

李刚, 李崇银, 谭言科, 等. 2013. 南太平洋海温异常及其气候影响的研究进展 [J]. 气候与环境研究, 18 (4): 539–550. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2013.11153. Li Gang, Li Chongyin, Tan Yanke, et al. 2013. Advances in research on South Pacific Sea temperature anomaly and its impact on climate variability [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (4): 539–550.

南太平洋海温异常及其气候影响的研究进展

李刚¹ 李崇银^{1,2} 谭言科¹ 白涛³

¹ 中国人民解放军理工大学气象海洋学院, 南京 211101

² 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

³ 中国人民解放军 94162 部队, 西安 710614

摘 要 随着海温观测资料的增多和资料同化技术的发展, 南太平洋海温资料质量有了显著提高, 这使得南太平洋逐渐成为科学家在研究海气相互作用及影响气候变化的因子时所关注的重点区域。文章系统地介绍了国内外对南太平洋海温(表层和次表层海温)异常变化特征的研究, 涉及南太平洋海温异常年际和年代际变化的主要模态及特征, 南太平洋海温异常与 El Niño–Southern Oscillation、南极环状模的关系, 以及南太平洋海温异常变化对大气环流和天气气候的影响(包括南太平洋对南美、东亚及中国地区天气气候的影响)等。在回顾已有研究成果的基础上, 提出了一些需要深入研究解决的主要问题, 以期引起大家对南太平洋海温异常变化研究的关注, 促进对南太平洋海温异常及其气候影响的研究和深刻认识。

关键词 南太平洋 海温异常 气候变化 研究进展

文章编号 1006–9585 (2013) 04–0539–12

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.11153

Advances in Research on South Pacific Sea Temperature Anomaly and Its Impact on Climate Variability

LI Gang¹, LI Chongyin^{1,2}, TAN Yanke¹, and BAI Tao³

¹ Institute of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101

² State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Science and Geophysical Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

³ No. 94162 Troops of PLA, Xi'an 710614

Abstract With an increasing number of ocean observations and the development of data assimilation models, the quality of the sea temperature data for the South Pacific has improved greatly. Therefore, many studies of large-scale extratropical ocean–atmosphere interaction and its impact on climate variability have focused on the South Pacific. This review introduces systematic studies of the characteristics of the variability of the South Pacific sea temperature (surface and subsurface sea temperature) anomaly, including the interannual and interdecadal variation in the leading mode, the characteristics of the South Pacific, and the relationships among the South Pacific sea temperature anomaly, El Niño–Southern Oscillation, and Southern Annular Mode. It also considers the impact of the South Pacific sea temperature anomalies on the atmospheric circulation and the impact of the South Pacific on the weather and climate in South America, eastern Asia, and China. On the basis of a review of former studies, important questions that require further study in the future are proposed in order to increase scientists' understanding of the importance of studies of the South Pacific sea temperature anomaly, which can promote scientific progress regarding the South Pacific sea temperature and its climatic impact.

收稿日期 2011–09–25 收到, 2012–12–26 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2010CB950400

作者简介 李刚, 男, 1983 年出生, 博士, 主要从事南太平洋海气相互作用相关研究。E-mail: ligang.1983@163.com

Keywords South Pacific, Sea temperature anomaly, Climate change, Advances in study

1 引言

北太平洋拥有高质量的海温观测资料,这使得它成为科学家在研究海气相互作用时所重点关注的区域之一。Namias (1972) 首先使用的 20 年 (1947~1966 年) 的海温观测资料研究了赤道以北的太平洋地区的年代际气候变化,结果表明东、西太平洋海表温度异常存在着反相变化特征,他还发现海温异常的年代际信号可以通过大气遥相关作用出现在其它气象要素中。在接下来的几十年里,科学家重点研究了北太平洋海温的时空变化特征 (Zhang et al., 1997; Mantua et al., 1997; 咸鹏和李崇银, 2003; MacDonald and Case, 2005)、它对大气环流以及生态系统的影响 (Isaacs, 1976; Hare and Francis, 1995; 李崇银和咸鹏, 2003; McGowan et al., 2003; Frankignoul and Sennéchaël, 2007)、它的产生机制 (Graham, 1994; Trenberth and Hurrell, 1994) 以及它与热带太平洋之间的联系 (Deser and Blackmon, 1995; Yeh and Kirtman, 2003)。

与北太平洋相比,南太平洋地区的海温观测资料数量偏少、质量偏低,这在一定程度上阻碍了科学家对南太平洋海温异常特征的研究。众所周知,在 20 世纪 70 年代以前,人们所用的海温观测资料基本是通过船舶、浮标以及其他一些观测仪器得到的。对南太平洋来说,由于人类在南太平洋的活动明显少于在北太平洋的,这导致南太平洋海温观测资料比北太平洋的偏少,由此使得 20 世纪 70 年代以前的南太平洋海温再分析资料的质量在很大程度上取决于同化模式和插值算法的优劣程度 (Reynolds and Smith, 1994),从而可能引起海温再分析资料与真实资料之间出现较大的误差。这是导致科学家对南太平洋海温异常特征及其与大气环流和天气气候之间关系研究偏少的重要原因之一。但从 20 世纪 70 年代后期开始,随着卫星遥感海温资料的出现和资料同化技术的提高,南太平洋地区的海温资料质量有了显著提高,科学家对南太平洋海温异常变化特征及其对气候影响的研究也随之增多。

虽然南太平洋缺少长时间的高质量海温资料,

但是仍有不少学者通过各种方法和途径对南太平洋海温异常进行了研究,这在一定程度上提高了人们对南太平洋海温异常特征的认识水平。此外,人们还发现南太平洋海温与全球及区域的天气气候存在一定的联系,研究其变化规律不仅能够提高对天气气候的认知能力,还可能对气候变化做出更准确的预测。

本文就近期国内外有关南太平洋海温异常变化特征及其与天气气候关系的研究作简要综述,以期推动对南太平洋海温异常变化特征及其气候影响的研究。

2 西南、东南太平洋海温异常特征的研究

虽然从总体上看,人类在南太平洋的活动要比北太平洋的少,但就南太平洋本身来说,20 世纪人类在南太平洋地区的活动主要集中在西南太平洋 (澳大利亚—新西兰附近海域) 和东南太平洋 (秘鲁—智利沿海岸域),因此,人们在这两个地区所得到的海温资料的质量要比南太平洋其它地区的高,它们也就自然成为科学家所较早关注的南太平洋重点海域,所以早期的关于南太平洋海温异常变化特征的研究主要是针对西南太平洋和东南太平洋展开的。

2.1 关于西南太平洋海温异常的研究

在 20 世纪 90 年代中期以前,受到资料同化技术的限制,西南太平洋地区较大空间尺度的海温资料质量普遍偏低,因此,科学家对西南太平洋的研究主要局限在很小范围的海域甚至一些沿岸站点。总体上看,人们对海温变化特征及海气相互作用机理的研究偏少,其研究的一个重点是 El Niño-Southern Oscillation (ENSO) 与南太平洋副热带涡旋系统、副热带辐合带及东澳大利亚海流等海洋系统的关系 (Meyers and Donguy, 1984; Wyrski, 1984; Harris et al., 1988; Hsieh and Hamon, 1991; Bindoff and Church, 1992)。利用不同时间长度的海温观测资料 (来自浮标或海岸观测点),科学家虽然得到的结论存在一定程度的差异,但从总体上看,这些研究均认为 ENSO 信号不仅能够出现在南半球大气中 (Karoly, 1989),而且还能出现在南太平洋副热

