南半球环状模气候影响的若干研究进展*

郑 菲[1] 李建平[1,2] 刘 婷[1,3]
ZHENG Fei[1] LI Jianping[1,2] LIU Ting[1,3]

1. 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
2. 北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院,北京,100875
3. 中国科学院大学,北京,100049
1. *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029, *China*
2. *College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing* 100875, *China*
3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

2014-04-02 收稿,2014-06-27 改回.

郑菲,李建平,刘婷. 2014. 南半球环状模气候影响的若干研究进展. 气象学报, 72(5): 926-939
Zheng Fei, LiJianping, Liu Ting. 2014. Some advances in studies of the climatic impacts of the Southern Hemisphere annular mode. ***Acta Meteorologica Sinica*****, 72(5): 926-939**

Abstract The Southern Hemisphere (SH) annular mode (SAM) is the dominant mode of atmospheric circulation in the SH extratropics. The SAM regulates climate in many regions due to its large spatial scale. Exploration of the climatic impacts of the SAM is a new research field that has developed rapidly in recent years. This paper reviews studies of the climatic impact of the SAM on the SH and the Northern Hemisphere (NH), emphasizing linkages between the SAM and climate in China. Studies relating the SAM to climate change are also discussed. A general survey of these studies shows that signals of the SAM in the SH climate have been systematically investigated. On interannual scales, the SAM can influence the position of storm tracks and the vertical circulation, and modulate the dynamic and thermodynamic driving effects of the surface wind on the underlying surface, thus influencing the SH air-sea-ice coupled system. These influences generally show zonally symmetrical characteristics, but with local features. On climate change scales, the impacts of the SAM on SH climate change show a similar spatial distribution to those on interannual scales. There are also meaningful results on the relationship between the SAM and the NH climate. The SAM is known to affect the East Asian, West African, and North American summer monsoons, as well as the winter monsoon in China. Air-sea interaction plays an important role in these connections in terms of the storage of the SAM signal and its propagation from the SH to the NH. However, compared with the considerable knowledge of the impact of the SAM on the SH climate, the response of the NH climate to the SAM deserves further study, including both a deep understanding of the propagation mechanism of the SAM signal from the SH to the NH and the establishment of a seasonal prediction model based on the SAM.

Key words Southern Hemisphere annular mode (SAM), Monsoon, Climatic impact, Climate change, Interaction between the Northern and Southern Hemispheres

摘 要 南半球环状模是南半球热带外地区环流变率的主导模态。由于南半球环状模在空间上的大尺度特征,全球多个地

* 资助课题:国家973计划项目(2013CB430200)、国家自然科学基金项目(41030961)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306031)。
作者简介:郑菲,主要从事环状模及其气候影响方面的研究。E-mail: zhengfei08@mail.iap.ac.cn
通讯作者:李建平,主要从事非线性动力学及可预报性、环状模动力学、季风和南北半球相互作用等方面的研究。E-mail: ljp@lasg.iap.ac.cn

区的气候均与南半球环状模的变化有关。探讨南半球环状模的气候影响,是近几十年来得到广泛关注并迅速发展的新方向。围绕这个方向,分别回顾了南半球环状模对南半球和北半球气候影响的研究进展,重点阐述了南半球环状模对中国气候影响的相关工作,并从长期变化尺度上,列举了南半球环状模与气候变化方面的研究成果。纵观近几十年的研究发现,针对南半球环状模对南半球的气候影响,目前已有比较系统的认识。总体而言,在年际尺度上,南半球环状模可以通过影响垂直环流和风暴轴的位置,改变表面风速对下垫面的热力和动力驱动作用,进而对南半球的海-气-冰耦合系统产生调控。这种调控多表现出纬向对称性,同时也存在纬向非对称的局地特征。在气候变化的尺度上,南半球环状模是过去半个世纪里南半球气候变化的主要驱动力之一。关于南半球环状模对北半球尤其是中国气候的影响问题,目前也取得了许多有意义的结果。例如,南半球环状模对东亚、西非、北美的夏季风和东亚冬季风均有作用,并且可以调控中国春季华南降水等。海-气耦合过程在南半球环状模对北半球气候的影响中扮演着重要角色,与南半球环状模信号的跨季节存储和由南半球向北半球的传播均有密切关系。但是,与南半球相比,南半球环状模对北半球气候影响的研究,还有许多问题值得深入讨论和研究:一是体现在对南半球环状模信号向北传播机制上的深入认识,二是将南半球环状模的信号作为因子在季节气候预测中的实践。

关键词　南半球环状模,季风,气候影响,气候变化,南北半球相互作用

中图法分类号　P434

1　引　言

南半球60%以上的面积为海洋覆盖、陆地面积较小,世界范围70%左右的陆地集中在北半球。这种海陆分布造成了90%的世界人口居住在北半球的格局。因此,针对北半球气候系统的观测和研究,不仅比南半球起步早,而且已有的研究成果也更加丰富。然而,全球气候系统是一个有机的整体,南半球通过热量、动量、质量、水分等交换影响北半球气候。近年来与南极臭氧损耗、极区对全球气候变化响应的敏感性等有关的问题,促使对气候系统的探索向南半球拓展。国际上许多大型科学计划都重视对南半球的观测和研究。例如,作为世界气候研究计划(World Climate Research Programme,简称WCRP)的核心项目之一的气候与冰冻圈计划(Climate and Cryosphere,简称Clic),推动了南大洋观测系统(Southern Ocean Observing System,简称SOOS)的建立;平流层过程及其对气候的作用研究计划(Stratospheric Processes And their Role in Climate,简称SPARC),重视发展与极区臭氧有关的化学-气候模式。在中国,对南大洋和南极洲的科学考察和资料收集也常年开展。加上近几十年卫星观测的快速发展、南极大陆多个国家观测台站的建立、全球剖面浮标阵列(Argo)在南半球海域的布设等,使得针对南半球气候系统多个成员的观测资料日益丰富,这为探索南半球气候系统的自身规律及其气候影响打下了基础。

大气遥相关是大气环流的重要现象。早期遥相关的研究可以追溯到南方涛动(SO)的提出。随后的研究表明,北半球主要的遥相关型包括:北大西洋涛动(NAO)(Walker, et al,1932)、北太平洋涛动(NPO)(Rogers,1981)、欧亚遥相关型(EU)(Wallace,et al,1981)、太平洋-北美型(PNA)(Wallace, et al,1981)、北极涛动(AO)(Thompson, et al, 1998)或北半球环状模(NAM)(Thompson, et al, 2000a)等。这些低频遥相关型对环流变率有很大的贡献,并且影响着区域及半球的气候,因此在气候研究中具有重要的地位。其中,北半球环状模反映了大气质量在北半球中、高纬度之间的反向变化。当北半球环状模为正(负)位相时,北半球高纬度位势高度场偏低(高)、中纬度位势高度场偏高(低),北半球西风急流向极地(热带)方向移动。在北半球遥相关型逐步揭示出来的背景下,在南半球资料不断丰富的基础上,针对南半球热带外环流变率的偶极型模态——南半球环状模(Southern Hemisphere Annular Mode,简称SAM)的研究迅速发展起来。

南半球环状模或南极涛动(Antarctic Oscillation,简称AAO)是南半球热带外环流变率的主导模态(龚道溢等,1998;Gong, et al,1999;Thompson, et al,2000a)。南半球环状模的产生机制主要是与波-流相互作用有关的大气内部过程(Limpasuvan, et al,1999;Lorenz, et al,2001;Zhang,et al, 2012)有关。在时间变率上,南半球环状模的频谱在年代际、年际、季节内、逐月、月内和逐日等多个时间尺度上都比较清楚(范丽军等,2003;Fan, et al, 2003;Wang,et al,2005;李晓峰等,2010,2012;张自银等,2010;Yuan,et al,2011)。在空间特征上,南半球环状模具有垂直方向准正压的结构,在对流层

和平流层中均比较明显。南半球环状模反映了大气质量在中、高纬度跷跷板似的反向变化,并伴随着急流位置的南北移动。当南半球环状模为正位相时,南半球高纬度位势高度场偏低,中纬度位势高度场偏高,急流向极地方向移动。当南半球环状模为负位相时则情况相反,南半球高纬度位势高度场偏高,中纬度位势高度场偏低,急流向低纬度方向移动。Li 等(2003)提出了大气环状活动带的概念,就环状模的物理图像给出了清晰的解释,构造的南半球环状模指数得到了广泛使用(Feng,et al, 2010;Ding, et al,2005;Sun,et al,2012)。

