明静, 孙建奇, 李国平, 等. 2015. 南半球中纬度偶极模态与亚洲—非洲夏季降水 [J]. 大气科学, 39 (2): 413−421, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1409.14193. Ming Jing, Sun Jianqi, Li Guoping, et al. 2015. Dipole pattern in southern hemispheric mid-latitude and Asian−African summer precipitation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (2): 413−421.

南半球中纬度偶极模态与亚洲—非洲夏季降水

明静[1, 2] 孙建奇[2] 李国平[1] 裴军林[3]

1 成都信息工程学院，成都 610225
2 中国科学院大气物理研究所竺可桢—南森国际研究中心，北京 100029
3 西昌卫星发射中心, 西昌 615000

摘 要 南半球大气环流第一模态为南极涛动，它表现出较好的纬向对称结构。本工作利用经验正交分解方法研究发现，在南半球的东半球，夏季（6～9 月）大气环流还存在一个重要的模态。不同于南极涛动，该模态表现为显著的纬向偶极分布，本文定义其为偶极模态。在海平面气压场上，该模态的解释方差可以达到 20%以上，表现出显著的年际变化特征。进一步的研究发现，该偶极模态与亚非夏季降水存在密切联系，尤其与我国华南、南亚以及热带非洲东部地区的夏季降水存在显著的正相关关系。机制分析表明，南半球这一偶极模态的异常会影响东半球越赤道气流的变化，从而造成向上述三个地区的水汽输送的多寡，并最终导致这三个地区夏季降水发生变化。本工作揭示的偶极模态变化独立于南极涛动，研究结果不但可以深化对南半球环流系统变化特征及影响的认识，而且对亚非夏季降水的变化特征和机制研究也具有重要意义。

关键词 偶极模态 夏季降水 越赤道气流
文章编号 1006-9895(2015)02-0413-09 **中图分类号** P466 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1409.14193

Dipole Pattern in Southern Hemispheric Mid-latitude and Asian–African Summer Precipitation

MING Jing[1, 2], SUN Jianqi[2], LI Guoping[1], and PEI Junlin[3]

1 *Chengdu University of Information Technology*, *Chengdu* 610225
2 *Nansen–Zhu International Research Centre, Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029
3 *Xichang Satellite Launch Center*, *Xichang* 615000

Abstract As the first middle and high latitude circulation mode in the Southern Hemisphere, the Antarctic Oscillation (AAO) has a zonally symmetric structure. Using the empirical orthogonal function method, this study reveals existence of another dominant mode of atmospheric circulation in the eastern Southern Hemisphere boreal summer (June–September). Different from the AAO, this mode shows a significant zonal dipole distribution, or dipole pattern. This dipole pattern accounts for more than 20% of the total variance in the regional sea-level pressure field, and shows a strong interannual variation. Further research has demonstrated that the dipole pattern is significantly positively correlated with summer rainfall in Asia and Africa, especially in South China, South Asia, and tropical eastern Africa. Analysis suggests this pattern anomaly can influence the variation of cross-equatorial flow in the Eastern Hemisphere, which can affect the

收稿日期 2014-07-16；**网络预出版日期** 2014-09-10
资助项目 公益性行业（气象）科研专项 GYHY201306026，中国科学院战略性先导科技专项 XDA05090306，中国科学院澳大利亚联邦科工组织战略合作项目 GJHZ1223，江苏省气候变化协同创新中心
作者简介 明静，女，1988 年出生，硕士研究生，主要从事气候变异研究。E-mail: stupidmj@163.com
通讯作者 孙建奇，E-mail: sunjq@mail.iap.ac.cn

transportation of water vapor into South China, South Asia, and tropical eastern Africa, and ultimately result in summer precipitation anomalies over the three regions. The dipole pattern revealed in this study is independent from the AAO, and the results of this study are not only helpful for better understanding the variation and influence of the atmospheric circulation in the Southern Hemisphere but also for examining summer precipitation variations and mechanisms in Africa and Asia.