带海洋中。例如, ENSO 不仅与副热带涡旋和辐合带的位置变化存在一定的联系, 而且还能影响局部海域的温度变化。虽然这些研究在某种程度上提高了人们对南太平洋海温异常特征的认识水平, 但这些研究有一定的局限性, 存在时间尺度偏短、空间尺度偏小以及资料质量偏低等不足, 而且最重要的是没有给出整个西南太平洋地区海温异常的时空变化特征。

20 世纪 90 年代中期以后, 随着海洋探测技术的发展和资料同化技术的提高, 人们在西南太平洋地区所得到的海温观测资料的数量和质量有了显著提高 (Holbrook, 1994; Holbrook and Bindoff, 1997)。在此基础上, 科学家对西南太平洋海温的研究逐渐由季节、年际时间尺度扩展到年代际时间尺度, 同时研究的空间范围由表层扩展到次表层。Holbrook and Bindoff (1997) 采用旋转主分量分析方法和由大约 40000 个海温探测器得到的 1955~1988 年之间的西南太平洋 450 m 以上的海温观测资料, 研究了西南太平洋海温的年际和年代变化特征, 发现西南太平洋海温异常年际模态不仅与 ENSO 存在密切关系, 而且还反映了赤道西太平洋温跃层垂直变化对超前其 3~6 个月的大气强迫的响应; 此外, 西南太平洋海表温度异常能够对 El Niño 的发生起到一定的预测作用; 对年代模态来说, 其变化不仅存在于中纬度副热带涡旋海域, 而且还存在于与南极副极地环状海流有关的模态中。进一步研究表明, 西南太平洋混合层与下层的温度异常存在反相变化特征; 其中混合层温度异常变化与太阳辐射存在密切联系, 下层的温度异常反映了温跃层垂直运动, 而温跃层垂直运动与风应力涡旋的季节性变化有关, Rossby 波可能对温跃层变化的强度有十分重要的影响 (Holbrook and Bindoff, 1999)。在发现西南太平洋表层及次表层海温异常模态与 ENSO 存在一定的超前滞后关系的基础上 (Holbrook and Bindoff, 1997), Holbrook et al. (2005) 又进一步使用扩展经验正交函数 (Extended Empirical Orthogonal Function, EEOF) 分解方法详细研究了西南太平洋表层及次表层海温异常在年际尺度上的演变特征。结果表明第 1 模态与 ENSO 的变化存在一致性, 存在准 4~4.5 年周期; 第 2 模态具有准 3~3.5 年周期, 它与副热带涡旋环流的变化存在一致性。

最近, Bijl et al. (2009) 基于塔斯曼海东部海

底沉积物重构的海温资料, 研究了西南太平洋海温在 Palaeogene 早期的演变特征, 结果表明, 5300×10^4 年以前的西南太平洋海表温度比现在热带太平洋的海温要高, 从 3600×10^4 年以前开始, 该海域的海温迅速降低, 该过程不仅与大气温室气体的浓度有关, 还可能与其它一些尚待研究的过程有关。

2.2 东南太平洋海温异常特征的研究

人们对东南太平洋海温异常变化特征的研究起源于对智利和秘鲁渔业生产的关注 (Yañez, 1991), 科学家发现东南太平洋海温异常的年际和年代际变化对渔业生产有重要的影响, 因此有必要对东南太平洋海温异常变化特征进行深入研究。与西南太平洋类似, 东南太平洋同样缺少质量高、时间长的海温观测资料。人们早期基本采用来自海岸站点的海温资料。虽然其数量偏少, 但是这在一定程度上提高了人们对东南太平洋海温异常变化特征的认识水平。

研究表明, 除东南太平洋的表层海温异常存在一定的年际变化特征外, 东南太平洋温跃层及下均匀层都存在显著的增暖现象, 尤其在中纬度地区 (28°S) 1600 m 深处的海温增暖较显著, 这可能是由于等温层的下移和 100~200 km 深处水团的南移造成的, 在较高纬度海区 (43°S) 800 m 深处的海温增暖较显著, 这被认为与近几十年较暖的南极副极地模态水的产生有关 (Shaffer et al., 2000)。

Kim et al. (2002) 利用智利中部海岸大陆架的沉积物重构了海温资料, 并使用该资料研究了在过去的 3.3×10^4 年中东南太平洋海表温度的变化趋势, 结果表明现在的东南太平洋海表温度比末次冰期大约高 3.4°C , 并发现南半球西风带的位置与海表温度的变化存在密切联系。

Montecinos et al. (2003) 采用秘鲁和智利沿岸的 9 个海温观测站点的海温观测资料和全球尺度的海温再分析资料研究了南美西岸海表温度的年际和年代际变化特征, 其研究结果表明东南太平洋海温异常的低频变化模态主要由与 ENSO 有关的年际模和太平洋海盆尺度的年代际模组成。其中与 ENSO 有关的年际变化特征在热带地区最显著。在热带地区, 年代际方差大约是年际方差的 1/3; 在中纬度地区 (36°S), 两者基本持平。此外, 他们还发现东南太平洋海温异常变化特征与东北太平洋海温异常的变化特征存在一定的相似性 (Lluch-Cota et al., 2001), 其原因尚不清楚。

从以上对西南和东南太平洋的研究可看出,随着海温观测资料的丰富、资料同化技术的改进和资料重构技术的提高,科学家对海温异常的研究逐渐深入,其研究的时空尺度变大,使人们由局部到整体对西南和东南太平洋的海温异常时空变化特征及其与 ENSO 的关系有了良好的认知。虽然结果有一定的差异,但这些研究均直接或间接表明西南和东南太平洋均存在一定程度的增暖趋势和年际变化特征,而且海温异常变化特征与 ENSO 存在一定的联系。此外,以上研究虽然取得了一定的成果,但是,科学家对这两个区域的海气相互作用过程以及海温异常变化对天气气候影响的研究相对偏少,而随着人们对全球变暖及气候变化对人类影响程度的关注,这两方面正在成为科学家研究的重点。考虑到大尺度海气相互作用及其对气候的影响,如果仅把研究局限于西南和东南太平洋地区显然是不够的,这就要求我们对整个南太平洋的海温异常变化特征及其对大气环流和天气气候的影响进行深入研究。

3 南太平洋全域海温异常变化特征及其影响因子的研究

我们知道,从 20 世纪 70 年代末开始,基于卫星的海温遥感资料开始出现,尤其是从 20 世纪 90 年代开始,由于人们加大了对海洋进行观测的力度,得到了密度大、质量高的海温观测资料,此外,资料同化模式技术日益成熟,这几方面共同使得南太平洋海温再分析资料的质量有了显著提高。与此同时,科学家对南太平洋全域海温异常特征的研究逐步开展起来。

3.1 南太平洋海温异常传播特征的研究

研究表明,海温异常信号具有一定的传播特征。对北太平洋而言,其海温异常主要通过海洋或大气桥的作用与热带海温异常形成遥相关关系。其中的一种重要观点认为中纬度潜沉海区的海温异常信号可以通过等密度面的海洋平流传输到热带地区(Gu and Philander, 1997; Zhang and Liu, 1999),但是这种信号也可能受到北赤道流的阻挡,只能向南传播至 18°N 附近(王东晓和刘征宇, 2000)。而 Lysne et al. (1997) 和 Pierce et al. (2000) 的研究表明在年代际时间尺度上,热带太平洋和北太平洋可能是通过 Rossby 波和 Kelvin 沿岸波联系在一起

