

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

范 可¹ 王会军²

1 云南大学大气科学系, 昆明 650091

2 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘 要 南半球大气环流是全球大气环流的重要组成部分, 也是影响气候变化和亚洲季风系统的一个重要因素。中国气象学家很早就注意到南半球大气环流对东亚夏季风降水的影响。近年来, 有关南半球气候变率的研究目前正受到世界气象学家越来越多的关注。南半球中高纬大气资料的丰富及南极涛动的确定, 使得认识南半球高中纬环流的年际变动规律及其与东亚气候关系成为可能。本文主要介绍近年来有关南极涛动的年际变化与沙尘天气发生频次及东亚冬春季气候的关系, 古气候资料揭示的南极涛动与华北降水的关系, 以及南半球大气环流与长江中下游夏季降水的关系和南极涛动变率的可预测性等方面的研究进展。并对未来研究方向作了初步的展望。

关键词 南极涛动 东亚气候 沙尘天气发生频次 可预测性

文章编号 1006-9895(2006)03-0402-11 **中图分类号** P461 **文献标识码** A

Studies of the Relationship Between Southern Hemispheric Atmospheric Circulation and Climate over East Asia

FAN Ke¹ and WANG Hui-Jun²

1 Department of Atmospheric Science, Yunnan University, Kunming 650091

2 Nansen-Zhu International Research Center, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract The Southern Hemisphere (SH) atmospheric circulation is both an important component of the global general circulation and a key factor influencing the global climate change and Asian monsoon systems. In early times, Chinese meteorologists focused the role of SH in the East Asia summer monsoon and obtain important results. Studies of the SH climate variability are currently paid much attention by meteorologists in the world. In recent years, meteorologists have been doing researches on the SH interannual variability and its association with East Asian Climate, with special focus on the Antarctic Oscillation (AAO) and the subtropical high pressure systems in SH. Besides, studies of the relationship between SH and both East Asian climate and dust during boreal winter and spring have been paid much attention as well. This paper introduces recent studies including the relationship between the interannual variability of AAO and dust weather frequency (DWF) in North China and East Asian climate during boreal winter and spring; central North China precipitation based on the reconstructed data from the Qing Dynasty; the summer rainfall over the Yangtze River valley, as well as the reproducibility of variability of AAO. Potential future research focuses are also discussed in the paper. Recent results show that the interannual variation of AAO plays a significant role in the dust-related atmospheric circulation during boreal spring. AAO and DWF correlate well, with positive AAO tending to decrease DWF in North China. Two possible mechanisms for the AAO-

DWF coupling are identified; one is related to a meridional teleconnection pattern; the other is related to a regional circulation pattern over the Pacific Ocean. The positive AAO anomaly decreases the cold activity over East Asia during boreal winter and spring. AAO-related barotropic meridional teleconnection from Antarctic to Arctic is found through analysis of mean meridional circulations. This meridional teleconnection is remarkable over Eurasia area during boreal winter and over the Pacific Ocean during boreal spring. Based on analysis of the long-term central North China precipitation (CNCP) time series reconstructed from the Qing Dynasty official document, it is found that the AAO is negatively correlated with the CNCP during June–July. It follows that AAO-related variability of convergence and convection over the tropical western Pacific can exert impact on the circulation condition and precipitation in north China (actually, the precipitation in the Yangtze River valley as well) through atmospheric teleconnection known as the East Asia-Pacific (or Pacific Japan) teleconnection wave pattern. Researches show that the interannual of Mascarene high (MH) and Australian high (AH) in boreal spring may provide some useful information for the East Asian summer monsoon precipitation. With the intensification of MH during boreal spring through summer, the Meiyu rain tends to increase while the effect of AH on summer rain is confined to southern China. Its physical mechanisms are related to change of convection near the Philippines. The reproducibility of variability of AAO is another focus. Using the NCAR CAM2 model forced with the historical sea surface temperature covering the period of 1950–2000, there would be some predictability to the AAO. The reproducibility is greater during the austral summer than winter, and the source of much of reproducibility is the tropical Pacific SST. Besides, Sea temperature at high latitudes of SH may force the AAO during boreal spring using IAP9L-AGCM model. However, the issues on the relationships between the Southern Hemisphere circulation and East Asian climate still need be studied further.

Key words Antarctic oscillation, East Asian climate, dust weather frequency, predictability

1 引言

东亚地区处于亚洲的季风活动区, 因此, 季风系统的季节、年际和年代际的异常直接影响着东亚和亚洲的气候异常, 如东亚冬季风异常造成冬春季的雪灾、寒害和沙尘暴以及夏季风异常造成旱涝等。

那么, 为什么要关注南半球大气环流与东亚气候的关系?

南半球是季风形成的一个关键区。很早以来, 气象学家就认识到南北半球大气的相互作用是季风现象的成因, 南北半球的海陆分布差异产生了两半球间跨赤道的季风现象^[1~3]。近年来, 曾庆存和李建平^[4]采用理性和统计分析, 进一步阐明行星热对流环流是热带季风的“第一推动力”, 而地表特性差异(海陆热力特性差异、地形高度等)所导致的准定常行星波为“第二推动力”。两推动力在亚澳季风区合拍, 使热带季风在亚澳区内最明显, 而各经圈环流圈的上下、南北关联及中高纬准定常行星波的配置, 则使全球范围内从低纬到高纬、从低空到高空有地域性的明显季节变化区, 从而构成三度的全球季风系统。

南半球的中低纬大气环流是亚洲季风系统的重要成员之一。亚洲季风系统包括印度季风系统和东亚季风系统, 两者相互联系而又有各自的独立性。印度季风系统的主要组成部分包括低空南半球的马斯克林高压, 索马里低空越赤道气流, 印度北部的季风槽、高空的南亚高压和高空自北半球向南半球的越赤道气流^[5]; 东亚夏季风系统包括印度的西南季风气流、澳大利亚的冷性反气旋, 沿 100°E 以东的越赤道气流、南海和赤道西太平洋的季风槽、西太平洋副高和赤道东风气流、梅雨锋及中纬度扰动^[6]。在低空, 南亚夏季风及部分东亚夏季风的源头正是南半球热带印度洋的越赤道气流。陶诗言等^[7]曾提出, 季风的爆发起源于东亚南半球的越赤道气流。

气象学家早就认识到用全球整体的观点来研究大气环流变化和进行天气预报的重要性, 揭示了南北半球环流的相互作用对北半球季风、热带、副热带天气系统及台风活动影响的天气事实, 并指出南北半球的侧向交换和侧向耦合是两半球相互作用的主要形式。例如, 早在 20 世纪 30 年代, 李宪之^[8]发现南半球的冬季寒潮可引起北半球西太平洋上空发生发展飓风, 陶诗言等^[9]从天气分析的角度提出