Keywords Dipole pattern, Summer precipitation, Cross-equator flow

1 引言

南北半球相互作用一直是气象学研究的重点问题。在南北半球的相互作用中，冬半球常常处于积极主动的地位，而夏半球则深受其影响，被动做出各种反应（赵宗慈和王绍武，1979）。早在 20 世纪 50 年代，李宪之（1956）就发现南半球冷空气活动与北半球台风生成之间存在密切联系。赵宗慈和王绍武（1979）进一步的研究指出，北大西洋、北太平洋和北印度洋热带气旋的数量变化分别与南半球副热带的三个高压，即南大西洋副热带高压、澳大利亚高压和马斯克林高压的强弱有着明显的关系。此外，研究还发现冬半球环流的变化对夏半球的降水也有着显著的影响。陶诗言等（1962）的研究显示在东亚低纬度盛行经向环流期间，南半球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也最强烈；而当东亚低纬度为纬向环流期间，南半球也盛行纬向环流，此时澳洲附近的冷空气活动不显著，向北半球的质量输送也明显较弱。

Findlater（1969）通过分析索马里低空急流的变化特征，发现其对印度夏季风的建立和爆发的重要作用，并进一步指出其与印度西部的西南季风降水之间的关系。20 世纪 80 年代之后，随着高质量观测资料的积累，其他几支低空越赤道气流通道相继被揭示（陈于湘，1980；陈隆勋，1984；王兴东和陶诗言，1984；汤明敏等，1985），并确认了它们与南半球寒潮爆发的显著关系，并且发现越赤道气流的强弱与东亚夏季风及降水有密切的关系。越赤道气流是两半球气候相互作用的关键，而北半球夏季这几支越赤道气流的强弱主要受制于南半球副热带高压的变化。对于东半球越赤道气流而言，澳大利亚高压和马斯克林高压的变化最为主要。黄士松和汤明敏（1987）从东亚夏季风的活动与低纬环流系统的关系研究入手，分析了东亚夏季风体系结构，提出马斯克林高压不仅是印度夏季风系统的成员，也是东亚夏季风系统的重要成员。此外，南半球副热带的两大高压呈现明显的低频振荡，当马斯克林高压增强后，其下游的澳大利亚高压亦随之增强，两高压对其北部的越赤道气流产生影响并进一步影响到西太平洋副热带高压（薛峰和何卷雄，2005）。更多的研究显示，东亚夏季风降水与马斯克林高压和澳大利亚高压有着密切的关系。当北半球从春到夏马斯克林高压增强时，我国长江流域至日本一带多雨，而华南到台湾以东的西太平洋以及东亚中纬度大部分地区为少雨（王会军和薛峰，2003；薛峰等，2003）。相比马高，澳大利亚高压的影响仅限于华南地区，当澳大利亚高压增强时华南多雨（薛峰等，2003）。

南极涛动（AAO）作为南半球中高纬大气环流最主要的模态，不仅对南半球气候有重要影响，而且对热带和北半球气候的作用也不容忽视。例如，春季南极涛动可以显著的影响到东亚夏季降水（高辉等，2003；Xue et al.，2004；Wang and Fan，2005；Sun et al.，2009）和沙尘频次的变化（Fan and Wang，2004）、西北太平洋台风生成频次（王会军和范可，2006）以及西非和北美夏季风等（Sun，2010；Sun et al.，2010）。在春季南极涛动影响东亚和西非夏季风的过程中，海洋性大陆地区对流和热带大西洋海温的变化起着重要的桥梁作用（Sun et al.，2009，2010）。因此，南极涛动影响的揭示对深入认识北半球气候变化具有重要意义，而且春季南极涛动的变化相对于东亚以及西非季风的变异具有较好的季节超前性，这一点具有重要的预测价值。

然而，已有关于南半球大尺度环流模态的研究，包括 AAO、马斯克林高压和澳大利亚高压等，关注的基本都是大气环流纬向对称的模态，尤其在东半球，这主要是由于马斯克林高压和澳大利亚高压表现出显著的一致变化特征（薛峰，2005）。除了纬向对称结构外，是否还存在其他结构的主要模态？如果有，进一步该模态的变化特征及其影响又如何？为了回答上述问题，本工作对南半球大气环流进行了再分析。

2　资料

本文研究所用资料包括：（1）欧洲中期天气预报中心（ECMWF）发展的 ERA-Interim 大气再分析资料，分析变量包含逐月海平面气压（SLP）、风场、高度场、比湿资料（Dee et al.，2011），该资料起始于 1979 年 1 月，水平分辨率为 1.5°×1.5°；（2）美国国家海洋和大气管理局（NOAA）发展的逐月射出长波辐射（OLR）资料，该资料水平分辨率为 2.5°×2.5°，资料起始于 1974 年 6 月，其中由于 NOAA-5 卫星故障使得 1978 年 3 月 1 日～1978 年 12 月 31 日的数据缺测，本文所使用的 OLR 数据并不包含这一时间段；（3）降水资料是来自全球降水气候计划（GPCP）发展的逐月降水资料（Adler et al.，2003），该资料的分辨率为 2.5°×2.5°，资料时间从 1979 年 1 月至今。