的。此外,有研究表明在太平洋存在一个“年代际通道”(Interdecadal Pathway, IP)(Zhou et al., 2007),这个年代际通道既有最强的海温异常年代际变化信号,又与太平洋年代际振荡(Pacific Decadal Oscillation, PDO)(Mantua et al., 1997)和东亚冬季风等气候态有密切联系,它甚至也可被视为联系中纬度太平洋和热带太平洋海气相互作用的“桥梁”。

相比较而言,南太平洋在年代际尺度上可能与热带太平洋有着更加紧密的联系,它是组成整个太平洋年代际信号经向通道的重要组成部分。热带西太平洋的年代际海温异常信号主要来自热带南太平洋,而这种信号可能是通过温跃层传播的(王东晓和刘征宇, 2000)。

需要指出的是,20 世纪 90 年代以来,“类 ENSO 模”是除 ENSO 以外,科学家所发现的位于太平洋的一个重要的模态(Zhang et al., 1997; Garreaud and Battisti, 1999)。在南太平洋地区,“类 ENSO 模”具有一定的传播特征(Garraud and Battisti, 1999)。观测研究表明,赤道东太平洋的正海温异常将通过大气遥相关作用在南太平洋激发出一个异常气旋,该气旋北侧的纬向风异常存在较大的经向梯度,这将导致热带南太平洋西部出现一个“东南—西北”向的负风应力涡旋,该涡旋将引起海洋温跃层变浅,并进一步通过海洋过程在海洋次表层产生负海温异常,随后次表层的负海温异常信号将向西北移动[见 Luo and Yamagata (2001) 图 12],到达赤道中西太平洋(这种运动可能受 Rossby 波传播的影响,也可能受平流的影响),在到达赤道区域后负海温异常随异常东风驱动的 Kelvin 波沿赤道向东传播,最终到达赤道东太平洋表层,取代原来的正海温异常,该负海温异常可能将通过热带海气相互作用过程进一步发展[见 Luo and Yamagata (2001) 图 12]。接下来, Niño3 区的负海温异常将通过南半球的大气遥相关在热带南太平洋西部激发出正风应力涡旋,引起温跃层加深,海洋次表层将出现正海温异常[见 Luo and Yamagata (2001) 图 12]。相似但符号相反的演变过程将可以连续进行(Luo and Yamagata, 2001)。以上观测结果通过数值模式进一步进行研究,研究结果表明,在年代尺度上,赤道太平洋的暖(冷)海温异常强迫将在南太平洋激发出一个“东南—西北”向的异常气旋(反气旋)环流,使得该异常环流的东北边界产生异常 Ekman

上升(下沉)流,从而导致海洋温跃层变浅(深),南太平洋次表层不仅为热带太平洋提供能量,而且还吸收热带太平洋释放出的能量,从而引起“类 ENSO 模”的变化(Luo et al., 2003)。

科学家在研究 ENSO 的发生机制时已明确指出,西太平洋暖池次表层海温异常及其向东传播与 ENSO 的发生密切相关,正(负)次表层海温异常的东传直接导致 El Niño (La Niña) 的发生,而与其相对应的负(正)次表层海温异常沿 10°N 和 10°S 的西传,又为下一次 La Niña (El Niño) 事件的发生准备了条件(Li et al., 1999; 李崇银, 2002)。Giese et al. (2002) 通过数值模拟的方法也得到类似的结果,他们发现 1976 年前后热带太平洋海表温度从冷至暖的突变现象源自热带南太平洋次表层海温异常,这种海温异常首先沿着 10°S 传播到西边界,然后向北传向赤道,最后沿赤道向东传播到 140°W 地区达到海洋表层。

最近的研究表明,除了次表层海温可能是联系南太平洋和热带太平洋的“纽带”以外,南太平洋表层海温也可能是连接南太平洋和热带太平洋的“纽带”。Wang et al. (2007) 的研究表明,南太平洋海表温度异常的年代际信号具有显著的传播特征,它首先从副热带东南太平洋向南太平洋西边界传播,然后向北移动到赤道,最终到达赤道中太平洋。他们认为 Rossby 波可能是其重要的传播机制之一。

从以上的研究可看出,观测分析和数值模拟均表明,南太平洋表层和次表层海温异常信号首先向西传播,然后北传,最后出现在热带太平洋。但是,对于它们的传播时间,不同的研究给出的结果并不一致。Luo and Yamagata (2001) 认为潜沉的海温异常信号需要 8~9 年传播到赤道西、中太平洋,然后再需要 3 年的时间沿赤道向东传播至热带东太平洋东岸;而 Luo et al. (2005) 认为副热带南太平洋海温异常传播到赤道西太平洋则需要 6~12 年的时间;Wang et al. (2007) 则认为副热带东南太平洋的海表温度异常大约需 8 年时间传播到热带太平洋。

海温异常信号由太平洋中高纬向热带地区的传播对于局地海气相互作用有着重要的影响。一方面海温异常信号传播可以改变海洋热含量的分布,从而影响海洋对大气的加热,并进一步引起海气相互作用的变化,这可能造成局地的天气气候发生一定程度的变化;另外,这种海温异常信号的传播可

能引起海洋内部的热力学及动力学过程发生一定程度的变化,这种变化可能导致海流、海洋涡旋等海洋内部系统发生改变。对于以上两方面,目前尚缺乏系统的论述,而对这些问题的回答有助于今后开展气候变化及其海洋变化的预报。

3.2 ENSO 与南太平洋海温异常的关系

以上研究表明南太平洋的海温异常信号可以传播至热带太平洋,这表明南太平洋可能会影响热带太平洋的海气耦合过程。那么,ENSO 作为全球海气系统中最强的年际信号,它对南太平洋是否有影响?影响程度如何?这些都是亟待回答的问题。最近,关于南太平洋全域海温异常变化特征及其与 ENSO 关系的研究逐渐增多。许多学者的研究结果表明,ENSO 是南太平洋海温异常变化的重要影响因子,它主要是通过改变海表热通量来引起南太平洋海温异常变化的。与北太平洋相比,ENSO 对南太平洋的影响更加直接和显著(Schneider and Cornuelle, 2005)。Garreaud and Battisti (1999) 将 Zhang et al. (1997) 的研究扩展到南半球,他们的研究表明,与 ENSO 有关的南太平洋海温异常模态和与“类 ENSO 模”有关的南太平洋海温异常模态在空间分布特征上存在一定的相似性,并发现这两类海温异常模态的变化可能是由与大气环流有关的表面热通量引起的。Li (2000) 通过海气耦合模式研究了热带太平洋与南太平洋中高纬度海表温度异常变化的关系,结果表明,南太平洋中高纬度的海表温度异常变化可能是由 ENSO 通过“大气桥”作用引起的海气界面热通量交换导致的。Kidson and Renwick (2002) 的研究表明,大尺度南太平洋海表温度异常的年际变化可能主要是由 ENSO 驱动的,并且它对季节尺度的气候预测并无显著的意义。Lee et al. (2010) 发现在 2009/2010 年南半球春夏之交出现的南太平洋中部海域的海温增暖现象可能是由 2009/2010 年的强 El Niño 事件引起的。此外,Wang et al. (2007) 认为起源于南太平洋海温异常的年代际模可能主要是由热带太平洋的年际变化引起的。

以上研究表明 ENSO 对南太平洋有重要的影响,ENSO 主要是通过“大气桥”来改变海表热通量,从而引起海表温度发生变化。一个重要的问题是,ENSO 能否通过“海洋桥”来影响南太平洋海温异常的变化?影响程度如何?此外,需要更加关注的是,关于不同类型 ENSO 的研究是近几年非常

