

地球三极200hPa温度的协同变化特征

方克艳^{1,2*}, 张鹏², 陈镜明^{1,3} and 陈德亮²

Citation: [中国科学: 地球科学](#) **51**, 610 (2021); doi: 10.1360/SSTe-2020-0272

View online: <https://engine.scichina.com/doi/10.1360/SSTe-2020-0272>

View Table of Contents: <https://engine.scichina.com/publisher/scp/journal/SSTe/51/4>

Published by the [《中国科学》杂志社](#)

Articles you may be interested in

[南极和邻近地区温度的时空变化特征](#)

Science in China Series D-Earth Sciences (in Chinese) **27**, 284 (1997);

[城市边界层温度廓线及特征的季节变化](#)

Chinese Science Bulletin **54**, 954 (2009);

[中国南部近500年冬季温度变化的若干特征](#)

Chinese Science Bulletin **25**, 270 (1980);

[北京地区过去2650年来暖季温度的年代际变化特征](#)

Chinese Science Bulletin **56**, 1854 (2011);

[CMIP5气候模式模拟的1850~2014年全球温度变化的集合经验模态分解](#)

SCIENTIA SINICA Terrae **46**, 1675 (2016);

论 文



地球三极200hPa温度的协同变化特征

方克艳^{1,2*}, 张鹏², 陈镜明^{1,3}, 陈德亮²

1. 福建师范大学地理科学学院湿润亚热带生态-地理过程教育部重点实验室, 福州 350007;

2. Regional Climate Group, Department of Earth Sciences, University of Gothenburg, Box 460S-405 30 Gothenburg, Sweden;

3. Department of Geography and Program in Planning, University of Toronto, 100 St. George St., Toronto, Ontario, Canada

* 通讯作者, E-mail: kfang@fjnu.edu.cn

收稿日期: 2020-10-12; 收修改稿日期: 2020-10-17; 接受日期: 2020-10-19; 网络版发表日期: 2021-01-11

国家自然科学基金项目(批准号: 41822101、41888101、41971022和41772180)、中国科学院战略性先导科技专项项目(编号: XDB26020000和XDA20060401)、国家外国专家局项目(编号: GS20190157002)、万人计划青年拔尖人才项目、福建省青年拔尖人才计划和创新团队项目(编号: IRTL1705)资助

摘要 地球的三极, 即北极、南极和第三极(即青藏高原及其周围地区), 拥有地球上最大储量的淡水资源。地球三极均对气候的变化响应敏感, 然而三极气候变化之间的关联, 特别是南极和第三极之间的关联却知之甚少。在200hPa高度, 夏季气温在地球三极的上空最高, 且受地表条件影响较小, 可能反映出大尺度的气候动态关联特征。地球三极的温度在年代际时间尺度(10~100年)上表现出同相变化特征, 北极和南极上空200hPa处的温度与布鲁尔-多布森环流(BDC)显著相关, 这可能是由于布鲁尔-多布森环流将平流层臭氧向南北极输送, 并同步加热了南北极200hPa处的空气。我们发现在第三极的对流层顶变暖增强了向两极的, 特别是向南极的, 布鲁尔-多布森环流输送, 由此将第三极的气候与南北极气候联系起来。此外, 太平洋年代际涛动(IPO)也显示出与三极200hPa处温度的关联。

关键词 地球三极, 青藏高原, 布鲁尔-多布森环流, 太平洋年代际涛动, 气候遥相关

1 引言

地球的三极, 即北极和南极, 以及由青藏高原及其周围地区组成第三极, 拥有地球上最大的冰储量, 对全球气候的变化响应敏感。近几十年来, 由于北极放大效应(Serreze和Barry, 2011), 北极地区变暖更为明显。由于存在沿海上升增温加剧的特征(Pepin等, 2015), 第三极(Chen等, 2015; Yao等, 2019)变暖更为明显。相反, 在20世纪上半叶, 南极出现了明显的降温趋势, 而

在最近几十年, 这种趋势已经逆转(PAGES 2k Consortium, 2013; Wang等, 2015)。此外, 地球三极气候变化通过局部反馈和大尺度遥相关导致全球气候异常(Chen等, 2015; Stocker等, 2013; Yao等, 2019)。目前, 科学界正开始认识到对三极进行统一研究, 揭示它们之间的遥相关性的重要性。

许多研究揭示了通过温盐环流的关联, 北极和南极之间的跷跷板气候模式(Blunier和Brook, 2001; Chylek等, 2010; Marino等, 2015; Wang等, 2015)。先前的研究

中文引用格式: 方克艳, 张鹏, 陈镜明, 陈德亮. 2021. 地球三极200hPa温度的协同变化特征. 中国科学: 地球科学, 51(4): 610~620, doi: 10.1360/SSTe-2020-0272
英文引用格式: Fang K, Zhang P, Chen J, Chen D. 2021. Co-varying temperatures at 200 hPa over the Earth's three poles. Science China Earth Sciences, 64(2): 340~350, <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9680-y>

究还揭示了北极和第三极之间(Zhang等, 2019)以及南极和东亚气候通过亚洲-澳大利亚夏季风之间的气候关联(Chen等, 2016; Fang等, 2019a; Fang等, 2015)。但对三极之间, 特别是南极和第三极之间的气候联系仍然认识不清。虽然使用了一个统一的物理框架来量化三极地表温度变化背后的各种物理机制(Gao等, 2019), 但迄今为止尚未有研究同时探讨三极之气候的协同变化特征。

现有的研究主要集中在三极地表气候之间的联系。本研究的重点是200hPa处三极温度之间的协同变化关系, 它们不仅受到地表条件的显著影响, 而且与大尺度大气运动密切相关(Ding和Wang, 2005), 因此可能更好地反映三极之间的大尺度气候遥相关。

2 数据和方法

2.1 数据

本研究采用的逐月200hPa温度来自美国国家环境预报中心-国家大气研究中心(NCEP-NCAR)开发的从1948年至今的一个再分析数据集。该数据集是通过模型和测量的数据同化而得出的。作为比较, 我们还使用了欧洲中期天气预报中心(ECMWF)开发的ERA-Interim(1979年至今)和美国国家航空航天局(NASA)的全球模拟和同化办公室制作的现代研究和应用回顾分析数据集(MERRA; 1979~2016年)(Rienecker等, 2011), 我们重点关注了NCEP-NCAR再分析数据集, 因为基于该数据集的结果与其他数据集的结果相似, 且持续时间更长。

我们使用了1°网格化的海表温度(SST)数据集, 该数据集始于1871年, 是来自哈德莱中心的全球海冰和海表温度数据集(HadISST)(Kennedy等, 2011)。1982年以后的海温数据是基于英国气象局海洋数据库(MDB)和全球电信系统(GTS)的数据。在没有英国气象局海洋数据库数据的时期, 数据集根据国际海-气综合数据集(ICOADS)中1871~1995年期间逐月海温。本研究使用了由荷兰皇家气象研究所开发的多传感器再分析第二版全球臭氧柱数据集(1970年至今)(van der A等, 2015)。1970年的早期数据仅基于Nimbus-4卫星上的一台仪器(BUV), 1978年以来的数据是基于Nimbus-7卫星上的两台更可靠的观测仪器(SBUV和TOMS)(van der A等, 2015)。这项研究只使用了1978年以后数据质量较高的