图 1 为南半球夏季(12—2 月)环流的气候态和南半球环状模为正位相时的环流异常示意图。可见南半球环状模的正位相伴随着南半球急流位置的向极移动,同时极锋急流强度有所加强,副热带急流强度有所减弱,费雷尔环流较气候态有所加强,体现了费雷尔环流在环状模的活动中的重要作用(Li,et al,2003;李建平,2005a,2005b)。由于南半球环状模在经圈方向上有全球尺度特征,纬圈方向也覆盖了南半球热带外的数十个纬度,这种大尺度的空间结构决定了南半球环状模的气候影响也是广泛的。已有研究表明,南半球环状模的信号不仅存在于南极极区、南半球中纬度和副热带地区,也存在于北半球的多个区域。20 世纪末以来,在全球气候变化的大背景下,南半球环状模出现了显著的上升趋势(Thompson,et al,2000b;Marshall,2003),这种趋势已经引起了全球多个区域气候变化的响应。这无疑从气候变化的角度上,凸显出对南半球环状模的气候影响这一问题进行研究的紧迫性。

南半球环状模的变率和变化及其对气候的影响,是近十几年来迅速发展并得到广泛重视的新方向。研究南半球环状模的气候影响,有助于从全球尺度上客观了解南半球环状模对局地和非局地气候系统的作用,拓展对南北半球和不同纬度相互作用的认识。在年际尺度上,对这一问题的探讨,有可能为短期气候预测的实践提供新的预测因子和思路。在气候变化的尺度上,在理论方面可为气候变化的归因研究提供可能的线索;在气候预估的实践方面,可为有关气候要素长期变化的降尺度预测和预估提供信息,从而为气候适应战略的制定提供理论指导。因此,南半球环状模的气候影响这一问题,不仅具有科学意义,也具有实际应用价值。近年来围绕这一问题已经取得了很多研究进展。本文针对南半球环状模的气候影响,列举和归纳了其中的主要研究成果,以期对近几十年围绕这一问题所取得的新认识做一简单回顾和总结,由于篇幅限制未能做到一一详述。为了统一起见,文中对各研究中提及的南半球环状模及南极涛动,统一称为南半球环状模。文中所出现的季节,如无特殊说明,均是按北半球的季节定义。

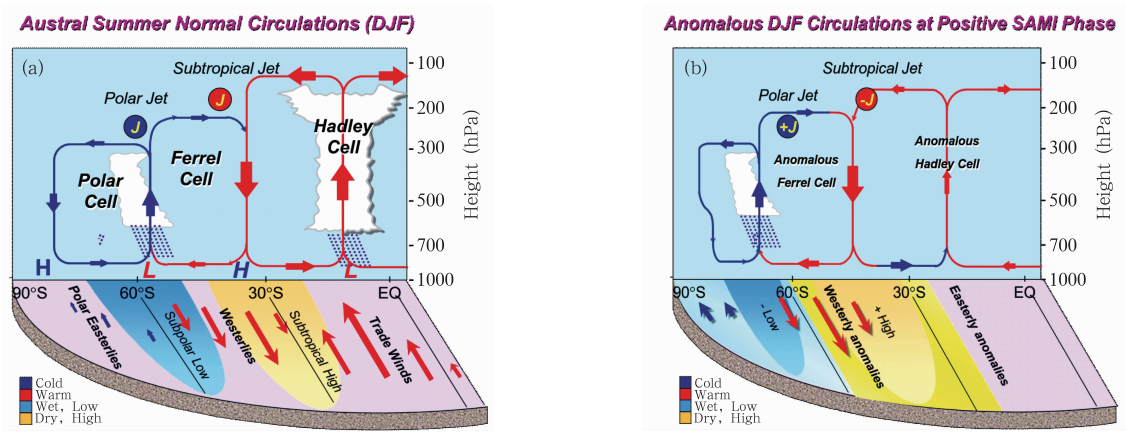


图 1 南半球夏季(12—2 月)

(a)大气环流的气候态和(b)南半球环状模为正位相时环流异常示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of (a) the climatology of atmospheric circulation in the Southern Hemisphere in austral summer (December – February) and (b) the corresponding circulation anomalies during a positive SAM phase

2　南半球环状模对南半球气候的影响

南半球环状模是南半球热带外环流变率的主导模态,因此许多学者探讨了南半球环状模对南半球气候系统的影响。下面从气候系统内部相互作用的3个子系统——大气、海洋和海冰入手进行回顾。

2.1　大　气

Thompson 等(2000a)研究了逐月时间尺度上南半球环状模在热带外的环流中的信号,指出当南半球环状模为正位相时,由于近地面上升运动引起的绝热冷却,使得南极洲大陆主体气温偏低,而南极半岛由于与绕极西风增强有关的海洋暖平流的增强,出现气温偏高,这个结论是利用 CRU(Climate Research Unit)的表面温度资料得到的。随后,Kwok 等(2002)采用月平均 AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer)红外通道表面温度,Schneider 等(2004)利用同样的红外通道表面温度资料和被动微波亮温共两种卫星资料,也得到类似结论,并指出南半球环状模对南极极区的表面温度有最大的解释方差。Marshall(2007)利用南极台站观测资料,进一步讨论了南半球环状模与南极地区表面温度关系的季节变化。在验证以上南半球环状模与南极大陆和南极半岛的表面温度的"偶极型"相关的基础上,进一步指出这种相关型在不同季节存在细节上的差别,并就其物理机制提出了新的认识,指出当南半球环状模为正位相时,南极大陆主体偏冷的原因与海洋经向热输送的减少有关,而南极半岛的变暖与南极大陆冷空气的爆发减少有关。此外,Lu 等(2007)用海温强迫的大气环流模式 HadAM3 的模拟结果也表明,南半球环状模与南极大陆主体的温度成负相关。

除了南极洲所在的高纬度地区,南半球环状模对南半球大气的影响也可向北延伸,甚至拓展到副热带 20°S 左右。Bals-Elsholz 等(2001)的研究表明,当南半球环状模为正位相时,南半球冬季(7—9月)南太平洋上副热带急流容易分裂产生极锋急流。Lu 等(2007)用 HadAM3 模拟发现,南半球环状模的正位相对应着 50°—70°S 范围内降水偏多,而 40°—50°S 降水偏少。这印证了 Gillett 等(2006)用台站观测资料得到的类似结论,并且与其他全球环流模式对南半球环状模和降水关系的模拟也较一致(Watterson,2000;Cai,et al,2002;Karoly,2003;Gupta,et al,2006;Lu,et al,2007)。南半球环状模对南半球中、高纬度降水影响的这种"带状偶极"结构,与风暴轴的位置、垂直运动和云量对南半球环状模的响应有关。此外,许多研究从局地的角度上探讨了南半球环状模对南半球区域降水的影响。结果表明,南半球环状模可以显著影响南安第斯山脉(González,et al,2010)、南非(Reason,et al,2005;Fauchereau,et al,2003)、新西兰(Renwick,2002)和澳大利亚西北部(Feng,et al,2013)的降水变率。Mao 等(2013)指出南半球环状模与南印度洋台风活跃季节(12—3月)的台风生成频数成显著正相关,并且澳大利亚西北海岸(10°—30°S,100°—120°E)的台风过境频数较气候态增加了 50%—100%。这是因为南半球环状模正位相时澳洲西部海岸出现气旋式位势高度异常,增强了水汽辐合和上升运动,进而导致此区域台风生成和过境增多。

此外,澳大利亚西南部的降水近几十年呈减少趋势(Hennessy,et al,1999),许多学者研究了这种干旱化趋势与南半球环状模的关系。有研究指出,南半球环状模通过改变澳大利亚西南部地区强降水事件的频次(Ansell,et al,2000;Cai,et al,2002,2005,2006;Li,et al,2005)或南半球中纬度西风的位置(Gupta,et al,2006;Meneghini,et al,2007),进而影响澳大利亚西南部降水的年际变率和长期趋势。然而,Hendon 等(2007)指出南半球环状模对澳大利亚降水的这种影响,主要出现在南半球夏季(12—2月)。那么,南半球冬季(6—8月)澳大利亚西南部的降水与南半球环状模的统计关系是否显著呢?为了进一步回答这个问题,Feng 等(2010)的研究指出,对于南半球冬季(6—8月)澳大利亚西南部的降水与南半球环状模的反相关关系,实际上是由1964年这个极值年造成的。如果排除1964年的数据后再进行分析,南半球环状模对南半球冬季(6—8月)澳大利亚西南部的降水影响实际上是较小的。这同时也说明,在对物理量可能联系的考察中,客观的统计分析和坚实的动力学分析对于获得正确结论的重要性。