热门的主题。事实上,早期的研究已经表明 ENSO 主要包括两类,一类主要在赤道太平洋东部(秘鲁沿岸)增暖然后向西扩展,另一类主要在赤道中太平洋出现大范围增暖并向东扩展(Rasmusson and Wallace, 1983; Fu et al., 1986; Wang, 1995; 李崇银, 2000)。那么这两类 ENSO 对南太平洋海温异常变化的影响如何?有何异同点?对这些问题进行深入研究有助于我们详细了解南太平洋海气耦合过程的机理及其气候影响。

4 南太平洋海温异常年代际变化特征的研究

以上我们初步论述了 ENSO 与南太平洋海温异常的关系。实际上,副热带太平洋的年代际尺度海温变化明显表现出某种受 ENSO 调节的规律,这在表层和次表层海温异常都有较明显的反映。虽然如此,但是副热带海温异常的年代际变化也有其自身的规律,而且它也可能对 ENSO 有显著的影响。因此,有必要对海温异常的年代际变化特征进行深入研究。

众所周知,太平洋年代变化(Pacific Decadal Variability, PDV)的空间分布形态与 ENSO 存在一定的相似性,但它在热带地区的振幅偏弱,在热带外地区的振幅相对较强,此外,它在南、北太平洋的分布特征存在一定的对称性(Folland et al., 2002),其起源是气候学中的一个十分重要的问题,至今仍无明确的结论。在过去的研究中,关于其起源存在多种假设,最主要的有三种:(1)热带太平洋驱动的结果;(2)热带外北太平洋驱动的结果;(3)热带—热带外相互作用的结果。人们针对这三种假设进行了大量的研究(Latif and Barnett, 1994; Barnett et al., 1999; Newman et al., 2003)。

研究表明, PDO (即“热带外北太平洋”驱动观点)似乎是一个更可靠的驱动 PDV 的机制,其时空特征均与 PDV 极为相似(Folland et al., 2002),但是 PDO 通常是指对去除了线性趋势后的 20°N 以北的太平洋海表温度异常进行 EOF 分解所得的第 1 模态,它本质上反映的是北太平洋海温异常的年代际变化特征,而不是整个太平洋年代变化特征;此外,它也并不能完全地反映 PDV 位于南、北半球的海温异常模态关于赤道的对称性。所以这种假设存在一定的局限性。此外,虽然南太平洋海温观测

资料稀少,但根据科学家对南太平洋已有观测资料进行研究的结果,副热带南太平洋可能对太平洋年代际变化具有一定的影响(White and Cayan, 1998)。

虽然科学家对太平洋年代际变化特征的认识有了一定程度提高,但仍有一部分问题尚待解决,例如,副热带南太平洋海温异常的年代际变化是否与北太平洋的变化同步?南太平洋海温异常年代际变化是周期性的还是仅出现在某一段时间?

基于以上问题, Linsley et al. (2002) 使用取自位于南太平洋拉汤罗加岛的珊瑚资料重构了 271 年(1726~1997 年)的海温资料,研究了南太平洋海温异常的年代际变化特征。研究表明,从 1726 年至今,南太平洋存在着显著的年代际变化特征。同时,他们还将南太平洋海温异常年代际变化与北太平洋的做了比较,发现两者变化存在一定的相似性,这表明南、北太平洋海温异常变化在年代际时间尺度上存在同步性,即太平洋年代际变化在南、北太平洋具有对称性。他们推测这种对称性表明热带太平洋的强迫作用可能是太平洋年代际变化的重要影响因素之一。

在已有的研究中, PDV 在北太平洋地区通常被称为 PDO,而在整个太平洋地区它通常被称为 IPO (Interdecadal Pacific Oscillation, IPO), IPO 对南太平洋气候尤其是南太平洋辐合带具有显著影响(Salinger et al., 2001; Folland et al., 2003)。但现有的海温观测资料并不能确定 IPO 的时间尺度。

为深入研究上述问题, Linsley et al. (2004) 采用拉汤罗加岛和斐济的珊瑚资料重构了长时间序列的海温资料。分析结果表明, 20 世纪年代际太平洋振荡(IPO)位于南太平洋的时空分布特征均比 19 世纪中期时的显著;此外,观测结果表明, IPO 位于南太平洋的空间模态在过去的 300 年里发生了一定程度的变化,其中在 1880 年发生了较为显著的变化。

以上研究虽然研究了南太平洋海温异常的年代际特征,但是并没有确定其年代际周期。Wang et al. (2007) 将南太平洋(25°S~40°S, 110°W~160°W)区域和(45°S~60°S, 110°W~150°W)区域的标准化海表温度距平之差定义为南太平洋年代际变化指数,发现南太平洋海表温度存在显著的年代际变化特征,而且该特征还存在一定的季节锁相特征,在北半球冬季最显著,其周期大约为 15

年。

需要重点关注的是, Shakun and Shaman (2009) 参照 Mantua et al. (1997) 定义 PDO 的方法, 对 20°S 以南的百年时间尺度 (1901~2007 年) 的南太平洋海表温度异常进行 EOF 分解, 并将其第 1 模态定义为南半球 PDO (Southern Hemisphere PDO, SPDO), 首次提出了 SPDO 的概念。他们的研究表明, SPDO 和 PDO 存在很高的同时相关关系[见 Shakun and Shaman (2009) 图 1], 两者原始序列相关系数为 0.38 (通过 99% 信度检验), 而对两者进行 7 年低通滤波后, 两者的相关系数为 0.59, 而且 SPDO 的空间结构与北太平洋 PDO 存在很好的对应特征[见 Shakun and Shaman (2009) 图 2], 两者在 7 年低通滤波前的相关系数为 0.75, 而 7 年低通滤波后相关系数增至 0.87。这表明南、北太平洋的年代际变化存在很高的相似性。为了进一步表明 ENSO 与热带外太平洋海温异常年代际变化的关系, 他们进一步通过一个一阶自回归模型 (Newman et al., 2003) 研究发现, 太平洋年代际变化可能是热带太平洋 (ENSO) 强迫的结果[见 Shakun and Shaman (2009) 图 4]。

通过以上的研究, 我们可以看出, ENSO 与热带外南太平洋海温异常的年代际变化存在密切的联系。特别需要指出的是, 根据 Shakun and Shaman (2009) 的研究结果, 我们可知, 热带外太平洋海温异常的年代际变化可能是 ENSO 驱动的结果, 而且南、北太平洋的年代际变化存在很高的相似性。那么这是否意味着南、北太平洋海温异常的年代际变化对大气及天气气候的影响也存在很高的相似性? 这是需要进一步研究的重要问题之一。

5 南太平洋海温异常与南极环状模关系的研究

以上的研究表明 ENSO 与南太平洋海温异常变化之间存在显著的关系。对南半球来说, 除 ENSO 外, 南极环状模也是一个非常重要的气候态, 它对南半球的海气系统和气候同样有显著的影响。实际上, 早在 20 世纪 30 年代, Walker and Bliss (1932) 提出著名的三大涛动, 即北大西洋涛动、北太平洋涛动和南方涛动。这些大气模态的发现及其与气候关系的研究成为了大气环流气候学研究中的一个重要里程碑。除了这三大涛动, 大气还存在着北极

涛动和南极涛动 (Kidson, 1975; Gong and Wang, 1999)。南极涛动又称为南极环状模 (Thompson and Lorenz, 2000), 南极环状模被认为是对南极涛动的修正, 它是南半球热带外地区在半球尺度上最显著的大气环流变化模态。

观测事实和数值模拟均表明南极环状模与南半球海温异常变化存在密切的联系。南极环状模可能是影响南半球大尺度海温异常变化的重要因子之一, 但关于南太平洋海温异常和南极环状模关系的研究相对还不是很多。

