郑菲,李建平. 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,2012,55(11):3542-3557,doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.11.004.

Zheng F, Li J P. Impact of preceding boreal winter southern hemisphere annular mode on spring precipitation over south China and related mechanism. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(11):3542-3557,doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.11.004.

前冬南半球环状模对春季华南降水的影响及其机理

郑 菲[1,2],李建平[1*]

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 中国科学院大学,北京 100049

摘 要 利用相关、合成、奇异值分解等统计诊断和数值模拟方法,分析了前冬(12—2 月)南半球环状模(SAM)对春季(3—5 月)中国华南降水的可能影响及其机理.诊断分析的结果表明,前冬南半球环状模与春季华南降水存在显著的负相关关系,也即前冬 SAM 偏强(弱),对应春季华南降水偏少(多).为了探讨这种南半球中高纬信号影响滞后一个季节的华南降水的物理机制,需要考虑下垫面海洋的桥梁作用.诊断分析的结果表明,当前冬 SAM 偏强时,南半球中高纬海洋的潜热释放受到海表风速影响发生变化,导致 30°S—45°S 海温偏高,45°S—70°S 海温偏低,并且异常的海温信号可以持续到次年春季.这种前冬 SAM 偏强时的春季海温异常信号,对应着春季西北太平洋副热带高压位置偏东且强度偏弱,西北太平洋上盛行异常气旋式环流,华南地区上空对流层低层有异常东北风和风场辐散,西南水汽输送较常年减弱,为春季降水偏少提供了有利的条件.前冬 SAM 偏弱时,南半球中高纬的海温异常及其引起的华南区域大气环流异常相反,有利于华南降水偏多.利用 CAM3 进行海温敏感性试验,也证明了上述南半球中高纬海温异常对应的环流异常.模拟结果表明,SAM 偏强时的海温异常,对应着华南上空对流层低层的东北风异常、风场辐散、以及下沉运动,不利于华南降水生成;SAM 偏弱时的海温异常,对应的环流异常相反,有利于华南降水增多,验证了资料诊断的结论.综上,在前冬 SAM 影响春季华南降水的过程中,体现了海气耦合桥的作用,即:海洋储存了冬季 SAM 的异常信号并在春季释放,通过影响春季大气环流,进一步影响华南春季降水.因此,前冬 SAM 为华南春季降水预测提供了一个有意义的前期信号.

关键词 南半球环状模,华南春季降水,海温异常,海气耦合桥

doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.11.004 **中图分类号** P422 **收稿日期** 2011-10-14,2012-10-18 收修定稿

Impact of preceding boreal winter southern hemisphere annular mode on spring precipitation over south China and related mechanism

ZHENG Fei[1,2], LI Jian-Ping[1*]

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 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

Abstract The impact of the preceding boreal winter (December-February) Southern Hemisphere Annular Mode (SAM) on spring (March-May) rainfall over South China (RSC) and related

基金项目 国家重点基础研究发展计划项目(2010CB950400),国家自然科学基金(41030961,40810059006)资助.

作者简介 郑菲,女,1986 年出生,2008 年本科毕业于兰州大学,博士研究生,主要从事环状模及其气候影响的研究.
E-mail:zhengfei08@mail.iap.ac.cn

*通讯作者 李建平,男,1969 年出生,研究员,1997 年毕业于兰州大学,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

physical mechanism were examined statistically by methods such as correlation analysis, composite analysis, singular value decomposition (SVD) and numerical simulation. The results show that there is a significant negative correlation relationship between the preceding winter SAM and spring RSC. That is, winters with strong (weak) SAM are often followed by less (more) RSC. In order to understand the physical mechanism of this relationship between signals from Southern Hemisphere mid-high latitudes and RSC in the following season, the role of ocean as underlying surface was investigated. It was found by diagnostic analyzing that in winters with strong SAM, latent heat fluxes change because of the change in sea surface wind speed, thus leading to positive (negative) SSTA in 30°S—45°S (45°—70°S). Because of large heat capacity of the ocean, the SSTA pattern persists to the following spring. Results from diagnostic analysis show that these SSTA lead to a series of consequence: Northwestern Pacific subtropical high weakens and the ridge extends less to west than normal years; an abnormal cyclonic circulation exists over West Pacific region; South China (SC) is controlled by abnormal northeast wind and wind divergence; water vapor transport to SC weakens, all these conditions lead to less RSC. The circulation anomalies related with SSTA caused by weak SAM are reversed, thus leading to more RSC. SST sensibility experiments carried out by CAM3 further certify above-mentioned circulation anomalies caused by SSTA. Results show that SSTA related with strong SAM lead to abnormal northeast wind, wind divergence, sinking movement over SC, thus leading to less RSC. In short, the winter SAM can impact the following spring RSC through SSTA in middle and high latitude in Southern Hemisphere, a manifestation of "ocean-atmosphere coupled bridge". The results imply that preceding winter SAM provides a significative prophase signature for forecasting spring RSC.

Keywords Southern Hemisphere Annular Mode (SAM), Spring rainfall over south China, Sea surface temperature anomalies (SSTA), Ocean-atmosphere coupled bridge

1　引　言

南半球环状模(Southern Hemisphere Annular Mode, 简称 SAM),也称南极涛动(Antarctic Oscillation, 简称 AAO)是南半球中高纬度大气质量变化的一种全球尺度翘翘板结构,是南半球热带外大气环流时空运动和变化的主要模态[1-3]. 关于 SAM 最早的研究,可以追溯到 20 世纪 20 年代末. Walker[4] 指出,在海平面气压场上,穿过智利、阿根廷的高压与南极威德尔海和别林斯高晋海的低压呈翘翘板形式反向变化. 对南半球热带外海平面气压场进行经验正交函数(EOF)分解的相关结果[3,5-7]也表明,第一特征向量在南北方向上表现出中、高纬地区反向变化的跷跷板结构,即南半球环状模(SAM)或者南极涛动(AAO). 不过,需要说明的是,南极涛动的概念首先是中国的学者龚道溢和王绍武[1-2]提出的,并得到国际上的认可. 在国外的文献中常用 EOF 来说明 SAM[3],其真实性一度受到质疑[8-9]. 在前人工作基础上,李建平等[10-11]提出了大气环状活动带的新概念,证明存在环状涛动,提炼出 SAM 与 NAM(北半球环状模, Northern Hemisphere Annular Mode, 简称 NAM)的物理本质并建立了物理模型,构造出了新的南、北半球环状模指数并被广泛使用[12-17].

SAM 因其纬向对称性结构及半球尺度特征,其变率在多个时间尺度[18-19]上与全球及区域大气环流变化有密切联系. 作为南半球中高纬大气的主要模态,其不仅对南半球的气候系统产生影响[20-24],也对北半球气候系统存在影响[16,25-29]. 具体到 SAM 对中国气候的影响,我国气象学者也做了许多研究. 例如:南素兰和李建平[13,25,30-31]指出春季 SAM 与夏季长江中下游降水存在显著的正相关,并提出了海洋桥的概念来揭示其中的影响机理;吴志伟等发现前冬 SAM 对次年夏季长江中下游地区旱涝并存[32]、旱涝急转有所影响[33],前冬 SAM 可以作为预测长江中下游地区夏季旱涝急转的一个前期信号;Wu 等[16]指出前期秋季 SAM 与中国的冬季风也存在密

切联系.

那么,前期冬季 SAM 会对次年春季的中国降水产生什么影响呢? 虽然我国受东亚季风的影响,降水主要集中在夏季,但是春季降水对于农作物生长等也非常重要,春旱严重影响着农作物的产量.尤其是华南地区,通过初步分析表明,华南春季降水量可以占到全年总降水量的约 40%,而且降水年际变率大[34].因此,研究前冬 SAM 对次年春季中国降水尤其是华南降水的影响,可以为春季降水提供有意义的前期预报信号,是一个有实际意义的重要问题.

实际上,我国气象学家针对华南降水的时空变率及影响降水的因子已经做了相当多的非常有价值的研究.例如,华南前汛期降水的时空分布特征[35-37],影响华南前汛期降水的敏感海区[38],东北冷涡与华南前汛期降水的关系[39],西北太平洋副热带高压对华南降水的影响[40-41],南半球低纬的气旋活动在南极海冰与华南前汛期降水关系中的桥梁作用[42],水汽输送异常与华南前汛期降水异常的关系[43]等.可以看到,虽然影响降水的直接因素是大气环流,但是海温、海冰也可以通过影响大气环流对降水产生间接影响;不仅北半球的低纬系统及中高纬系统可以影响华南降水,南半球的低纬系统也可以对华南降水产生影响.

本文集中分析前冬 SAM 对次年春季华南降水的可能影响这个问题,旨在讨论南半球中高纬度的环流变率是否可能对我国华南地区降水产生影响.

2 资料、方法和模型

本文所使用的降水资料为中国 160 台站逐月降水资料;环流资料为逐月的 NCEP/NCAR 再分析资料[44],水平分辨率为 2.5°×2.5°,垂直共 17 层(垂直速度共 12 层),基本要素包括位势高度、水平风速、垂直速度、相对湿度等;南半球环状模指数(SAM Index, SAMI)采用 Nan 和 Li 的定义[13],即标准化的纬向平均海平面气压(Sea Level Pressure, SLP)在 40°S 与 70°S 的差.Niño3.4 指数定义为东赤道太平洋(5°N—5°S,170°W—120°W)的区域平均的海温异常(数据下载自 Climate Prediction Center (CPC)/ NOAA).

采用相关、合成、SVD 等统计分析方法,计算了前冬 SAM 与春季华南降水及大气环流的关系.合成分析中,强(弱)年定义为超过正(负)1.0 个标准差的年份,合成差是指强年合成减弱年合成的差值.为了计算排除 ENSO 信号后,SAM 与华南降水的相关关系,文中还采用了偏相关分析.具体计算方法为:设有三个变量 x_1, x_2, x_3,可计算 x_1, x_2 同时扣除 x_3 影响之后的偏相关系数,记作 $r_{12,3}$,其计算公式为

$$r_{12,3} = \frac{r_{12} - r_{13}r_{23}}{\sqrt{(1-r_{13}^2)}\sqrt{(1-r_{23}^2)}}, \tag{1}$$

其中,r_{12}, r_{13}, r_{23} 分别代表变量 x_1 和 x_2,变量 x_1 和 x_3,以及变量 x_2 和 x_3 的相关系数.