本文分析时段为 1979～2012 年，季节为北半球夏季 6～9 月的平均。由于本文主要关注年际变化，因此在分析前所有资料均已去除线性趋势。

3　南半球 SLP 偶极模态

为了探讨南半球大气环流的主要模态，首先对过去 34 年南半球的东半球 6～9 月平均的 SLP 做经验正交分解（EOF）分析（图 1）。可以看到，EOF 第一模态表现出纬向对称的中、高纬度反相变化的特征，即典型的 AAO 模态分布，该模态的解释方差可以占到总方差的 41.9%。在该模态中，南半球副热带呈纬向对称结构，这表明，位于该地区的两个副热带高压系统，马斯克林高压和澳大利亚高压首先表现出一致变化的特征，这与已有研究结果一致（薛峰，2005）。不同于第一模态，EOF 第二模态表现为显著的纬向偶极模态，南半球中纬度基本上以 110°E 为界，东西两侧的 SLP 呈现出反相变化的特征，该模态的解释方差也达到了 20.9%。为了进一步探讨南半球这一偶极模态存在的客观性，本文还利用 NCEP/NCAR 的两套再分析资料以及 ERA-40 再分析资料做了同样的分析研究，也得到了与本文相似的结果，EOF 第二模态均为纬向偶极模态，并且解释方差也均在 20%以上（图略）。这说明了偶极模态独立于资料的选择，也进一步证实了本文利用 ERA-Interim 资料的研究结果。

如引言部分所述，之前关于 AAO 已有多项工作开展，取得了一系列研究成果，因此本文将不再对该模态进行研究，后续内容将主要针对第二模态

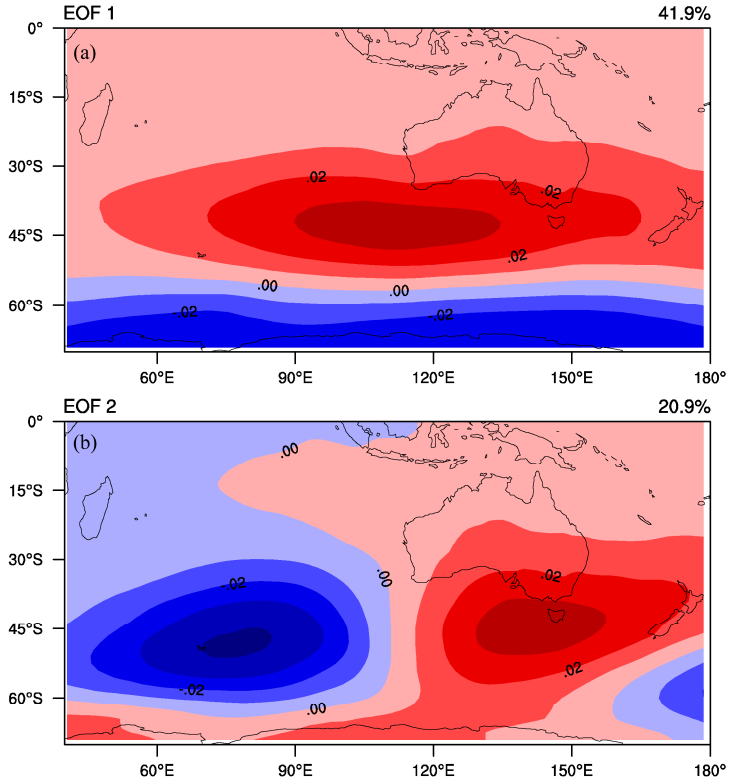

图 1　夏季（6～9 月）南半球 SLP 的 EOF 模态空间分布：（a）第一模态；（b）第二模态

Fig. 1　Spatial distribution of the EOF modes of the southern hemispheric SLP in the boreal summer (June–September): (a) First mode; (b) second mode

开展分析，本文称之为偶极模态。

偶极模态的时间系数如图 2 所示，可以看出在过去 30 多年中，该模态表现出较强的年际变化特征。在 1988 年、2003 年、2006 年和 2007 年，偶极模态的异常值可以超过两倍标准差。通过对该偶极模态的时间系数进行小波分析（使用 Morlet 连续小波变换），从图 3 可以看到该模态存在 4～8 年的准周期变化，在该周期内，存在通过 95%信度检验的显著谱峰。为了进一步研究偶极模态呈不同位相时各气候系统的变化差异，本文定义偶极模态时间系数大于 1 的年份为偶极模态极端正异常年、小于 −1 的年份为偶极模态极端负异常年，共得出七个极端正异常年（1988、1994、1997、1999、2006、2007、2011）和九个极端负异常年（1979、1981、1986、2002、2003、2004、2008、2009、2012）。后文的合成分析将依据这些年份开展，文中所提到的异常即极端正异常年平均值与极端负异常年平均值的差值。