两半球间环流关系密切,在东亚低纬经向环流的盛行期间,南半球(特别是澳洲)也盛行经向环流,并且在澳洲附近从南半球向北半球的质量输送最强烈。20 世纪 60 年代末,Findlater^[10]发现了索马里低空急流,Krishnamuri^[11]和 Banoon^[12, 13]对索马里急流作了数值模拟和动力研究。随后,许多气象工作者^[14~18]研究了西太平洋的越赤道气流,李曾中和楼光平^[19]细分了北半球东半球夏季风的四个越赤道气流通道。钱永甫等^[20]采用数值模式模拟了索马里越赤道气流的发展过程并讨论了其形成机制,指出索马里的低空急流的发展分为两个基本阶段,同时指出在边界层中,气流的发展主要取决于非绝热加热的海陆地形的分布,与地形的高度关系较小,但地形高低对气流的强度、垂直伸展高度和风速轴线高度的倾斜有影响。杨修群和黄土松^[21]、何金海等^[22]以及徐祥德等^[23]采用数值模拟研究南半球的马斯克林高压和澳大利亚高压系统的变化对两半球大气环流异常的影响。薛峰等^[24]和曾庆存等^[25]从季节变化入手,揭示出大气环流从春到夏的季节变化首先开始于南半球和平流层事实,这说明了南半球环流变化在全球季节变化的重要性。

南极涛动(AAO)是近年来得到确认的南半球中高纬大气环流主要的气候变率模态,又称为南半球中高纬大气环流的环状模,它具有很强的纬向对称性和明显的正压结构,从海平面气压场到对流层以及平流层低层都有反映,同时有年代际、年际、季节内时间尺度变化^[26~31]。南极涛动在全年中信号显著,有更好的季节持续性。其实质就是南半球极地到高纬 60°S 附近与中纬度 45°S 附近南北向之间的大尺度质量交换,表示了南半球绕极低压带和副热带高压带之翘翘板的变化。南极涛动正(强)异常时,绕极低压带加深和副热带高压带加强,高中纬度之间的气压梯度加大,高纬西风加强^[32]。已有研究^[30~33]证实南极涛动异常能够影响南半球中高纬的气候和天气异常。研究还发现近几十年来南极涛动在增强^[30~33],但增强的原因不清。

黄荣辉等^[34]总结了影响东亚气候系统年际变化异常的多种气候系统因子,其中有大气内部的因子和大气外部的因子。如西太平洋副高、东亚季风活动异常、西风带异常等和 ENSO、西太平洋暖池、青藏高原的热力和动力作用、陆面强迫等,正是这些因子的综合作用使东亚气候年际和年代际变化规

律复杂。王会军在研究中注意到,东亚夏季风在 20 世纪 70 年代末期减弱了,同时相伴出现南半球大气环流异常^[35],并发现东亚夏季风与 ENSO 的联系存在着不稳定性^[36]。正是这些研究事实启发我们:南半球中高纬大气环流的变动,尤其是春季环流,有没有可能是影响东亚气候异常的一个显著的影响因子呢?许多事实已揭示了南半球中低纬大气环流对东亚夏季风的影响是显著的,然而,南半球大气环流对东亚冬春季气候和沙尘天气有无影响?既然南半球大气环流,尤其是中高纬大气环流,变化稳定,如果能搞清楚它与东亚气候的关系,一方面将有助于加深认识亚洲季风的形成、变异和对亚洲、东亚气候影响的机理,另一方面,南半球大气环流有可能作为东亚气候系统年际变化的一个预测因子。

2 关于南半球大气环流变动与东亚夏季气候的关系

近几年,薛峰等^[37, 38]从年际尺度研究了南半球环流(马斯克林高压和澳大利亚高压)对东亚夏季风降水的影响机理,研究结果表明,马斯克林高压的年际变化主要取决于南极涛动,当南半球高纬绕极低压加深时,马斯克林高压加强,而澳大利亚高压的年际变化与南极涛动和 ENSO 有关,当 ENSO 发生时,澳大利亚高压加强。相关分析和个例分析均表明,当北半球从春到夏马斯克林高压增强时,中国长江流域至日本一带多雨,华南到台湾以东的西太平洋及东亚中纬度地区少雨。澳大利亚高压的影响只限于华南地区,澳大利亚高压增强时,华南多雨。他们的合成分析发现夏季马斯克林高压增强不但可以使索马里越赤道气流增强而且使澳大利亚高压及澳大利亚高压北部的越赤道气流加强,在 850 hPa 赤道西太平洋两侧出现气旋对环流异常,使得赤道中西太平洋信风减弱而菲律宾附近的对流活动减弱,从而激发负的东亚-太平洋遥相关型,使得西太平洋副高减弱,长江中下游夏季降水偏多。

施宁等^[39]研究了东半球夏季越赤道气流的气候学特征、越赤道气流对南海季风爆发的影响、越赤道气流与海温场的联系以及华东地区旱涝的影响,他们研究表明南非高压、南印度高压和澳大利亚高压对越赤道气流的维持和强度变化具有重要的

作用; 北太平洋海温对越赤道气流的强弱也具有重要的影响; 5、6 月份索马里越赤道气流偏强, 南海季风偏早, 华东地区旱涝年越赤道气流显著偏强, 雨涝年呈强弱相间的变化。李向红等^[40]研究表明华南暴雨和亚洲两支越赤道气流的关系紧密, 在华南暴雨发生前, 索马里和 105°E 赤道附近存在经向风扰动增强的现象。王会军等^[41]针对索马里急流的年际变化及其对东亚夏季降水的影响问题展开分析研究, 其结果揭示了索马里急流作为最主要的越赤道气流, 对两半球的水汽输送起最关键的作用, 它把水汽从冬半球输送到夏半球。他们讨论了索马里急流影响东亚气候现象的可能物理机制是, 首先, 索马里急流强度的变化会直接影响越赤道向南亚季风区和东亚季风区的水汽输送量, 进而影响那里的水汽供应和降水量变化; 其次, 索马里急流的变化可以直接影响西南季风, 通过西南季风的变化再影响东亚气候; 第三, 索马里低空急流的变化会同时导致高空经向气流的变化, 它的变化会与南亚高压相联系, 再配合低层西南季风气流的变化引起高低层辐散辐合的变化, 从而影响东亚气候。影响索马里急流的物理机制可能有两个: (1) 澳大利亚以南的偶极型异常会影响马斯克林高压, 进而影响索马里低空急流; (2) 亚洲季风环流系统的同期和前期变化在高层和低层都会导致南北向气流强度变化, 从而影响索马里急流。也就是说, 亚洲季风环流和索马里急流是相互联系和相互作用的两个系统。高辉等^[42]考虑到年平均的南半球副热带高压带中心脊线及费雷尔环流的下沉支在 30°S , 将南极涛动指数定义为 30°S 和 60°S 纬圈平均的气压差的标准化值, 他们的研究表明 5 月南极涛动对江淮梅雨有重要影响和预测意义, 5 月南极涛动加强, 江淮梅雨量多, 出梅晚, 梅雨期长。Nan 和 Li^[43]的研究也表明了春季 (4~5 月) 的南极涛动与长江中下游的夏季降水有显著的正相关关系, 春季南极涛动加强, 对应着东亚夏季风减弱和西太平洋副高加强西伸。