2.2　海　洋

南半球热带外地区的大气下垫面具有一定的特殊性。在这个区域内,陆地的阻隔小、海洋的连通性好,并且包含了地理意义上的南大洋(60°S 以南的所有海域),系为太平洋、大西洋和印度洋传递气候信号的通道,并在全球气候的变率和变化中扮演了重要的角色。因此,对与南半球环状模有关的南半

球热带外海-气耦合过程的探讨变得十分重要。

南大洋最主要的表层环流是南极绕极流(Antarctic Circumpolar Current,简称 ACC),其显著特点是非常倾斜的等密度线和深厚的风生漂流。Lefebvre 等(2004)用 NCEP/NCAR 再分析资料驱动的全球海冰-海洋模式(ORCA2-LIM)模拟发现,南半球环状模的增强对应着南极绕极流区域海洋表层流速的增大。Gnanadesikan 等(2000)用粗分辨率海洋模式从热力和动力平衡的角度,分析了南极绕极流对风应力的响应。结果表明,南大洋风应力的加强可加快南极绕极流的传输。因此,南半球环状模可以在年际尺度上影响德雷克海峡的海洋传输(Meredith,et al,2004a,2004b)。张文霞等(2011)发现,由于南半球环状模导致的局地风应力变化,引起南极绕极流流量调整,南极绕极流洋域的等密面倾斜程度发生改变,导致背景海洋向中尺度涡的斜压能量转换产生变化,进而造成南极绕极流洋域中尺度涡活动的年际调整及涡动能的变化,纬向风应力极大(小)值超前涡动能极大(小)值 3 年左右出现。

南半球环状模对南半球海洋的影响不仅体现在对海洋环流的调控上,还包括其对海表温度(SST)的作用。当南半球环状模为正位相时,南半球绕极西风的位置向极地偏移,通过表面风速的改变对海洋产生动力强迫。南大洋向北的埃克曼输送增强,使得南极大陆附近存在增强的上翻流,而45°S附近存在加强的下沉流。同时,与南半球环状模正位相有关的表面风速的改变也会对海洋产生热力强迫,引起海洋表面热通量的改变(Mo,2000;Watterson,2000,2001;Cai,et al,2002;Hall,et al,2002;Lefebvre,et al,2004;Gupta,et al,2006;Nan,et al,2003,2009;Wu,et al,2009;郑菲等,2012)。综合动力和热力的影响,南半球环状模正位相时,南半球出现中纬度海表温度偏高、高纬度海表温度偏低的带状偶极型异常。由于海洋的热惯性,这种海表温度异常信号往往可以持续一个季节左右,使得南半球环状模的信号超前于海洋的信号(Wu,et al,2009;郑菲等,2012)。在后面的回顾中可以看到,南半球环状模对南半球海表温度的这种影响及其进一步激发的大气环流的响应,正是南半球环状模影响北半球气候的重要"桥梁"之一。

此外,南半球环状模与海洋混合层厚度的联系逐渐受到关注。混合层厚度一方面受海表风应力的强迫,另一方面也会进一步影响大气和深海的热量等交换,并决定着海洋存储热量的能力。与海表温度对南半球环状模的纬向对称响应不同,Sallee 等(2010)的研究表明,南半球环状模导致了混合层厚度的纬向非对称响应。南半球环状模引起的经向风及海洋热量输送的异常,是混合层厚度对南半球环状模的响应表现出非对称性的主要原因。

2.3 海 冰

南半球环状模对海冰的影响相对复杂,不同经度上的表现有所差异,同样表现出一定的纬向非对称性(Kwok,et al,2002;Lefebvre,et al,2004)。研究表明,当南半球环状模为正位相时,南极威德尔海海冰偏少,罗斯海海冰偏多。这种非环状的结构,是由于西风在南极半岛附近向东南偏向,在罗斯海向东北偏向,使得有更多的暖空气输入威德尔海,而更多的冷空气输入罗斯海,从而导致了海冰对南半球环状模响应的偶极子结构(Lefebvre,et al,2004)。Lefebvre 等(2005)用全球海冰-海洋模式 ORCA2-LIM 的研究进一步指出,以上这种动力作用导致了威德尔海海冰厚度减小,而威德尔海海冰面积的缩小则与南半球环状模的热力作用密切联系。动力和热力的综合作用,使得海冰对南半球环状模的响应呈现偶极子结构。Gupta 等(2006)用 NCAR 的耦合气候模式探讨了南极海-气-冰系统对南半球环状模的响应。结果表明,与南半球环状模有关的大气和海洋的动力和热力强迫,可以很好地解释南极海冰的变率,并且由于反照率的正反馈效应使得海冰异常可以持续数月。

值得指出的是,南半球高纬度的海-气-冰是相互耦合的统一整体。南半球环状模可影响海表温度和海冰等气候要素,这些要素反过来也对南半球环状模有一定的反馈作用(Watterson,2000,2001;Marshall,et al,2006;Raphael,et al,2011)。由于这不是本文重点,因此不详细列举。

3 南半球环状模对北半球气候系统的影响

全球大气是一个统一整体,南半球环状模导致的南半球纬向平均垂直运动及环流变率的改变,也可能会联动北半球的垂直环流及其他气候系统。

目前的研究表明,南半球环状模对北半球大气环流要素的影响,在季节内和年际尺度上均有体现。在季节内尺度上,Song 等(2009)指出,冬季(12—2月)处于正(负)位相的南半球环状模,对应着滞后

25—40 d 在北大西洋中高纬度地区(45°—65°N)出现的西(东)风异常和位势高度负(正)异常,而中低纬度(25°—40°N)地区则出现东(西)风异常和位势高度正(负)异常,从而在北大西洋地区出现一个类似于北大西洋涛动正(负)位相的偶极模态(宋洁等,2009)。对机制分析的探究表明,冬季(12—2 月)南半球环状模通过波-流相互作用过程可引起热带中东太平洋对流层上层的纬向风异常(Thompson, et al,2004;Song, et al,2009),这种热带纬向风异常可激发类似太平洋-北美型的准定常罗斯贝波向北大西洋传播,引起涡动通量的异常并逐渐演化为类似北大西洋涛动的模态(Song, et al,2009)。

在年际尺度上,南半球环状模与东亚和南亚的气候也存在密切联系。例如,Ho 等(2005)分析发现,夏季(7—9 月)南半球环状模的正位相对应西北太平洋有异常的反气旋式环流生成,进而影响热带气旋的路径,使得东海热带气旋过境数目增加,而南海的热带气旋过境数目减少。王会军等(2006)发现,6—9 月南半球环状模和西北太平洋台风生成频次具有显著的负相关关系,这是因为当南半球环状模处于正(负)位相时,通过经向遥相关波列的作用,使得西北太平洋区纬向风的垂直切变增强(减弱)、海表温度偏冷(偏暖),这些变化均不利于台风生成和发展。郑菲等研究发现,前冬(12—2 月)南半球环状模与春季(3—5 月)西北太平洋热带气旋活动存在一定联系。当前冬南半球环状模为正位相时,春季西北太平洋热带气旋和其中的台风生成频数偏多,这与前冬南半球环状模造成的同期菲律宾以东洋面的海温异常持续到春季有关。在非洲,南半球环状模可以调制西非季风的活动和 Sahel 地区的降水。Sun 等(2010)发现,当春季(3—4 月)南半球环状模为正位相时,同期的热带南大西洋的海温偏高,从而改变 Sahel 地区和几内亚—热带大西洋区域湿静力能的梯度,而这种梯度对于西非夏季风系统的向北爆发十分重要,因此造成 Sahel 地区初夏降水的偏多。随后,降水和土壤湿度的正反馈作用有利于在整个夏季(6—9 月)维持这种降水异常。在北美,春季(4—5 月)南半球环状模的正位相往往对应着后期偏弱的北美夏季风,季风区的降水也随之减小。对物理机制的分析表明,春季南半球环状模的正异常对应着热带大西洋的海温偏暖,而这种海温异常从春季持续到夏季(7—9 月),进而在夏季产生对百慕大高压的影响,从而影响季风区降水(Sun, 2010)。