Mo (2000) 的研究表明, 南极环状模的减弱与南太平洋东部海表温度的升高是对应的。Hall and Visbeck (2002) 通过数值模拟发现, 南极环状模的位相变化可以引起南半球西风强度和极向热量输送的改变。Lovenduski and Gruber (2005) 的研究表明, 南极环状模处于正位相时, 南极极地附近的西风异常加强, 这一地区的海温异常强度减弱而向赤道的 Ekman 漂流加强。南极环状模与南太平洋中部的海温异常存在显著负相关, 它在大陆沿岸有小范围的正相关区。

其它一些观测研究表明, 当南极环状模处于正位相时, 30°S~40°S 的海域存在暖海温异常, 而 50°S~60°S 的海域存在冷海温异常, 而在南太平洋 (50°S, 130°W) 海域的冷海温异常显著增强 (Sen Gupta and England, 2006); 此外, 数值模拟结果不仅表明海温异常对南极环状模的响应表现的比观察的要更加纬向对称, 而且进一步证实了南极环状模对南半球海温异常的影响 (Hall and Visbeck, 2002)。Meredith et al. (2004) 以及 Meredith and Hogg (2006) 认为南极环状模是通过德雷克海峡来影响海流输送, 它还可驱动南极绕极流附近的动能变化。Lefebvre et al. (2004) 证实南极环状模可以影响南极附近的海冰的分布范围。Verdy et al. (2006) 的研究表明南极绕极流附近的海温异常变化与 Ekman 热通量和表面热通量的变化存在一致性, 而 Ekman 热通量和表面热通量与南极环状模和 ENSO 存在密切的联系。

从以上研究可以看出, 科学家对南太平洋海温异常与南极环状模关系的研究远没有与 ENSO 的研究深入。尽管如此, 这些研究仍表明, 南极环状模与南太平洋海温异常存在一定的联系, 南极环状模可能对南太平洋局地海温异常的影响更加显著, 但是这种影响需要进一步详细验证。另外的一个重要

问题是, 南极环状模与南太平洋次表层海温异常的关系也是需要加强研究的。

6 南太平洋海温异常对天气气候的影响

以上我们总结了科学家对南太平洋海温异常变化特征的研究及其与 ENSO 和南极环状模的关系。研究海气相互作用的一个重要目的是揭示它对气候变化的影响。但关于南太平洋海温异常变化对天气气候影响的研究相对偏少, 一方面可能是由于人们对南太平洋海温异常研究偏少 (相对北太平洋), 另一方面可能是早期人类在南太平洋地区的活动远没有北太平洋地区的多。虽然如此, 但随着海温资料质量的提高以及全球化程度的日益发展, 有不少学者对南太平洋海温异常与天气气候的关系进行了研究。结果表明, 南太平洋海温异常不仅与南美的天气气候存在一定的关系 (Barros and Silvestri, 2002), 而且还与东亚尤其是中国的天气气候存在密切的联系。

从全球范围来看, 南、北半球存在相互作用。这种相互作用可能是南 (北) 半球海气系统影响北 (南) 半球气候变化的重要途径之一。Garreaud and Battisti (1999) 的研究表明 ENSO 及北半球 PDO 对南半球的大气环流有明显的影响, 而宋洁和李崇银 (2009) 以及 Song et al. (2009) 的研究又表明南极环状模对北半球大气环流也存在显著影响。前面我们提到, 南极环状模和南太平洋海温异常变化存在一定的联系。南太平洋海温异常能否通过影响南极环状模进而影响东亚甚至是中国的天气气候? 如果可以, 是通过何种途径影响的? 这都是需要解决的问题。需要指出的是, 前人已做过关于南极环状模影响东亚和中国天气气候的讨论 (范可和王会军, 2006)。南极环状模可以通过两个经向遥相关, 即欧亚经向遥相关和太平洋型遥相关, 来影响华北的沙尘天气 (Fan and Wang, 2004); 此外, 南极环状模的信号可以通过海洋性大陆的对流活动和太平洋—东亚型波列来影响华北夏季降水 (Wang and Fan, 2005; Sun et al., 2009) 和西北太平洋的台风活动 (王会军和范可, 2006)。因此, 研究南太平洋海温异常如何通过南极环状模来进一步影响东亚和中国天气气候是非常有意义的。

近几年, 关于南太平洋海温异常与中国天气气

候关系的研究逐渐增多。刘舸等 (2008) 研究了澳大利亚东侧环流及局地海温异常与长江中下游夏季旱涝的关系。其研究结果表明, 当澳大利亚东侧局地海表温度偏高 (低) 时, 对应澳大利亚东侧位势高度偏高 (低), 同时, 南海地区海表温度易于偏高 (低), 使得西太平洋副高较强并偏南西伸 (较弱并偏东偏北), 从而造成长江中下游降水偏多 (少)。孙密娜等 (2010) 的研究结果表明, 6~8 月南太平洋海表温度出现西低 (高) 东高 (低) 型分布时, 我国华北地区夏季降水偏少 (多)。周波涛 (2011) 认为冬季澳洲东侧的海温异常可以通过两种途径来影响长江流域夏季降水, 一是海温异常的持续性通过南北半球遥相关来影响降水, 二是通过与澳洲东侧海温异常相关的西南印度洋海温异常来影响华北降水。Hsu and Chen (2011) 发现西太平洋夏季 (7~10 月) 降水在 20 世纪后半叶存在显著的 10~20 年的周期振荡特征, 这种振荡与 SPDO 的 10~20 年周期振荡存在很好的一致性, 进一步研究表明, 西南太平洋海温异常可能会导致热带西太平洋出现一个异常的准 Hadley 环流系统, 这个系统将间接的影响菲律宾海的上升运动, 从而对菲律宾、台湾及东亚地区的降水产生影响。

从以上研究可以看出, 前人对南太平洋海温异常与东亚及中国气候的关系做了一定程度的研究, 其中一个重要的机制是经向遥相关, 南太平洋可以通过这个机制来影响中国的降水。但是这种遥相关的具体过程是什么? 它是否呈现出季节演变特征? 此外, 需要指出的是, 前人在研究南太平洋和中国气候关系时, 并没有消除其他气候态 (例如: ENSO、印度洋偶极子、南极环状模等) 的影响, 这些气候态的存在可能模糊南太平洋海温异常影响中国气候的机制。因此, 需要进一步详细研究南太平洋与中国气候的关系。

7 尚待进一步研究的主要问题

从过去的研究来看, 虽然人们对南太平洋海温异常变化特征的研究有了一定程度的结果, 而且其结果也存在一定的代表性, 但是这仍不足以从整体上把握南太平洋海温异常变化的特点。另外, 与北太平洋相比, 近年来, 越来越多的研究发现 ENSO 的发生发展可能与南太平洋存在着更为紧密的关系, 而 ENSO 对全球及区域的天气气候具有十分重

要的影响, 因此, 为了更好的研究天气气候发生发展机理并对其做出可靠的预测, 我们有必要对南太平洋海温异常变化特征进行深入的研究。

(1) Yeh and Kirtman (2003) 研究表明, 北太平洋海表温度异常存在显著的年际和年代际变化, 其年际和年代际变化具有不同的时空变化特征, 而且它们各自与热带太平洋海温异常存在不同的超前滞后关系; 咸鹏和李崇银 (2003) 的研究表明, 北太平洋海表温度异常的年代际模存在着“西北—东南”向振荡和沿海盆做顺时针旋转的共存演变特征。虽然科学家对北太平洋海表温度异常进行了详细的研究, 但对南太平洋海表温度异常变化特征尚缺乏系统的研究。南太平洋 (20°S 以南) 海表温度异常的演变特征如何? 其年际和年代际变化的时空特征与热带太平洋的关系如何? 对这些问题的研究有助于我们深入了解南太平洋海表温度的变化特征。