本文还计算了某格点上的水汽输送矢量 $\boldsymbol{V}_q$ 及水汽输送矢量散度 D_q,计算公式分别为

$$\boldsymbol{V}_q = qu\boldsymbol{i} + qv\boldsymbol{j}, \tag{2}$$

$$D_q = \frac{\partial qu}{\partial x} + \frac{\partial qv}{\partial y}, \tag{3}$$

单位面积低层大气(1000～700 hPa)水汽输送通量矢量,采用公式为

$$\begin{aligned}\boldsymbol{Q} &= \frac{1}{g}\int_{P_S}^{P_T} q\boldsymbol{V}\mathrm{d}p = \frac{1}{g}\int_{P_S}^{P_T} qu\,\mathrm{d}p\boldsymbol{i} + \frac{1}{g}\int_{P_S}^{P_T} qv\,\mathrm{d}p\boldsymbol{j} \\ &= Q_\lambda\boldsymbol{i} + Q_\varphi\boldsymbol{j}, \end{aligned} \tag{4}$$

其中,$\boldsymbol{Q}$ 为水汽输送通量矢量,Q_λ 和 Q_φ 分别是纬向和经向水汽输送通量,g 为重力加速度,q 为比湿,P 为气压,P_S 和 P_T 分别取为 1000 hPa 和 700 hPa.对于华南区域(110°E—120°E, 20°N—30°N),四个边界上的低层水汽输送通量为

$$Q_w = \sum_{i=1}^{m} Q_\lambda(i)\cdot L_w, \tag{5}$$

$$Q_E = \sum_{i=1}^{m} Q_\lambda(i)\cdot L_E, \tag{6}$$

$$Q_N = \sum_{i=1}^{n} Q_\varphi(i)\cdot L_N, \tag{7}$$

$$Q_S = \sum_{i=1}^{n} Q_\varphi(i)\cdot L_S. \tag{8}$$

其中,Q_W、Q_E、Q_N、Q_S 分别是西、东、北、南边界的水汽输送通量;L_W、L_E、L_N、L_S 分别为四个边界的长度;m 和 n 分别为纬向和经向的格点数.计算选定的华南区域的总的水汽收支,公式为

$$Q_T = Q_E - Q_W + Q_N - Q_S, \tag{9}$$

若 $Q_T > 0$,则流出选定的华南区域的水汽大于流入的水汽,表明有水汽辐散;若 $Q_T < 0$,则流出选定的华南区域的水汽小于流入的水汽,即有水汽辐合.

此外,为了验证再分析资料诊断得到的海温异常引起华南及其邻近地区大气环流异常的结论,采用 CAM3(NCAR Community Atmospheric Mode Version 3)大气模式进行海温敏感性试验来进一步验证相关机理.CAM3 是 NCAR 发展的全球谱模

式,水平分辨率为 T42(纬向为均匀分布的 128 个格点,经向为 64 个高斯格点),垂直方向采用 η 坐标,共 26 层.试验设计将在第 7 节中给出具体说明.

本文中所取时间段为 1950/51—2007/08(冬/春),考虑到再分析资料在南半球高纬度的准确度的问题,除了对全时段(1950/51—2007/08)进行计算分析外,也对比分析了 1980/81—2007/08 时段的结果.本文中的冬季和春季分别指的是 12—1 月和 3—5 月,即北半球冬、春季的定义方法.华南区域是指(110°E—120°E, 20°N—30°N).

3　前冬 SAM 与春季华南降水

图 1a 给出了前冬 SAMI 与我国春季降水量的相关系数分布.由图可见,华南地区是显著的负相关区.相关系数超过置信度 90%的显著性检验的台站包括:衢州、浦城、南昌、吉安、赣州、零陵、梅县、汕头、河源、广州、悟州,共 11 个台站.也就是说,当前冬 SAM 偏强时,次年春季华南降水易于偏少;当前冬 SAM 偏弱时,次年春季华南降水易出现偏多.

我国许多气象学者已经指出,ENSO 作为气候系统年际振荡的强信号,可以影响我国降水[45-46].那么,SAM 与华南降水的这种相关关系,是 ENSO 导致的两者协同变化的表现呢?还是 SAM 确实对华南降水存在影响?为了探讨这个问题,需要采用偏相关分析的方法来说明.图 1b 给出了排除了冬季 ENSO 信号后,SAMI 与我国次年春季降水的偏相关系数.比较图 1a 和图 1b 可见,扣除前冬 ENSO 信号后,在我国华南地区,SAMI 与降水的相关系数变化并不大.并且,在排除了前冬 ENSO 信号后,前冬 SAMI 与春季 RI 的偏相关系数为−0.41,虽然比扣除 ENSO 信号前的相关系数−0.44 略有减小,但是仍然超过置信度 99%的显著性检验.这表明,前冬 SAM 对华南春季降水的影响是存在的.

将以上 11 个台站的平均春季降水量做标准化处理,作为反映华南地区春季降水的一个指标,定义为春季华南降水指数(RI).由前冬 SAMI 与春季华南降水指数(RI)的时间序列图 (图 2a)可见,SAMI 与 RI 均表现出很强的年际变化,同时具有年代际变化和长期趋势.两时间序列的相关系数为−0.44,超过置信度 99%的显著性检验.去除线性趋势后(图 2b),两序列的相关系数仍可达−0.40,仍超过置信度 99%的显著性检验.图 2c 给出的是春季 RI 与各月 SAMI 的超前滞后相关,由图可见,春季 RI 与前一年 12 月到 2 月 SAMI 有最强的负相关系数,分别超过置信度 99%和 95%的显著性检验.虽然春季 RI 与前一年秋季 SAMI 的相关系数也为负,但是未通过显著性检验.图 2d 显示的是前冬 SAMI 与次年春季 RI 的 31 年滑动相关,可以看到两者的负相关关系是比较稳定的,基本上均能超过置信度 90%的显著性检验,并且这种负相关在近年有较明显的增强趋势.

定义冬季 SAMI 高(低)于 1 个正(负)标准差的年份为强(弱)SAM 年.在 1950—2007 年共 58 年的冬季中,强 SAM 年共有 14 年,分别为 1958、1961、1962、1973、1981、1988、1993—1995、1997—1999、2001、2007 年;弱 SAM 年共有 18 年,分别为 1951、1952、1955、1956、1964—1966、1968、1971、1972、1974、1976、1979、1982、1984、1991、1992、2005 年.从 SAMI 高低指数年合成的我国春季降水场上看(图略),前冬强 SAM 年合成的次年春季华南降水偏少,异常可达−100mm 以上;前冬弱 SAM 年,合成出的次年春季华南降水偏多,异常可达 120 mm 以上.

另外,定义春季 RI 高(低)于 1 个正(负)标准差的年份为强(弱)华南春季降水年.在 1951—2008 年共 58 年春季中,强 RI 年共 10 年,分别是 1952、1953、1957、1973、1975、1980、1981、1983、1984、1992 年;弱 RI 年共 8 年,分别是 1963、1964、1971、1974、1990、1991、2007、2008 年.春季强 RI 年,前冬南半球高纬度 55°S—90°S 有 SLP 的正异常,850 hPa 上对应异常反气旋风场,中纬度 30°S—55°S 有 SLP 的负异常,850 hPa 上对应异常气旋式风场,这些均为 SAM 负位相的典型特征(图 3).在高层,RI 强年合成的 500hPa 位势高度场及 200 hPa 风场也有类似特征,即前冬南半球 500 hPa 上高纬度 55°S—90°S 的位势高度正异常以及 200 hPa 上的异常反气旋风场,中纬度 30°S—55°S 的位势高度负异常以及 200 hPa 上的异常气旋式风场,这些也对应 SAM 的负位相(图略).综合低层和高层的情况,反映了 SAM 的相当正压结构,说明春季华南降水偏多,对应前冬有 SAM 负异常的信号.低 RI 年合成出的以上各个异常场,具有相反的形式,说明春季华南降水偏少,对应前冬有 SAM 正异常的信号.

为了进一步确定前冬 SAM 与春季华南降水的负相关关系,采用 SVD 方法[47]进行分析.左场选取 1950—2007 年冬季 10°S 以南的 SLP 场,右场选取 1951—2008 年春季中国 160 台站降水.做 SVD 分

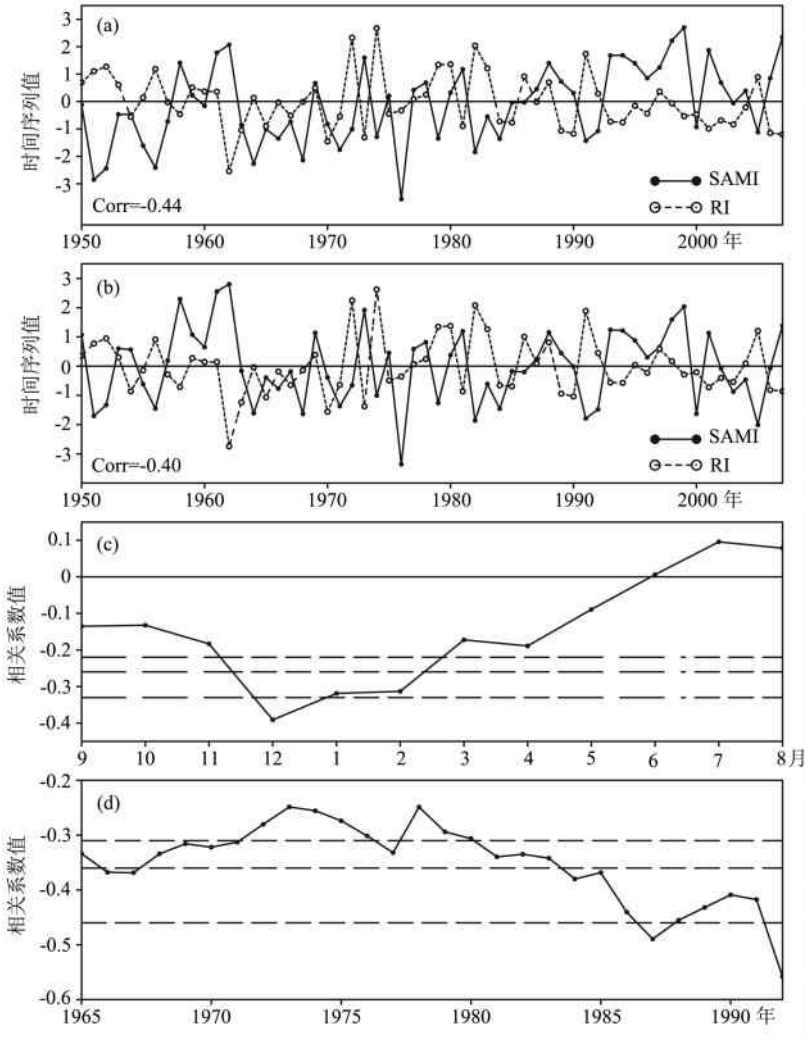

图 2 前冬 SAMI 与春季华南降水指数 RI 的标准化的时间序列及相关关系

(a)前冬 SAMI 与春季华南降水指数 RI 的标准化的时间序列;(b)同(a),但为去线性趋势后的结果;(c)春季 RI 与各月 SAMI 的超前滞后相关,3条虚线从上到下分别代表置信度90%,95%,和 99%的显著性检验(下同);(d)前冬SAMI与春季华南降水指数RI的31年滑动相关,3 条虚线同(c).