范可^[44]从长江中下游夏季降水的年际变化出发, 比较和分析了与其对应的春夏两季南半球持续环流异常, 并讨论可能的影响机制, 发现长江中下游夏季降水量自 20 世纪 70 年代中后期以来增多的事实与北半球春季南极涛动近二十年增强的事实吻合, 同时, 二者在年际变化上有显著的相关关系,

如在长江中下游涝年 (1991、1996、1998、1999) 对应着春季南极涛动正异常年。而早年 (1959、1966、1967、1968、1972、1978、1985) 对应着南极涛动负异常年。此外, 春季南极涛动指数分别与马斯克林高压和澳大利亚高压有显著的正相关关系, 由此说明了南半球高纬环流的变动的影响能影响南半球中低纬环流, 进而影响长江中下游的夏季降水。研究证实了南极涛动、马斯克林高压和澳大利亚高压在春夏两季有很好的持续性。范可^[44]在研究中还发现, 从南半球高纬到北半球东亚沿岸经向分布的正压遥相关可以部分解释南半球高纬环流与长江中下游降水的关系。其次, 在春、夏两季中, 南半球在整个对流层中持续异常增温, 季风推动力减弱, 长江中下游出现涝年。

上述研究揭示了北半球春夏季中, 南半球高中纬大气环流的变动是能够影响东亚的夏季气候, 尤其是长江中下游的夏季风降水, 因此, 北半球春季的南半球大气环流是可以作为长江中下游夏季降水短期气候预测的主要因子。

3 关于南极涛动的年际变化及与我国北方沙尘频次和冬春季气候的关系

沙尘天气包括扬沙、浮尘、沙尘暴, 是中国北方春季 (3~5 月) 重要的天气现象。它们在气象上的定义为: 浮尘是指尘土、细沙均匀地浮游在空中, 使水平能见度小于 10 km 的天气现象; 扬沙是指风力较大, 将地面尘沙吹起, 使空气相当浑浊, 水平能见度在 1~10 km 的天气现象; 沙尘暴是指强风把地面大量沙尘卷入空中, 使空气特别浑浊, 水平能见度低于 1 km 的天气现象, 强沙尘暴的水平能见度小于 500 m。中国北方沙尘天气频繁发生, 对社会、经济、和环境造成影响, 同时强沙尘暴还可随低空气流影响到日本、韩国甚至北美。目前, 国内外已从观测分析、遥感、数值模拟及陆面过程等方面广泛开展研究, 并取得了重要的进展^[45~55]。2003 年, 王会军等^[55]采用气候模式开展沙尘暴的跨季度气候预测, 证实了沙尘暴的跨季度气候预测的可行性。沙尘暴产生的天气成因有: (1) 大风 (是沙尘暴的动力条件), (2) 不稳定的大气层结状况, (3) 丰富的沙尘源下垫面和特殊的地形条件, 同时, 冷空气的活动能激发冷锋和气旋以及中尺度系统生成^[49, 53]。

沙尘气候成因比较复杂,研究表明东亚冬季风、ENSO、北极涛动、北半球极涡以及春季气旋异常都能影响沙尘天气的发生频次。例如,张德二^[45]对我国历史时期降尘的天气气候成因分析表明,降尘的频繁期对应冷、干气候期。尚可政等^[46]研究发现甘肃河西走廊的沙尘暴发生次数与前两年的赤道中、东太平洋海温的负相关最好;张仁健等^[50]认为 2000~2002 年处于反 El Niño 事件的高峰期,东亚冬季风强,春季的极涡位于东半球新地岛附近,使冷空气频繁南下,造成中国北方沙尘频繁发生。Qian 等^[51]和张莉等^[54]认为,沙尘天气的出现与冬、春气温存在显著的负相关和春季 850 hPa 的扰动涡旋有显著的正相关。这些工作都表明了东亚冬、春季冷空气异常是沙尘发生的重要动力条件。王式功等^[47]、周自江等^[48]和钱正安等^[52]的研究表明,沙尘暴频数在近 50 年内在波动减少,20 世纪 80 年代和 90 年代强沙尘暴明显少于 20 世纪 50 年代和 70 年代,2000 年后又急剧上升,他们的研究揭示了沙尘暴的活动有年代和年际变化的特点。康杜娟和王会军^[56]分析了我国北方沙尘气候的时间变化特征,重点研究与沙尘气候的年代际变化相应的冬、春季气候和大气环流异常特征,揭示了在沙尘活动频繁年代(1956~1970)和稀少年代(1985~1999)冬、春季的气候和大气环流有显著差别。在沙尘发生的稀少年代,冬季极涡异常加深,50°N 附近的西风增强,东亚极锋锋区位置偏北,东亚大槽偏弱;西伯利亚高压北部及中心强度变弱,阿留申低压明显升压;东亚季风强度变弱,影响我国的冷空气势力减弱,冬、春季大风天气变少。同时,我国北方广大地区冬季温度显著升高,西北和内蒙古的沙源地区春季降水明显增多。他们的研究还发现,在年际尺度上,我国北方的沙尘活动频次与前冬的西风指数、北极涛动指数呈显著的负相关,与冬、春季东亚季风指数呈显著的正相关。Zhao 等^[57]研究揭示了内蒙古沙尘频次在 1961~2000 年减少是与大风日数、亚洲极涡的强度和北半球极涡面积指数有显著的关系。Ding 等^[58]也揭示了西北沙尘频次自 20 世纪 80 年代中期减少是与欧亚的静止波变化有关。上述工作大多是关注与我国沙尘天气和气候背景相关的北半球大气环流,而未关注南半球大气环流。事实上,范可和王会军^[59, 60]的研究表明了中国北方沙尘的年际变化是

