组合、人为因子和全强迫等8组共11个过去2000年全球气候变化模拟试验,诊断了气候变化对不同驱动因子的敏感性^[20]。结果发现:二者的差异可能是因驱动历史暖期和20世纪暖期的主控因子和物理机制不同所致^[18,20]。

对比全强迫与单因子、自然因子组合、人为因子组合等试验的地表温度变化空间场表明:中世纪全球增暖虽受多个因子共同作用,但主要受太阳短波辐射变化的影响;短波辐射在到达地球后,通过加热下垫面、特别是被海洋吸收后,再发射长波辐射加热大气,这一物理机制称为“海洋恒温机制(thermostat mechanism)”;由于地球下垫面具有显著的不均质性,因而导致增暖出现非均匀特征。但20世纪的全球增暖则主要受温室气体的控制,温室气体在大气中随大气环流均匀扩散并吸收长波辐射直接加热大气,因此其增暖在全球具有较强一致性,这一机制称为“大气稳定机制(stabilization mechanism)”^[21]。

两种不同的增暖机制虽均导致全球平均降水量增加,但增加幅度和影响区域差异显著。同样是温度上升1℃的情景下,中世纪暖期在自然因子强迫下的降水增加量(2.1%)大于20世纪暖期在人为因子强迫下的降水增加量(1.2%)近1倍。在前一情景下,全球大部分区域的降水都有增加;而在后一情景,降水只在赤道区域增加较为明显,其邻近区域的降水却显著减少。这是由于:中世纪暖期在海洋恒温机制作用下,热带太平洋海表温度分布类似于La Nina态势,使得东西向的海表温度(SST)梯度加大,气压梯度相应增大,导致赤道东风和Walker环流加强,有利于水汽向热带季风及暖池区的辐合,使得全球降水量显著增加。而20世纪暖期在人为因子强迫下,尽管也受下垫面分布不均的影响,且有探空资料分析显示,在增暖背景下大气底层增温强,对流层中上层增温弱^[21];但模拟结果显示:与中世纪暖期相比,因温室气体吸收长波辐射加热大气相对均匀,所以对全球

平均而言, 20世纪暖期大气上、下层间的温度梯度较中世纪暖期小、稳定度增大, 这削弱了Walker环流, 导致水汽辐合较中世纪暖期弱; 因而使得20世纪暖期的降水增幅小于中世纪暖期^[22].

3 极端寒冷事件对年代际温度变化的可能指示意义

气象观测记录显示, 相比于20世纪80、90年代的急速升温, 近10多年来变暖的势头正在放缓: 1998~2012年间全球平均气温只上升了 $0.05 \pm 0.08^\circ\text{C}$, 这一被称为“增暖停滞”的现象^[5,23]已被国际学界高度重视. 目前对这一现象的解释尚无定论, 但多数将其归为自然原因, 如300 m以下深层海水吸收了多余热量、海气相互作用的阶段性波动, 以及太阳活动减弱和火山活动加强等^[5,23].

“增暖停滞”对公众比较直观的印象是近年世界各地严寒事件的增多, 如2008年初的中国南方“雨雪冰冻”、2012年初的“欧亚极寒”、2013年北美“暴雪严寒”等. 其中2008年初, 中国江淮流域各省市普遍出现数十年不遇的持续雨雪冰冻灾害, 给社会经济运转、特别是春运工作造成极为严重的影响. 根据对历史时期极端寒冷事件的研究, 我们发现类似的极端寒冷事件可能还对温度的年代际变化具有早期预警(early warning)意义^[24].