除了以上大气环流和气候要素外,也有研究表明南半球环状模可以驱动北半球的海洋环流和相关物理量的变化。例如,Gong 等(2009)发现南半球冬季 8 月南半球环状模与滞后 1—3 个月的中国南海区域的珊瑚礁中锶含量存在正相关,而这种锶含量可视为海表面温度的一个表征。Marini 等(2011)采用耦合气候模式(IPSL CM4),运行 500 年的数值积分试验,探讨了南半球环状模对大西洋翻转流(Atlantic Meridional Overturning Circulation,简称 AMOC)的驱动作用。结果表明,大西洋翻转流与南半球环状模在多个时间尺度上存在关联。在年代际时间尺度上,加强的大西洋翻转流滞后于正的南半球环状模约 8 年,这是由于南半球环状模正位相可能通过海温的持续性导致滞后 1 年的北大西洋 50°—60°N 范围出现东风异常,并使得格陵兰岛和冰岛附近的海域上层 500 m 内盐度增大,滞后 4 年后此区域的海洋混合层加深,进而造成北大西洋地区海洋深对流的增强,从而加强大西洋翻转流,这种加强的大西洋翻转流在滞后于南半球环状模正位相约 8 年达到最强。在更长的多年代际时间尺度上,南半球环状模也调制着大西洋翻转流的强度,其原因与南半球环状模引起的南半球热带外海洋盐度异常的向北传播有关(Marini, et al,2011)。

4　南半球环状模对中国气候的影响

4.1　南半球环状模与东亚夏季风系统及中国降水

前期和同期的南半球环状模信号可对东亚夏季风系统及相关的气候要素产生影响。首先聚焦超前夏季风的春季(4—5 月)南半球环状模的信号对中国夏季(6—8 月)环流的气候影响。已有研究表明,当春季(4—5 月)南半球环状模为正位相时,后期东亚夏季风减弱、中国长江中下游夏季(6—8 月)降水增强(Nan, et al,2003,2009;高辉等,2003;南素兰等,2005a,2005b;吴志伟等,2006a;范可,2006;范可等,2006;鲍学俊等,2006;李建平等 2011a,2011b)。在解释这种影响的直接原因(东亚夏季环流和水汽条件)方面,以上研究揭示的相关异常环流特征共性基本一致,即春季(4—5 月)南半球环状模的正位相对应着后期东亚夏季风的减弱,西北太平洋副热带高压强度偏强且位置偏西,长江中下游垂直上升运动加强,从而导致降水加强。

然而,就以上影响中的两个关键过程,一是春季

(4—5月)南半球环状模信号如何持续到夏季(6—8月),二是南半球环状模的信号如何从南半球传至北半球,不同作者从多个角度提供了不同的解释。就第一个问题,吴志伟等(2006a)的研究结果表明,当春季(4—5月)南半球环状模偏强时,中国近海海域的海温偏高,海陆热力差异减小,从而导致东亚夏季风偏弱。对第二个问题,高辉等(2003)发现,5月南半球环状模指数与7月南半球对流层低层马斯克林高压成很强的正相关,而马斯克林高压的异常对应着西北太平洋副热带高压的异常。南素兰等(2005a,2005b)的研究对这两个关键过程给出了综合的解释。南半球环状模可以通过印度洋和中国南海的"海-气耦合桥"影响东亚夏季风和夏季长江流域降水。具体而言,当春季(4—5月)南半球环状模正异常时,南印度洋中、高纬度海域海温偏高。这种异常海温信号随着时间由南向北推进,直到北印度洋。到了夏季(6—8月),信号在北印度洋通过海-气相互作用反馈给大气,使得东亚夏季风减弱,西北太平洋副热带高压位置偏西,强度偏强。此外,Wu等(2006a,2006b)和吴志伟等(2006b)还对与南半球环状模有关的长江中下游夏季旱涝急转和旱涝共存现象做了讨论。高辉等(2012)的研究表明,亚洲夏季风爆发早晚的前兆信号可追溯至冬季(12—2月)的南半球环状模。孙丹等(2013)研究发现,南半球环状模对中国夏季降水的影响存在年代际变化。

在夏季南半球环状模对同期的夏季风环流和降水等要素的影响方面,Xue等(2004)的研究表明,夏季(6—8月)南半球环状模加强时,南半球对流层低层马斯克林高压加强,引起从东亚经北太平洋至北美西海岸的负位相的太平洋-日本(Pacific-Japan,PJ)波列,使得中国长江流域到日本的梅雨增强(薛峰,2005)。Wang等(2005)在历史降水资料中发现夏季(6—8月)华北中部地区的降水与南半球环状模成显著的负相关,并指出南半球环状模通过赤道西太平洋对流异常和西欧到华北的纬向波列影响华北地区的降水。以上关于南半球环状模对中国夏季风系统的研究结果,和南半球环状模对北半球其他地区夏季(6—8月)气候的影响,一并总结概括在图2中。

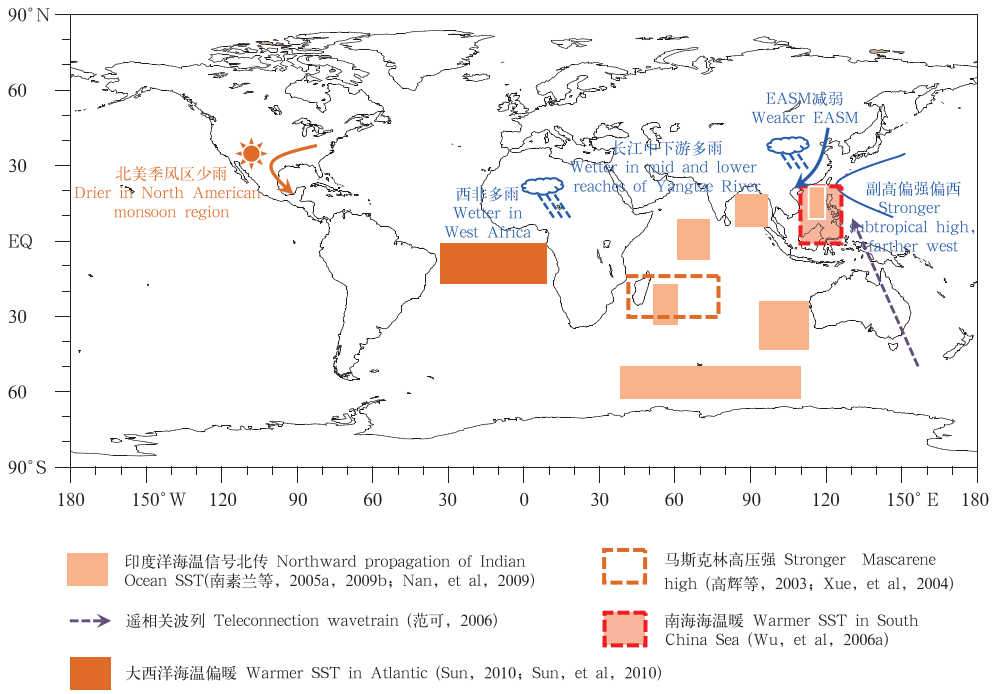


图2 前期北半球春季和夏季的南半球环状模对北半球夏季气候的影响及物理机制

(南半球环状模正位相时的情况,各项要素均代表异常值)

Fig. 2 Influences of the boreal spring and summer SAM on boreal summer Northern Hemisphere climate and the corresponding mechanisms

(anomalies are shown for a positive SAM phase)

4.2　南半球环状模与东亚冬季风系统及中国气温

Wu 等(2009)指出前期秋季(9—11 月)南半球环状模为正位相时,中国的冬季风偏弱。这是因为秋季南半球环状模为正位相时,南半球 30°—45°S 海表温度异常偏高,海洋的这种异常信号一直持续到冬季,并在局地强迫出异常上升运动,哈得来环流减弱,对应中国冬季风偏弱,冬季(12—2 月)气温偏高。以上机制和南半球环状模对北半球其他区域冬季气候的影响,总结如图 3 所示。由于南半球环状模的信号超前于中国冬季气温一个季节,因此这意味着,前期秋季(9—11 月)的南半球环状模可以为中国冬季(12—2 月)气温预测提供有意义的信号。除气温外,钱卓蕾(2014)分析了秋季南半球环状模和冬季(12—2 月)中国南方降水的关系,结果表明以上两者在年际尺度上存在显著的负相关。对其机制的分析表明,秋季南半球环状模正(负)位相,随后的冬季北半球副热带西风急流增强(减弱),中国大部分地区出现偏北(偏南)风异常,从而导致秋季南半球环状模正(负)位相时中国南方冬季降水偏少(多)。

4.3　南半球环状模对中国春季气候的影响

Fan 等(2004)发现前冬(12—2 月)和春季(3—5 月)南半球环状模与中国北方沙尘频次存在显著负相关关系,南半球高纬度延伸到北半球高纬度的经向型遥相关和沿太平洋的局地遥相关型是这种影响产生的可能机制,并采用大气环流模式(IAP9L-AGCM)验证了这种经向型遥相关型(范可等,2007)。Yue 等(2008)分析了南半球环状模与春季北亚气旋的联系。结果表明,前冬(12—2 月)南半球环状模与春季(3—5 月)北亚气旋(NAC)存在显著的正相关。这是由于前冬南半球环状模偏强时,春季西太平洋的对流加强,局地的哈得来环流增强。高层的急流加强,有利于北亚气旋活动的发展。