时段。

我们整理了第三极地区($20^{\circ}\sim45^{\circ}\text{N}$, $45^{\circ}\sim105^{\circ}\text{E}$)年分辨率的代用资料集。这些代理数据开始的时间不晚于1800年, 结束的时间不早于1980年, 主要来自PAGES 2k项目(PAGES 2k Consortium, 2013)、美国国家气候数据中心(NCDC, www.ncdc.noaa.gov/data-access/paleoclimatology-data)和其他大尺度气候重建(Fang等, 2018)。该数据集由202个代用数据组成, 其中大部分来自树轮(196)、冰芯(5)和多指标记录(1)。本文网络版附录(<http://earthcn.scichina.com>)列举了有关代用资料的详细信息。

2.2 方法

我们使用小波相干法(WTC)来评估在不同时间尺度上, 时间序列之间的时变相关性。该方法基于小波分析, 将时间序列数据转换为不同时间尺度的分量, 然后计算局部相关性(Grinsted等, 2004; Torrence和Compo, 1998)。我们使用代用资料的第一主成分(PC1)来重建第三极200hPa处的温度。为了确保重建的共同校准时段足够长, 我们使用正则期望最大化(RegEM)方法(Fang等, 2018; Mann等, 2009; Shi等, 2015)来填补校正时段缺失的代理数据。通过这种方法, 我们保证代用资料和器测记录有1948~1996年的共同时期。网络版附录对我们的重建方法做了详细介绍。利用从NCEP-NCAR逐日再分析资料获得的大气温度和经向风速资料计算的质量流函数, 生成了 $30^{\circ}\text{S}\sim30^{\circ}\text{N}$ 范围内的对流层到平流层的月净质量通量(Kalnay等, 1996; Kistler等, 2001)。我们将月对流层顶定义为最低高度水平当温度递减率降至 2K km^{-1} 或更低, 但该水平与其上 2km 所有较高水平之间的平均温度递减率不超过 2K km^{-1} 。我们使用了与计算质量通量相同的大气温度数据计算了每月对流层顶高度。

3 结果与讨论

3.1 200hPa的温度协同变化及其与布鲁尔-多布森环流的联系

3.1.1 200hPa三极温度的协同变化特征

在200hPa处, 南北半球夏季温度的高值区域集中在地球三极地区, 相反地, 三极地区的温度在各自半球的冬季又是最低的(图1), 然而, 当高度低于200hPa

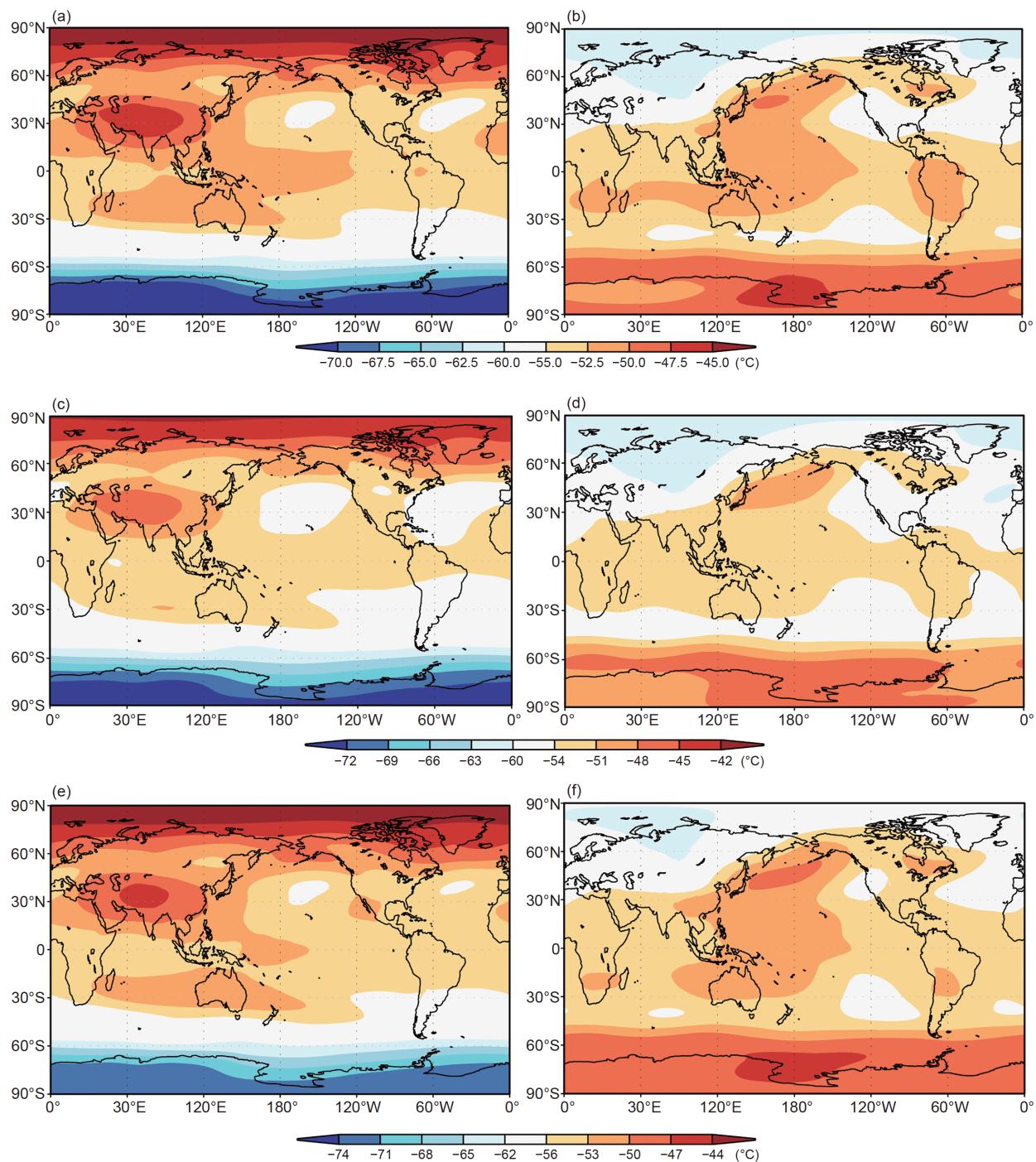


图 1 基于NCEP、ERA-Interim和MERRA再分析资料((a)、(c)和(e))北半球夏季(6~8月)和((b)、(d)和(f))南半球夏季(12月至次年2月)200hPa的平均温度

时这种温度的分布特征不明显(网络版附图S1)。200hPa的温度位于第三极对流层顶,而在北极和南极地区到了平流层的位置,这个高度是研究对流层顶、

平流层和三极地表气候之间联系的理想层位。北极和南极分别在各自半球的夏季受到太阳辐射增温的时间最长,此外,从热带传递到北极和南极的热量在各自的

半球夏季也显著加强(Boos 和 Kuang, 2010; Rao 等, 2019; Zhao 等, 2011). 由于高海拔的原因, 第三极强烈地加热了对流层上层的气团, 从而使得第三极成为北半球夏季200hPa处最热的地区之一(Chen 等, 2015; Wu 等, 2007). 我们对北极($60^{\circ}\text{--}90^{\circ}\text{N}$, $0^{\circ}\text{--}360^{\circ}\text{E}$)、南极($60^{\circ}\text{--}90^{\circ}\text{S}$, $0^{\circ}\text{--}360^{\circ}\text{E}$)和第三极($25^{\circ}\text{--}40^{\circ}\text{N}$, $50^{\circ}\text{--}100^{\circ}\text{E}$)各自半球夏季的200hPa温度进行平均, 生成各自温度

的时间序列. 在南极, 200hPa的温度变率最强, 其温度变率是北极的三倍(图2a). 大体上看, 三极地区200hPa的温度与其半球夏季在年代际时间尺度(10~100年)上表现出一致变化的特征, 尤其是其20年以上的周期性波动表现出较好的匹配关系(图2和网络版彩图S2).