与全球环流异常相联系的,与南半球中高纬大气环流的关系密切。

3.1 南极涛动与中国北方沙尘频次的关系

范可和王会军^[59]从大尺度的大气环流遥相关出发研究了南极涛动与我国北方的沙尘频次(DWF)的关系,发现二者存在显著的反相关关系,并初步提出了可能的影响机制。中国北方的沙尘频次定义为扬沙、浮尘、沙尘暴出现的次数,以北京站来表示中国北方沙尘变化。南极涛动指数是根据 Thompson 和 Wallace^[29]的定义:南半球(20°S~90°S)850 hPa 位势高度异常的 EOF 分解的第一模态的时间系数。在 1954~2001 年整个期间,我国北方的沙尘频次(DWF)的线性趋势下降,而冬季和春季的南极涛动(AAO)的线性趋势是一致上升(图 1,引自文献^[59])。因此,DWF 和 AAO 有非常显著的反相关的线性变化趋势,DWF 在 20 世纪 70 年代中后期以前,沙尘频次较多;70 年中后期以后,沙尘频次减少,同时又在 1997 年后沙尘频次上升。这说明了我国北方沙尘频次有年代和年际变化的特点,在 70 年代中后期,沙尘频次出现了年代际的转折。冬、春季 AAO 在 70 年代中期以前以负位相为主,之后以正位相为主。扣除线性趋势后,DWF 和 AAO 的显著的反相关关系依然存在。因此,DWF 和 AAO 在年代和年际变化上有显著的反相关关系。

范可和王会军^[59]还分析了与沙尘频次显著相关的全球大气环流背景。冬季和春季的主要相关场特征基本一致。南半球的中高纬大气环流的特征非常显著和稳定,北半球中高纬的特征在春季有些减弱。在南半球南极地区和绕极低压区为显著的正相关区,而中低纬度为负相关区,高中纬度之间反位相的气压异常的变化是显著 AAO 负(弱)位相。北半球的 AO 负位相也比较清楚,但春季 AO 减弱。由此,可以说明 AAO 对北半球春季影响是非常显著的,同时也证实了沙尘频次确实与冬、春季 AAO 有非常显著的反相关关系。南极涛动强,我国北方的沙尘频次减少;南极涛动弱,我国北方沙尘频次增多。

研究还表明^[45, 51, 54],前冬的气温是沙尘频次显著相关的气候因子,冬季气温越低越有利于沙尘的发生(这是因为北方冬季温度越低引起冻土越厚,当春季温度回升后,地表土质变得很疏松,沙化严

重),因此,分析 AAO(DJF)与中国 160 站的气温相关,发现 AAO(DJF)与北方大部地区冬季气温呈显著的正相关,这一结果证实了 AAO 能显著影响与沙尘频次密切相关的气候因子——冬季气温的变化。

那么,冬、春季的南极涛动为什么会影响中国北方的沙尘频次? 范可和王会军^[59]从大尺度的遥相关出发讨论了二者影响的可能机制。图 2(引自文献[59])是冬季 AAO 正异常下 500 hPa 纬向风的差异,可以看到,从南极到北极有经向遥相关。春季也有如此特征,只是北半球高纬西风减弱。因

此,在北半球冬春季 AAO 正异常年中,南半球高纬西风加强,北半球中高纬西风加强,东亚冷空气减弱,沙尘频次的动力条件减弱,实际上春季南极涛动正异常年下的经向风的差异场,还反映了第二个可能机制是环太平洋的局地遥相关型,它表明了南半球环流的异常能够改变了阿留申低压强度和东亚沿岸的气压梯度,进而东亚冷空气活动减弱。此外,他们^[59]还考察了与春季气旋发生、发展密切相关的对流层高层东亚急流,在 AAO 正异常年中,从南极到北极分布的经向遥相关上使 40°N 的西风急流减弱,进而抑制高空动量下传和低层气旋发生

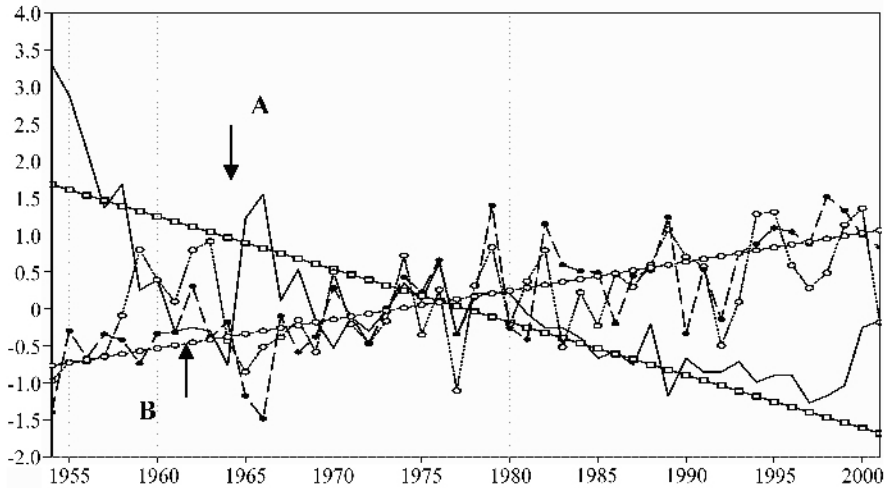


图 1 北京站沙尘频次(实线)、冬季南极涛动(虚线)、春季南极涛动(点线); A: 沙尘频次的线性趋势, B: 春季南极涛动的线性趋势(引自文献[59])

Fig. 1 Time series of normalized dust weather frequency (DWF) at Beijing station (solid line), Antarctic Oscillation during Dec - Feb (AAO-DJF, dashed line), Antarctic Oscillation during Mar - May (AAO-MAM, dotted line), and the linear trend of DWF (A) and AAO-MAM (B) (Quoted from reference [59])

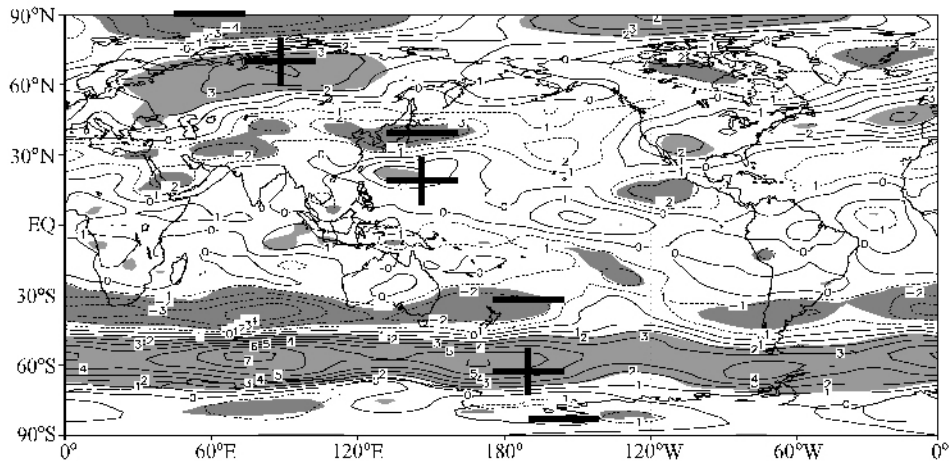


图 2 冬季 AAO 异常年 500 hPa 纬向风(单位: m/s) 差异(强-弱)场(阴影区>95%的可信度检验)(引自文献[59])