(2) 与 Li et al. (1999) 的研究结果类似, 巢清尘和巢纪平 (2001) 认为热带西太平洋和东印度洋的次表层海温异常对 ENSO 的发展具有重要的影响; Sugimoto et al. (2003) 发现北太平洋次表层海温异常存在中北太平洋副极地模和东北太平洋副热带模, 它们具有不同的传播特征; 吕俊梅等 (2005) 的研究认为, 在 PDO 的不同背景下, ENSO 在表层及次表层海温异常具有不同的循环特征; Chen et al. (2010) 也发现当 ENSO 处于不同的位相时, 北太平洋次表层海温异常存在不同的演变特征。那么南太平洋次表层海温异常的主要模态具有怎样的时空演变特征? 此外, 南太平洋次表层海温异常与 ENSO 存在着怎样的相互关系? 还需要对这些问题进行深入的研究。

(3) 此外, 已有的研究表明 PDO 能够对 ENSO 影响北美 (Barlow et al., 2001)、东亚 (Wang et al., 2008; Yoon and Yeh, 2010) 尤其是我国地区 (朱益民和杨修群, 2003) 的天气气候起到一定的调节作用。那么 SPDO 是否对 ENSO 也有类似的调制作用以及调制的程度如何? SPDO 和 PDO 之间存在怎样的关系? 针对这些问题, 也还需要做相应的深入研究。

(4) 近些年, 我国的科学家开始重点关注南极环状模对我国天气气候的影响, 并发现它对中国的降水 (Nan and Li, 2003) 和沙尘暴 (Fan and Wang, 2004) 存在一定程度的影响。那么 SPDO 与南极

环状模的关系如何? 此外, SPDO 是否会影响南极环状模与中国天气气候的关系? 这也需要很好的研究。

总体上看, 南太平洋海温异常变化特征、它与 ENSO 等系统的关系、及其与天气气候的关系已取得一些研究成果, 但都还存在许多需要深入研究解决的问题。随着南太平洋海温观测资料的增多, 这些问题正在引起各国学者的广泛关注, 相信过不了多久大家对南太平洋热状况及其变化和影响必将有较为全面和深刻的了解。

参考文献 (References)

- Barlow M, Nigam S, Berbery E H. 2001. ENSO, Pacific decadal variability, and U. S. summertime precipitation, drought, and stream flow [J]. *J. Climate*, 14: 2015–2128.
- Barnett T P, Pierce D W, Saravanan R, et al. 1999. Origins of the midlatitude Pacific decadal variability[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 26: 1453–1456, doi:10.1029/1999GL900278.
- Barros V R, Silvestri G E. 2002. The relation between sea surface temperature at the subtropical south-central Pacific and precipitation in southeastern South America [J]. *J. Climate*, 15: 251–267.
- Bindoff N L, Church J A. 1992. Warming of the water column in the Southwest Pacific Ocean [J]. *Nature*, 357: 59–62.
- Bijl P K, Schouten S, Sluijs A, et al. 2009. Early palaeogene temperature evolution of the Southwest Pacific Ocean [J]. *Nature*, 461: 776–779.
- 巢清尘, 巢纪平. 2001. 热带西太平洋和东印度洋对 ENSO 发展的影响 [J]. *自然科学进展*, 11 (12): 1293–1300. Chao Qingchen, Chao Jiping. 2001. The impact of the Western Tropical Pacific Ocean and the Eastern Indian Ocean on the development of ENSO [J]. *Progress in Natural Science (in Chinese)*, 11 (12): 1293–1300.
- Chen Y L, Zhao Y P, Wang F, et al. 2010. Subsurface temperature anomalies in the North Pacific Ocean associated with the ENSO cycle [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 28 (6): 1304–1315, doi:10.1007/s00343-010-9078-2.
- Deser C, Blackmon M L. 1995. On the relationship between tropical and North Pacific sea surface temperature variations [J]. *J. Climate*, 8: 1677–1680.
- Fan K, Wang H J. 2004. Antarctic oscillation and the dust weather frequency in North China [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L10201, doi:10.1029/2004GL019465.
- 范可, 王会军. 2006. 有关南半球大气环流与东亚气候的关系研究的若干新进展 [J]. *大气科学*, 30 (3): 402–412. Fan Ke, Wang Huijun. 2006. Studies of the relationship between Southern Hemispheric atmospheric circulation and climate over East Asia [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese)*, 30 (3): 402–412.
- Folland C K, Renwick J A, Slinger M J, et al. 2002. Relative influences of the interdecadal Pacific Oscillation and ENSO on the South Pacific convergence zone [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29, doi:10.1029/