位于平流层北极和南极的200hPa温度受到臭氧层吸收的能量的重要影响(Lu 等, 2019), 这使得我们很容

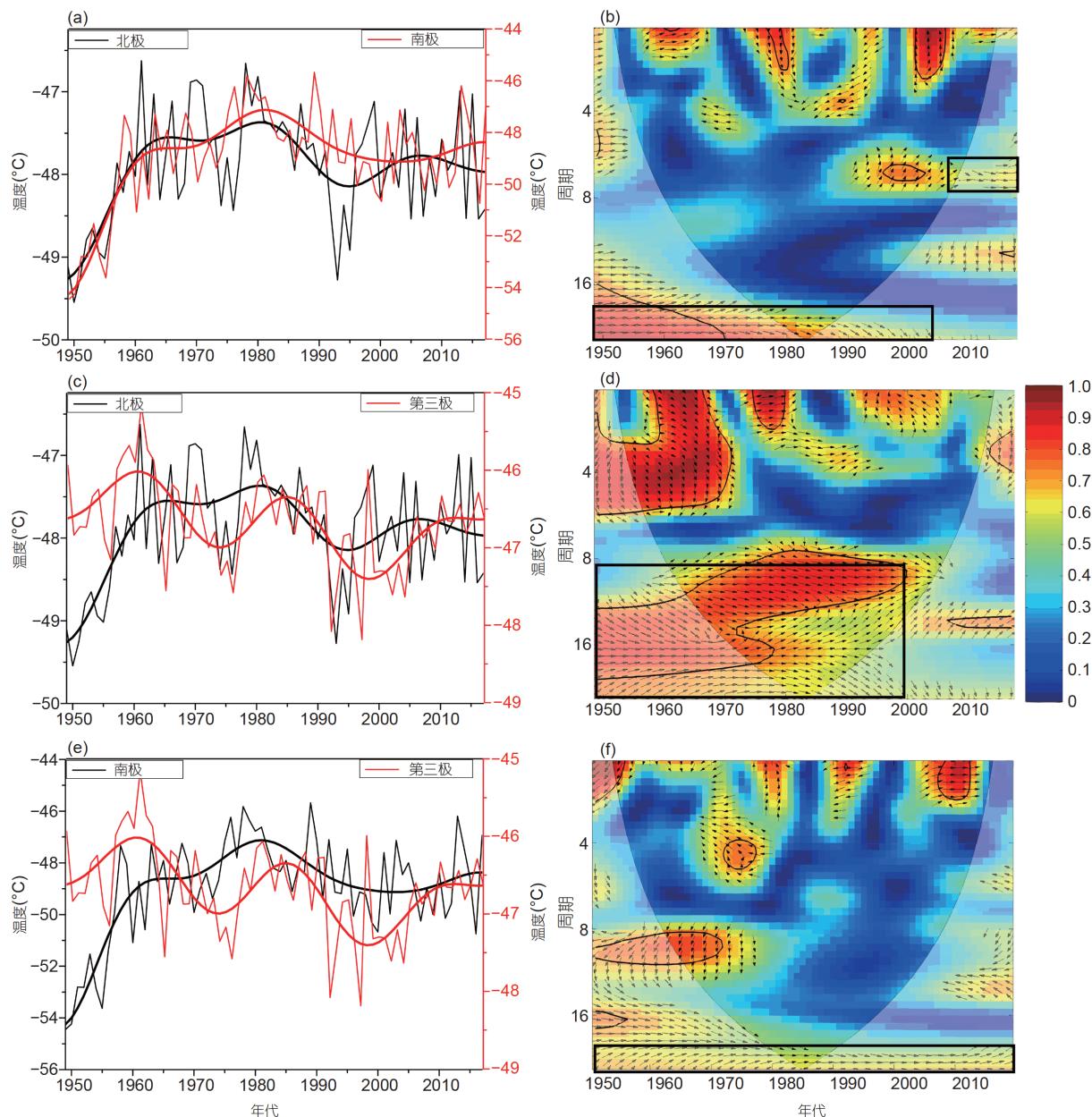


图 2 北极和南极((a)和(b))、北极和第三极((c)和(d))以及南极和第三极((e)和(f))之间200hPa温度和小波相干性的比较
等值线内表示显著相关, 箭头指向左(右)表示同相(反相)相关. 气温的计算分别针对南北半球的夏季进行

易理解位于200hPa的南北极温度与区域臭氧柱浓度之间存在显著的正相关(图3a和3b). 然而第三极地区

200hPa的温度与臭氧浓度几乎没有显著的相关性(图3c).