Fig. 2 Standardized time series of the preceding winter SAMI and spring RI and correlation coefficient between them

(a)Standardized time series of winter SAMI and spring RI; (b) Same as (a) but for detrended series; (c) Lead-lag correlations between spring RI and SAMI in different months , the three dashed lines respectively indicate significant at the 90%, 95%, and 99% confidence levels; (d) 31a sliding correlation coefficients between preceding winter SAMI and spring RI, the three dashed lines are same as (c).

析之前,两变量均经过标准化处理. SVD 第一模态占了总平方协方差的 44 %,两变量场对应的时间系数的相关是 0.68(超过置信度 99%的显著性检验). 异质相关图上(图略),南半球中、高纬度地区分别表现出环状的显著正、负相关,是 SAM 的显著正位相特征. 华南地区是显著的负相关,相关系数高达−0.5. 说明前冬 SAM 的正位相是与春季华南降水偏少的情况对应的,而前冬 SAM 的负位相则是与春季华南降水偏多对应的. 这些与之前前冬 SAMI 与春季华南降水的相关分析结果一致,进一步说明了前冬 SAM 与春季华南降水的显著负相关关系.

4 前冬 SAM 与春季大气环流异常

前冬 SAMI 异常合成的春季 850 hPa 水平风场的合成差分布(图 4a)表明,当前冬 SAM 偏弱时,次年春季西北太平洋地区有反气旋式环流异常,对应华南地区上空的异常西南风. 由前冬 SAMI 异常合成的春季低层(1000—700 hPa)水汽输送异常图(图略)上可见,这支西南风异常有利于水汽到达华南地区,使气候平均的西南水汽输送(图略)得到加强,从而为华南降水增多提供了有利条件. 当前冬SAM

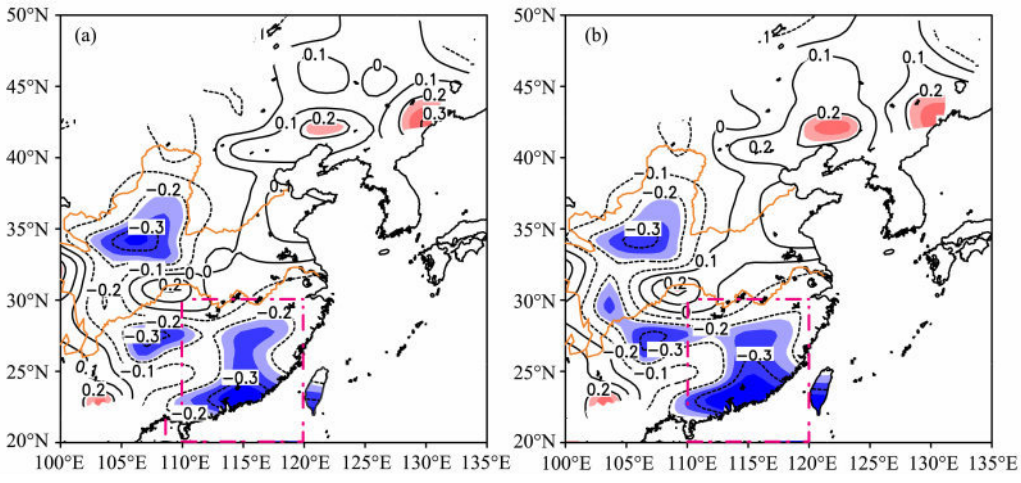

图 1　前冬 SAMI 与中国东部地区春季降水量的相关系数分布

(a)未排除 ENSO 信号；(b)排除 ENSO 信号的偏相关计算结果；等值线间隔为 0.1，阴影区由浅至深分别表示超过 90%，95%和 99%置信度检验的区域；红色点虚线所包围的框是选定的华南区域范围.

Fig. 1　Correlation coefficients between the preceding winter (DJF) SAMI and spring (MAM) precipitation over East China

(a) Correlation map before removal of ENSO; (b) Partial correlation after removal of ENSO; The contour interval is 0.1, and the shaded areas from light to dark respectively indicate correlation coefficients significant at 90% , 95%, and 99% confidence levels. The domain of South China is surrounded by the red dot dashed line.

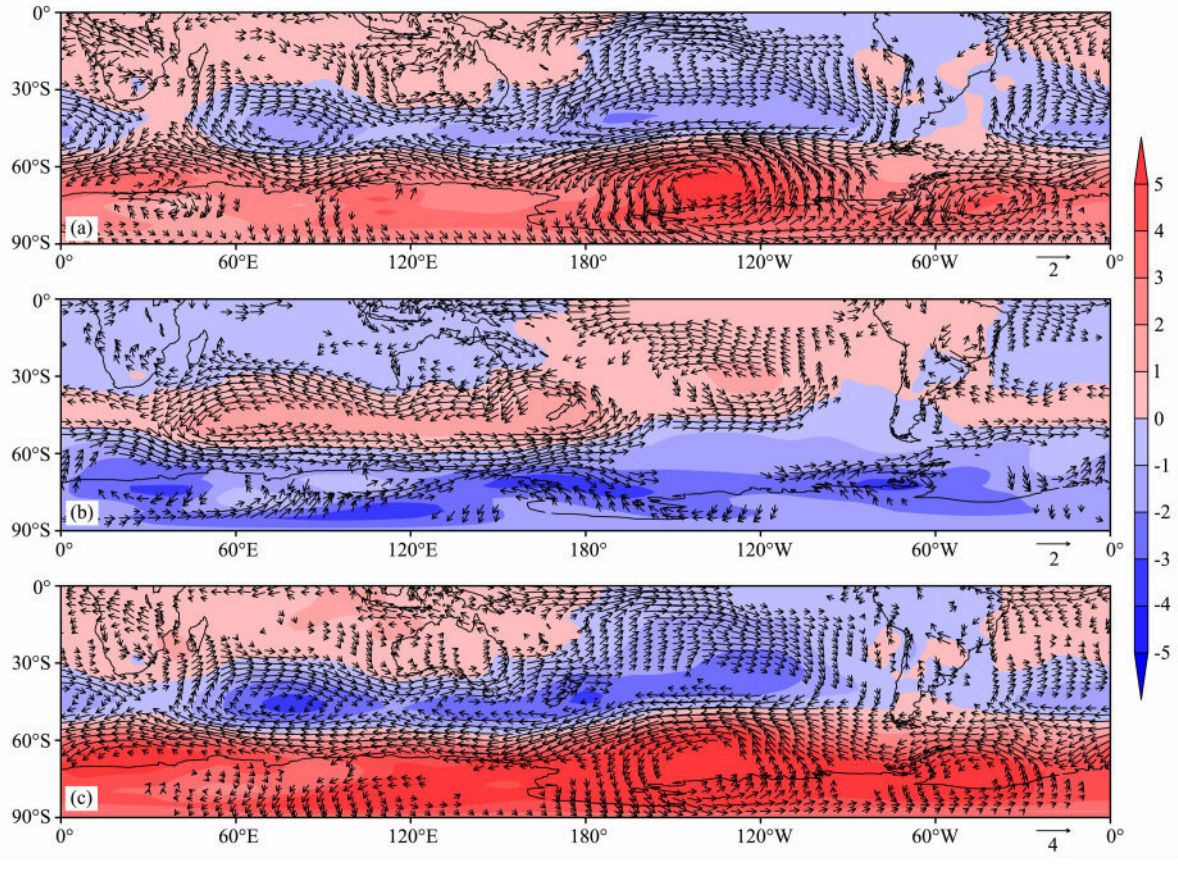

图 3　春季强、弱 RI 年合成的前冬海平面气压异常场(阴影，单位：hPa)及 850 hPa 风异常场(矢量，单位：m/s)

(a) 强 RI 年合成；(b) 弱 RI 年合成；(c) 强、弱年的合成差；图中只给出了达到 95%置信度检验的风矢量.

Fig. 3　Composite analysis in preceding winter SLP anomalies (shaded, unit: hPa) and 850 hPa wind anomalies (vector, unit: m/s) between high and low spring RI

(a) High RI; (b) Low RI; (c) Composite difference between high and low RI years; only the wind vector that are significant at 95% confidence level are shown.

偏强时,情况相反,华南地区的异常东北风不利于水汽输送,为华南降水减少提供了有利条件.为了进一步证明以上结果,分析春季 RI 合成的同期春季 850 hPa 水平风场的合成差分布(图 4b).由图可见,春季 RI 指数偏高(华南降水偏多),对应同期春季西北太平洋地区的异常反气旋式环流,华南地区上空的西南风异常,以及西南水汽输送加强(图略).图 4a 和图 4b 在西北太平洋地区的异常型具有很高的一致性且风向基本相反,说明前冬 SAM 偏弱为春季华南降水偏多提供了有利的环流条件;反之,前冬 SAM 偏强为春季华南降水减少提供了有利的环流条件.