Fig. 2 Zonal wind difference (m/s) between positive and negative AAO-DJF years at 500 hPa, shaded areas show significant changes at 95% level, estimated by a local student's *t*-test (Quoted from reference [59])

和发展。

总之,从大尺度的遥相关出发,有两个可能的遥相关存在:一个是南半球高纬到北半球高纬的经向型遥相关,一个是沿太平洋的局地遥相关。两个遥相关影响着北半球中高纬大气环流异常、亚洲的大气活动中心、东亚急流及蒙古气旋,进而影响了我国北方沙尘发生的动力条件。

3.2 南极涛动年际变化对东亚冬春季气候的影响

范可和王会军^[61]分析了南极涛动异常下的平均经圈环流,进而证实经向遥相关的存在。北半球冬季南极涛动强年,欧亚地区($60^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$),从南极到北极,呈现显著的正负相间的经向遥相关型分布,其结构为准正压,其中南半球极为东风带, 60°S 附近为显著的西风带, 30°S 附近为显著的东风带,同时,在北半球 30°N 附近为东风带, 60°N 附近为显著的西风带,北极为东风带。这说明了冬季南极涛动异常能引起南半球平均经圈环流的异常,并与欧亚及东亚地区的局地经圈环流异常有紧密的关系,欧亚地区的经向遥相关是冬季两半球联系的一个可能途径。北半球春季南极涛动强年,在整个太平洋地区($150^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{W}$),从南极到北极地区也有显著的正压经向遥相关型分布。由此,太平洋地区经向遥相关型是春季南极涛动异常与北太平洋地区的局地平均经圈环流作用的途径。

他们^[61]还研究了南半球高纬的纬圈平均西风 and 欧亚西风、北半球欧亚遥相关(EU)、太平洋北美遥相关(PNA)的关系。他们的研究^[61]发现,冬季欧亚西风指数与南半球的纬圈平均西风指数在年际变化中存在很高的正相关关系。欧亚西风是东亚冬季风环流的一个重要的因子,它与欧亚高纬度的极地环流密切相关,欧亚西风强,使极锋偏北,东亚冷空气减弱。南半球冬、春季的纬圈平均西风与PNA遥相关指数有显著的反相关关系,因此,这些统计事实可部分解释北半球冬、春季存在着两半球的经向遥相关型。

4 用历史资料研究南极涛动与华北降水的关系

已有很多工作揭示了南半球大气环流异常对东亚气候的密切关系,这些研究结果都基于几十年的观测资料和数值模式的敏感性实验,尚需采用更长时间的历史资料来进一步研究。此外,更多的研究

工作^[37,38,44]揭示了南半球大气环流与长江中下游夏季降水的关系,而与华北降水的关系关注不多。王会军等(2005)^[62]的研究工作中采用葛全胜等^[63]恢复重建的自清代至今重建的100多年历史资料,揭示南极涛动与华北降水的关系,并讨论其影响机制。葛全胜等^[63]整理的资料时间为1836~1998年,其中1836~1910年是重建的古历史资料,1910年后是器测资料。

王会军等^[62]分析了6~7月AAO的指数和华北地区降水量(CNCP)及三个子区域——河北(PHB)、晋南(PJN)和山东(PSD)的降水量时间变化,发现在年际尺度上AAO与华北地区降水及各个子区域降水有显著的反相关关系,同时5年的滑动曲线对应很好。在整个时段内AAO的显著大值很好对应着华北地区降水及各个子区域降水小值的年代有19世纪70年代末期,20世纪20年代早期、40年代早期、60年代和90年代末期等等。他们认为,赤道西太平洋地区是AAO异常影响华北地区降水的关键区。这是由于赤道西太平洋的对流异常能激发著名的EAP或PJ波列^[64,65],进而影响华北的大气环流和降水。此外,与AAO异常相伴出现欧亚地区的环流异常也通过西欧到华北的纬向波列影响华北的大气环流和降水异常。

5 南极涛动的可预测性及其气候影响的数值模拟研究

南极涛动是具有季节、年际、年代际等多时间尺度变率的模态,因此,南极涛动变率的可预测性是目前国际上研究的热点。Zhou等^[66]利用CAM2模式指出,实际观测的南极涛动的年际变率在海温已知的情况下具有很高的可预测性,这种预测性具有季节依赖性,南半球的夏季更强于冬季,12月份可预测性最强,其强迫的源头来自赤道东太平洋;南半球的夏季,赤道东太平洋的暖事件对应着负南极涛动位相。他们指出,模式集合平均的结果可以提高南极涛动的可预测性。他们的研究还表明了实际观测到南极涛动的年代际增强趋势,则不能利用海温的变化来强迫产生。

范可和王会军^[67]利用IAP9L-AGCM模式开展了北半球春季南极涛动异常及其对同期北半球大气环流影响的数值试验。他们首先考察了模式中 with 南极涛动异常相关的海温敏感区,发现南半球高纬海

温异常能够强迫出北半球春季的南极涛动异常, 而赤道东太平洋海温异常与太平洋南美型遥密切相关。这说明北半球春季的南极涛动变率的可预测性在一定程度上取决于南半球高纬的海温异常。然后, 他们设计并完成了数值模拟试验。他们的数值实验结果支持了资料分析结果, 验证了资料分析中揭示的两半球间的经向遥相关的存在和南极涛动正异常下使东亚冷空气减弱的事实。

6 总结和展望

本文介绍了近几年有关南半球大气环流和东亚气候关系的最新研究进展。这些研究工作说明了南半球大气环流, 尤其是南半球的中高纬大气环流, 对东亚夏季风降水、冬春气候及沙尘的影响是显著的, 南半球的中高纬大气环流是有可能作为东亚气候短期预测的一个重要因子, 因此, 从全球大气环流的整体来研究东亚气候的变化是非常必要和重要的。事实上, 关于南半球气候变率的研究已逐渐引起全球范围内更多气象学家的重视^①, 他们注意到了南半球在全球变化中的重要作用。