然而,前冬南半球环状模的信号是如何持续到春季的呢?对于降水这一重要的气候要素,南半球环状模会产生怎样的影响呢?最近的研究表明,前冬(12—2 月)南半球环状模可以影响春季(3—5 月)华南降水,两者存在显著的负相关关系,“海-气耦合桥”作用是前冬南半球环状模信号持续到春季,并进一步影响春季环流和降水的重要机制(郑菲,2012)。

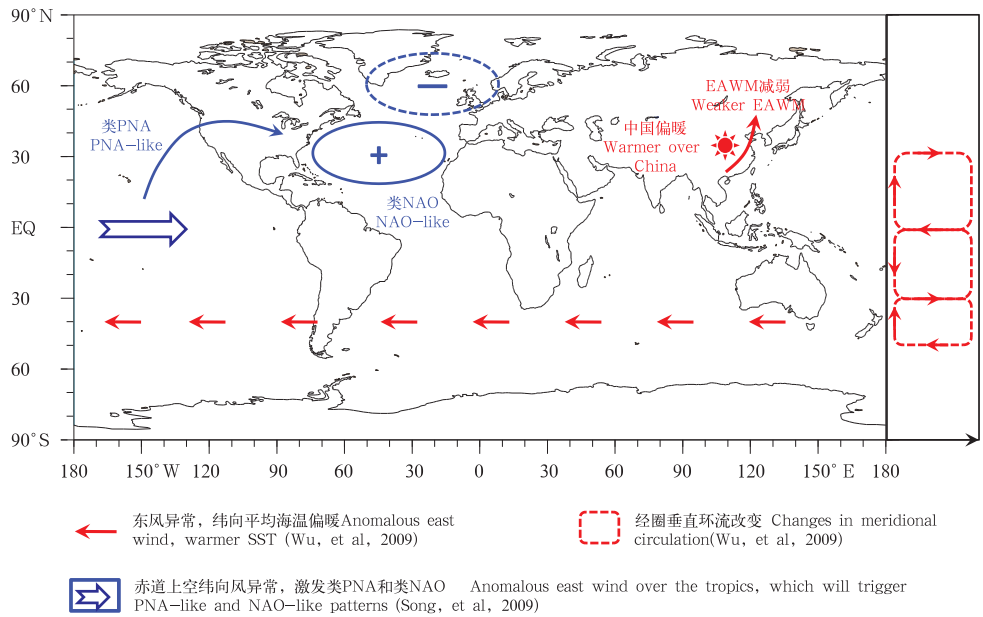


图 3　前期北半球秋季和冬季的南半球环状模对北半球冬季气候的影响及物理机制

(南半球环状模正位相时的情况,各项要素均代表异常值)

Fig. 3　Influences of the boreal autumn and winter SAM on boreal winter Northern Hemisphere climate and the corresponding mechanisms

(anomalies are shown for a positive SAM phase)

具体而言,当前冬(12—2月)南半球环状模偏强时,南半球中纬度的西风减弱、高纬度的西风增强,风速的变化导致了海表蒸发和潜热释放的响应,进而使得南半球中纬度海温偏高、高纬度的海温偏低。由于海洋的热惯性,这种海温异常可以持续到春季(3—5月),并在春季释放,进而激发大气环流的一系列响应,使得华南区域被异常下沉气流控制、气候态的西南水汽输送减弱、湿度减小,最终导致华南春季(3—5月)降水的减少。由于南半球环状模的信号超前华南春季降水一个季节,因此可以采用南半球环状模为预报因子对春季华南降水做出预测。定量的比较历史资料中模型后报的降水和实测降水发现,该模型有一定的预报技巧,性能比较稳定,并且对于南方前汛期连旱的情况,该模型也有一定的预报能力(李建平等,2013)。

5 南半球环状模与气候变化

20世纪末期,在全球变暖的大背景下,南半球环状模表现出明显的上升趋势。这种趋势主要归因为南极平流层臭氧的损耗(Thompson,et al,2002,2011;Gillett,et al,2003a,2003b,2005;Karoly,2003;Shindell,et al,2004;Marshall,et al,2004;Zheng,et al,2013)。同时,温室气体的增长也是造成南半球环状模增强趋势的外部强迫因子(Shindell,et al,2004)。最近的研究表明,在过去500年中也曾出现类似的南半球环状模增强趋势,20世纪末期与温室气体和臭氧有关的南半球环状模增强的趋势,在叠加自然变率后可能更强(Zhang,et al,2013)。热带海表温度的升温也对20世纪末期观测到的南半球环状模的上升趋势有所贡献(Grassi,2005)。

南极平流层臭氧损耗等造成的南半球环状模的显著变化,意味着南极极区气候系统的多个方面,包括表面温度、降水、海冰等,也将发生一系列变化。资料诊断和数值模拟的结果均表明,南半球环状模是过去半个世纪南半球气候变化的主要驱动力,南半球各要素的变化对南半球环状模的响应,与受南半球环状模自然年际变率影响的形式类似。例如,南极半岛的显著增暖(Turner,et al,2005),南极绕极流输送的增强(Gupta,et al,2006),温跃层厚度的改变(Sallee,et al,2010)等。实际上,南极臭氧损耗通过调制南半球环状模造成的气候变化,可以向北延伸至南半球的副热带甚至热带地区。例如,伴随着南半球环状模的增强,热带外风暴轴向极移动,雨带由中纬度向高纬度偏移,60°S附近降水增多,45°S附近降水减少,副热带20°S附近降水增多(Polvani,et al,2011;Son,et al,2009;Kang,et al,2011)。

由以上回顾可以看到,围绕南半球环状模的变化而导致的气候变化的研究,多集中在南半球。针对南半球环状模对北半球长期气候变化的可能影响,目前却鲜有涉及。Chen等(1998)曾利用数值试验讨论过南极臭氧损耗对北半球气候的可能影响,但是未就物理机制给出详细讨论。分析臭氧损耗造成的南半球环状模的长期趋势对北半球气候变化的可能影响,可为气候变化归因分析提供新的线索。

未来可能出现南极臭氧含量恢复(Hu,et al,2003,2009,2011)有利于南半球环状模出现下降趋势,与温室气体增强造成的南半球环状模上升趋势相反,因此,南半球环状模在未来不同气候情境下的可能演化成为气候变化领域的关注热点。预测南半球环状模的未来趋势,不仅有助于了解未来南半球中高纬度与急流位置、移动有关的环流变化,也对受南半球环状模影响地区的气候降尺度预测有着启示意义。耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project Phase,简称CMIP)资料为预估南半球环状模的未来变化提供了可能途径。多数CMIP3模式可以刻画观测到的20世纪末期南半球夏季(12—2月)南半球环状模的上升趋势(Cai,et al,2007;Fogt,et al,2009;Zhu,et al,2010)。但是,具有随时间变化的臭氧强迫模式模拟的趋势更加显著。Simpkins等(2012)和Zheng等(2013)分别利用CMIP3和CMIP5模式评估了未来不同情景下南半球环状模的趋势,结果表明,尽管考虑了南极臭氧的恢复,南半球环状模仍可因温室气体持续排放而继续保持上升趋势。

考虑到气候变化,在不同气候背景下南半球环状模对南半球或北半球气候的影响及机理是否会产生相应变化,也是值得进一步探索的重要问题。

6 结 语

近年来,南半球环状模的变化及其气候影响已成为一个新的研究方向,并已经取得了很多研究进展。文中针对南半球环状模气候影响方面的相关研究进行了回顾,主要总结了南半球环状模对南半球

气候、中国及其他北半球地区的气候影响方面的工作,主要结论如下:

目前,针对南半球环状模对南半球的气候影响的问题已取得了较为系统的认识,南半球环状模对南半球的海-气-冰系统存在显著的影响。总体而言,南半球环状模的正位相对应着南半球垂直环流的改变,高纬度上升运动的增强导致气温绝热冷却,降水异常增多;中纬度下沉运动的增强导致 40°—50°S 云量和降水的减少。由于南半球环状模的准正压结构,表层风速所产生的对下垫面海洋的动力和热力的驱动,使得海温、环流及海冰都显著响应于南半球环状模的变率。由于南半球环状模的信号在纬向风场上呈纬向对称性,南半球环状模的气候影响在南半球降水和海表湿度场上多表现出大尺度的纬向对称特征。但是南半球环流等要素对南半球环状模的响应,也有纬向非对称的局地特征的存在,尤其是对海冰和温跃层厚度而言。这种非对称性多与南半球环状模导致的经向风异常有关。