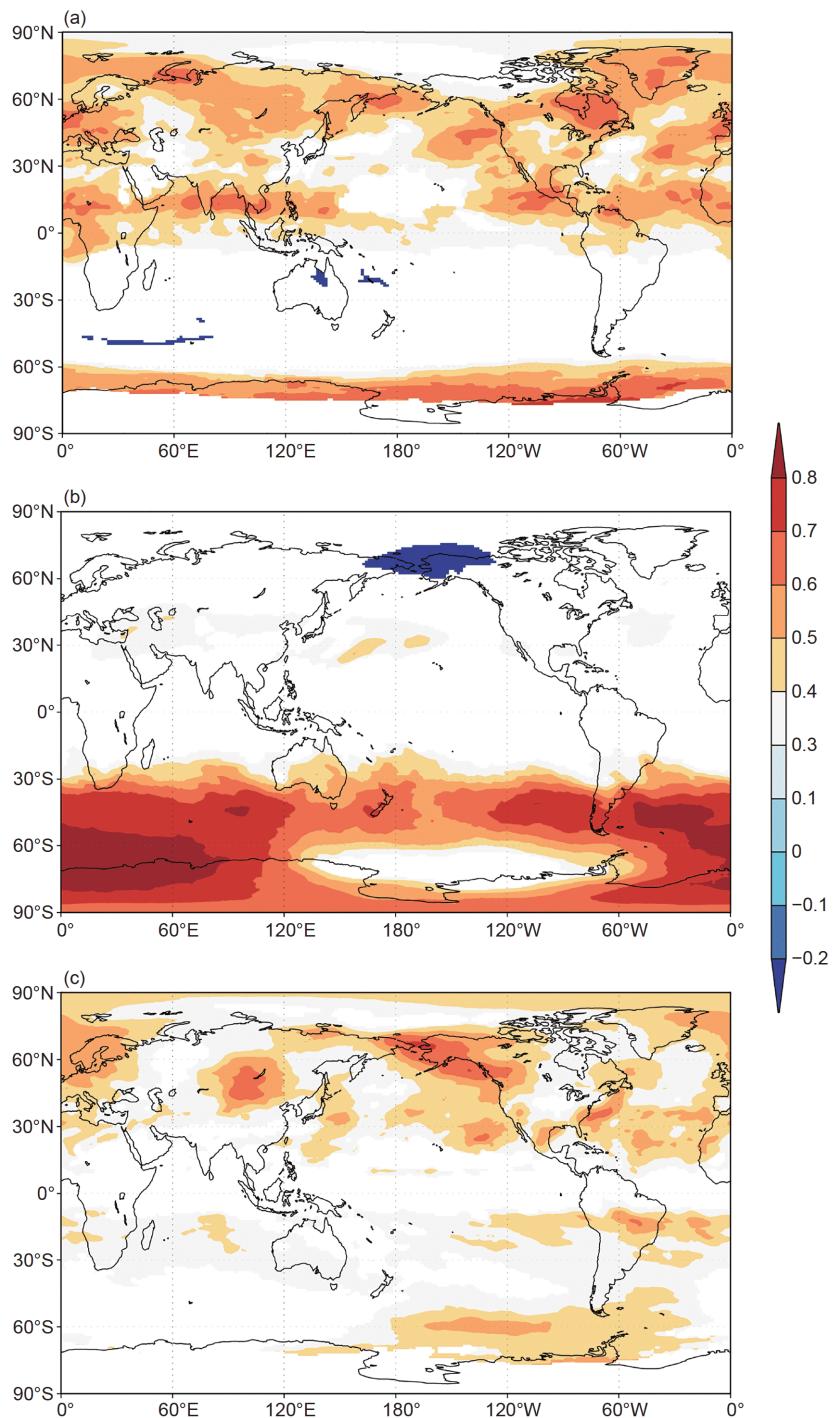


图3 三极温度与臭氧浓度之间的相关关系图

(a)北半球夏季(6~8月)的北极200hPa温度与平均臭氧浓度的相关关系图; (b)南半球夏季(12月至次年2月)200hPa的南极温度与臭氧浓度相关关系图; (c)北半球夏季200hPa第三极的温度与臭氧浓度之间的相关关系图

3.1.2 布鲁尔-多普森环流与三极温度协同变化

臭氧主要由布鲁尔-多普森环流从热带输送到北极和南极, 布鲁尔-多普森环流从热带对流层顶上升到平流层, 在北极和南极下降到对流层(Brewer, 1945; Dobson, 1956)。我们计算了热带地区对流层到平流层的月净质量通量(30°S ~ 30°N)作为布鲁尔-多普森环流强度指标, 然后与三极的200hPa温度进行比较(图4)。北(南)半球的布鲁尔-多普森环流强度与北(南)极200hPa温度之间存在较高的相关性(图4a和4b), 这说明增强的布鲁尔-多普森环流导致更强的极向臭氧传输, 这很可能是引起200hPa南北极温度增高的重要原因。

在年代际时间尺度上, 最强的相关性出现在第三极200hPa温度和布鲁尔-多普森环流到南半球之间的输送(图4c), 这说明第三极的增温导致向南半球输送的布鲁尔-多普森环流增强。第三极在北半球夏季时的升温导致对流层顶比邻近地区更加温暖(Zhao等, 2011), 这可以把更多的空气从对流层顶送到第三极的平流层。第三极的增温及其对大规模环流的影响集中在喜马拉雅山南部附近(Boos和Kuang, 2010), 该地区属于对流层到平流层的气团传输区域。布鲁尔-多普森环流的输送在冬季更为显著, 这是由于该时期加强的罗斯贝波和重力波输送(Holton等, 1995), 因此第三极地区的布鲁尔-多普森环流输送容易进入南半球, 因为这时是南半球的冬季。由于第三极200hPa的温度、布鲁尔-多普森环流、南极上空的臭氧浓度与南极200hPa温度之间的相关性, 我们认为南极和第三极可能通过布鲁尔-多普森环流关联。第三极上空的200hPa温度与亚洲-澳大利亚夏季风密切相关(Tang等, 2011; Wu等, 2007)。我们推测存在于南半球表面到第三极南部对流层顶的环流起了一定的作用, 此环流由亚洲-澳大利亚夏季风驱动, 然后从平流层回到南半球, 直到南极上空的对流层。此外, 南极上空臭氧浓度的增加常常对应着南半球环状模(SAM)强度的降低, 导致南半球的西风带减弱(Sexton, 2001), 减弱的西风可能与秘鲁洋流减弱和海温的厄尔尼诺态有关(Fang等, 2015)。

3.2 太平洋年代际涛动和三极200hPa的温度协同变化特征

3.2.1 与太平洋年代际涛动的联系

由于海温在年代际尺度气候变化中起关键作用,

于是对当年夏季和前一年冬季的海温与三极200hPa的温度做了相关性分析。发现北极(图5a、5b)、南极(图5c、5d)和第三极(图5e、5f)的温度与赤道东太平洋海温呈现显著正相关, 与南、北太平洋中纬度地区海温呈负相关。此模式类似于太平洋年代际涛动(IPO)(Henley等, 2015), 这种类似太平洋年代际涛动的相关模式在第三极(图5e、5f)和200hPa处温度的相关性更为显著。三极温度与全年海温的相关性也表现出类似太平洋年代际涛动的模式(网络版图S3、S4), 特别是在南极(网络版图S3b)。综上, 太平洋年代际涛动与三极200hPa温度之间存在正相关关系。

太平洋年代际涛动作为太平洋海温的主要模式, 在调控北极和南极200hPa温度年代际尺度上的协同变化特征方面起着重要作用。太平洋年代际涛动可以通过哈德莱环流和布鲁尔-多普森环流调节第三极的温度。哈德莱环流是将热带地区的热量输送到北极和南极的一个重要环流。先前的研究表明, 在太平洋年代际涛动的正相位阶段, 哈德莱环流的上升支流会增强(Fu等, 2006; Seidel等, 2007)。这可能会导致北极和南极上方200hPa处的温度升高。此外, 赤道东太平洋海温与布鲁尔-多普森环流强度之间呈正相关关系(Rao等, 2019)。在太平洋年代际涛动的暖相位阶段, 布鲁尔-多普森环流增强可能与臭氧浓度增加有关, 而臭氧浓度的增加可导致南北极200hPa的温度升高。

3.2.2 第三极200hPa温度和太平洋年代际涛动的耦合变化

以上结果表明, 低纬度地区的加热, 特别是第三极和热带太平洋的升温, 在调节北极和南极的200hPa温度方面起着重要作用。前期研究表明, 第三极升温可以加热其对流层顶, 增强的南亚高压进一步增强印度夏季风的强度(Wei等, 2015)。由于第三极的地面气候和对流层顶气候存在动力关联, 我们使用地表树轮和冰芯数据进一步重建了第三极1678年以来200hPa处的温度(网络版图S5a; 网络版表S1), 该重建资料对再分析数据的解释量达到30.9%(网络版图S5b)。更多详细信息见附录。为了研究它们在长时间尺度上的联系, 将重建的温度与现有的热带太平洋海气涛动的重建进行了对比。