考虑到水汽是影响降水的重要因子,进一步分析前冬 SAM 对春季华南地区水汽收支情况的可能影响.分析气候态的春季低层(1000～700 hPa)华南区域的各边界上水汽输送通量及区域总水汽收支情况(图 5a)发现,华南区域在春季有水汽辐合,是水汽汇区.南北边界均是向北的水汽输送,但是南边界的输入大于北边界的输出;东西边界均是向东的输送,但是西边界的输入大于东边界的输出.由前冬 SAMI 合成的春季低层水汽收支合成差(图 5b)可见,当前冬 SAMI 偏强时,华南区域有异常水汽辐散,较气候平均的水汽辐合有所减小,有利于降水的异常偏少.分析各边界水汽输送异常情况,发现华南区域的异常辐散主要是由于南边界的水汽输入异常减小导致的,强弱年的差值可达气候均值的 39%.由于西边界水汽输出的减小值大于东边界的水汽输入减小值,东西方向上有水汽异常辐合.但是,由于东西方向上的异常辐合小于南北方向上的异常辐散,华南区域总体有异常辐散.由春季 RI 合成的春季低层水汽收支合成差(图 5c)可见,当春季华南降水偏多时,对应华南区域异常水汽辐合,水汽收入在强弱年的差值可达气候均值的96%.这主要是由于

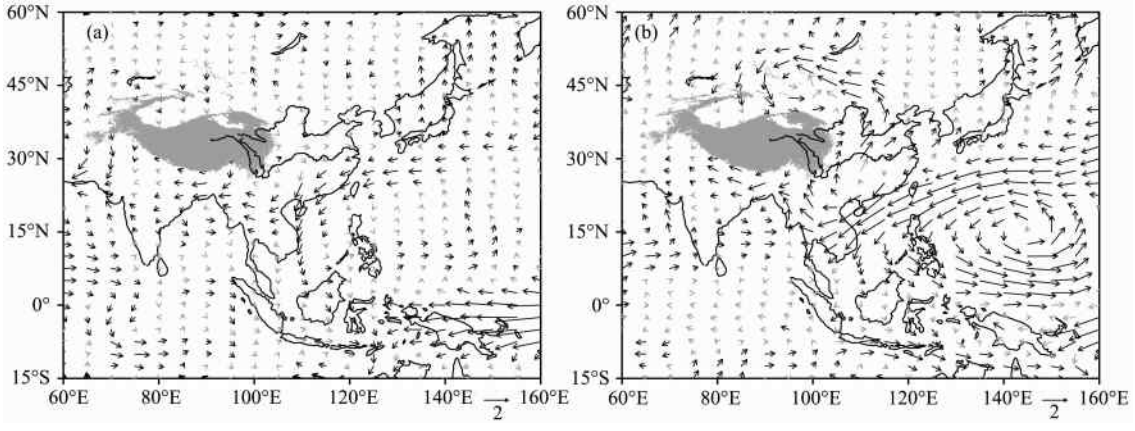

图 4 前冬 SAMI(a)及春季 RI(b)合成的春季 850 hPa 水平风场的合成差(单位:m/s)
黑(灰)色的矢量代表通过(未通过)置信度 90%的显著性检验.

Fig. 4 Composite differences in spring 850 hPa horizontal wind field (unit: m/s) respectively between high and low winter SAMI (a) and between high and low spring RI (b)
Black (gray) vector indicates significant (not significant) at the 90% confidence level.

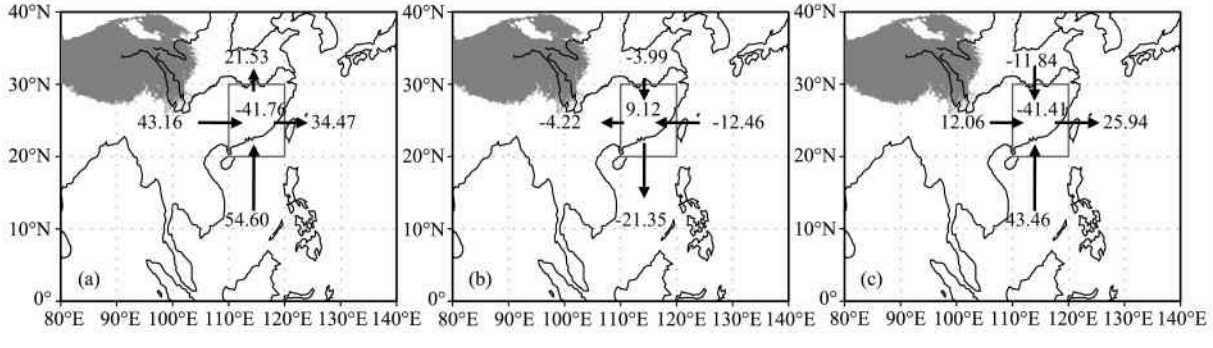

图 5 华南区域春季低层(1000～700 hPa)水汽收支的气候态(a),及分别基于前冬 SAMI(b)和春季 RI(c)合成的水汽收支合成差(单位:10^6 kg·s^{-1})

Fig. 5 Climatology(a) and composite differences in low layer (1000～700 hPa) spring water vapor budget respectively between high and low winter SAMI (b) and between high and low spring RI (c) (unit: 10^6 kg·s^{-1})

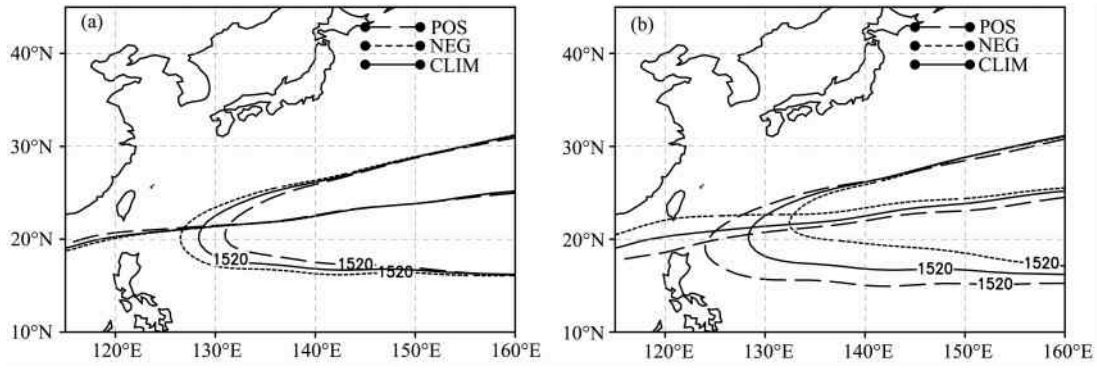

图 6　前冬 SAMI(a)和春季 RI(b)合成的东亚地区春季 850 hPa 西北太平洋副热带高压脊线位置
标有 1520 的线代表位势高度 1520 gpm,未标值的线代表纬向风速为 0 的线;
实线、长虚线、短虚线分别代表气候态、强年合成、弱年合成.

Fig. 6　Composite analysis in spring 850 hPa Northwestern Pacific subtropical high ridge line respectively based on the preceding winter SAMI (a) and on spring RI (b) (The lines marked by 1520 represent the geopotential height is 1520 gpm, the lines without contour labeling indicate zonal wind equaling to zero; the solid, long dash , and short dash line respectively indicates climatology, strong year, and weak year)

南边界上异常偏强的水汽输入造成的,水汽输入在强弱年的差值达气候均值的 80%.但是在东西方向上,由于东边界的水汽输出异常值大于西边界的水汽输入异常值,反而存在水汽的异常辐散.结合图 5b 和图 5c 可得,当前冬 SAMI 偏强时,华南区域有异常水汽支出,对应降水偏少时的水汽收支异常,为降水偏少提供了有利条件;当前冬 SAMI 偏弱时,华南区域有异常水汽收入,对应降水偏多时的水汽收支异常,为降水偏多提供了有利条件.

考虑到西北太平洋副热带高压对于春季华南降水的重要性,对西太副高做进一步的分析.图 6a 是基于前冬 SAMI 正、负异常年合成的 850hPa 副高脊线位置.图中标出了纬向风速为 0 的线和位势高度为 1520 gpm 的线,两条线的西侧交叉点可以表示副热带高压西伸的脊点.由图可见,当前冬 SAM 偏强时,对应春季副热带高压偏东,西伸脊点在 130°E 以东,与春季华南降水偏少时副高脊线的异常(图 6b)相似,不利于华南降水;当前冬 SAM 偏弱时,对应春季副热带高压偏西,西伸脊点在 130°E 以西,与春季华南降水偏多时副高脊线的异常(图 6b)相似,有利于华南降水增多.

降水的形成与垂直速度的条件密不可分.前冬 SAMI 偏弱时,春季华南地区由低层到高层,基本上都被异常的上升运动控制(图略).并且 600 hPa 以下有异常的辐合,600 hPa 以上到 150 hPa 有异常的辐散,对应上升运动的加强,有利于降水的增加.前冬 SAMI 偏强时对应的风场辐合和垂直速度的异常情况与以上所述相反,但是其所造成的异常的强度比 SAMI 偏弱年造成的异常偏弱(图略).

5　与冬季 SAM 有关的同期冬季及次年春季海温异常

超前一个季节的南半球信号 SAM 是怎样影响到滞后一个季节的华南大气环流进而影响春季降水的呢?由于大气自身的记忆性较差,因此考虑下垫面(如海洋)对异常信号经存储并再释放影响大气的过程(海气耦合桥过程).图 7 是冬季 SAMI 与各月纬向平均近地面纬向风、纬向平均海温的超前滞后相关.由图 7a 可见,冬季 SAMI 与 30°S—45°S 之间纬向平均的近地面纬向风为负相关,与 45°S—70°S 之间纬向平均的近地面纬向风为正相关.并且,冬季 SAMI 与近地面纬向风的相关关系可以由冬季持续到次年春季.风速可以影响蒸发,从而影响潜热释放及海温.由图 7b 可见,冬季 SAMI 与 30°S—45°S 之间纬向平均海温呈正相关,与 45°S—70°S 之间纬向平均海温为负相关,并且相关关系也可以由冬季持续到次年春季,这与图 7a 是对应的.也即:当冬季 SAM 偏强时,30°S—45°S 之间的近地面纬向风减弱,从而引起蒸发减弱,潜热释放减少,导致海温升高;45°S—70°S 之间近地面纬向风加强,从而引起蒸发加强,潜热释放增多,导致海温降低.冬季 SAM 偏弱时情况相反.并且,计算了 1980/81—2007/08 年时段的结果(图略),与用全时段资料计算的结果(图 7)基本一致.

图8是基于冬季SAMI合成的同期冬季(图 8a)

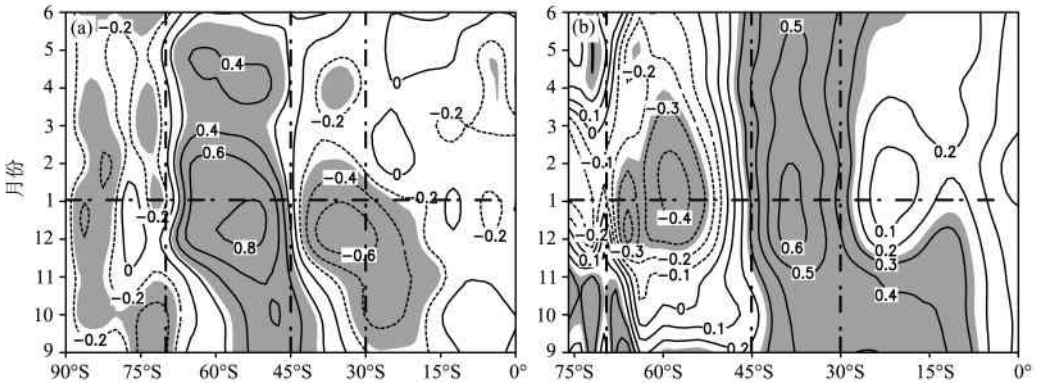

图 7 冬季 SAMI 与各月纬向平均近地面纬向风(a)、纬向平均 SST(b)的超前滞后相关系数

阴影区代表相关系数通过置信度 95%的显著性检验.