目前, 虽已确认了南半球主要的几个气候变率模态, 但对其气候变率的规律、机制仍不清楚。很多研究^[29, 33, 66, 67]都注意到了南极涛动近几十年来在持续增强, 在北半球冬季(12~2月)尤其显著。南极涛动的增强是与平流层的南极臭氧洞、CO₂、ENSO 和南半球高纬海温等因素有关, 但对增强原因的研究和有关动力机制的解释尚在进行中。同时, 南极涛动多时间尺度变率的可预测性也是国际研究的热点。Zhou 等^[66]的研究表明, 在 CAM2 模式中南极涛动的年际变率的可预测性有季节依赖性, 其强迫的源头是热带太平洋。范可和王会军^[67]利用 IAP9L-AGCM 模式发现南半球高纬海温的异常也能强迫北半球春季的南极涛动。太平洋南美型(PSA)是反映南半球东南太平洋地区高中低纬的气候变率模态^[28], 它具有季内和年际的变化, 已有研究证实它与 ENSO 有密切的关系, 而 PSA 与 ENSO 及海冰之间的影响机理都需作进一步的研究。因此, 在大气-海洋-海冰的气候系统中, 要搞清楚南半球高中纬大气环流的年代和年际变化规律

及相互作用的机制以及与北半球的相互作用, 的确是非常复杂和艰难的, 还需要通过观测资料、数值模拟、古气候资料、动力理论等方法作更深入和系统的研究。

南半球的大气环流变动是一个重要的模态, 它对于全球大气环流和区域气候的影响是一个十分重要的课题, 例如, 最近的研究表明^②, 南极涛动对于西非季风和降水也具有超前的影响, 他们也同样注意到了从南半球高纬区到热带的经向遥相关型, 并认为该遥相关型是一个重要机制。另外, 南极涛动可能还与印度季风系统、南亚高压系统的变动有密切关系。那么, 北半球的大气环流变动是否会影响南半球中高纬的大气环流? 这也是一个十分有趣的问题。

研究尝试用南半球大气环流的变动作为预测因子来预测我国冬春季节沙尘发生频次、冬春季节气候、以及夏季长江流域和华北的降水更是非常有价值的研究方向, 最近, 已经有一些尝试。这种预测研究具有很大的吸引力, 渴望成为我国气候预测的一个新的重要因素。

参考文献 (References)

- [1] 竺可桢. 东南季风与中国之雨量. 地理学报, 1934, **1**: 1~27
Zhu Kezhen. The enigma of southeast monsoon in China. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 1934, **1**: 1~27
- [2] 涂长望, 黄士松. 中国夏季风之进退. 气象学报, 1944, **18**: 82~92
Tu Changwang, Huang Shisong. Advance and retreat of summer monsoon. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1944, **18**: 82~92
- [3] 高由禧, 徐淑英. 东亚季风的若干问题. 北京: 科学出版社, 1962
Gao Youxi, Xu Shuying. *Some Questions on East Asian Monsoon* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1962
- [4] 曾庆存, 李建平. 南北两半球大气的相互作用和季风的本质. 大气科学, 2002, **26** (4): 433~448
Zeng Qingcun, Li Jianping. Interactions between the Northern and Southern Hemispheric atmospheres and the essence of Monsoon. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2002, **26** (4): 433~448
- [5] Krishnamuriti T N. Tropical Meteorology. Geneva: WMO Publications, 1982
- [6] Tao Shiyan, Chen Longxun. The East Asian summer mon-

① CLIVAR Exchange No. 4, Oct. 2005

② 孙建奇和王会军, 私人通讯

- soon. Proceedings of International Conference on Monsoon in the Far East, Tokyo, Nov. 5-8, 1985. 1~11
- [7] 陶诗言, 何诗秀, 杨祖芳. 1979 年季风试验期间东亚地区夏季季风爆发时期的观测研究. 大气科学, 1983, **7**: 347~355
Tao Shiyang, He Shixiu, Yang Zufang. An observational study on the onset of the summer monsoon over Eastern Asia in 1979. *Chinese J. Atmos. Sci. (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1983, **7**: 347~355
- [8] 李宪之. 台风的研究. 见: 中国近代科学论著丛刊-气象学 (1919-1949). 北京: 科学出版社, 1955. 119~145
Li Xianzhi. Study of Typhoon. In: *Monograph of Modern Science in China: Meteorology (1919-1949)* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1955. 119~146
- [9] 陶诗言, 徐淑英, 郭其蕴. 夏季东亚热带和副热带地区经向和纬向环流型的特征. 气象学报, 1962, **32**: 91~103
Dao Shihyen, Hsu Shuying, Kuo Chiyunn. The characteristics of the zonal and meridional circulation over tropical and subtropical regions in eastern Asia in summer. *Acta Meteorological Sinica* (in Chinese), 1962, **32**: 91~103
- [10] Findlater J. A major low-level air current near the Indian Ocean during the northern summer. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1969, **95**: 362~380
- [11] Krishnamurti T N. Numerical simulation of the Somali jet. *J. Atmos. Sci.*, 1976, **33**: 2350~2362
- [12] Bannon P R. On the dynamics of the East African jet. I: Simulation of mean conditions for July. *J. Atmos. Sci.*, 1979, **36**: 2139~2152
- [13] Bannon P R. On the dynamics of the East African jet. II: Jet transients. *J. Atmos. Sci.*, 1979, **36**: 2153~2168
- [14] 王继志, 李麦村. 源于澳洲过赤道气流与中国季风环流和降水. 大气科学, 1982, **6**: 1~10
Wang Jizhi, Li Maicun. Cross-equator flow from Australia and monsoon over China. *Chinese J. Atmos. Sci. (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese) 1982, **6**: 1~10
- [15] 陈於湘. 夏季西太平洋越赤道气流的谱分析. 大气科学, 1980, **4**: 363~368
Chen Yuxiang. The spectral analysis of the low-level cross-equator air flow over the Western Pacific during the northern summer. *Chinese J. Atmos. Sci. (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1980, **4**: 363~368
- [16] 何诗秀, 杨祖芳. 北半球夏季西北太平洋热带地区西南季风强弱变化与南半球环流型的关系. 大气科学, 1981, **5**: 50~59
He Shixiu, Yang Zufang. The relationship between the intensity of summer southwest monsoon over northwest Pacific and the circulation patterns of the Southern Hemisphere. *Chinese J. Atmos. Sci. (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1981, **5**: 50~59
- [17] 王兴东, 陶诗言. 西太平洋越赤道气流的初步研究. 海洋学报, 1984, **6**: 160~173
Wang Dongxing, Tao Shiyang. A preliminary study of the cross-equatorial air flow over the western Pacific. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 1984, **6**: 160~173
- [18] 陈隆勋, 朱乾根, 罗会邦等. 东亚季风. 北京: 气象出版社, 1991
Chen Longxun, Zhu Qiangeng, Luo Huibang, et al. *East Asian Monsoon* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1991
- [19] 李曾中, 楼光平. 北半球夏季季风时期东半球越赤道气流通道的研究. 大气科学, 1987, **11**: 313~319
Li Zengzhong, Lou Guangping. A study on the passages of cross-equatorial current during the southern monsoon. *Chinese J. Atmos. Sci. (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1987, **11**: 313~319
- [20] 钱永甫, 王谦谦, 董一平, 等. 索马里低空气流的数值模拟. 大气科学, 1987, **11** (2): 176~184
Qian Yongfu, Wang Qianqian, Dong Yiping, et al. Numerical experiment of Somali jet. *Chinese J. Atmos. Sci. (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese) 1989, **11** (2): 176~184
- [21] 杨修群, 黄士松. 马斯克林高压的强度变化对大气环流影响的数值试验. 气象科学, 1989, **9** (2): 125~138
Yang Xiuqun, Huang Shisong. The influence of intensity change Mascarene high on the general circulation of atmosphere: A numerical experiment. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1989, **9** (2): 125~138
- [22] 何金海, 陈丽臻. 南半球中纬度准 40 天振荡及其与北半球夏季季风的关系. 南京气象学院学报, 1989, **12** (1): 11~18
He Jinhai, Chen Lizhen. Quasi-40-day oscillation at mid-latitude of Southern Hemisphere with their relation to the summer monsoon over the Northern Hemisphere. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 1989, **12** (1): 11~18
- [23] 徐祥德, 赵天良, 何金海, 等. 澳洲大陆热力强迫对南北半球环流异常的影响效应. 大气科学, 1993, **17**: 641~650
Xu Xiangde, Zhao Tianliang, He Jinhai, et al. The effect of Australian continent thermal forcing on anomalous variations of circulation systems in the Northern and Southern Hemispheres. *Chinese J. Atmos. Sci. (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1993, **17**: 641~650
- [24] Xue Feng, Zeng Qingcun. Diagnostic study on seasonality and interannual variability of the wind field. *Adv. Atmos. Sci.*, 1999, **16**: 537~543
- [25] 曾庆存, 张邦林. 大气环流的季节变化和季风. 大气科学, 1998, **22**: 805~813
Zeng Qingcun, Zhang Banglin. On the seasonal variation of the atmospheric circulation and the monsoon. *Chinese J. Atmos. Sci. (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1998, **22**: 805~813
- [26] Rogers J C, van Loon H. Spatial variability of sea level pres-