如果将这些极端正、负异常年份的 SLP 做合成（图略），通过对比分析可以发现，在偶极模态正异常年份马斯克林高压偏强，影响区域向南拓展，而澳大利亚高压强度偏弱，影响区域向南收缩，反之亦然。所以，该偶极模态在物理本质上反映了马斯克林高压和澳大利亚高压反向变化的特点。

4 南半球偶极模态与亚非地区夏季降水的关系

大量研究结果表明南半球的大气环流异常对北半球气候具有重要的影响，如马斯克林高压、澳大利亚高压以及 AAO 等。那么本文揭示的南半球偶极模态对北半球夏季气候是否也存在重要作用呢？这是本节所要探讨的主要科学问题。

图 4 为偶极模态时间系数与亚非地区夏季 OLR 之间的相关分布图。可以看到，在热带非洲东部、南亚以及我国华南地区存在显著的负相关区。说明在偶极模态正异常年，热带非洲东部、南亚以及我

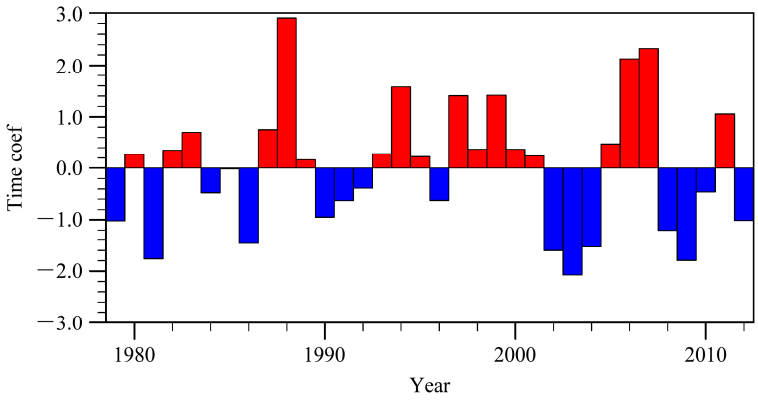

图 2 标准化的偶极模态时间系数

Fig. 2 Normalized time coefficients of the dipole pattern

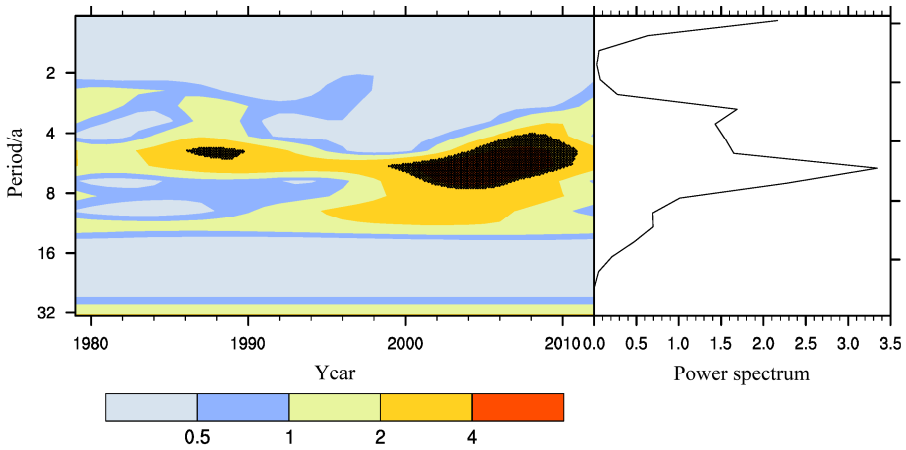

图 3 偶极模态时间系数的 Morlet 小波分析。黑色阴影为超过 95%信度检验的区域

Fig. 3 Morlet wavelet analysis of the dipole pattern time series. Dark shading indicates the regions significant at the 95% confidence level

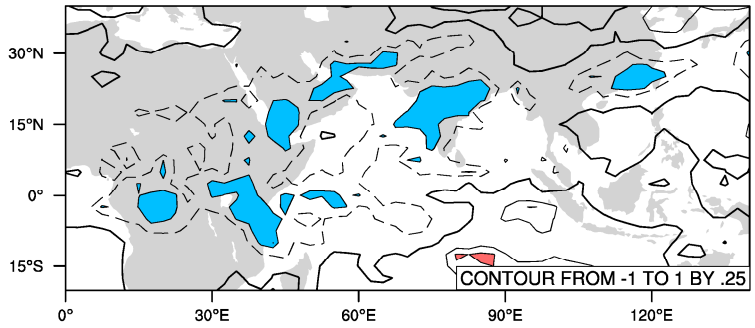

图 4　偶极模态时间系数与亚非地区夏季（6～9 月）OLR 的相关系数分布。粗实线：零线；实（虚）线：正（负）值；红（蓝）色阴影代表正（负）相关系数通过 95%信度检验的区域