Fig. 7 The lead-lag correlation coefficients between boreal winter (DJF) SAMI and zonal mean zonal wind (a), zonal mean SST (b) in different months.

The shadow areas indicate correlation coefficients significant at the 95% confidence level.

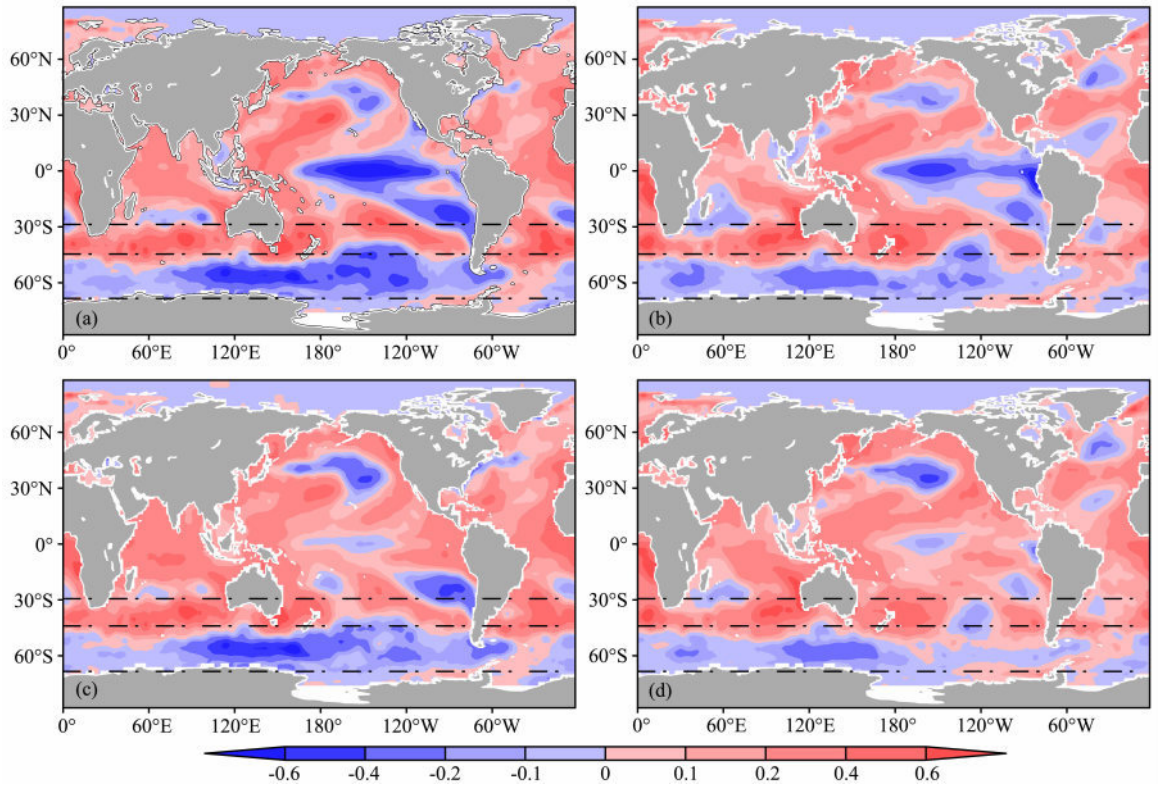

图 8 基于冬季 SAMI 合成的同期冬季及次年春季 SST 的合成差分布

(a,c) 冬季; (b,d)春季; (a,b) 未排除 ENSO 信号; (c,d) 排除 ENSO 信号.

Fig. 8 Composite differences in winter (a,c) and following spring (b,d) SST between high and low winter SAMI

(a,c) winter; (b,d) spring; (a,b): before removal of ENSO; (c,d) after removal of ENSO.

及次年春季(图 8b)SST 的合成差分布. 由图可见,当冬季 SAM 偏强时,无论同期冬季还是次年春季,南半球中高纬的海温异常呈现带状的偶极型结构,在 30°S—45°S 之间的海温偏高,而在 45°S—70°S 之间的海温偏低,这与图 7 所得结论是一致的. 由图 8a、b 还可以看到,前冬 SAMI 合成的海温异常场,在热带太平洋地区有类似于 ENSO 的信号. 并且,有学者研究发现 SAM 与 ENSO 之前存在相关关系[48-49]. 为了避免在分析中带入 ENSO 信号的影响,将 SAMI 和 SST 资料中的 ENSO 信号用线性回归的方法排除后,再做基于 SAMI 合成的同期冬季(图 8c)及次年春季(图 8d)SST 的合成差分布. 由图可见,无论保留还是排除 ENSO 信号,用 SAMI 合成的南半球中高纬度的带状海温异常均是明显的,

且冬季 SAMI 与冬、春季 ZSSTI 的偏相关在排除 ENSO 信号后仍然是显著的,相关系数分别为 0.58 和 0.37,说明南半球中高纬度的这种带状海温异常与 SAM 存在相关关系. 同样,也分析了仅用 1980 年后资料计算的结果(图略),所得 SST 的合成差的分布与用全时段的资料所得结果(图 8)一致度较高.

为了进一步分析南半球的带状海温异常引起的大气环流异常,定义一个海温指数,为经过标准化处理的 30°S—45°S 和 45°S—70°S 这两条纬带的区域平均海温之差,记为 ZSSTI. 由以上分析可知,前冬 SAMI 偏高(低),对应同期冬季及次年春季 ZSSTI 偏高(低).

由前冬 SAMI、ZSSTI 与春季 ZSSTI、RI 时间的序列图(图略)可见,前冬 SAMI、ZSSTI 及春季 ZSSTI 随时间的变化有很高的一致性,而以上 3 个变量与春季 RI 随时间的变化基本相反. 如 1999 年冬/2000 年春,冬季 SAMI、ZSSTI,春季 ZSSTI、RI 的值依次为 2.70、1.79、1.72、−0.54. 分析这 4 个变量的相关系数矩阵(表 1)发现,前冬 SAMI 与次年春季 RI 的相关系数为−0.44,反映了两者负相关的基本事实;探索这种相关关系的物理过程,发现前冬 SAMI 与同期 ZSSTI 的相关系数为 0.62,与图 7、8 结果相符,说明冬季 SAM 异常会造成同期南半球两条纬带上的海温异常;前冬与春季 ZSSTI 的相关系数高达 0.91,反映了海温异常信号自身较长的记忆性,也就是说冬季 SAM 引起的海温异常信号可以持续到次年春季;到春季,ZSSTI 与同期 RI 的相关系数为−0.30,也即前冬 SAMI 引起的这种海温异常可以使 RI 相反变化,也即 ZSSTI 偏高,同期春季华南降水偏少.

表 1　前冬 SAMI、ZSSTI 与春季 ZSSTI、RI 的相关系数矩阵

Table 1　Correlation coefficient matrix between the preceding winter SAMI, ZSSTI and spring ZSSTI, RI

	DJF SAMI	DJF ZSSTI	MAM ZSSTI	MAM RI
DJF SAMI	1	0.62**	0.74**	−0.44**
DJF ZSSTI	0.62**	1	0.91**	−0.26*
MAM ZSSTI	0.74**	0.91**	1	−0.30*
MAM RI	−0.44**	−0.26*	−0.30*	1

注:** 和 * 分别代表通过置信度 99%和 95%显著性检验.

排除了 ENSO 信号后,由春季 RI 合成的前冬及同期春季 SST 的合成差的分布(图略)可见,春季华南降水偏多,无论是前冬还是同期春季,在 30°S—45°S 之间的海温偏低,而在45°S—70°S之间的海温均偏高,对应 ZSSTI 偏低,与图 2 结果相符,进一步反映了春季 ZSSTI 与华南降水的负相关.

6　春季南半球中高纬带状海温异常对应的同期春季大气环流异常

第 5 节中给出了前冬 SAM、春季南半球中高纬带状海温异常以及春季华南降水的相关关系,并且分析了前冬 SAM 造成春季带状海温异常的物理机制. 那么,这种春季带状海温异常(用 ZSSTI 表示)是怎样影响到同期春季华南降水(用 RI 表示)的呢? 图 9 是春季 ZSSTI 合成的同期春季 850 hPa 水平风异常流场. 由图可见,当 ZSSTI 偏高时,西太平洋地区有异常反气旋式环流,对应我国华南地区 850 hPa 有异常东北风. 这支东北风减弱了气候平均的西南水汽输送(图略),不利于华南地区降水发生;当ZSSTI偏低时,对应华南地区有异常西南风,

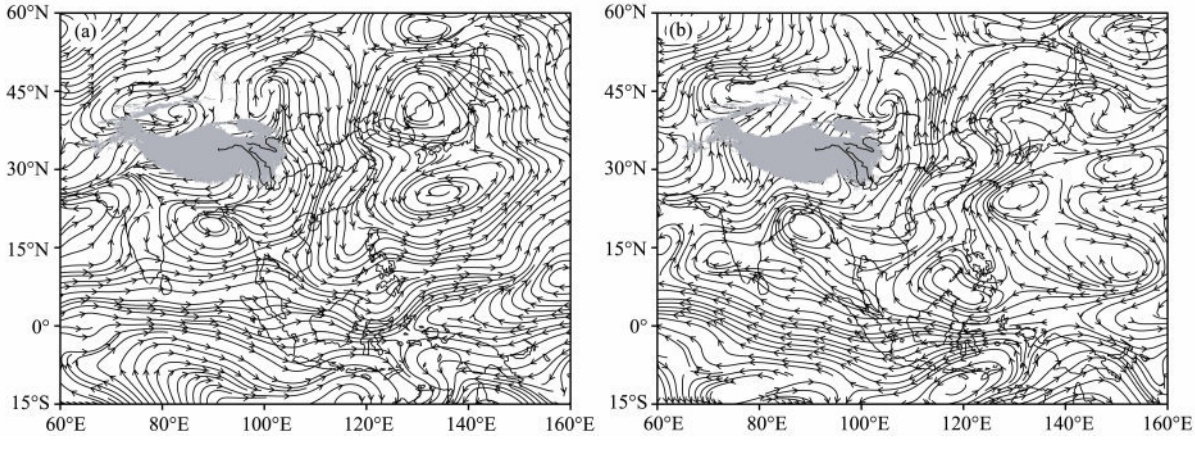

图 9　春季 ZSSTI 强(a)、弱(b)年合成的同期春季 850 hPa 风场异常(单位:m/s)

Fig. 9　Composite analysis in spring 850 hPa wind anomalies in high (a) and low (b) spring ZSSTI years (unit: m/s)

这支西南风带来更加充足的水汽输送(图略),有利于华南地区降水的增加.