对1951年以来中国和南方冬季及1月气温变化的分析表明, 当该年冬季气温距平低于发生概率 $\leq 10\%$ 阈值时, 中国东部便会出现大范围、持续性严重雨雪冰冻灾害, 江淮地区大河、大湖及长江以南河湖会出现冻结, 并发生大范围的柑橘及其他亚热带、热带果蔬严重冻害. 参照这些特征, 我们利用历史文献记载重建了中国东部过去500年极端冷冬年表^[24,25]. 对比其中与2008年初南方雨雪冰冻灾害强度相近的严寒事件空间分布特征发现: 在过去500年中与2008年初相似的极端冷冬事件有4次, 分别出现在1578, 1620, 1796和1841年, 属百年一遇的极端事件^[24]. 分析这4次事件所对应的冷暖变化背景特征显示: 除1841年外, 其余3次极端寒冷事件均与气候由一个暖峰转向一个多年代的寒冷期对应(图2). 从北半球温度变化看, 这3次事件后均出现了20年左右的持续降温, 其中前2次事件之后的冷期持续了约30年, 而后1次则持续了约50年. 中国东部也大致与之对应, 但第2次事件后的降温更为显著. 这意味着, 2008年雪灾可能是

图2 过去500年中发生的与2008年初中国南方“雨雪冰冻”事件相似的极端寒冷事件(蓝箭头)^[24]及其与温度变化的对比. (a) 中国东中部温度变化^[8], 细黑线: 逐年温度距平; 粗灰线: 30年滑动平滑; (b) 北半球温度变化, 灰色阴影: 重建结果及其包络范围; 红蓝线: PMIP计划中不同模式的全强迫模拟结果^[5]

Figure 2 Comparison on temperature change for the last 500 years and the occurrence of extremely cold winter events (blue arrows)^[24], which like the “snowstorm” in southern China in early 2008. (a) Temperature change (thin line: annual temperature, bold line: 30-year running mean) in central eastern China^[8]. (b) Northern Hemisphere temperature change derived from simulations (red/blue lines) by PMIP with different models and mean of proxy-based reconstructions (grey) with range of multi-reconstructions (grey shading)^[5]

气候由暖转冷的一个先兆, 即当前的“增暖停滞”可能是自然变率导致的气候由暖转冷的一个早期信号^[24].

4 历史气候变化影响与适应的启示

气候变化对过去2000年社会经济发展的影响是当前全球变化研究的热点与难点之一. 在建立历史气候变化影响与适应研究概念框架^[26]的基础上, 我们构建了与气候变化影响评价相对应的历史时期社会经济系统脆弱性指标体系; 同时通过系统检索过去2000年中国气候变化影响史料, 分析记载特点, 提出了基于语义差异的历史社会经济等级序列重建方法^[27], 重建了8条覆盖过去2000年、分辨率为10年的社会经济序列, 包括丰歉^[28,29]、经济^[30]、财政^[31]、社会兴衰等级序列, 以及人口增长率、饥荒指数、农民起义频次、农牧民族战争频次序列^[32]; 从而实现了历史社会经济变化程度的定量度量和时间尺度的均一化. 在此基础上, 通过对过去2000年气候与社会经济变化序列的对比分析、明清华北平原气候变化对社会影响过程分析和中国历史上22个气候变化影响的

典型案例剖析,定量分析了气候变化对中国社会经济影响的历史过程,揭示了气候变化影响社会经济发展的特征与机制,以及人类适应气候变化方式选择的等级-次序性和后续效应。

对序列的统计对比表明:在中国史载的31个盛世、大治和中兴事件中,有21个发生在温暖或相对偏暖时段,3个在由冷转暖时段,2个在由暖转冷时段。而在15次王朝更替中,有11次出现在冷期或相对寒冷时段。这进一步证明:中国历史上的社会经济波动与气候变化之间总体上存在“冷抑暖扬”的对应特征,即在暖期时,往往呈现农业生产发达、经济繁荣、人口增加、国力强盛的态势;反之,寒冷阶段往往农业萎缩、经济衰退、国力式微^[33-35]。