Fig. 4　The correlation coefficients between the dipole pattern time series and Asian–African OLR in the boreal summer. Thick solid lines: zero lines; solid (dashed) lines: positive (negative) values. The red (blue) shading indicates the correlation coefficients significant at the 95% confidence level

国华南这三个地区对流活动显著偏强；反之，在负异常年，这些地区的 OLR 值为正异常，说明此时对流活动受到抑制、偏弱。这表明本文所揭示的南半球偶极模态与亚非地区的对流活动具有密切的联系。

为了进一步探讨南半球偶极模态与上述三个地区对流活动的时间演变关系，本文定义了三个对流指数，分别为热带非洲东部（12.5°S～2°N，35°E～45°E）、南亚（15°N～25°N，60°E～90°E）以及华南（20°N～30°N，110°E～120°E）三个地区区域平均的 OLR 值。三个标准化的对流指数与偶极模态时间系数的变化曲线如图 5 所示，可以发现，热带非洲东部、南亚以及华南地区的 OLR 指数与南半球偶极模态时间系数均具有相似的年际变化特征。计算结果显示，偶极模态时间系数与热带非洲东部夏季 OLR 指数的相关系数为－0.46，与南亚地区的相关系数为－0.54，与华南地区的相关系数为－0.41，三个相关系数均通过了 95%的信度检验。这进一步说明南半球偶极模态与北半球夏季对流活动存在显著的关联，且影响区域主要集中在赤道非洲东部、南亚以及我国华南地区。

中低纬度的对流活动与降水具有较为一致的变化，图 6 为偶极模态时间系数与夏季降水的相关分布。和 OLR 空间分布相似（符号相反），在热带非洲东部、南亚以及我国华南存在显著的正相关区。这进一步证实了南半球偶极模态与亚非夏季气候存在密切联系。与 OLR 空间分布有所差异的是，在降水相关场上，非洲北部地区也存在一个显著的正相关区，但是从本文后续的环流分析来看，该地区的降水与南半球中纬度偶极模态的变化没有直

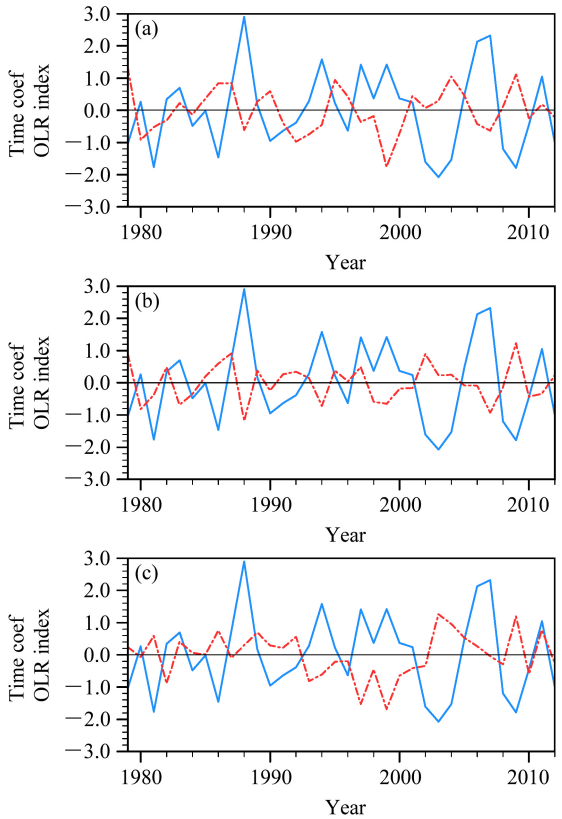

图 5　偶极模态时间系数（蓝色实线）与（a）热带非洲东部、（b）南亚以及（c）华南地区的 OLR 指数（红色虚线）

Fig. 5　The dipole pattern time series (blue solid lines) and the OLR indices (red dashed lines) in (a) eastern tropical Africa, (b) South Asia, and (c) South China

接的物理关联，因此，这里的降水与偶极模态的高相关很可能只是统计上的关系，该地降水的变化可能更多受制于其他气候因素的影响。因为本文主要研究南半球偶极模态的影响，因此这里将不再对非洲北部地区降水变化的归因做进一步的探讨。