与图 5 类似的分析方法,定量分析了在 ZSSTI 强、弱年,华南区域大气对流层低层的水汽收支情况(图略).当春季 ZSSTI 偏强时,对应华南区域有异常水汽辐散,不利于降水发生.这种异常的水汽辐散主要是由于南边界上流入区域的水汽输送显著减小导致的,偏强年和偏弱年的差值可达气候均值的 40%;虽然北边界上流出区域的水汽输送也有所减小,但是这个减小值小于南边界上流入的减小值,所以南北方向上存在异常水汽辐散.东西方向上,由于东边界流出水汽通量的减小值大于流入的减小值,所以东西方向上存在异常水汽辐合.由于东西方向上的异常辐合值小于南北方向上的异常辐散值,对区域整体而言,低层存在辐散,水汽收入较气候平均值减小,不利于降水发生.

表 2 是华南区域的南边界低层水汽输送通量与前冬 SAMI、春季 ZSSTI 及春季 RI 的相关系数.由表可知,春季华南降水与南边界低层水汽输送呈正相关,由南边界流入区域的水汽越多(少),对应降水也越多(少).但是,无论是前冬 SAMI,还是前冬 SAMI 引起的次年春季的海温异常信号 ZSSTI,均与南边界水汽输送通量呈负相关,即前冬 SAMI 偏强,春季 ZSSTI 偏强,南边界上的水汽输送通量越小,对应华南降水偏少.

表 2 华南区域的南边界低层(1000～700 hPa)水汽输送通量与前冬 SAMI、春季 ZSSTI 及春季 RI 与的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between low layer (1000～700 hPa) water vapor transport flux at south boundary of South China and the preceding winter SAMI, spring ZSSTI and spring RI

	SAMI	ZSSTI	RI
Corr	−0.38 *	−0.42 *	0.69 *

注:* 代表通过置信度 99%的显著性检验.

春季南半球带状海温异常信号造成的大气环流异常还表现在其它环流要素方面.由图 10a 可见,ZSSTI 偏强时,在 60°N 以南、60°E 以东的亚洲大陆大部分地区,850 hPa 的位势高度场有正异常,而接近亚洲大陆的西太平洋上,大部分地区位势高度偏低.位势高度异常场的这种配置,对应着 ZSSTI 强(弱)年,我国华南地区有异常东北(西南)风,这与图 9 的结果一致.分析西北太平洋副热带高压西伸脊点的异常(图 10b)发现,ZSSTI 偏弱(强),西太副高西伸脊点较气候平均明显偏西(东),利于(不利于)华南降水增多的.为了避免在 ZSSTI 合成的过程中带入 ENSO 的影响,先排除典型的 ENSO 年,再用 ZSSTI 进行合成分析.因此重新计算了图 9 至图 10 的结果,与 ZSSTI 对应的春季华南地区环流异常变化不大(图略),异常型分布基本一致.

综合以上诊断分析的结果可以得出:当前冬 SAM 偏强时,受海表风速影响潜热释放量发生变化,导致 30°S—45°S 海温偏高,45°S—70°S 海温偏低,异常的海温信号可以持续到次年春季,并进一步导致了春季华南地区的东北风异常及水汽偏弱等异常,有利于华南降水偏少.前冬SAM偏弱时情况相反,有利于华南降水偏多.这一过程体现了海气耦

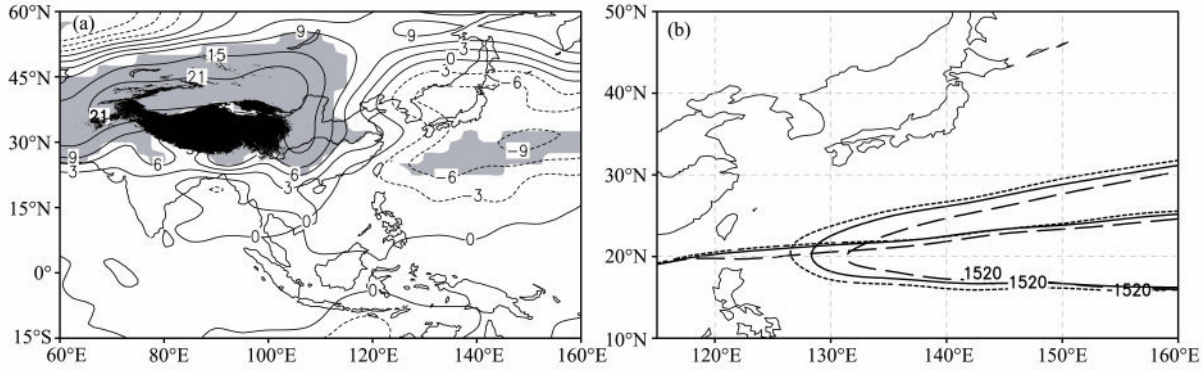

图 10 春季 ZSSTI 合成的同期春季 850 hPa 位势高度场合成差(a)及西北太平洋副高脊线(b)(单位:gpm)

图 a 中浅灰色阴影区代表通过置信度 90%的显著性检验,深灰色阴影代表青藏高原,

图 b 中实线、长虚线、短虚线分别代表气候态、强年合成、弱年合成.

Fig. 10 Composite analysis in the spring geopotential height (a) and Northwestern Pacific subtropical high (b) on 850 hPa between high and low spring ZSSTI (unit: gpm)

In figure a, the dark shadow areas indicate significant at 90 % level, the light shadow indicates Tibet Plateau; in figure b, the solid, long dash, and short dash line respectively indicates climatology, strong year composite, and weak year composite

合桥的作用,即:海洋储存了冬季 SAM 的异常信号并在春季释放,通过影响春季大气环流,进一步影响华南春季降水.考虑到这是基于诊断分析得到的结论,为了验证春季大气环流对同期春季南半球中高纬与 SAM 有关的带状海温异常的响应,利用 CAM3 进行了海温敏感性试验.

7　CAM3 模式海温敏感性试验的结果

本节利用 CAM3 模式通过参照试验和修改海温强迫场的敏感性试验来进行模拟分析.参照试验不对海温等外强迫场做任何修改.在第一组敏感性试验中,令春季 30°S—45°S 之间的海温增加 1 ℃,45°S—70°S 之间的海温减小 1 ℃,对应春季高 ZSSTI 时的海温异常型,其他季节的海温保持不变;在第二组敏感性试验中,令春季 30°S—45°S 之间的海温降低 1 ℃,45°S—70°S 之间的海温增加 1 ℃,对应春季低 ZSSTI 时的海温异常型,同样保持其他季节的海温不变.参照试验和敏感性试验均积分 25 年,考虑模式运行的稳定性,取后 15 年的结果进行分析.图 11 是春季全球纬向平均垂直环流对同期春季高 ZSSTI 对应的海温异常的响应(敏感性试验与参照试验之差),图中阴影为气候态的上升和下沉运动(参照试验结果).可以看到,气候态的春季 Hadley 环流在南北半球基本对称,中心上升支位于赤道;南半球费雷尔环流上升支及极地环流下沉支

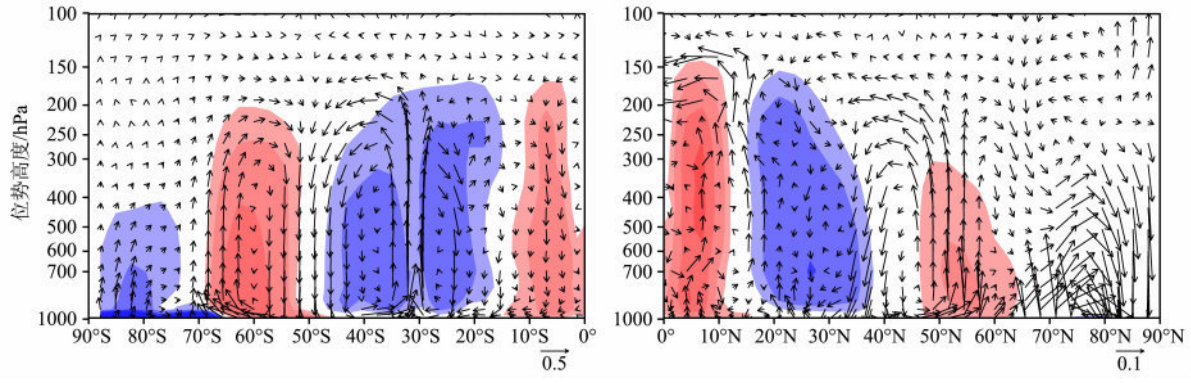

图 11　CAM3 模式模拟的春季全球纬向平均垂直环流对同期春季高 ZSSTI 对应的海温异常的响应

图中红、蓝色阴影分别表示气候态的上升和下沉运动.

Fig. 11　The response of spring global zonal mean vertical circulation to a high ZSSTI forcing in the CAM3 model.

(The red (blue) shadow indicates climatologic ascending (descending) motion)

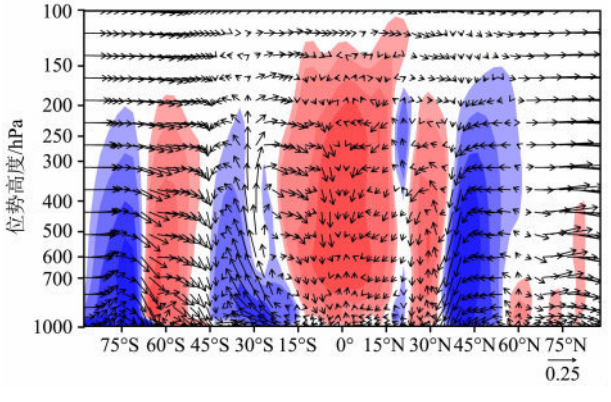

图 12　CAM3 模式模拟的春季华南区域(110°E—120°E)纬向平均垂直环流对同期春季高ZSSTI对应的海温异常的响应

图中红、蓝色阴影分别表示气候态的上升和下沉运动.

Fig. 12　The response of spring zonal mean vertical circulation over South China (110°E—120°E) to a high ZSSTI forcing in the CAM3 model

The red (blue) shadow indicates climatologic ascending (descending) motion.

的强度均强于北半球.南半球 30°S—45°S 位于气候态 Hadley 环流的下沉区,45°S—70°S 基本上位于气候态的费雷尔环流的上升区.