- 2001GL014201.
- Folland C K, Salinger M J, Jiang N, et al. 2003. Trends and variations in South Pacific Island and ocean surface temperatures [J]. *J. Climate*, 16: 2859–2874.
- Frankignoul C, Sennéchal N. 2007. Observed influence of North Pacific SST anomalies on the atmospheric circulation [J]. *J. Climate*, 20: 592–606.
- Fu C B, Diaz H, Fletcher J. 1986. Characteristics of the response of sea surface temperature in the central Pacific associated with the warm episodes of the Southern Oscillation [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 114: 1716–1738.
- Garreaud R D, Battisti D S. 1999. Interannual (ENSO) and Interdecadal (ENSO-like) variability in the southern hemisphere tropospheric circulation [J]. *J. Climate*, 12: 2113–2123.
- Giese B S, Urizar S C, Fuckar N S. 2002. Southern hemisphere origins of the 1976 climate shift [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29, 1014, doi:10.1029/2001GL013268.
- Gong D Y, Wang S W. 1999. Definition of Antarctic oscillation index [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 26(4): 459–462.
- Graham N E. 1994. Decadal-scale climate variability in the tropical and North Pacific during the 1970s and 1980s—observations and model results [J]. *Climatic Dyn.*, 10: 135–162.
- Gu D F, Philander S G H. 1997. Interdecadal climate fluctuations that depend on exchanges between the tropics and extratropics [J]. *Science*, 275: 805–807.
- Hall A, Visbeck M. 2002. Synchronous variability in the southern hemisphere atmosphere, sea ice, and ocean resulting from the annular mode [J]. *J. Climate*, 15: 3043–3057.
- Hare S R, Francis R C. 1995. Climate change and salmon production in the northeast Pacific ocean [C]// *Climate Change and Northern Fish Populations*. Beamish R J, Eds. 121. Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Science, 357–372.
- Harris G P, Davies P, Nunez D M, et al. 1988. Interannual variability in climate and fisheries in Tasmania [J]. *Nature*, 333: 754–757.
- Holbrook N J. 1994. Temperature variability in the Southwest Pacific Ocean between 1955 and 1998 [D]. Ph. D. dissertation, University of Sydney, 229pp.
- Holbrook N J, Bindoff N L. 1997. Interannual and decadal temperature variability in the southwest Pacific Ocean between 1955 and 1988 [J]. *J. Climate*, 10: 1035–1049.
- Holbrook N J, Bindoff N L. 1999. Seasonal temperature variability in the upper southwest Pacific Ocean [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 29: 366–381.
- Holbrook N J, Chan P S, Venegas S A. 2005. Oscillatory and propagating modes of temperature variability at the 3–3.5 and 4–4.5-yr time scales in the upper southwest Pacific Ocean [J]. *J. Climate*, 18: 719–736.
- Hsieh W, Hamon B V. 1991. The El Niño–Southern Oscillation in southwestern Australian waters [J]. *Australian Journal of Marine and Freshwater Research*, 42: 263–275.
- Hsu H H, Chen Y L. 2011. Decadal to bi-decadal rainfall variation in the western Pacific: A footprint of South Pacific decadal variability? [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L03703, doi:10.1029/2010GL046278.
- Isaacs J D. 1976. Some ideas and frustrations about fishery science [R]. California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports, 18: 34–43.
- Karoly D J. 1989. Southern Hemisphere circulation features associated with El Niño–Southern Oscillation events [J]. *J. Climate*, 2: 1239–1252.
- Kidson J W. 1975. Eigenvector analysis of monthly mean surface data [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 103 (3): 182–186.
- Kidson J W, Renwick J A. 2002. The southern hemisphere evolution of ENSO during 1981–99 [J]. *J. Climate*, 15: 847–863.
- Kim J H, Schneider R R, Hebbeln D, et al. 2002. Last deglacial sea-surface temperature evolution in the southeast Pacific compared to climate changes on the South American continent [J]. *Quaternary Science Reviews*, 21: 2085–2097.
- Latif M, Barnett T P. 1994. Causes of decadal climate variability over the North Pacific and North America [J]. *Science*, 266: 634–637, doi:10.1126/science.266.5185.634.
- Lee T, Hobbs W R, Willis J K. 2010. Record warming in the South Pacific and western Antarctica associated with the strong central-Pacific El Niño in 2009–10 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 37, L19704, doi:10.1029/2010GL044865.
- Lefebvre W, Goosse H, Timmermann R, et al. 2004. Influence of the Southern Annular Mode on the sea ice–ocean system [J]. *J. Geophys. Res.*, 109, C09005, doi:10.1029/2004JC002403.
- Li C Y, Mu M Q, Zhou G Q. 1999. Subsurface ocean temperature anomalies in the Pacific Warm pool and ENSO occurrence [R]. Program on Weather Prediction Research Report, Series No. 13, 232–240, WMO/TD No. 979, Geneva.
- 李崇银. 2000. 气候动力学引论 [M]. 北京: 气象出版社, 240–260. Li Chongyin. 2000. Introduction to Climate Dynamics (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 240–260.
- 李崇银. 2002. 关于 ENSO 本质的进一步研究 [J]. *气候与环境研究*, 7 (2): 160–174. Li Chongyin. 2002. A further study of the essence of ENSO [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 7 (2): 160–174.
- 李崇银, 咸鹏. 2003. 北太平洋海温年代际变化与大气环流和气候的异常 [J]. *气候与环境研究*, 8 (3): 258–273. Li Chongyin, Xian Peng. 2003. Interdecadal variation of SST in the North Pacific and the anomalies of atmospheric circulation and climate [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 8 (3): 258–273.
- Li Z X. 2000. Influence of tropical Pacific El Niño on the SST of the southern ocean through atmospheric bridge [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 27: 3505–3508.
- Linsley B K, Wellington G M, Schrag D P. 2002. Decadal sea surface temperature variability in the subtropical South Pacific from 1726 to 1997 [J]. *Science*, 290 (5494): 1145–1148.
- Linsley B K, Wellington G M, Schrag D P, et al. 2004. Geochemical evidence from corals for changes in the amplitude and spatial pattern of South Pacific interdecadal climate variability over the last 300 years [J]. *Climate Dyn.*, 22, doi:10.1007/s00382-003-0364-y.
- 刘舸, 张庆云, 孙淑清. 2008. 澳大利亚东侧环流及海温异常与长江中下游夏季旱涝的关系 [J]. *大气科学*, 32 (2): 231–241. Liu Ge, Zhang Qingyun, Sun Shuqing. 2008. Summer rainfall in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (2): 231–241.

- Lluch-Cota D B, Wooster W S, Hare S R. 2001. Sea surface temperature variability in coastal areas of the northeastern Pacific related to the El Niño–Southern Oscillation and the Pacific Decadal Oscillation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 28: 2029–2032.
- Lovenduski N S, Gruber N. 2005. The impact of the Southern Annular Mode on Southern Ocean circulation and biology [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32: L11603, doi:10.1029/2005GL022727.
- Luo J J, Masson S, Behera S, et al. 2003. South Pacific origin of the decadal ENSO-like variation as simulated by a coupled GCM [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 30 (24): 2250, doi:10.1029/2003GL018649.
- Luo Y Y, Rothstein L M, Zhang R H, et al. 2005. On the connection between South Pacific subtropical spiciness anomalies and decadal equatorial variability in an ocean general circulation model [J]. *J. Geophys. Res.*, 110, C10002, doi:10.1029/2004JC002655.
- Luo J J, Yamagata T. 2001. Long-term El Niño–Southern Oscillation (ENSO-like) variation with special emphasis on the South Pacific [J]. *J. Geophys. Res.*, 106 (22): 22211–22227.
- 吕俊梅, 踞建华, 张庆云, 等. 2005. 太平洋年代际振荡冷、暖背景下 ENSO 循环的特征 [J]. *气候与环境研究*, 10 (2): 238–249. Lü Junmei, Ju Jianhua, Zhang Qingyun, et al. 2005. The characteristic of ENSO cycle in different phases of Pacific Decadal Oscillation [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 10 (2): 238–249.
- Lysne J, Chang P, Giese B. 1997. Impact of the extratropical Pacific on equatorial variability [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 24: 2589–2592.
- MacDonald G M, Case R A. 2005. Variations in the Pacific Decadal Oscillation over the past millennium [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L08703, doi:10.1029/2005GL022478.
- Mantual N J, Hare S R, Zhang Y, et al. 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78: 1069–1079.
- McGowan J A, Bograd S J, Lynn R J, et al. 2003. The biological response to the 1977 regime shift in the California current [J]. *Deep-Sea Research*, 50: 2567–2582.
- Meredith M P, Hogg A M. 2006. Circumpolar response of Southern Ocean eddy activity to a change in the Southern Annular Mode [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33: L16608, doi:10.1029/2006GL026499.
- Meredith M P, Woodworth P L, Hughes C W, et al. 2004. Changes in the ocean transport through Drake Passage during the 1980s and 1990s, forced by changes in the Southern Annular Mode [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 31: L21305, doi:10.1029/2004GL021169.
- Meyers G, Donguy J R. 1984. South Equatorial Current during the 1982–83 El Niño [J]. *Tropical Ocean–Atmosphere Newsletter*, 27: 10–11.
- Mo K C. 2000. Relationships between low-frequency variability in the southern hemisphere and sea surface temperature anomalies [J]. *J. Climate*, 13: 3599–3610.
- Montecinos A, Purca S, Pizarro O. 2003. Interannual-to-interdecadal sea surface temperature variability along the western coast of South America [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 30: 1570, doi: 10.1029/2003GL017345.
- Namias J. 1972. Large-scale and long-term fluctuations in some atmospheric and oceanic variables [C]// Dyrssen D, Jagner D, eds. *Proceedings of the 20th Nobel Symposium*. Gothenburg, Sweden. Almqvist and Wiksell, Stockholm, 27–48.
- Nan S, Li J. 2003. The relationship between the summer precipitation in the Yangtze River valley and the boreal spring Southern Hemisphere annular mode [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 30: 2266, doi:10.1029/2003GL018381.
- Newman M, Compo G P, Alexander M A. 2003. ENSO-forced variability of the Pacific Decadal Oscillation [J]. *J. Climate*, 16: 3853–3857.
- Pierce D W, Barnett T P, Latif M. 2000. Connections between the Pacific Ocean tropics and midlatitudes on decadal time scales [J]. *J. Climate*, 13: 1173–1194.
- Rasmusson E M, Wallace J M. 1983. Meteorological aspects of El Niño/Southern Oscillation [J]. *Science*, 222: 1195–1202.
- Reynolds R W, Smith T M. 1994. Improved global sea surface temperature analysis using optimum interpolation [J]. *J. Climate*, 15: 3058–3068.
- Salinger M J, Renwick J A, Mullan A B. 2001. Interdecadal Pacific Oscillation and South Pacific climate [J]. *International Journal of Climatology*, 21: 1705–1721.
- Schneider N, Cornuelle B D. 2005. The forcing of the Pacific Decadal Oscillation [J]. *J. Climate*, 18: 4355–4373.
- Sen Gupta A, England M H. 2006. Coupled ocean–atmosphere–ice response to variations in the Southern Annular Mode [J]. *J. Climate*, 19 (18): 4457–4486.
- Shaffer G, Leth O, Bendtsen U J, et al. 2000. Warming and circulation change in the eastern South Pacific Ocean [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 27 (9): 1247–1250.
- Shakun J D, Shaman J. 2009. Tropical origins of North and South Pacific decadal variability [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 36, L19711, doi:10.1029/2009GL040313.
- 宋洁, 李崇银. 2009. 南极涛动和北半球大气环流异常的联系 [J]. *大气科学*, 33(4): 847–858. Song Jie, Li Chongyin. 2009. The Linkages between the Antarctic Oscillation and the Northern Hemisphere circulation anomalies [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33 (4): 847–858.
- Song J, Zhou W, Li C Y, et al. 2009. Signature of the Antarctic Oscillation in the Northern Hemisphere [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 105: 55–67, doi:10.1007/s00703–009–0036–5.
- Sugimoto S, Yoshida T, Ando T. 2003. Decadal variability of subsurface temperature in the central North Pacific [J]. *Journal of Oceanography*, 59: 945–955.
- Sun J Q, Wang H J, Yuan W. 2009. A possible mechanism for the co-variability of the boreal spring Antarctic Oscillation and the Yangtze River valley summer rainfall [J]. *International Journal of Climatology*, 29: 1276–1284, doi:10.1002/joc.1773.
- 孙密娜, 管兆勇, 张蓬勃. 2010. 南太平洋 6~8 月 SST 异常的主要模态及其与 ENSO 和 SAM 的联系 [J]. *热带气象学报*, 26 (2): 174–180. Sun Mina, Guan Zhaoyong, Zhang Pengbo. 2010. Principal modes of JJA SST anomalies of the South Pacific and their relations with ENSO and SAM [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 26 (2): 174–180.
- Thompson D W J, Lorenz D J. 2000. Annular modes in extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability [J]. *J. Climate*, 13: 1000–1016.
- Trenberth K E, Hurrell J W. 1994. Decadal atmosphere–ocean variations in the Pacific [J]. *Climate Dyn.*, 9: 303–319.
- Verdy A, Marshall J, Czaja A. 2006. Sea surface temperature variability