5 对越赤道气流以及水汽的分析

为了进一步研究南半球偶极模态与亚非夏季降水联系的物理过程，本文利用合成分析方法探讨了该模态异常所对应的环流变化。

在南北半球相互作用研究中，越赤道气流是连接南北两个半球气候系统的重要机制。图 7 为偶极模态极端正、负异常年合成的印度洋—西太平洋地区 850 hPa 异常风场。首先在南半球中纬度地区异常风场呈现出东西反向的偶极模态分布，这与 SLP 的 EOF 模态空间分布相一致。与该模态相对应，澳大利亚北侧呈现出显著的异常东南风，该异常气流在西进和北进的过程中，于苏门答腊岛地区上空分为了两支，一支折向东北越过南海到达我国华南；另一支继续向西，在热带西印度洋上空又分为两支，一支折向东北抵达印度半岛，另外一支向西抵达非洲东部。

越赤道气流的变化主要对两半球间水汽的分配起着重要的调制作用，并进而导致两半球气候的异常。在上述越赤道气流的影响下，两半球水汽输送的变化也十分显著（图 8）。尤其是位于我国南海地区的那支越赤道气流，通过它可以把大量水汽输送到我国华南地区。这支越赤道气流在偶极模态极端正、负异常年有着鲜明的变化，因此，它的异常对我国华南地区夏季降水的多寡具有重要的影响和贡献。

除了向我国华南地区的水汽输送外，在偶极模态极端正异常年，位于印度洋上的越赤道水汽输送

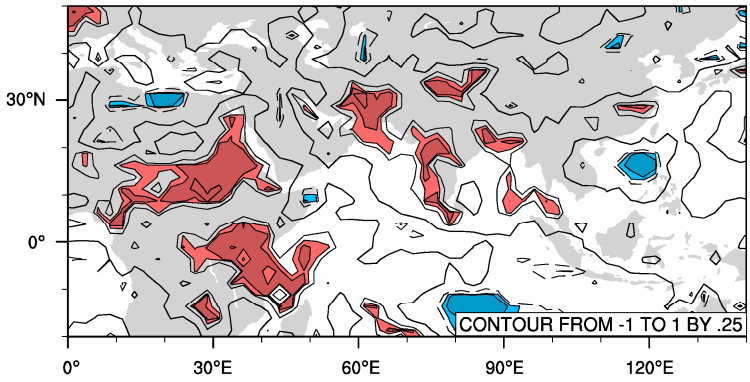

图 6 偶极模态时间系数与夏季亚非地区降水的相关系数分布图。粗实线：零线；实（虚）线：正（负）值；深/浅红色（蓝色）阴影表示正（负）相关系数通过 95%/90%信度检验的区域

Fig. 6 The correlation coefficients between the dipole pattern time series and the Asian–African rainfall in the boreal summer. Thick solid lines: zero lines; solid (dashed) lines: positive (negative) values. The dark/light red (blue) shading indicates the correlation coefficients significant at the 95%/90% confidence level

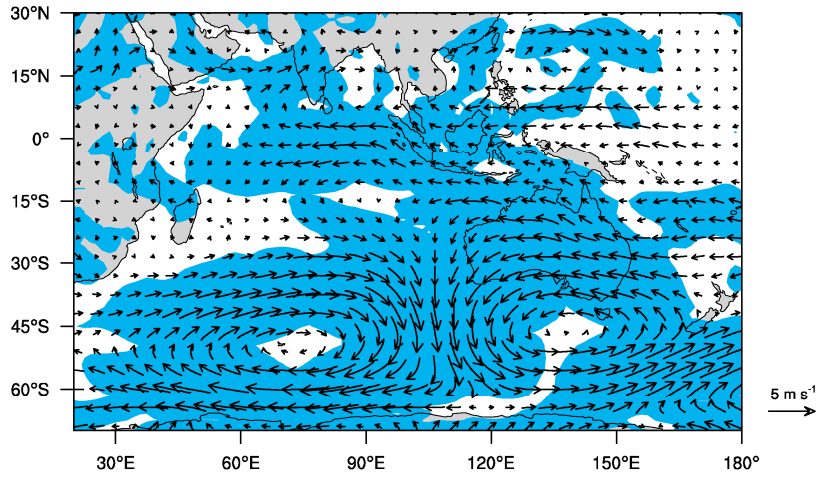

图 7 偶极模态极端正、负异常年合成的印度洋—西太平洋地区 850 hPa 风场差值矢量图（单位：m s^{-1}）。蓝色阴影表示风场差值通过 95%信度检验的区域

Fig. 7 Composite differences of 850-hPa wind (unit: m s^{-1}) in the Indian Ocean–western Pacific regions between extreme positive and negative anomaly years of dipole pattern. The blue shading indicates the differences significant at the 95% confidence level