南半球环状模对北半球尤其是对中国气候的影响问题,目前也取得了较多有意义的结果。春季南半球环状模可以影响夏季东亚、西非、北美的季风系统及与之关联的季风降水,并且可以调节西北太平洋热带气旋活动;秋季南半球环状模可以影响东亚冬季风及中国冬季气温;前冬南半球环状模可以影响中国春季华南降水及北方沙尘频次。对以上过程的机制分析表明,海-气耦合过程在南半球环状模对北半球的气候影响中扮演着关键角色。无论是在南半球环状模信号的跨季节的存储、由南半球向北半球的传播、以及将存储的南半球环状模信号在下一个季节释放进而影响大气环流的过程中,均有海-气相互作用的体现。在应用方面,由于南半球环状模超前于中国相关气候要素的信号,可以用于对中国气候的短期气候预测。

虽然目前关于南半球环状模对北半球的气候影响研究已取得了一些成果,但是还有许多问题有待进一步深入。例如,目前围绕南半球环状模对夏季风及夏季气候的研究成果较多,对其他季节的研究尚需进一步加强,尤其是目前对春季和秋季气候的研究还相对较少。而春季和秋季是冬夏季节过渡期,是冬夏季风系统的转换期,往往冷暖空气交汇频繁,并且对于农耕有重要影响。另外,目前南半球环状模对北半球气候系统的研究,多是从局地角度上,分析南半球环状模对个别区域的气候影响,考虑到南半球环状模的纬向对称结构以及其对纬向平均垂直环流的影响,很可能会对北半球空间上大尺度的气候有所作用,而目前从大尺度角度上探讨南半球环状模对北半球的气候影响的工作还相对较少。并且,南半球环状模对区域气候的研究,也多是集中探讨了季风区的气候与南半球环状模的联系,南半球环状模对北半球其他区域的可能影响尚不明确。除南半球环状模外,厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)、北大西洋涛动及北半球环状模等模态也是调控北半球气候的重要系统,而以往研究表明南半球环状模有可能与 ENSO 存在负相关关系(Zhou,et al,2004;Gong,et al,2010,2013;Ding,et al,2011,2012),南半球环状模的正(负)位相往往对应拉尼娜(厄尔尼诺)事件。如何辨识南半球环状模的影响,及其与其他模态的协同作用,也是需要进一步考虑的问题。

参考文献

鲍学俊,王盘兴,覃军. 2006. 南极涛动与江淮梅雨异常的时滞相关分析. 南京气象学院学报,29(3):348-352

范可. 2006. 南半球环流异常与长江中下游夏季旱涝的关系. 地球物理学报,49(3):672-679

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. 大气科学,30(3):402-412

范可,王会军. 2007. 南极涛动异常及其对冬春季北半球大气环流影响的数值模拟试验. 地球物理学报,50(2):397-403

范丽军,李建平,韦志刚等. 2003. 北极涛动和南极涛动的年变化特征. 大气科学,27(3):419-424

高辉,薛峰,王会军. 2003. 南极涛动的年际变化对江淮梅雨的影响及预报意义. 科学通报,48(S2):87-92

高辉,刘芸芸,王永光等. 2012. 亚洲夏季风爆发早晚的新前兆信号:冬季南极涛动. 科学通报,57(36):3516-3521

龚道溢,王绍武. 1998. 南极涛动. 科学通报,43(3):296-301

李建平. 2005a. 海气耦合涛动与中国气候变化//秦大河. 中国气候与环境演变(上卷). 北京:气象出版社,324-333

李建平. 2005b. 北极涛动的物理意义及其与东亚大气环流的关系//俞永强,陈文. 海-气相互作用对我国气候变化的影响. 北京:气象出版社,169-176

李建平,吴国雄,胡敦欣. 2011a. 亚印太交汇区海气相互作用及其对我国短期气候的影响(上卷). 北京:气象出版社,1-516

李建平,吴国雄,胡敦欣. 2011b. 亚印太交汇区海气相互作用及其对我国短期气候的影响(下卷). 北京:气象出版社,517-1081

李建平,任荣彩,齐义泉等. 2013. 亚洲区域海-陆-气相互作用对全球和亚洲气候变化的作用研究进展. 大气科学,37(2):518-538

李晓峰,李建平. 2010. 月内尺度南半球环状模对应的大气环流异

常传播特征. 大气科学, 34(6): 1099-1113

李晓峰, 李建平. 2012. 南半球环状模事件的准地转调整过程分析. 大气科学, 36(4): 755-768

南素兰, 李建平. 2005a. 春季南半球环状模与长江流域夏季降水的关系: Ⅰ. 基本事实. 气象学报, 63(6): 837-846

南素兰, 李建平. 2005b. 春季南半球环状模与长江流域夏季降水的关系: Ⅱ. 印度洋、南海海温的"海洋桥"作用. 气象学报, 63(6): 847-856

钱卓蕾. 2014. 秋季南极涛动异常对冬季中国南方降水的影响. 大气科学, 38(1): 190-200

宋洁, 李崇银. 2009. 南极涛动和北半球大气环流异常的联系. 大气科学, 33(4): 847-858

孙丹, 薛峰, 周天军. 2013. 不同年代际背景下南半球环流变化对中国夏季降水的影响. 气候与环境研究, 18(1): 51-62

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. 科学通报, 51(24): 2910-2914

吴志伟, 何金海, 韩桂荣等. 2006a. 长江中下游梅雨与春季南半球年际模态(SAM)的关系分析. 热带气象学报, 22(1): 79-85

吴志伟, 李建平, 何金海等. 2006b. 大尺度大气环流异常与长江中下游夏季长周期旱涝急转. 科学通报, 51(14): 1717-1724

薛峰. 2005. 南半球环流变化对东亚夏季风的影响. 气候与环境研究, 10(3): 401-407

张文霞, 孟祥凤. 2011. 南极绕极流区中尺度涡动动能年际变化和转换机制. 极地研究, 23(1): 42-48

张自银, 龚道溢, 何学兆等. 2010. 近500年南极涛动指数重建及其变率分析. 地理学报, 65(3): 259-269

郑菲, 李建平. 2012. 前冬南半球环状模对春季华南降水的影响及其机理. 地球物理学报, 55(11): 3542-3557

Ansell T J, Reason C J C, Smith I N, et al. 2000. Evidence for decadal variability in southern Australian rainfall and relationships with regional pressure and sea surface temperature. Int J Climatol, 20(10): 1113-1129

Bals-Elsholz T M, Atallah E H, Bosart L F, et al. 2001. The wintertime Southern Hemisphere split jet: Structure, variability, and evolution. J Climate, 14(21): 4191-4215

Cai W J, Watterson I G. 2002. Modes of interannual variability of the Southern Hemisphere circulation simulated by the CSIRO climate model. J Climate, 15(10): 1159-1174

Cai W J, Shi G, Li Y. 2005. Multidecadal fluctuations of winter rainfall over southwest Western Australia simulated in the CSIRO Mark 3 coupled model. Geophys Res Lett, 32(12), doi: 10.1029/2005GL022712

Cai W J, Cowan T. 2006. SAM and regional rainfall in IPCC AR4 models: Can anthropogenic forcing account for southwest Western Australian winter rainfall reduction? Geophys Res Lett, 33(24), doi: 10.1029/2006GL028037

Cai W J, Cowan T. 2007. Trends in Southern Hemisphere circulation in IPCC AR4 models over 1950-99: Ozone depletion versus greenhouse forcing. J Climate, 20(4): 681-693

Chen Y J, Zhang H, Bi X Q. 1998. Numerical experiment for the impact of the ozone hole over Antarctica on the global climate. Adv Atmos Sci, 15(3): 300-311

Ding Q H, Wang B, Wallace J M, et al. 2011. Tropical-extratropical teleconnections in boreal summer: Observed interannual variability. J Climate, 24(7): 1878-1896

Ding Q H, Steig E, Battisti D, et al. 2012. Influence of the tropics on the Southern Annular Mode. J Climate, 25(18): 6330-6348

Ding R Q, Li J P, Wang S G, et al. 2005. Decadal change of the spring dust storm in northwest China and the associated atmospheric circulation. Geophys Res Lett, 32(2), doi:10. 1029/2004GL021561

Fan K, Wang H J. 2004. Antarctic oscillation and the dust weather frequency in North China. Geophys Res Lett, 31(10), doi: 10.1029/2004GL019465