我们仅选择了能够被其他独立指标验证的可靠的太平洋地区海气涛动重建资料, 可惜的是我们没有找

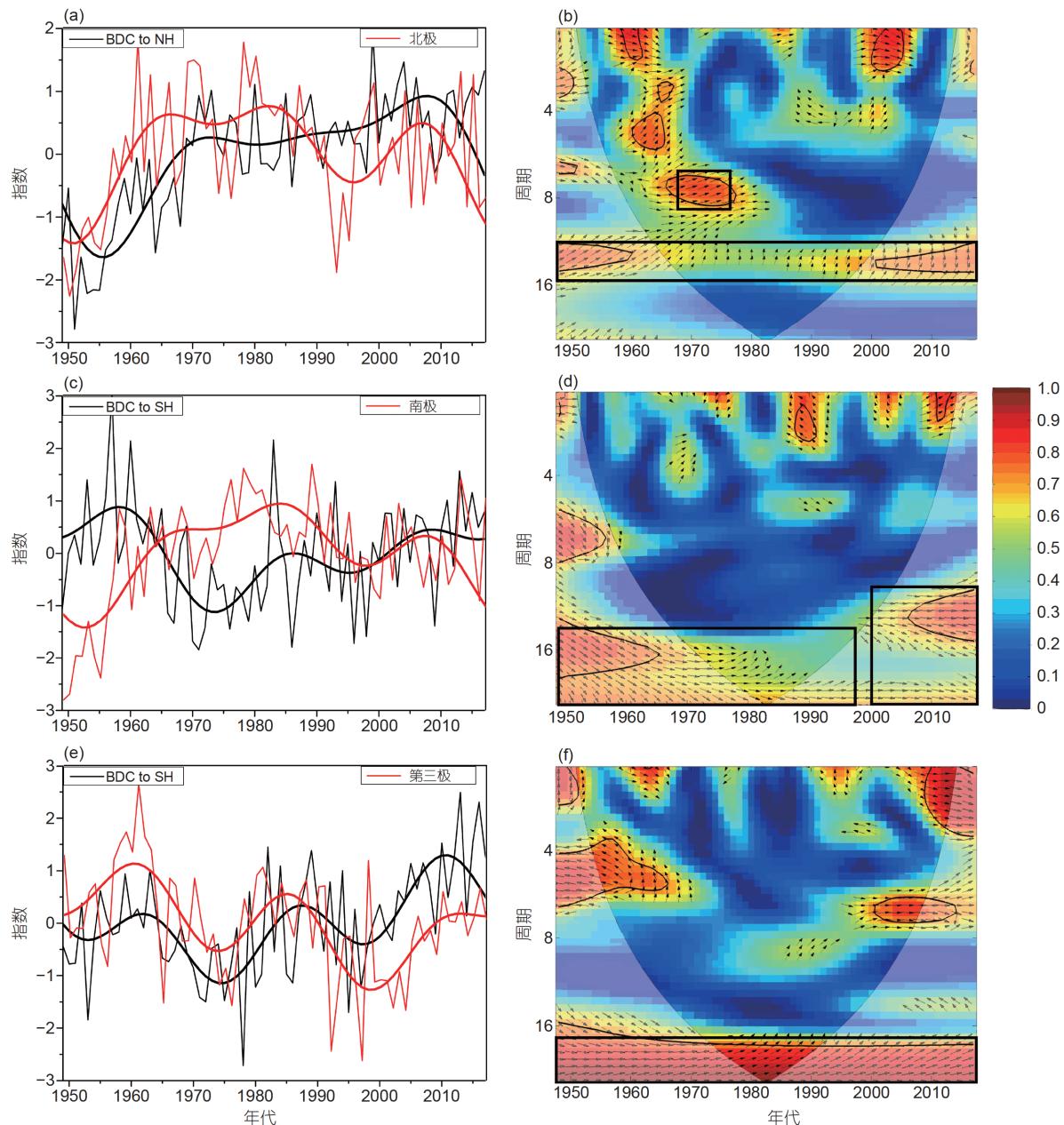


图 4 三极200hPa温度和经布鲁尔-多普森环流(BDC)向南北半球质量输送的对比与小波相干(WTC)图

((a)和(b))北半球夏季北极200hPa温度与北半球春夏季时(3~8月)赤道地区(30°S ~ 30°N)通过布鲁尔-多普森环流(BDC)到达北半球的质量传输的时间序列对比和小波相干(WTC)图; ((c))和((d))南半球夏季南极200hPa温度与南半球春夏季时(9月至次年2月)通过布鲁尔-多普森环流到达南半球的质量传输的时间序列对比和小波相干(WTC)图; ((e))和(f))北半球夏季第三极地区200hPa温度和布鲁尔-多普森环流向南半球的年质量传输的时间序列对比和小波相干(WTC)图。由于布鲁尔-多普森环流是一个相对缓慢的过程, 与BDC强度的相关性计算包括夏季前3个月。在小波相干图((b)、(d)、(f))中的等值线范围内的相关显著, 指向左(右)的箭头表示同相(反相)相关性。所有用于计算的数据都被归一化为零均值和标准差为1

到满足此要求的太平洋年代际涛动重建。我们选择了根据前期研究(Fang等, 2019b), 具有可靠年代际变化的厄尔尼诺-南方涛动(ENSO; Wilson等, 2010)(图6a)

和南半球环状模(SAM)重建(Villalba等, 2012)(图6b)。先前的研究揭示了太平洋地区多年代的气候变化, 被定义为多年代际太平洋涛动(MPO)(Fang等, 2018)。此