也显著加强，该水汽输送带在热带西印度洋分为两支分别加强了向热带非洲东部和印度半岛的水汽输送。并且显著变化的气流在我国华南、印度半岛和热带非洲东部上空呈现出异常气旋性流场，造成水汽的辐合。图 8 中蓝色阴影部分是偶极模态极端正、负异常年合成的显著 OLR 变化区，可以看到在热带非洲东部、南亚和华南这些水汽输送强烈的地区，OLR 值也相对减小，说明该地对流不稳定在增强。

越赤道气流的变化，直接影响向热带非洲东部、南亚和我国华南地区水汽输送和辐合的变化，直接导致上述三个地区大气含水量的异常。如图 9 所示，在偶极模态极端正异常年，热带非洲东部、印度半岛以及华南地区，大气中水汽含量显著偏多，这为上述三个地区降水的偏多准备了良好的水汽条件。

综上所述，与南半球偶极模态极端负异常年相比，极端正异常年东印度洋地区的越赤道气流有所增强，这将加强向热带非洲东部、南亚以及华南地区的水汽输送，从而使得这些地区大气含水量增加，同时对流增强，最终导致这三个地区降水偏多，反之亦然。

6 结论与讨论

本文利用 EOF 分析方法，揭示出夏季南半球中纬度大气环流存在一个偶极模态，该模态在 SLP 场可以占到 20.9%的解释方差，表现出明显的年际变化特征。进一步，本文研究了该模态与亚非地区夏

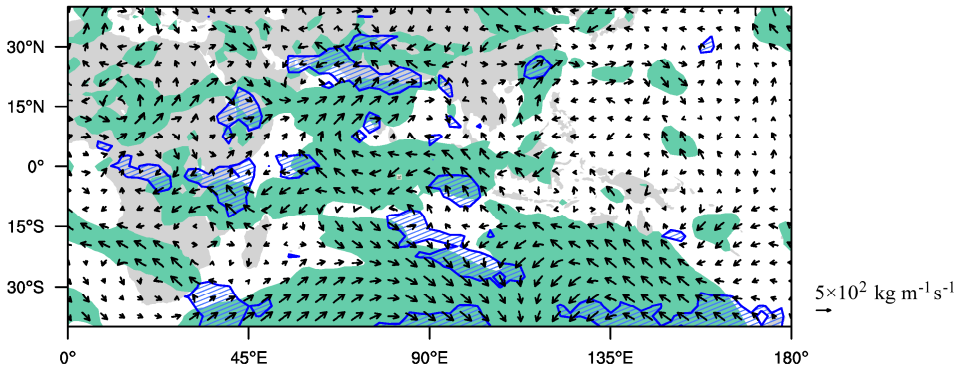

图 8 偶极模态极端正、负异常年合成的夏季整层积分水汽输送通量差值（矢量，单位：kg m^{-1} s^{-1}）。绿色阴影区代表水汽输送通量差值通过 95%信度检验的区域；蓝色曲线代表 OLR 差值通过 95%信度检验的区域

Fig. 8 Composite differences of the vertically integrated water vapor transport fluxes between extreme positive and negative anomaly years of dipole pattern. The green shading represents the water vapor flux differences significant at the 95% confidence level; the blue curve indicates the differences of the OLR significant at the 95% confidence level

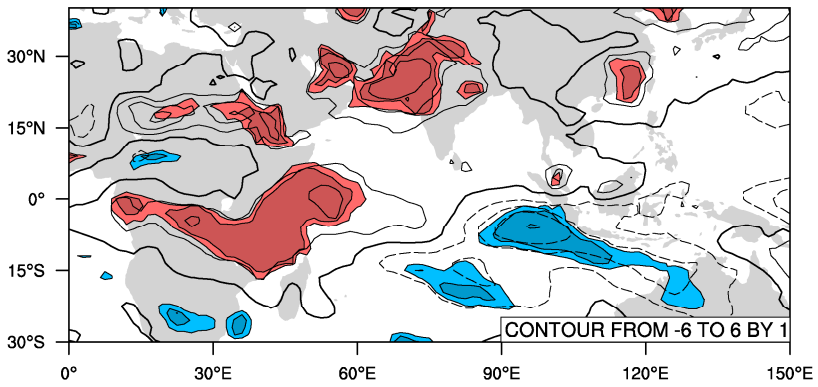

图 9 偶极模态极端正、负异常年合成的夏季整层积分水汽含量差值（单位：g）。粗实线：零线；实（虚）线：正（负）值；深/浅红色（蓝色）阴影表示正（负）差值通过 95%/90%信度检验的区域