Fan L J, Li J P, Wei Z G, et al. 2003. Annual variations of the arctic oscillation and the antarctic oscillation. Chin J Atmos Sci, 27(4): 352-358

Fauchereau N, Trzaska S, Richard Y, et al. 2003. Sea-surface temperature co-variability in the southern Atlantic and Indian Oceans and its connections with the atmospheric circulation in the southern hemisphere. Int J Climate, 23(6): 663-677

Feng J, Li J P, Li Y. 2010. Is there a relationship between the SAM and southwest Western Australian winter rainfall? J Climate, 23(22): 6082-6089

Feng J, Li J P, Xu H L. 2013. Increased summer rainfall in northwest Australia linked to southern Indian Ocean climate variability. J Geophys Res, 118(2):467-480

Fogt R L, Perlwitz J, Monaghan A J, et al. 2009. Historical SAM variability. Part Ⅱ: Twentieth-century variability and trends from reconstructions, observations, and the IPCC AR4 models. J Climate, 22: 5346-5365

Gillett N P, Thompson D W J. 2003a. Simulation of recent Southern Hemisphere climate change. Science, 302(5643): 273-275

Gillett N P, Allen M R, Williams K D. 2003b. Modelling the atmospheric response to doubled CO_2 and depleted stratospheric ozone using a stratosphere-resolving coupled GCM. Quart J Roy Meteor Soc, 129(589): 947-966

Gillett N P, Allan R J, Ansell T J. 2005. Detection of external influence on sea level pressure with a multi-model ensemble. Geophys Res Lett, 32(19), doi:10.1029/2005GL023640

Gillett N P, Kell T D, Jones P D. 2006. Regional climate impacts of the Southern Annular Mode. Geophys Res Lett, 33(23), doi: 10.1029/2006GL027721

Gnanadesikan A, Hallberg W. 2000. On the relationship of the circumpolar current to Southern Hemisphere winds in coarse-resolution ocean models. J Phys Oceanogr, 30(8): 2013-2034

Gong D Y, Wang S W. 1999. Definition of antarctic oscillation index. Geophys Res Lett, 26(4): 459-462

Gong D Y, Kim S J, Ho C H. 2009. Arctic and antarctic oscillation signatures in tropical coral proxies over the South China Sea.

Ann Geophys, 27(5): 1979-1988

Gong T T, Feldstein S B, Luo D H. 2010. The impact of ENSO on wave breaking and Southern Annular Mode events. J Atmos Sci, 67(9): 2854-2870

Gong T T, Feldstein S B, Luo D H. 2013. A simple GCM model study on the relationship between ENSO and the Southern Annular Mode. J Atmos Sci, 70(6): 1821-1832

González M H, Vera C S. 2010. On the interannual wintertime rainfall variability in the Southern Andes. Int J Climatol, 30(5): 643-657

Grassi B, Redaelli G, Visconti G. 2005. Simulation of polar Antarctic trends: Influence of tropical SST. Geophys Res Lett, 32, doi:10.1029/2005GL023804

Gupta A S, England M H. 2006. Coupled ocean-atmosphere-ice response to variations in the Southern Annular Mode. J Climate, 19(18): 4457-4486

Hall A, Visbeck M. 2002. Synchronous variability in the Southern Hemisphere atmosphere, sea ice, and ocean resulting from the Annular Mode. J Climate, 15(21): 3043-3057

Hendon H H, Thompson D W J, Wheeler M C. 2007. Australian rainfall and surface temperature variations associated with the Southern Hemisphere annular mode. J Climate, 20(11): 2452-2467

Hennessy K J, Suppiah R, Page C M. 1999. Australian rainfall changes, 1910-1995. Aust Meteor Mag, 48: 1-13

Ho C H, Kim J H, Kim H S, et al. 2005. Possible influence of the Antarctic Oscillation on tropical cyclone activity in the Western North Pacific. J Geophys Res, 110: D19104, doi: 10.1029/2005JD005766

Hu Y Y, Tung K. 2003. Possible ozone-induced long-term changes in planetary wave activity in late winter. J Climate, 16(18): 3027-3038

Hu Y Y, Xia Y, Gao M, et al. 2009. Stratospheric temperature changes and ozone recovery in the 21st Century. Acta Meteor Sinica, 23(3): 263-275

Hu Y Y, Xia Y, Fu Q. 2011. Tropospheric temperature response to stratospheric ozone recovery in the 21st century. Atmos Chem Phys, 11(15): 7687-7699

Kang S M, Polvani L M, Fyfe J C, et al. 2011. Impact of polar ozone depletion on subtropical precipitation. Science, 332(6032): 951-954

Karoly D J. 2003. Ozone and climate change. Science, 302(5643): 236-237

Kwok R, Comiso J C. 2002. Spatial patterns of variability in Antarctic surface temperature: connections to the Southern Hemisphere Annular Mode and the Southern Oscillation. Geophys Res Lett, 29, doi:10.1029/2002GL015415

Lefebvre W, Goosse H, Timmermann R, et al. 2004. Influence of the Southern Annular Mode on the sea ice-ocean system. J Geophys Res, 109(C9), doi:10.1029/2004JC002403

Lefebvre W, Goosse H. 2005. Influence of the Southern Annular Mode on the sea ice-ocean system: The role of the thermal and mechanical forcing. Ocean Sci, 2: 299-329

Li J P, Wang J X L. 2003. A modified zonal index and its physical sense. Geophys Res Lett, 30(12), doi:10.1029/2003GL017441

Li Y, Cai W J, Campbell E P. 2005. Statistical modeling of extreme rainfall in southwest Western Australia. J Climate, 18(6): 852-863

Limpasuvan V, Hartmann D L. 1999. Eddies and the Annular Modes of climate variability. Geophys Res Lett, 26(20): 3133-3136

Lorenz D J, Hartmann D L. 2001. Eddy-zonal flow feedback in the Southern Hemisphere. J Atmos Sci, 58(21): 3312-3327

Lu R Y, Li Y, Dong B W. 2007. Arctic Oscillation and Antarctic Oscillation in internal atmospheric variability with an ensemble AGCM simulation. Adv Atmos Sci, 24(1): 152-162

Mao R, Gong D Y, Yang J, et al. 2013. Is there a linkage between the tropical cyclone activity in the southern Indian Ocean and the Antarctic Oscillation? J Geophys Res Atmos, 118(15): 8519-8535

Marini C, Frankignoul C, Mignot J. 2011. Links between the Southern Annular Mode and the Atlantic Meridional Overturning Circulation in a climate model. J Climate, 24(3): 624-640

Marshall G J. 2003. Trends in the Southern Annular Mode from observation and reanalysis. J Climate, 16(24): 4134-4143

Marshall G J, Stott P A, Turner J, et al. 2004. Causes of exceptional atmospheric circulation changes in the Southern Hemisphere. Geophys Res Lett, 31(14), doi: 10.1029/2004GL019952

Marshall G J, Connolley W M. 2006. Effect of changing Southern Hemisphere winter sea surface temperatures on Southern Annular Mode strength. Geophys Res Lett, 33(17), doi: 10.1029/2006GL026627

Marshall G J. 2007. Half-century seasonal relationships between the Southern Annular mode and Antarctic temperatures. Int J Climatol, 27(3): 373-383

Meneghini B, Ian S, Smith I N. 2007. Association between Australian rainfall and the southern annular mode. Int J Climatol, 27(1): 109-121

Meredith M P, Hughes C W. 2004a. On the wind forcing of bottom pressure variability at Amsterdam and Kerguelen Islands, southern Indian Ocean. J Geophys Res, 109(C3), doi:10.1029/2003JC002060

Meredith M P, Woodworth P L, Hughes C W, et al. 2004b. Changes in the ocean transport through Drake Passage during the 1980s and 1990s, forced by changes in the Southern Annular Mode. Geophys Res Lett, 31(21), doi: 10.1029/2004GL021169

Mo K C. 2000. Relationships between low-frequency variability in the Southern Hemisphere and sea surface temperature anoma-

lies. J Climate, 13(20): 3599-3610

Nan S L, Li J P. 2003. The relationship between the summer precipitation in the Yangtze River valley and the boreal spring Southern Hemisphere annular mode. Geophys Res Lett, 30(24), doi:10.1029/2003GL018381

Nan S L, Li J P, Yuan X J, et al. 2009. Boreal spring Southern Hemisphere Annular Mode, Indian Ocean sea surface temperature, and East Asian summer monsoon. J Geophys Res, 114(D2): D02103, doi:10.1029/2008JD010045

Polvani L M, Waugh D W, Correa G J P, et al. 2011. Stratospheric ozone depletion: The main driver of twentieth-century atmospheric circulation changes in the Southern Hemisphere. J Climate, 24(3): 795-812