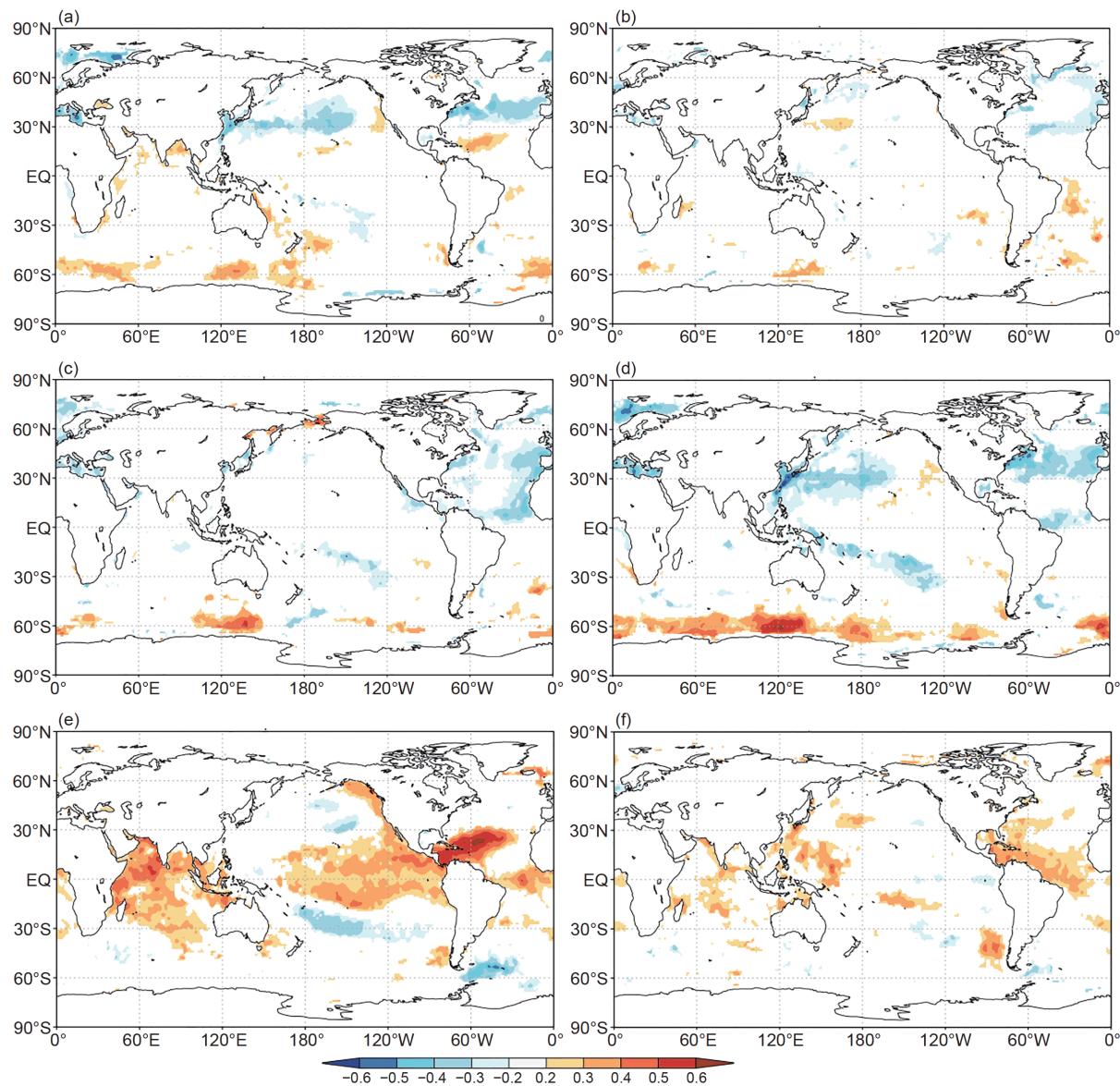


图 5 三极200hPa温度与海温相关图

前一年北半球冬季(a)和当年北半球夏季(b)的海温与北半球夏季北极200hPa处温度之间的相关性图; 前一年南半球冬季(c)和当年南半球夏季(d)的海温与南极200hPa处的温度之间的相关性图; 前一年北半球冬季(e)和当年北半球夏季的海温与第三极200hPa处的温度的相关性图

外, 我们将多年代际太平洋涛动与第三极重建的200hPa处的温度进行了比较。厄尔尼诺-南方涛动、太平洋年代际涛动和多年代际太平洋涛动有很强的相关性(Fang等, 2019b), 但它们占主导的时间尺度存在差异: 年际尺度(ENSO), 年代际尺度(IPO)和多年代际尺度(MPO)。多年代际太平洋涛动覆盖整个太平洋, 与太平洋多年代际变率(PMV)(Zhong等, 2008)和太平洋多年代际振荡不同(PMO)(Steinman等, 2015), 后两者侧

重于北部太平洋。

如图6所示, 仅在多年代时间尺度(50年以上)上, 200hPa处的温度才与重建的厄尔尼诺-南方涛动, 多年代际太平洋涛动和南半球环状模高度吻合。这种协同变化特征表明, 第三极和太平洋似乎存在耦合变暖特征。第三极200hPa的升温可能是将多年代际气候信号传送到整个太平洋地区的一个因素, 导致了前期研究揭示的环太平洋地区大尺度多年代际气候协同变化特

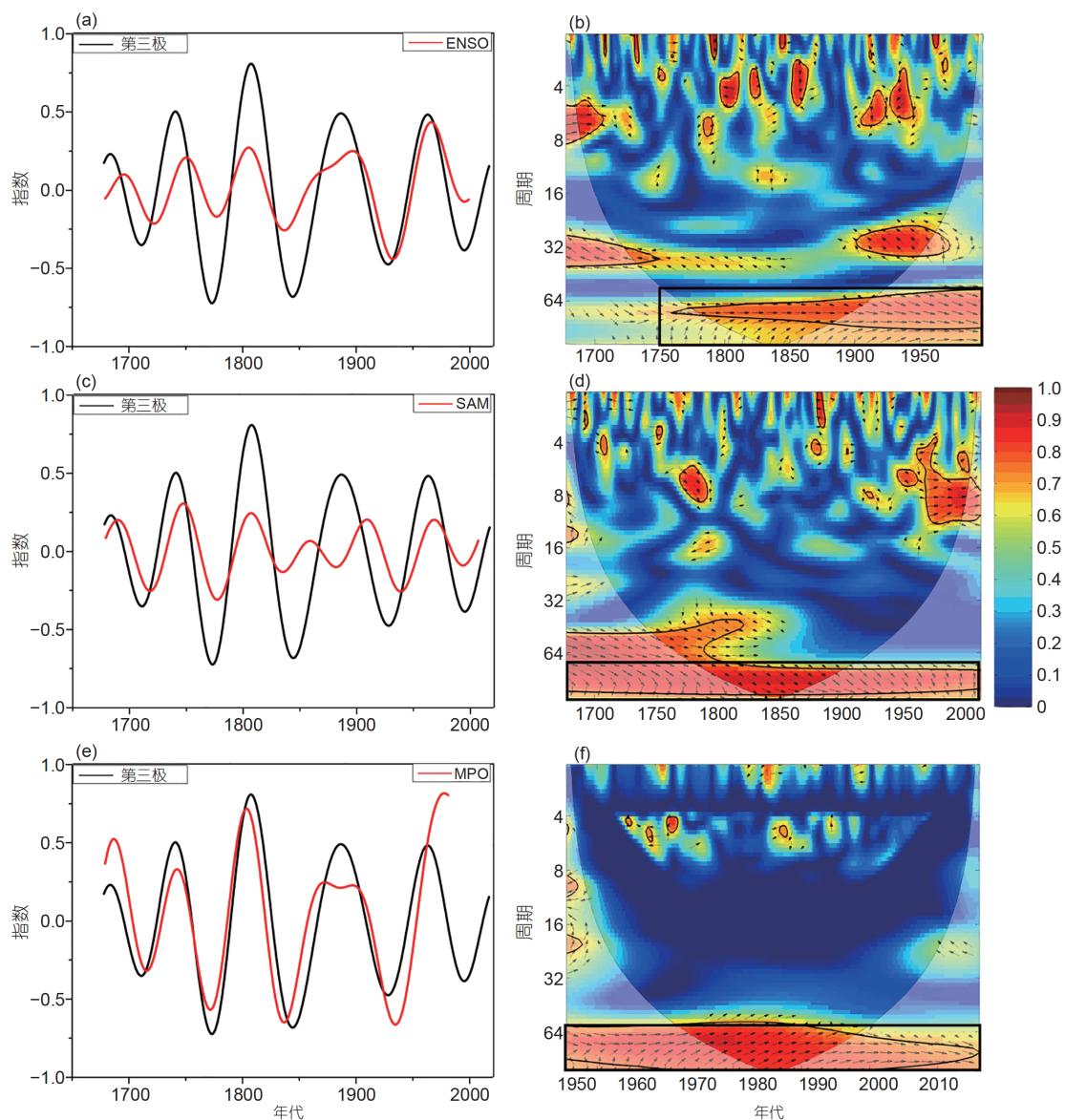


图 6 北半球夏季第三极200hPa温度的重建与((a)和(b))厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)的重建之间的比较和小波相干(WTC)图, 与((c)和(d))南半球环状模(SAM)重建, 及其与((e)和(f))多年代际太平洋涛动(MPO)重建之间的比较和小波相干图