但本项目的深入分析还发现:与暖期相伴的社会经济发展与人口膨胀同时也增加了对资源与环境的压力,使得以农业为基础的社会系统风险持续上升,因而在遭遇重大的气候转折(如温度下降、降水减少)时,很容易造成资源相对短缺,导致人地关系失衡^[36]。统计表明:在过去2000年中国社会的9个高风险期中,有8个与气候由暖转冷过程一致。在此背景下,极端气候事件与重大灾害往往也容易触发社会危机,一些事件甚至成为社会全面动荡和朝代更替的导火索^[32]。其中明朝的灭亡就是一个典型案例^[37]:一方面,16世纪晚期开始的气候转冷、转干趋势,不仅直接降低了粮食产量,使得整个华北长期处在粮食短缺状态,而且导致北方军屯体系崩溃,迫使明政府向该地区大规模转运军粮,使政府深陷财政危机;另一方面,17世纪20年代末期开始的长达十余年的北方大旱(史称崇祯大旱,为过去500年间华北最为严重的旱灾)首先触发了陕西、山西两省农民起义浪潮,之后随着灾区蔓延和灾情加重,在起义军兵源不断得到补充的同时,又持续削弱了明军的补给能力,使明王朝最终为起义军所推翻。

然而,中国地域广阔,无论温暖还是寒冷,皆为有利和不利影响地区并存;因而适应气候变化以趋利避害,也因时、因地制宜。如中世纪暖期,使得中国大多数地区热量资源增加,与此相适应,10~13世纪农作物种植界线大规模北扩,特别是在北方农牧交错带和暖温带-亚热带交界处更为明显^[38]。而且,为适应当时中国东部“北涝南旱”^[39]的影响,在北宋政府倡导下,北方黄河流域推广稻作,长江流域则推广生长期较短的占城稻,并形成稻麦连作制度,其中

后者被认为是中国农业史上一次重要的种植制度变革,对其后中国社会经济发展产生了深远影响^[33]。

而处于小冰期的清代,人口增长迅速,除清初期外,人地矛盾一直较为紧张。因而在响应、适应气候变化举措上,不但将推广相对高产作物(如玉米、薯类等)及调整种植制度(如18世纪初气候转暖后在长江下游地区推广双季稻)等农业措施作为基本手段,而且还以向边疆移民与拓垦作为适应气候变化(特别是极端气候事件)影响的重要手段。虽然从多世纪尺度看,向边疆移民与拓垦的主要内在驱动因素是人口压力,也与戍边、政策、国力变化等社会政治因素及适应能力增强有关;但对比分析表明:1650年以后,几乎每次在华北发生的极端旱涝事件,都伴有数万、甚至数十万人口自发或被政府组织迁至长城以外地区^[40]。特别是在19世纪,清政府因财力日渐衰退而致赈灾能力显著降低;同时因受气候寒冷影响,全国多数地区收成下降,导致从江南调往华北的备赈粮食显著减少;这推动了清政府在1860年以后对关外实施“弛禁”政策。此后,人口向地广人稀的东北地区流动成为华北地区应对气候恶化和极端气候事件影响的主要手段^[40,41]。从而不仅客观上降低了华北地区的社会风险^[40];也有力促进了东北地区开发,使得晚清在边境危机加深时大部分边疆领土得以保存^[41]。

5 讨论与展望

过去2000年一直是全球变化研究的重点时段之一,它既包括工业革命前的自然变率主导的波动变化时段,又包括了工业革命以来在自然波动基础上因人为影响而导致的气候趋势变化时段,同时人类活动与气候变化相互作用也极为密切。由于至今为止,器测观测记录最长者不过300年,且大多数地区不足百年,因此将代用资料重建分析和气候模拟诊断相结合,研究过去2000年气候变化,不仅对深入揭示年代至百年尺度的气候变化特征与机制的理解,也对我适应未来气候变化具有参考价值。

然而由于代用资料本身存在局限性,气候模拟手段也正处在不断发展和改进过程中,因此尽管本文已在20世纪气候增暖的历史地位及其历史暖期的形成机制差异、当前“增暖停滞”对未来气候变化的早期预警意义、暖期气候影响与适应等问题上取得上述新进展,但这些认识仍具有不确定性。如包络评估显

示: 受千年之前温度变化代用资料覆盖度所限, 过去 2000 年中国温度变化序列只有公元 900 年以后的结果才具有高信度, 之前仅及中信度. 而关于极端寒冷事件对年代际温度变化指示意义的认识, 是仅根据 4 个案例中有 3 个相同得到的, 一致性高但证据有限 (high agreement limited evidence), 即仅具中等信度. 这些亟待新研究予以深化和确认.