首先关注大气环流对海温异常的局地响应,以 30°S 为中心有异常上升气流,以 50°S 为中心存在异常下沉,基本上符合高海温对应异常上升,低海温对应异常下沉,但是环流的响应比海温异常偏北 10° 左右.局地垂直环流的异常,必然会带动其它纬度产生环流异常.由图 11 可见,以 30°S 为中心的上升气流削弱了南半球 Hadley 环流下沉支的主体部分,使得 15°S—4°N 之间 Hadley 环流上升支也相应减弱.北半球 4°N—20°N (包含气候态 Hadley 环流的上升支) 有异常上升,20°N—45°N 异常下沉,北半球的 Hadley 环流有所加强.我们关注的华南区域位于 20°N—30°N,这个区域对应异常下沉气流,利于降水减少.

图 12 是华南区域(110°E—120°E)纬向平均垂

直环流对同期春季高 ZSSTI 对应的海温异常的响应.由图可见,华南地区春季气候态上是由上升运动控制的,由于经向范围只有 10 个经度,气候态的三圈环流和对高 ZSSTI 强迫的响应不如全球纬向平均表现的规则,但可以明确看到华南地区上空的异常下沉气流以及异常北风,这两个因素都不利于降水发生.

图 13 给出的是 CAM3 模式模拟的两组敏感性试验在春季 867 hPa 之差,由图可见,春季 ZSSTI 偏强对应的海温异常型,对应同期 867 hPa 我国华南地区的偏北风异常(图13a),以及异常的风场辐散与下沉运动,这些与之前资料诊断的结果是一致的,验证了春季ZSSTI偏高对应的海温异常型所导致的大气环流异常,不利于华南降水的发生.

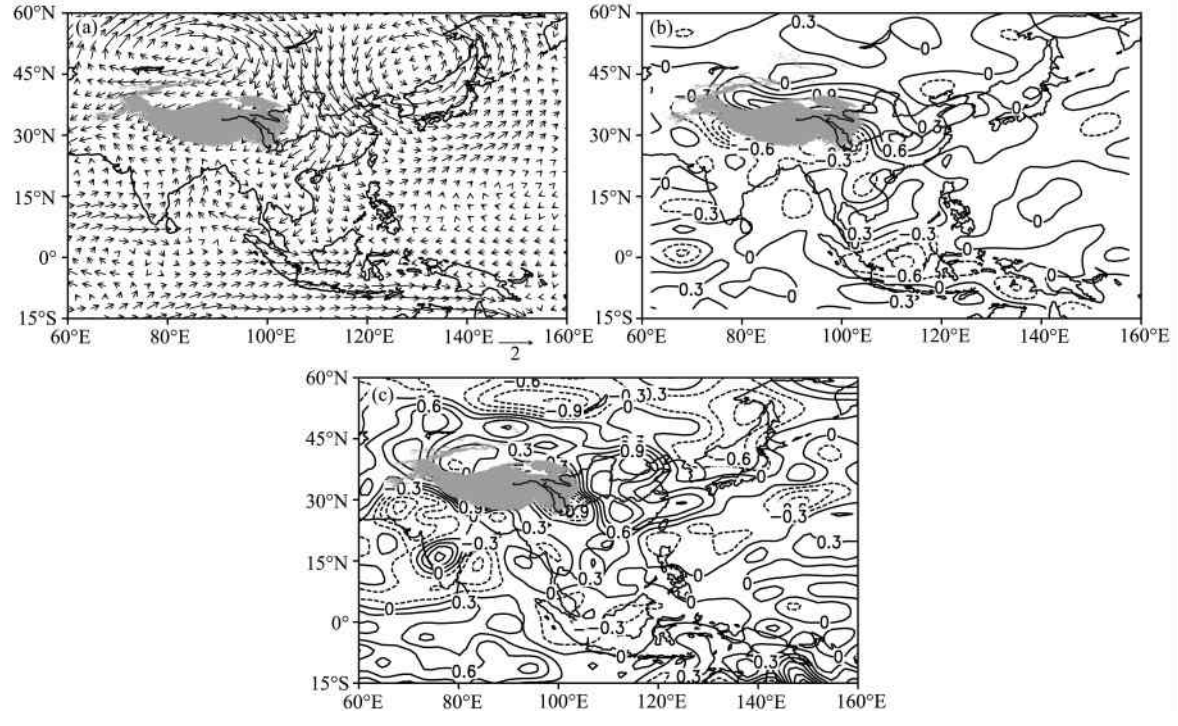

图 13 CAM3 模式模拟的强 ZSSTI 与弱 ZSSTI 两组敏感性试验在春季 867 hPa 之差

(a) 风场(单位: m/s); (b) 风场散度(单位:10^{-7}/s);(c) 垂直速度(单位:10^{-5} hPa/s).

Fig. 13 Composite difference in atmospheric circulation on 867 hPa between high and low ZSSTI in CAM3.0

(a) Wind (unit: m/s); (b) Divergence of wind (unit: 10^{-7}/s); (c) Vertical velocity (unit: :10^{-5} hPa/s)

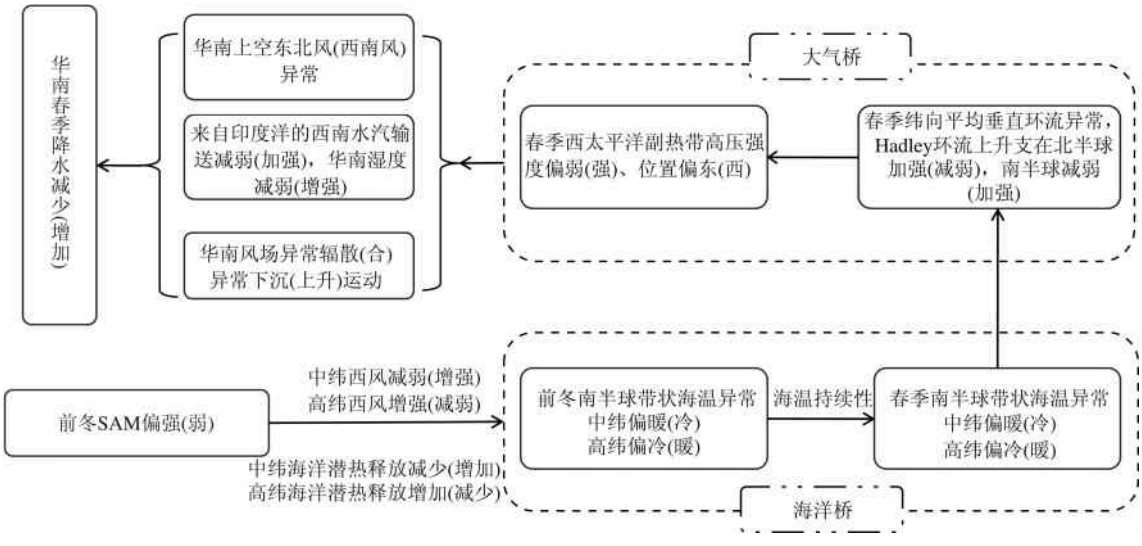

图 14 前冬 SAM 影响次年春季华南降水的可能物理机制概念图

Fig. 14 Possible mechanism of the impact of preceding boreal winter SAM on spring rainfall over South China

8　小结与讨论

本文分析了前冬南半球环状模(SAM)与春季华南降水之间的关系,诊断分析的结果表明两者之间存在显著的负相关关系.当前冬 SAM 偏强时,春季华南降水易于偏少;反之,降水易于偏多.分析前冬 SAM 异常对应的春季东亚区域大气环流异常发现,当前冬 SAM 偏强时,西北太平洋副热带高压位置偏东并且强度减弱,西太平洋地区有异常气旋式环流,华南地区有异常东北风,输入华南地区的水汽输送减少,不利于华南地区降水生成.加之华南地区存在异常下沉运动与异常偏低的相对湿度,为春季降水偏少提供了有利的条件.春季 SAM 偏弱时,情况相反,利于华南降水偏多.简言之,超前一个季节的南半球信号 SAM,可以影响到滞后一个季节的华南大气环流进而影响春季降水.要探讨这种影响过程的物理机制,考虑到大气自身的记忆性较差,因此探讨了下垫面海洋对大气异常信号经存储并再释放影响大气的过程.

再分析资料诊断的结果表明,当前冬 SAM 偏强时,受海表风速影响海洋的潜热释放量发生变化,导致 30°S—45°S 海温偏高, 45°S—70°S 海温偏低,异常的海温信号可以持续到次年春季.为了探讨这种海温异常信号影响大气环流,从而影响降水的物理机制,定义两条纬带的区域平均海温之差为海温指数(ZSSTI),SAM 偏强(弱)对应 ZSSTI 偏高(低).诊断分析的结果表明,春季 ZSSTI 偏强,西北太平洋副热带高压位置偏东且强度偏弱,对应西太平洋上盛行异常气旋式环流,华南地区上空对流层低层有异常东北风,西南水汽输送较常年减弱,有异常水汽辐散,不利于华南降水生成.春季 ZSSTI 偏弱时情况相反,有利于华南降水偏多.为了进一步证实与前冬 SAM 有关的 ZSSTI 型海温异常对应的春季大气环流异常,采用 CAM3 模式进行海温敏感性试验.数值模拟的结果也表明,ZSSTI 型海温异常导致了纬向平均垂直环流的异常.ZSSTI 偏高,华南地区上空对流层中低层存在异常的东北风异常、风场辐散以及异常下沉气流,不利于降水的生成;ZSSTI 偏低时情况相反,有利于华南降水偏多.数值模拟的结果验证了资料诊断的结果.综上,可提炼出前冬 SAM 影响次年春季华南降水的可能物理机制概念图(图 14),在前冬南半球 SAM 影响春季华南降水的过程中,体现了海气耦合桥的作用,即:前冬 SAM 异常,由于海表风速改变影响潜热蒸发,从而导致海温产生异常.海温异常信号保存到春季,在春季释放从而影响大气,使得大气环流产生相应变化从而影响华南降水.

另外,南半球高纬度(主要是 60°S 以南)存在海冰,作为气候系统中重要的因子之一,海冰会对某些区域的气候产生影响.冬季 SAM 对海冰的作用如何,以及是否会通过海冰的异常带来对中国气候的影响,是进一步需要深入研究和探讨的问题.

致　谢　感谢审稿专家提出的宝贵建议;感谢编辑部对本文的悉心审核;在本文的分析和写作过程中,得到了课题组同学的无私帮助,作者深表感谢.

参考文献(References)

[1] Gong D Y, Wang S W. Antarctic oscillation: concept and applications. *Chinese Sci. Bull.*, 1998, 43(9): 734-738.

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

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

[4] Walker G. World weather. *Nature*, 1928, 121(3053): 713-716.