- sure and 500 mb height anomalies over the Southern Hemisphere. *Mon. Wea. Rev.*, 1982, **110**: 1375~1392
- [27] Gong D Y, Wang S W. Definition of antarctic oscillation index. *Geophys. Res. Lett.*, 1999, **26**: 459~462
- [28] Mo K C. Relationships between low-frequency variability in the Southern Hemisphere and sea surface temperature anomalies. *J. Climate*, 2000, **13**: 3599~3610
- [29] Thompson D W J, Wallace J M. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability. *J. Climate*, 2000, **13**: 1000~1016
- [30] Thompson D W J, Wallace J M. Annular modes in the extratropical circulation. Part II: Trends. *J. Climate*, 2000, **13**: 1018~1036
- [31] Renwick J A. Trends in the Southern Hemisphere polar vortex in NCEP and ECMWF reanalyses. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, **31**, L07209, doi: 10.1029/2003GL019302
- [32] Kindson J W. Index cycles in the Southern Hemisphere during the global weather experiment. *Mon. Wea. Rev.*, 1986, **114**: 1654~1663
- [33] Fyfe J C, Boer G J, Flato G M. The arctic and antarctic oscillations and their projected changes under global warming. *Geophys. Res. Lett.*, 1999, **26**: 1601~1604
- [34] 黄荣辉, 陈际龙, 周连童, 等. 关于中国重大气候灾害与东亚气候系统之间关系的研究. *大气科学*, 2003, **27** (4): 770~787
- Huang Ronghui, Chen Jilong, Zhou Liantong, et al. Studies on the relationship between the severe climatic disasters in China and the East Asia climate system. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2003, **27** (4): 770~787
- [35] Wang H J. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of the 1970s. *Adv. Atmos. Sci.*, 2001, **18** (3): 376~386
- [36] Wang H J. Instability of the East Asian summer monsoon - ENSO relations. *Adv. Atmos. Sci.*, 2002, **19** (1): 1~11
- [37] 薛峰, 王会军, 何金海. 马斯克林高压和澳大利亚高压的年际变化及其对东亚夏季风降水的影响. *科学通报*, 2003, **48** (3): 287~291
- Xue F, Wang H J, He J H. Interannual variability of Mascarene high and Australian high and their influence on summer rainfall over East Asia. *Chinese Science Bulletin*, 2003, **48** (5): 492~496
- [38] Xue F, Wang H J, He J H. Interannual variability of Mascarene high and Australian high and their influence on East Asian summer monsoon. *J. Meteor. Soc. Japan*, 2004, **82** (4): 1173~1186
- [39] 施宁, 施丹平, 严明良. 夏季越赤道气流对南海季风及华东旱涝的影响. *热带气象学报*, 2001, **17** (4): 405~414
- Shi Ning, Shi Danping, Yan Mingliang. The effects of cross-equatorial current on South China Sea monsoon onset and drought/flood in East China. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2001, **17** (4): 405~414
- [40] 李向红, 徐海明, 何金海. 对亚洲两支越赤道气流与华南暴雨的关系探讨. *气象科学*, 2004, **24** (2): 161~167
- Li Xianghong, Xu Haiming, He Jinhai. The study on the relationship between the west cross-equatorial flow and the heavy rain in South China. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2004, **24** (2): 161~167
- [41] 王会军, 薛峰. 索马里急流的年际变化及其对半球间水汽输送和东亚夏季降水的影响. *地球物理学报*, 2003, **46**(1): 18~25
- Wang Huijun, Xue Feng. Interannual variability of Somali jet and its influences on the inter-hemispheric water vapor transport and on the East Asian Summer rainfall. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2003, **46** (1): 18~25
- [42] 高辉, 薛峰, 王会军. 南极涛动年际变化对江淮梅雨的影响及预报意义. *科学通报*, 2003, **48** (增刊): 87~92
- Gao Hui, Xue Feng, Wang Huijun. Influence of interannual variability of Antarctic Oscillation on Meiyu along the Yangtze and Huaihe River valley and its importance to prediction. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2003, **48**(Supp.): 61~67
- [43] Nan S L, Li J P. The relationship between the summer precipitation in the Yangtze River valley and the boreal spring Southern Hemisphere annular mode. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, doi:10.1029/2003
- [44] 范可. 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*, 定稿待刊
- Fan Ke. Atmospheric circulation in Southern Hemisphere and summer rainfall over Yangtze River valley. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), accepted
- [45] 张德二. 我国历史时期以来降尘的天气气候学初步分析. *中国科学 (B辑)*, 1984, (3): 278~288
- Zhang D E. The preliminary study on the dust weather and climate since the period of history. *Science in China* (series B) (in Chinese), 1984, (3): 278~288
- [46] 尚可政, 孙黎辉, 王式功, 等. 甘肃河西走廊沙尘暴与赤道中、东太平洋海温之间的遥相关分析. *中国沙漠*, 1995, **15** (1): 19~30
- Shang Kezheng, Sun Lihui, Wang Shigong, et al. The teleconnection of sand-duststorms over Hexi Corridor and sea surface temperature in area of middle and eastern Pacific Ocean near equator. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 1995, **15** (1): 19~30
- [47] 王式功, 董光荣, 杨德保, 等. 中国北方沙尘暴变化趋势初探. *自然灾害学报*, 1996, **5**(2): 86~94
- Wang Shigong, Dong Guangrong, Yang Debao, et al. A study on sand-duststorms over the desert region in North China. *Journal of Desert Natural Disaster* (in Chinese), 1996, **5**(2): 86~94
- [48] 周自江. 近 45 年中国扬沙和沙尘暴天气. 第四纪研究, 2001, **21**(1): 9~16