因此, 进一步开展代用资料的定量指示意义研

究, 增加代用资料的密度, 提高气候变化重建结果的精度与信度, 模拟诊断全球气候变化的动力学机制、揭示区域气候和全球气候变化的关联机理、以及极端事件与气候系统平均态变化之间的可能联系机制, 区分气候自然波动变率与人为导致的气候趋势对未来气候变化的作用, 阐明过去 2000 年气候变化对社会经济发展影响的时空差异特征及其机制, 是我们下一步的研究重点.

参考文献

- PAGES. Past Global Changes: Science Plan and Implementation Strategy. IGBP Report No. 57. Stockholm: IGBP Secretariat, 2009
- Mann M E, Bradley R S, Hughes M K. Northern hemisphere temperatures during the past millennium: Inferences, uncertainties, and limitations. *Geophys Res Lett*, 1999, 26: 759–762
- IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 101–181
- Zheng J Y, Ge Q S, Liu H L, et al. “Climategate” and the debate on historical significance of the 20th century warming in the last millennium (in Chinese). *Chin J Nat*, 2013, 35: 22–29 [郑景云, 葛全胜, 刘浩龙, 等. “气候门”与 20 世纪增暖的千年历史地位之争. *自然杂志*, 2013, 35: 22–29]
- IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 383–464
- Shi F, Yang B, Mairesse A, et al. Northern Hemisphere temperature reconstruction during the last millennium using multiple annual proxies. *Clim Res*, 2013, 56: 231–244
- Ge Q S, Hao Z X, Zheng J Y, et al. Temperature changes over the past 2000 yr in China and comparison with the Northern Hemisphere. *Clim Past*, 2013, 9: 1153–1160
- Yan J H. Characteristics of climate change in the middle and lower reaches of the Yellow River and Yangtze River of China since 1500 AD (in Chinese). Dissertation for the Doctoral Degree. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014 [闫军辉. 1500 AD 以来黄河和长江中下游地区冷暖变化特征研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学, 2014]
- Zhang Y, Shao X M, Yin Z Y, et al. Millennial minimum temperature variations in the Qilian Mountains, China: Evidence from tree rings. *Clim Past*, 2014, 10: 1763–1778
- Shao X M. A preliminary reconstruction of temperature in the eastern Qaidam Basin, northeaster Tibetan Plateau, China. *Quat Int*, 2012, 279–280: 444
- Wang J L, Yang B, Qin C, et al. Tree-ring inferred annual mean temperature variations on the southeastern Tibetan Plateau during the last millennium and their relationships with the Atlantic Multidecadal Oscillation. *Clim Dyn*, 2013, 43: 627–640
- Liu X Q, Yu Z T, Dong H L, et al. A less or more dusty future in the Northern Qinghai-Tibetan Plateau? *Sci Rep*, 2014, 4, doi: 10.1038/srep06672
- Chen T R, Yu K F, Chen T G. Sr/Ca—sea surface temperature calibration in the coral *Porites lutea* from subtropical northern South China Sea. *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecol*, 2013, 392: 98–104
- Ge Q S, Liu J, Fang X Q, et al. General characteristics of temperature change and centennial warm periods during the past 2000 years (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2013, 68: 579–592 [葛全胜, 刘健, 方修琦, 等. 过去 2000 年冷暖变化的基本特征与主要暖期. *地理学报*, 2013, 68: 579–592]
- Ge Q S, Zheng J Y, Hao Z X, et al. State-of-the-arts in the study of climate changes over China for the past 2000 years (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2014, 69: 1248–1258 [葛全胜, 郑景云, 郝志新, 等. 过去 2000 年中国气候变化研究的新进展. *地理学报*, 2014, 69: 1248–1258]
- Ge Q S, Zheng J Y, Fang X Q, et al. Winter half-year temperature reconstruction for the middle and lower reaches of the Yellow River and Yangtze River, China, during the past 2000 years. *Holocene*, 2003, 13: 933–940
- IPCC. 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: Cambridge University Press, 2007. 466–482