比较是在几十年(<0.02)的时间尺度上进行的, 因为这是相关性最强的时间尺度。注意厄尔尼诺-南方涛动和南半球环状模重建与第三极温度重建之间没有重复使用的代用资料, 而多年代际太平洋涛动重建采用青藏高原的指标数据, 此外, 多年代际太平洋涛动重建仅包含多年代际变率, 而厄尔尼诺-南方涛动和南半球环状模重建则包含不同时间尺度的变率。

征(Fang等, 2018), 但是, 我们没有发现在重建的第三极200hPa温度与大西洋多年代际振荡(AMO)重建之间的显著关联特征(网络版图S6)。

模拟研究表明, 目前人为强迫的赤道东太平洋增温, 较自然强迫的中世纪气候异常时期(MCA)更为温暖(Liu等, 2013)。赤道东太平洋变暖可能与极地热传输增强有关, 这可能也是导致北极地区变暖更加明显

的一部分原因。与目前北极地区最强烈的变暖现象不同(Serreze和Barry, 2011), 在MCA期间(950~1250年), 发现北大西洋地区增温强度要高于环北极地区(Mann等, 2009; PAGES 2k Consortium, 2013; Stocker等, 2013)。此外, 第三极增温(Pepin等, 2015)可能通过增强布鲁尔-多普森环流促进南极的变暖(PAGES 2k Consortium, 2013; Wang等, 2015)。

4 结论

在各自半球的夏季, 地球200hPa的温度最高的区域集中在地球的南极、北极和第三极地区。地球三极200hPa的温度在年代际时间尺度上表现出协同变化特征。我们还发现, 第三极200hPa处的升温加强了布鲁尔-多普森环流的极向输送, 尤其是在北半球夏季向南极地区的输送。布鲁尔-多普森环流的加强会增加向极地的臭氧传输, 从而导致南北极, 特别是南极的变暖。先前的研究发现, 布鲁尔-多普森环流将低纬地区的能量输送到北极和南极, 我们的研究结果表明, 第三极变暖可能是这种联系的关键部分。我们提出了通过亚洲-澳大利亚夏季风和太平洋年代际涛动将三极200hPa的温度与地表气候联系起来的可能机制, 但这需要进一步的模拟实验。我们的研究表明, 针对三极地区进行的研究需要考虑从地表气候到对流层顶和平流层气候的气候遥相关。

致谢 感谢贡献本文所涉及代用资料和再分析数据的科学家和研究机构。

参考文献

- Blunier T, Brook E J. 2001. Timing of millennial-scale climate change in Antarctica and Greenland during the last glacial period. *Science*, 291: 109–112
- Boos W R, Kuang Z. 2010. Dominant control of the South Asian monsoon by orographic insulation versus plateau heating. *Nature*, 463: 218–222
- Brewer A W. 1945. Evidence for a world circulation provided by the measurements of helium and water vapour distribution in the stratosphere. *Q J R Meteorol Soc*, 75: 351–363
- Chen D, Xu B, Yao T, Guo Z, Cui P, Chen F, Zhang R, Zhang X, Zhang Y, Fan J. 2015. Assessment of past present and future environmental changes on the Tibetan Plateau. *Chin Sci Bull*, 60: 3025–3035
- Chen S, Wang Y, Cheng H, Edwards R L, Wang X, Kong X, Liu D. 2016. Strong coupling of Asian Monsoon and Antarctic climates on sub-orbital timescales. *Sci Rep*, 6: 32995
- Chylek P, Folland C K, Lesins G, Dubey M K. 2010. Twentieth century bipolar seesaw of the Arctic and Antarctic surface air temperatures. *Geophys Res Lett*, 37: L08703
- Ding Q, Wang B. 2005. Circumglobal teleconnection in the Northern Hemisphere summer. *J Clim*, 18: 3483–3505
- Dobson G M B. 1956. Origin and distribution of the polyatomic molecules in the atmosphere. *Proc R Soc Lond A*, 236: 187–193
- Fang K, Chen D, Guo Z, Zhao Y, Frank D, He M, Zhou F, Shi F, Seppä H, Zhang P, Neukom R. 2019a. An interdecadal climate dipole between Northeast Asia and Antarctica over the past five centuries. *Clim Dyn*, 52: 765–775
- Fang K, Chen D, Ilvonen L, Pasanen L, Holmström L, Seppä H, Huang G, Ou T, Linderholm H. 2019b. Oceanic and atmospheric modes in the Pacific and Atlantic Oceans since the Little Ice Age (LIA): Towards a synthesis. *Quat Sci Rev*, 215: 293–307
- Fang K, Cook E, Guo Z, Chen D, Ou T, Zhao Y. 2018. Synchronous multi-decadal climate variability of the whole Pacific areas revealed in tree rings since 1567. *Environ Res Lett*, 13: 024016
- Fang K, Seppä H, Chen D. 2015. Interdecadal hydroclimate teleconnections between Asia and North America over the past 600 years. *Clim Dyn*, 44: 1777–1787
- Fu Q, Johanson C M, Wallace J M, Reichler T. 2006. Enhanced mid-latitude tropospheric warming in satellite measurements. *Science*, 312: 1179
- Gao K, Duan A, Chen D, Wu G. 2019. Surface energy budget diagnosis reveals possible mechanism for the different warming rate among Earth's three poles in recent decades. *Sci Bull*, 64: 1140–1143
- Grinsted A, Moore J C, Jevrejeva S. 2004. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlin Processes Geophys*, 11: 561–566
- Henley B J, Gergis J, Karoly D J, Power S, Kennedy J, Folland C K. 2015. A tripole index for the interdecadal Pacific oscillation. *Clim Dyn*, 45: 3077–3090
- Holton J R, Haynes P H, McIntyre M E, Douglass A R, Rood R B, Pfister L. 1995. Stratosphere-troposphere exchange. *Rev Geophys*, 33: 403–439
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, Collins W, Deaven D, Gandin L, Iredell M, Saha S, White G, Woollen J, Zhu Y, Leetmaa A, Reynolds R, Chelliah M, Ebisuzaki W, Higgins W, Janowiak J, Mo K C, Ropelewski C, Wang J, Jenne R, Joseph D. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull Amer Meteorol Soc*, 77: 437–471
- Kennedy J J, Rayner N A, Smith R O, Parker D E, Saunby M. 2011. Reassessing biases and other uncertainties in sea surface temperature observations measured *in situ* since 1850: 2. Biases and homogenization. *J Geophys Res*, 116: D14104
- Kistler R, Collins W, Saha S, White G, Woollen J, Kalnay E, Chelliah M, Ebisuzaki W, Kanamitsu M, Kousky V, van den Dool H, Jenne R, Fiorino M. 2001. The NCEP-NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation. *Bull Amer Meteorol Soc*, 82: 247–267
- Liu J, Wang B, Cane M A, Yim S Y, Lee J Y. 2013. Divergent global precipitation changes induced by natural versus anthropogenic