- along the path of the Antarctic Circumpolar Current [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 36: 1317–1331.
- Walker G T, Bliss E W. 1932. World weather [J]. *V. Mem. Roy. Meteor. Soc.*, 4: 53–84.
- Wang B. 1995. Interdecadal changes in El Niño onset in the last four decades [J]. *J. Climate*, 8: 267–285.
- 王东晓, 刘征宇. 2000. 太平洋年代际海洋变率的信号通道 [J]. *科学通报*, 45 (8): 785–798. Wang Dongxiao, Liu Zhengyu. 2000. The pathway of the interdecadal variability in the Pacific Ocean [J]. *Chinese Science Bulletin*, 45 (17): 1555–1561.
- Wang H J, Fan K. 2005. Central North China precipitation as reconstructed from the Qing Dynasty: Signal of the Antarctic Atmospheric Oscillation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L24705, doi:10.1029/2005GL024562.
- 王会军, 范可. 2006. 西北太平洋台风生成频次与南极涛动的关系 [J]. *科学通报*, 51 (24): 2910–2914. Wang Huijun, Fan Ke. 2007. Relationship between the Antarctic Oscillation in the western North Pacific typhoon frequency [J]. *Chinese Science Bulletin*, 52 (4): 561–565.
- Wang L, Chen W, Huang R H. 2008. Interdecadal modulation of PDO on the impact of ENSO on the East Asian winter monsoon [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L20702, doi:10.1029/2008GL035287.
- Wang X, Li C, Zhou W. 2007. Interdecadal mode and its propagating characteristics of SSTA in the South Pacific [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 98: 115–124, doi:10.1007/s00703-006-0235-2.
- White W B, Cayan D R. 1998. Quasi-periodicity and global symmetries in interdecadal upper ocean temperature variability [J]. *J. Geophys. Res.*, 103: 21335–21354, doi:10.1029/98JC01706.
- Wyrski K. 1984. A southward displacement of the subtropical gyre in the South Pacific during the 1982–83 El Niño [J]. *Tropical Ocean-Atmosphere Newsletter*, 23: 14–15.
- 咸鹏, 李崇银. 2003. 北太平洋海温变化的年代际模及其演变特征 [J]. *大气科学*, 27 (5): 861–869. Xian Peng, Li Chongyin. 2003. Interdecadal Modes of sea surface temperature in the North Pacific Ocean and its evolution [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 27 (5): 861–869.
- Yañez E. 1991. Relationships between environmental changes and fluctuating major pelagic resources exploited in Chile (1950–1988) [M]// Kawasaki T, Tanaka S, Toba Y, et al. *Long-term Variability of Pelagic Fish Populations and Their Environment*. Great Britain: Pergamon Press, 301–309.
- Yeh S W, Kirtman B P. 2003. On the relationship between the interannual and decadal SST variability in the North Pacific and tropical Pacific Ocean [J]. *J. Geophys. Res.*, 108, D11, 4344, doi:10.1029/2002JD002817.
- Yoon J, Yeh S W. 2010. Influence of the Pacific Decadal Oscillation on the relationship between El Niño and the northeast Asian summer monsoon [J]. *J. Climate*, 23: 4525–4537.
- Zhang R H, Liu Z. 1999. Decadal thermocline variability in the North Pacific Ocean: Two pathways around the subtropical gyre [J]. *J. Climate*, 12: 3273–3296.
- Zhang Y, Wallace J M, Battisti D S. 1997. ENSO-like interdecadal variability: 1900–93 [J]. *J. Climate*, 10: 1004–1020.
- 周波涛. 2011. 冬季澳大利亚东侧海温与长江流域夏季降水的联系及可能物理机制 [J]. *科学通报*, 56 (16): 1301–1307. Zhou Botao. 2011. Linkage between winter sea surface temperature east of Australia and summer precipitation in the Yangtze River valley and a possible physical mechanism [J]. *Chinese Science Bulletin*, 56 (17): 1821–1827.
- Zhou W, Li C Y, Wang X. 2007. Possible connection between Pacific Oceanic Interdecadal Pathway and East Asian winter monsoon [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L01701, doi:10.1029/2006GL027809.
- 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 [J]. *气象学报*, 61 (6): 641–654. Zhu Yimin, Yang Xiuqun. 2003. Relationships between Pacific Decadal Oscillation (PDO) and climate variabilities in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 61 (6): 641–654.