- 18 Yan M, Wang Z Y, Liu J. Simulation of the characteristics and mechanisms of Chinese typical warm periods over the past 1500 years (in Chinese). *Quat Sci*, 2014, 34: 1166–1175 [严蜜, 王志远, 刘健. 中国过去 1500 年典型暖期气候的模拟研究. 第四纪研究, 2014, 34: 1166–1175]
- 19 Shi F, Yang B, Zhao S, et al. Spatial pattern reconstruction of typical centennial warm periods of global temperature over the past millennium (in Chinese). *Quat Sci*, 2014, 34: 1125–1135 [史锋, 杨保, 赵森, 等. 全球过去千年典型暖期温度空间格局重建. 第四纪研究, 2014, 34: 1125–1135]
- 20 Wang Z Y, Liu J. Modeling study on the characteristics and mechanisms of global typical warm periods over the past 2000 years (in Chinese). *Quat Sci*, 2014, 34: 1136–1145 [王志远, 刘健. 过去 2000 年全球典型暖期特征与机制的模拟研究. 第四纪研究, 2014, 34: 1136–1145]
- 21 Fu Q, Johanson C M, Wallace J M, et al. Enhanced mid-latitude tropospheric warming in satellite measurements. *Science*, 2006, 312: 1179
- 22 Liu J, Wang B, Cane M A, et al. Divergent global precipitation changes induced by natural versus anthropogenic forcing. *Nature*, 2013, 493: 656–659
- 23 Kosaka Y, Xie S P. Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling. *Nature*, 2013, 510: 403–407
- 24 Hao Z X, Zheng J Y, Ge Q S, et al. Historical analogues of the 2008 extreme snow event over Central and Southern China. *Clim Res*, 2011, 50: 161–170
- 25 Zheng J Y, Ding L L, Hao Z X, et al. Extreme cold winter events in southern China during AD 1650–2000. *Boreas*, 2012, 41: 1–12
- 26 Fang X Q, Zheng J Y, Ge Q S. Historical climate change impact-response processes under the framework of food security in China (in Chinese). *Sci Geogr Sin*, 2014, 34: 1291–1298 [方修琦, 郑景云, 葛全胜. 粮食安全视角下中国历史气候变化影响与响应的过程与机理. 地理科学, 2014, 34: 1291–1298]
- 27 Fang X Q, Su Y, Yin J, et al. Methodology for quantifying social and economic series on the base of semantic differential to serve the research on impacts of climate change (in Chinese). *Quat Sci*, 2014, 34: 1204–1214 [方修琦, 苏筠, 尹君, 等. 历史气候变化影响研究中的社会经济等级序列重建方法探讨. 第四纪研究, 2014, 34: 1204–1214]
- 28 Su Y, Fang X Q, Yin J. Impact of climate change on fluctuations of grain harvests in China from the Western Han Dynasty to the Five Dynasties (206 BC–960 AD). *Sci China-Earth Sci*, 2014, 57: 1701–1712
- 29 Yin J, Su Y, Fang X Q. Relationship between climate change and grain harvest fluctuation in China during 210 BC to 1910 AD. *Quat Int*, 2015, 355: 153–163
- 30 Wei Z D, Miller R A, Fang X Q, et al. Macro-economic cycles related to climate change in dynastic China. *Quat Res*, 2015, 83: 13–23
- 31 Wei Z D, Fang X Q, Su Y. Climate change and fiscal balance in China over the past two millennia. *Holocene*, 2014, 24: 1771–1784
- 32 Fang X Q, Su Y, Yin J, et al. Transmission of climate change impacts from temperature change to grain harvests, famines and peasant uprisings in the historical China. *Sci China Earth Sci*, 2015, doi: 10.1007/s11430-015-5075-9
- 33 Ge Q S, Fang X Q, Zheng J Y. Learning from the historical impacts of climatic change in China (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2014, 29: 23–29 [葛全胜, 方修琦, 郑景云. 中国历史时期气候变化影响及其应对的启示. 地球科学进展, 2014, 29: 23–29]
- 34 Zhang D D, Jim C Y, Lin G C S, et al. Climatic change, wars and dynastic cycles in China over the last millennium. *Clim Change*, 2006, 76: 459–477
- 35 Zhang D D, Brecke P, Lee H F, et al. Global climate change, war, and population decline in recent human history. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2007, 104: 19214–19219
- 36 Fang X Q, Xiao L B, Wei Z D. Social impacts of the climatic shift around the turn of the 19th century on the North China Plain. *Sci China-Earth Sci*, 2013, 56: 1044–1058
- 37 Zheng J Y, Xiao L B, Fang X Q, et al. How climate change impacted the collapse of the Ming Dynasty. *Clim Change*, 2014, 127: 169–182
- 38 Man Z M, Yang Y D. The Medieval warming impacts on the natural environment in Eastern China as inferred from historical documents (in Chinese). *Quat Sci*, 2014, 34: 1197–1203 [满志敏, 杨煜达. 中世纪温暖期升温影响中国东部地区自然环境的文献证据. 第四纪研究, 2014, 34: 1197–1203]
- 39 Zheng J Y, Hao Z X, Zhang X Z, et al. Drought/flood spatial patterns in centennial cold and warm periods of the past 2000 years over eastern China (in Chinese). *Chin Sci Bull (Chin Ver)*, 2014, 59: 2964–2971 [郑景云, 郝志新, 张学珍, 等. 中国东部过去 2000 年百年冷暖的旱涝格局. 科学通报, 2014, 59: 2964–2971]
- 40 Xiao L B, Fang X Q, Zhang Y J, et al. Multi-stage evolution of social response to flood/drought in the North China Plain during 1644–1911. *Reg Environ Change*, 2014, 14: 583–595
- 41 Ye Y, Fang X Q, Khan M A U. Migration and reclamation in Northeast China in response to climatic disasters in North China during the past 300 years. *Reg Environ Change*, 2012, 12: 193–206