Raphael M N, Hobbs W, Wainer I. 2011. The effect of Antarctic sea ice on the Southern Hemisphere atmosphere during the southern summer. Clim Dyn, 36(7-8): 1403-1417

Reason C J C, Rouault M. 2005. Links between the Antarctic Oscillation and winter rainfall over western South Africa. Geophys Res Lett, 32(7), doi:10.1029/2005GL022419

Renwick J A. 2002. Southern hemisphere circulation and relations with sea ice and sea surface temperature. J Climate, 15(21): 3058-3068

Rogers G T. 1981. The north-Pacific oscillation. J Climate, 1(1): 39-57

Sallee J B, Speer K G, Rintoul S R. 2010. Zonally asymmetric response of the Southern Ocean mixed-layer depth to the Southern Annular Mode. Nature Geoscience, 3(4): 273-279

Schneider D P, Steig E J, Comiso J C. 2004. Recent climate variability in Antarctica from satellite-derived temperature data. J Climate, 17(7): 1569-1583

Shindell D T, Schmidt G A. 2004. Southern Hemisphere climate response to ozone changes and greenhouse gas increase. Geophys Res Lett, 31(18), doi:10.1029/2004GL020724

Simpkins G R, Karpechko A Y. 2012. Sensitivity of the southern annular mode to greenhouse gas emission scenarios. Climate Dyn, 38(3-4): 563-572

Son S W, Tandon N F, Polvani L M, et al. 2009. Ozone hole and Southern Hemisphere climate change. Geophys Res Lett, 36(15), doi:10.1029/2009GL038671

Song J, Zhou W, Li C Y, et al. 2009. Signature of the Antarctic oscillation in the northern hemisphere. Meteor Atmos Phys, 105(1-2): 55-67

Sun C, Li J P. 2012. Space-time spectral analysis of the Southern Hemisphere daily 500-hPa geopotential height. Mon Wea Rev, 140(12): 3844-3856

Sun J Q. 2010. Possible impact of the boreal spring Antarctic Oscillation on the North American summer monsoon. Atmos Oceanic Sci Lett, 3(47): 232-236

Sun J Q, Wang H J, Yuan W. 2010. Linkage of the boreal spring Antarctic Oscillation to the West African summer monsoon. J Meteor Soc Japan, 88(1): 15-28

ThompsonD W J, Wallace J M. 1998. The Arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. Geophys Res Lett, 25(9): 1297-1300

Thompson D W J, Wallace J M. 2000a. Annular modes in the extratropical circulation. Part Ⅰ: Month-to-month variability. J Climate, 13(5): 1000-1016

Thompson D W J, Wallace J M, Hegerl G C. 2000b. Annular modes in the extratropical circulation: Part Ⅱ: Trends. J Climate, 13(5): 1018-1036

Thompson D W J, Solomon S. 2002. Interpretation of recent Southern Hemisphere climate change. Science, 296(5569): 895-899

Thompson D W J, Lorenz D J. 2004. The signature of the annular modes in the tropical troposphere. J Climate, 17(22): 4330-4342

Thompson D W J, Solomon S, Kushner P J, et al. 2011. Signatures of the Antarctic ozone hole in Southern Hemisphere surface climate change. Nat Geosci, 4(11): 1752-0894

Turner J, Colwell S R, Marshall G J, et al. 2005. Antarctic climate change during the last 50 years. Int J Climatol, 25(3): 279-294

Walker G T, Bliss E W. 1932. World weather. V Mem Roy Meteor Sci, 4: 53-84

Wallace J M, Gutzler D S. 1981. Teleconnections in the Geopotential Height Field during the Northern Hemisphere Winter. Mon Wea Rev, 109(4): 784-812

Wang H J, Fan K. 2005. Central-north China precipitation as reconstructed from the Qing dynasty: Signal of the Antarctic Atmospheric Oscillation. Geophys Res Lett, 32(24): L24705, doi:10.1029/2005GL024562

Watterson I G. 2000. Southern midlatitude zonal wind vacillation and its interaction with the ocean in GCM simulations. J Climate, 13(3): 562-578

Watterson I G. 2001. Zonal wind vacillation and its interaction with the ocean: Implications for interannual variability and predictability. J Geophys Res, 106(D20): 23965-23975

Wu Z W, Li J P, He J H, et al. 2006a. Occurrence of droughts and floods during the normal summer monsoons in the mid- and lower reaches of the Yangtze River. Geophys Res Lett, 33, doi:10.1029/2005GL024487

Wu Z W, Li J P, He J H, et al. 2006b. The large-scale atmospheric singularities and the summer long-cycle droughts-floods abrupt alternation in the middle and lower reaches of the Yangtze River. Chinese Sci Bull, 50(16): 2027-2034

Wu Z W, Li J P, Wang B, et al. 2009. Can the Southern Hemisphere annular mode affect China winter monsoon? J Geophys Res, 114, doi:10.1029/2008JD011501

Xue F, Wang H J, He J H. 2004. Interannual variability of Mascarene high and Australian high and their influences on East Asian summer monsoon. J Meteor Soc Japan, 82(4): 1173-1186

Yuan X J, Yonekura E. 2011. Decadal variability in the Southern

Hemisphere. J Geophys Res-Atmos, 116(D19), doi:10.1029/2011JD015673

Yue X, Wang H J. 2008. The springtime North Asia cyclone activity index and the Southern Annular Mode. Adv Atmos Sci, 25(4): 673-679

Zhang Y, Yang X Q, Nie Y, et al. 2012. Annular Mode-like variation in a multilayer quasigeostrophic model. J Atmos Sci, 69(10): 2940-2958

Zhang Z Y, Gong D Y, Kim S J, et al. 2013. Is the Antarctic oscillation trend during the recent decades unusual? Antarctic Science. Antarctic Science, available on CJO2013, doi:10.1017/S0954102013000734

Zheng F, Li J P, Clark R, et al. 2013. Simulation and projection of the Southern Hemisphere Annular Mode in CMIP5 models. J Climate, 26(24): 9860-9879

Zhou T J, Yu R C. 2004. Sea-surface temperature induced variability of the Southern Annular Mode in an atmospheric general circulation model. Geophys Res Lett, 31(24), L24206

Zhu Y L, Wang H J. 2010. The arctic and antarctic oscillations in the IPCC AR4 coupled models. Acta Meteor Sinica, 24(2): 176-188

欢迎订阅 2015 年度《气象学报》

《气象学报》中文版创刊于 1925 年,是由中国气象局主管,中国气象学会主办的全国性大气科学学术期刊,主要刊载有关大气科学及其交叉科学研究的具有创新性的论文;国内外大气科学发展动态的综合评述;新观点、新理论、新技术、新方法的介绍;研究工作简报及重要学术活动报道;优秀大气科学专著的评介以及有关本刊论文的学术讨论等。

《气象学报》中文版 2003 年和 2005 年连续两次荣获中华人民共和国新闻出版总署颁发的第二届、第三届“国家期刊奖百种重点学术期刊”奖;2003—2007、2009 年被中国科学技术信息研究所评为“百种中国杰出学术期刊”;2007—2011 年获得中国科学技术协会精品科技期刊工程项目的资助,2008、2011、2014 年《气象学报》(中文版)被评选为“中国精品科技期刊”;2012 年获评“中国最具国际影响力学术期刊”;2013 年入选国家新闻出版广电总局“百强科技期刊”。

《气象学报》为大气科学研究提供了学术交流平台,一直致力于推动中国大气科学基础研究和理论研究的发展,服务于中国气象现代化建设事业。作者和读者对象主要为从事气象、海洋、地理、环境、地球物理、天文、空间及生态等学科的科研人员、高校师生。

《气象学报》中文版为双月刊,国内外发行。

2015 年全年共 6 期,定价 240 元/年。

邮发代号:2-368(国内)　　BM329(国际)

通讯地址:北京市中关村南大街 46 号　中国气象学会《气象学报》编辑部

邮政编码:100081

联系电话:010-68406942, 68408571 (传真)

邮　　箱:cmsqxxb@263.net; qxxb@cms1924.org

期刊主页:http://www.cmsjournal.net/qxxb_cn

开户银行:北京建行白石桥支行

户　　名:中国气象学会

帐　　号:11001028600059261046

《气象学报》2015 年征订回执单

年　月　日

订户单位全称				经手人	
订户详细地址				邮政编码	
刊物名称	全年订价	订阅份数	总金额	（订户单位盖章）	
《气象学报》中文版	240.00 元				
总金额(大写)	仟　佰　拾　元　角　分				
说明:此联与汇款凭证一起报销有效。					