[5] Kidson J W. Eigenvector analysis of monthly mean surface data. *Mon. Wea. Rev.*, 1975, 103(3): 177-186.

[6] Rogers J C, van Loon H. Spatial variability of sea level pressure and 500 mb height anomalies over the Southern Hemisphere. *Mon. Wea. Rev.*, 1982, 110(10): 1375-1392.

[7] Limpasuvan V, Hartmann D L. Eddies and the annular modes of climate variability. *Geophys. Res. Lett.*, 1999, 26(20): 3133-3136.

[8] Ambaum M H P, Hoskins B J, Stephenson D B. Arctic oscillation or North Atlantic oscillation? *J. Climate*, 2001, 14(16): 3495-3507.

[9] Dommenget D, Latif M. Notes and correspondence: A cautionary note on the interpretation of EOFs. *J. Climate*, 2001, 15(2): 216-225.

[10] Li J P, Wang J X L. A modified zonal index and its physical sense. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, 30(12): 1632, doi:10.1029/2003GL017441.

[11] 李建平. 北极涛动的物理意义及其与东亚大气环流的关系// 俞永强, 陈文等. 海—气相互作用对我国气候变化的影响. 北京: 气象出版社, 2005: 169-176.
Li J P. Physical nature of the Arctic Oscillation and its relationship with East Asian atmospheric circulation// Yu Y Q, Chen W, et al. Air-Sea-land Interactions in Asia Monsoon Region and Their Impacts on the Climate Variation in China (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2005: 169-176.

[12] 范丽军, 李建平, 韦志刚等. 北极涛动和南极涛动的年变化

特征. 大气科学, 2003, 27(3): 419-424.
Fan L J, Li J P, Wei Z G, et al. Annual variations of the Arctic Oscillation and the Antarctic Oscillation. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 27(3): 419-424.

[13] 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, 30(24): 2266, doi:10.1029/2003GL018381.

[14] Ding R Q, Li J P, Wang S G, et al. Decadal change of the spring dust storm in northwest China and the associated atmospheric circulation. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, 32(2), L02808, doi:10.1029 /2004GL021561.

[15] 苗春生, 吴志伟, 何金海. 北半球环状模(NAM)、东北冷涡与前汛期华南旱涝. 热带气象学报, 2006, 22(6): 593-599.
Miao C S, Wu Z W, He J H. Relationship among the Northern Hemisphere annual mode, the Northeast China cold vortex and precipitation during the first yearly rainy period in South China. *J. Trop. Meteor.* (in Chinese), 2006, 22(6): 593-599.

[16] Wu Z W, Li J P, Wang B, et al. Can the Southern Hemisphere annular mode affect China winter monsoon? *J. Geophys. Res.*, 2009, 114 (D11107), doi: 10.1029/2008JD011501.

[17] 孙诚, 李建平. 2009/2010 年北半球冬季异常低温分析——兼论北半球环状模与北半球地面气温的关系. 气候与环境研究, 2012, 17(3): 259-273.
Sun C, Li J P. Analysis of anomalously low surface air temperature in the Northern Hemisphere during 2009/2010 winter-Relationship between Northern Hemisphere Annular Mode and Northern Hemisphere surface air temperature. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2012, 17(3): 259-273.

[18] 李晓峰, 李建平. 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, 2010, 34(6): 1099-1113.
Li X F, Li J P. Propagation characteristics of atmospheric circulation anomalies of sub-monthly Southern Hemisphere Annular Mode. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2010, 34(6): 1099-1113.

[19] 李晓峰, 李建平. 月内尺度北半球环状模水平和垂直活动特征分析. 气象学报, 2011, 69(6): 1046-1061.
Li X F, Li J P. Meridional and vertical propagation characteristics of the submonthly Northern Hemisphere Annual Mode. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 2011, 69(6): 1046-1061.

[20] Hall A, Visbeck M. Synchronous variability in the Southern Hemisphere atmosphere, sea ice, and ocean resulting from the annular mode. *J. Climate*, 2002, 15(21): 3043-3057.

[21] Silvestri G E, Vera C S. Antarctic oscillation signal on precipitation anomalies over southeastern South America. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, 30(21): 2115, doi: 10.1029/2003GL018277.

[22] Lefebvre W, Goosse H, Timmermann R, et al. Influence of the Southern Annular Mode on the sea ice-ocean system. *J. Geophys. Res.*, 2004, 109: C09006, doi: 10.1029/2004JC002403.

[23] Naik S S, Thamban M, Laluraj C M, et al. Century of climate variability in central Dronning Maud Land, East Antarctica, and its relation to Southern Annular Mode and El Niño-Southern Oscillation. *J. Geophys. Res.*, 2010, 115: D16102, doi: 10.1029/2009JD013268.

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

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

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

[27] 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 H, Xue F, Wang H J. Influence of interannual variability of Antarctic Oscillation on Meiyu along the Yangtze and Huaihe River valley and its importance to prediction. *Chinese Sci. Bull.* (in Chinese), 2003, 48(Suppl): 87-92.

[28] Feng X, Wang H J, He J H. Interannual variability of Mascarene high and Australian high and their influences on East Asian summer monsoon. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2004, 82(4): 1173-1186.

[29] 薛峰. 南半球环流变化对东亚夏季风的影响. 气候与环境研究, 2005, 10(3): 401-408.
Xue F. Influence of the Southern circulation on east Asian summer monsoon. *Climatic Environ. Res.* (in Chinese), 2005, 10(3): 401-408.

[30] 南素兰, 李建平. 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, 2005, 63(6): 837-846.
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: Ⅰ Basic facts. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 2005, 63(6): 837-846.

[31] 南素兰, 李建平. 春季南半球环状模与长江流域夏季降水的关系: II. 印度洋和南海海温的"海洋桥"作用. 气象学报, 2005, 63(6): 847-856.
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: Ⅱ The role of the Indian Ocean and South China sea as an "Oceanic bridge". *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 2005, 63(6): 847-856.

[32] 吴志伟, 何金海, 李建平等. 长江中下游夏季旱涝并存及其异常年海气特征分析. 大气科学, 2006, 30(4): 570-577.
Wu Z W, He J H, Li J P, et al. The summer drought-flood coexistence in the middle and lower reaches of the Yangtze

River and analysis of its air-sea background feathers in anomalous years. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2006, 30 (4): 570-577.

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

[34] Feng J, Li J P. Influence of El Niño Modoki on spring rainfall over South China. *J. Geophys. Res.*, 2011, 116: D13102, doi: 10.1029/2010JD015160.

[35] 黄士松，李真光，包澄澜. 华南前汛期暴雨. 广州：广东科技出版社，1986.
Huang S S, Li Z G, Bao C L. The Heavy Rain During the First Rainy Season in South China (in Chinese). Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1986.

[36] 吴尚森，梁建茵. 华南前汛期旱涝时空分布特征. 热带气象学报，1992，8(1)：87-92
Wu S S, Liang J Y. Temporal and spatial characteristics of the drought and flood during the rainy season in South China. *J. Trop. Meteor.* (in Chinese), 1992, 8(1): 87-92.

[37] 郭其蕴，沙万英. 华南前汛期降水变率的分析. 应用气象学报，1998，9(增刊)：9-15
Guo Q Y, Sha W Y. Analysis of rainfall variability during the first rainy season in South China. *J. Appl. Meteor. Sci.* (in Chinese), 1998, 9 (Suppl1): 9-15.

[38] 邓立平，王谦谦. 华南前汛期 (4-6 月) 降水异常特征及其与我国近海海温的关系. 热带气象学报，2002，18(1)：45-55.
Deng L P, Wang Q Q. On the relationship between precipitation anomalies in the first raining season (April-June) in Southern China and SST over offshore waters in China. *J. Trop. Meteor.* (in Chinese), 2002, 18(1): 45-55.

[39] 苗春生，吴志伟，何金海. 北半球环状模(NAM)、东北冷涡与前汛期华南旱涝. 热带气象学报，2006，22(6)：593-599.
Miao C S, Wu Z W, He J H. Relationship among the Northern Hemisphere annual mode, the Northeast China cold vortex and precipitation during the first yearly rainy period in South China. *J. Trop. Meteor.* (in Chinese), 2006, 22(6): 593-599.

[40] 黄先香，炎利军，施能. 华南前汛期旱涝影响因子和预报方法. 热带气象学报，2006，22(5)：431-438.
Huang X X, Yan L J, Shi N. Influence factors and prediction method on flood/drought during the first rainy season in South China. *J. Trop. Meteor.* (in Chinese), 2006, 22(5): 431-438.

[41] 毛江玉，吴国雄. 1991 年江淮梅雨与副热带高压的低频振荡. 气象学报，2005，63(5)：762-770.
Mao J Y, Wu G X. Intraseasonal variability in the Yangtze-Huaihe River rainfall and subtropical high during the 1991 Meiyu period. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 2005, 63 (5): 762-770.

[42] 吴恒强，张爱华，蒋伯仁等. 华南前汛期降水与南极海冰变化的关系. 南京气象学院学报，1998，21(2)：266-273.
Hu H Q, Zhang A H, Jiang B R, et al. Relationship between the variation of Antarctic sea ice and the pre-flood season rainfall in Southern China. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 1998, 21(2): 266-273.

[43] 陈长胜，林开平，王盘兴. 华南前汛期降水异常与水汽输送的关系. 南京气象学院学报，2004，27(6)：721-727.
Chen C S, Lin K P, Wang P X. Relation between pre-flood season precipitation anomalies in South China and water vapor transportation. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2004, 27(6): 721-727.

[44] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, 77(3): 437-470.

[45] 黄平，黄荣辉. El Niño 事件对其衰减阶段夏季中国降水季节内演变的影响及其机理. 大气科学学报，2010，33(5)：513-519.
Huang P, Huang R H. Effects of El Niño events on intraseasonal variations of following summer rainfall in China and its mechanism. *Trans. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2010, 33(5): 513-519.

[46] 宗海峰，陈烈庭，张庆云. ENSO 与中国夏季降水年际变化关系的不稳定性特征. 大气科学，2010，34(1)：184-192.
Zong H F, Chen L T, Zhang Q Y. The instability of the interannual relationship between ENSO and the summer rainfall in China. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2010, 34(1): 184-192.

[47] Wallace J M, Smith C, Bretherton C S. Singular value decomposition of wintertime sea surface temperature and 500-mb height anomalies. *J Climate*, 1992, 5(6): 561-576.

[48] 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.

[49] Cai W J, Sullivan A, Cowan T. Interactions of ENSO, the IOD, and the SAM in CMIP3 Models. *J. Climate*, 2011, 24 (6): 1688-1704.

（本文编辑　汪海英）