Forcing and impacts of warm periods in the past 2000 years

GE QuanSheng¹, HUA Zhong^{1,2}, ZHENG JingYun¹, FANG XiuQi^{3,1}, XIAO LingBo¹, LIU Jian⁴ & YANG Bao⁵

¹ Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³ School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

⁴ Virtual Geographical Environment Laboratory of Ministry of Education, School of Geography, Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;

⁵ Institute of Cold and Arid Regions Environmental and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

The purposes of the research project on forcing and impacts of warm periods in the past 2000 years, which was funded by the China Global Change Research Program, are summarized as follows: to reconstruct past climate changes in different regions and the pattern of warm periods over China, to analyze climate forcing and diagnose the mechanisms in warm periods by climate change simulations, to assess the impacts of climate change on socio-economic systems and human adaptation to warm periods in China, and to investigate Northern Hemisphere (NH) temperature changes and the coherences/differences in regional temperature anomalies during warm periods across the NH. The new findings are highlighted as follows: (1) Warming in the 20th century was not unprecedented in the past 2000 years. However, warming in the 20th century was almost simultaneous over the entire NH, whereas warming in the Medieval Warm Period was heterogeneous in amplitude and phase at regional and continental scales. The difference could be mainly attributed to the mechanism driven by different external forcings. Warming in the 20th century was mainly driven by a “stabilization mechanism”, forced by increased greenhouse gases, whereas the Medieval Warm Period was mainly driven by a “thermostat mechanism”, forced by increased solar radiation. (2) Extremely cold winter events, such as the “snowstorm” in southern China in early 2008, was the early warning of decadal cooling in historical terms. It suggests that the recent global-warming hiatus might be an early signal of cooling induced by natural variability. (3) In Chinese history, warm periods usually corresponded to prosperous times for the socio-economy, whereas it was contrary in cold periods. However, socio-economic development and population growth in warm periods may increase pressures on the natural environment system because of increased resource utilization. Such pressure could lead to disequilibria in the human–environment system and trigger social crises when abrupt climate change (such as cooling and precipitation decrease) occurs. These results can help in improving our understanding on the characteristics and mechanisms of decadal to centennial climate change as well as provide insight for successful adaptation to climate change in the future.

past 2000 years, warm periods, mechanism of climate change, external forcings, impacts and adaptation

doi: 10.1360/N972014-01298