- forcing. *Nature*, 493: 656–659
- Lu X, Zhang L, Zhao Y, Jacob D J, Hu Y, Hu L, Gao M, Liu X, Petropavlovskikh I, McClure-Begley A, Querel R. 2019. Surface and tropospheric ozone trends in the Southern Hemisphere since 1990: Possible linkages to poleward expansion of the Hadley circulation. *Sci Bull*, 64: 400–409
- Mann M E, Zhang Z, Rutherford S, Bradley R S, Hughes M K, Shindell D, Ammann C, Faluvegi G, Ni F. 2009. Global signatures and dynamical origins of the Little Ice Age and Medieval climate anomaly. *Science*, 326: 1256–1260
- Marino G, Rohling E J, Rodríguez-Sanz L, Grant K M, Heslop D, Roberts A P, Stanford J D, Yu J. 2015. Bipolar seesaw control on last interglacial sea level. *Nature*, 522: 197–201
- PAGES 2k Consortium. 2013. Continental-scale temperature variability during the past two millennia. *Nat Geosci*, 6: 339–346
- Pepin N, Bradley R, Diaz H, Baraér M, Caceres E, Forsythe N, Fowler H, Greenwood G, Hashmi M, Liu X. 2015. Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. *Nat Clim Chang*, 5: 424–430
- Rao J, Yu Y Y, Guo D, Shi C H, Chen D, Hu D Z. 2019. Evaluating the Brewer–Dobson circulation and its responses to ENSO, QBO, and the solar cycle in different reanalyses. *Earth Planet Phys*, 3: 1–16
- Rienecker M M, Suarez M J, Gelaro R, Todling R, Bacmeister J, Liu E, Bosilovich M G, Schubert S D, Takaes L, Kim G K, Bloom S, Chen J, Collins D, Conaty A, da Silva A, Gu W, Joiner J, Koster R D, Lucchesi R, Molod A, Owens T, Pawson S, Pegion P, Redder C R, Reichle R, Robertson F R, Ruddick A G, Sienkiewicz M, Woollen J. 2011. MERRA: NASA’s modern-era retrospective analysis for research and applications. *J Clim*, 24: 3624–3648
- Seidel D J, Fu Q, Randel W J, Reichler T J. 2007. Widening of the tropical belt in a changing climate. *Nat Geosci*, 1: 21–24
- Serreze M C, Barry R G. 2011. Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis. *Glob Planet Change*, 77: 85–96
- Sexton D M H. 2001. The effect of stratospheric ozone depletion on the phase of the Antarctic Oscillation. *Geophys Res Lett*, 28: 3697–3700
- Shi F, Ge Q, Yang B, Li J, Yang F, Ljungqvist F C, Solomina O, Nakatsuka T, Wang N, Zhao S, Xu C, Fang K, Sano M, Chu G, Fan Z, Gaire N P, Zafar M U. 2015. A multi-proxy reconstruction of spatial and temporal variations in Asian summer temperatures over the last millennium. *Clim Change*, 131: 663–676
- Steinman B A, Mann M E, Miller S K. 2015. Atlantic and Pacific multidecadal oscillations and Northern Hemisphere temperatures. *Science*, 347: 988–991
- Stocker T F, Qin D, Plattner G, Tignor M, Allen S, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley P. 2013. Climate change 2013. In: The Physical Science Basis Intergovernmental Panel on Climate Change Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report (AR5). New York: Cambridge University Press
- Tang H, Micheels A, Eronen J, Fortelius M. 2011. Regional climate model experiments to investigate the Asian monsoon in the Late Miocene. *Clim Past*, 7: 847–868
- Torrence C, Compo G P. 1998. A practical guide to wavelet analysis. *Bull Amer Meteorol Soc*, 79: 61–78
- van der A R J, Allaart M A F, Eskes H J. 2015. Extended and refined multi sensor reanalysis of total ozone for the period 1970–2012. *Atmos Meas Tech*, 8: 3021–3035
- Villalba R, Lara A, Masiokas M H, Urrutia R, Luckman B H, Marshall G J, Mundo I A, Christie D A, Cook E R, Neukom R, Allen K, Fenwick P, Boninsegna J A, Suru A M, Morales M S, Araneo D, Palmer J G, Cuq E, Aravena J C, Holz A, LeQuesne C. 2012. Unusual Southern Hemisphere tree growth patterns induced by changes in the Southern Annular Mode. *Nat Geosci*, 5: 793–798
- Wang Z, Zhang X, Guan Z, Sun B, Yang X, Liu C. 2015. An atmospheric origin of the multi-decadal bipolar seesaw. *Sci Rep*, 5: 8909
- Wei W, Zhang R, Wen M, Kim B J, Nam J C. 2015. Interannual variation of the South Asian high and its relation with Indian and East Asian summer monsoon rainfall. *J Clim*, 28: 2623–2634
- Wilson R, Cook E, D’Arrigo R, Riedwyl N, Evans M N, Tudhope A, Allan R. 2010. Reconstructing ENSO: The influence of method, proxy data, climate forcing and teleconnections. *J Quat Sci*, 25: 62–78
- Wu G, Liu Y, Wang T, Wan R, Liu X, Li W, Wang Z, Zhang Q, Duan A, Liang X. 2007. The influence of mechanical and thermal forcing by the Tibetan Plateau on Asian climate. *J Hydrometeorol*, 8: 770–789
- Yao T, Xue Y, Chen D, Chen F, Thompson L, Cui P, Koike T, Lau W K M, Lettenmaier D, Mosbrugger V, Zhang R, Xu B, Dozier J, Gillespie T, Gu Y, Kang S, Piao S, Sugimoto S, Ueno K, Wang L, Wang W, Zhang F, Sheng Y, Guo W, Ailikun W, Yang X, Ma Y, Shen S S P, Su Z, Chen F, Liang S, Liu Y, Singh V P, Yang K, Yang D, Zhao X, Qian Y, Zhang Y, Li Q. 2019. Recent Third Pole’s rapid warming accompanies cryospheric melt and water cycle intensification and interactions between monsoon and environment: Multi-disciplinary approach with observation modeling and analysis. *Bull Amer Meteorol Soc*, 100: 423–444
- Zhang Y, Zou T, Xue Y. 2019. An Arctic-Tibetan connection on subseasonal to seasonal time scale. *Geophys Res Lett*, 46: 2790–2799
- Zhao P, Yang S, Wang H, Zhang Q. 2011. Interdecadal relationships between the Asian-Pacific Oscillation and summer climate anomalies over Asia North Pacific and North America during a recent 100 years. *J Clim*, 24: 4793–4799

(责任编辑: 赵艳)