- Zhou Zijiang. Blowing-sand and sandstorms in China in recent 45 years. *Quaternary Sciences* (in Chinese), 2001, **21**(1): 9~16
- [49] 周秀骥, 徐祥德, 颜鹏, 等. 2000年春季沙尘暴动力学特征. 中国科学(D辑), 2002, **32**(4): 327~334
Zhou Xiujie, Xu Xiangde, Yan Peng, et al. Dynamic features of dust storms in 2000. *Science in China* (Series D) (in Chinese), 2002, **32**(4): 327~334
- [50] 张仁健, 韩志伟, 王明星, 等. 中国沙尘暴天气的新特征及成因分析. 第四纪研究, 2002, **22**(4): 374~380
Zhang Renjian, Han Zhiwei, Wang Mingxing, et al. Dust storm weather in China: New characteristics and origin. *Quaternary Sciences* (in Chinese), 2002, **22**(4): 374~380
- [51] Qian W H, Quan L S, Shao S Y. Variations of the dust storm in China and its climate control. *J. Climate*, 2002, **15**: 1216~1229
- [52] 钱正安, 宋敏红, 李万元. 近五十年中国北方沙尘暴的分布及变化趋势分析. 中国沙漠, 2002, **22**(2): 106~111
Qian Zheng'an, Song Minhong, Li Wanyuan. Analyses on distributive variation and forecast of sand-dust storms in recent 50 years in North China. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 2002, **22**(2): 106~111
- [53] 赵琳娜, 赵思雄. 引发北方沙尘暴天气快速发展气旋的数值模拟研究. 气候与环境研究, 2004, **9**(1): 116~126
Zhao Linna, Zhao Sixiong. Simulation of rapid developing cyclone associated with strong dust storm in North China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2004, **9**(1): 116~126
- [54] 张莉, 任国玉. 中国北方沙尘频数演变及其气候成因分析. 气象学报, 2003, **61**(6): 744~750
Zhang Li, Ren Guoyu. Change in dust storms frequency and the climatic controls in northern China. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2003, **61**(6): 744~750
- [55] 王会军, 郎咸梅, 周广庆, 等. 我国今冬和明春气候异常与沙尘气候形势的模式预测初步报告. 大气科学, 2003, **27**(1): 136~140
Wang Huijun, Lang Xianmei, Zhou Guangqing, et al. A preliminary report of the model prediction on the forthcoming winter and spring dust climate over China. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2003, **27**(1): 136~140
- [56] 康杜娟, 王会军. 中国北方沙尘暴气候形势的年代际变化. 中国科学(D), 2005, **35**(11): 1096~1102
Kang Dujuan, Wang Huijun. Analysis on the decadal scale variation of the dust storm in north China. *Science in China* (Series D) (in Chinese), 2005, **35**(11): 1096~1102
- [57] Zhao C S, Dabu X, Li Y. Relationship between climatic factors and dust storm frequency in Inner Mongolia of China. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, **31**: L01103, doi: 10. 1029/2003GL018351
- [58] Ding R Q, Li J P, Wang S G. Decadal change of the spring dust storm in northwest China and the associated atmospheric circulation. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32**: L02808, doi: 10. 1029/2004GL021561
- [59] Fan K, Wang H J. Antarctic Oscillation and the dust weather frequency in North China. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, **31**: L10201, doi:10. 1029/2004GL019465
- [60] 范可, 王会军. 中国北方沙尘频次的年际变化及其全球环流背景分析. 地球物理学报, 定稿待刊
Fan Ke, Wang Huijun. The interannual variability of dust frequency in north China and its global circulation. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), accepted
- [61] 范可, 王会军. 南极涛动年际变化及其对东亚冬春季气候的影响. 中国科学(D), 2006, **36**(4) (即将刊出)
Fan Ke, Wang Huijun. Interannual variability of Antarctic Oscillation and its influence on East Asian climate during boreal winter and spring. *Science in China* (Series D) (in Chinese), 2006 (in press)
- [62] Wang H J, Fan K. Central-North China precipitation as reconstructed from the Qing Dynasty: Signal of the Antarctic atmospheric oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32**: L24705, doi:10. 1029/2005GL024562
- [63] Ge Q S, Zheng J Y, Hao Z X, et al. Reconstruction of historical climate in China. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2005, **86**: 671~679
- [64] Nitta T. Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1987, **65**: 373~390
- [65] 黄荣辉, 孙凤英. 热带西太平洋暖池上空对流活动对东亚夏季风季节内变化的影响. 大气科学, 1994, **18**(4): 456~465
Huang Ronghui, Sun Fengying. Impacts of thermal state and the convective activities in the tropical western warm pool on the summer climate anomalies in East Asia. *Chinese J. Atmos. Sci.* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 1994, **18**(4): 456~465
- [66] Zhou T J, Yu R C. Sea-surface temperature induced variability of the Southern Annular Mode in an atmospheric general circulation model. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, **31**: L24206, doi:10. 1029/2004GL021473
- [67] 范可, 王会军. 南极涛动异常及其对冬春季北半球大气环流影响的数值试验. 地球物理学报, 定稿待刊
Fan Ke, Wang Huijun. Simulation on the AAO anomaly and its influence on the Northern Hemispheric circulation in boreal winter and spring. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), accepted