Fig. 9 Composite differences of the total column water vapor content (units: g) between extreme positive and negative anomaly years of dipole pattern. Thick solid lines: zero lines; solid (dashed) lines: positive (negative) values. The dark/light red (blue) shading indicates that the positive/negative differences significant at the 95%/90% confidence level

季降水的关系，发现该偶极模态与亚非地区夏季降水存在密切联系，尤其是热带非洲东部、南亚以及我国华南地区，在其极端正（负）异常年，这三个地区夏季降水显著偏多（少）。环流分析结果显示，在南半球偶极模态影响亚非夏季降水的过程中，热带东印度洋地区越赤道气流的变化起着重要的桥梁作用。当该偶极模态偏强时，它可以引起热带印度洋地区越赤道气流的加强，进而使得向热带非洲东部、南亚和我国华南地区水汽输送的增加，使得上述三个地区夏季水汽含量偏多、对流偏强，从而最终导致这三个地区降水偏多。

以上研究均表明偶极模态对亚非夏季降水具有重要的影响。进一步的问题是，该模态变化的机理如何？现有气候模式对该模态是否具有模拟能力？这些问题是未来需要关注的，对于这些问题的回答将进一步加深对该偶极模态变化及其影响的认识。

参考文献（References）

Adler R F, Huffman G J, Chang A, et al. 2003. The version-2 global precipitation climatology project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979–present) [J]. J. Hydrometeor., 4 (6): 1147–1167.

陈隆勋. 1984. 东亚季风环流系统的结构及其中期变动 [J]. 海洋学报, 6 (6): 744–758. Chen Longxun. 1984. Structure of the East Asian monsoon system and its medium-range oscillation [J]. Acta Oceanologica Sinica (in Chinese), 6(6): 744–758.

陈于湘. 1980. 夏季西太平洋越赤道气流的谱分析 [J]. 大气科学, 4 (4): 363–368. Chen Yuxiang. 1980. The spectral analysis of the low-level cross-equator air flow over the western Pacific during the northern summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 4 (4): 363–368.

Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 137 (656): 553–597.

Fan K, Wang H J. 2004. Antarctic oscillation and the dust weather frequency in North China [J]. Geophys. Res. Lett., 31: L10201, doi:10.1029/2004GL019465.

Findlater J. 1969. A major low-level air current near the Indian Ocean during the northern summer [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 95 (404): 362–380.

高辉, 薛峰, 王会军. 2003. 南极涛动年际变化对江淮梅雨的影响及预报意义 [J]. 科学通报, 48 (S2): 87–92. Gao Hui, Xue Feng, Wang Huijun. 2003. Influence of interannual variability of Antarctic Oscillation on Meiyu along the Yangtze and Huaihe River valley and its importance to prediction [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 48 (S2): 87–92.

黄士松, 汤明敏. 1987. 论东亚夏季风体系的结构 [J]. 气象科学, (3): 1–14. Huang Shisong, Tang Mingmin. 1987. On the structure of the summer monsoon regime of East Asia [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), (3): 1–14.

李宪之. 1956. 台风生成的综合学说 [J]. 气象学报, 27 (2): 87–100. Li Xianzhi. 1956. Comprehensive theory of typhoon genesis [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 27 (2): 87–100.

Sun J Q, Wang H J, Yuan W. 2009. A possible mechanism for the co-variability of the boreal spring Antarctic Oscillation and the Yangtze River valley summer rainfall [J]. Int. J. Climatol., 29 (9): 1276–1284.

Sun J Q. 2010. Possible impact of the boreal spring Antarctic Oscillation on the North American summer monsoon [J]. Atmos. Oceanic Sci. Lett., 3 (4): 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]. J. Meteor. Soc. Japan, 88 (1): 15–28.

汤明敏, 黄士松, 周德佩. 1985. 全球越赤道气流的时空变化 [J]. 热带气象, (4): 287–296. Tang Mingmin, Huang Shisong, Zhou Depei. 1985. On the spatial and temporal variation of the cross-equatorial currents around the globe [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), (4): 287–296.

陶诗言, 徐淑英, 郭其蕴. 1962. 夏季东亚热带和副热带地区经向和纬向环流型的特征 [J]. 气象学报, 32 (2): 91−103. Tao Shiyan, Xu Shuying, Guo Qiyun. 1962. The characteristics of the zonal and meridional circulation over tropical and subtropical regions in eastern Asia in summer [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 32 (2): 91–103.

王会军, 薛峰. 2003. 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 [J]. 地球物理学报, 46 (1): 18–25. Wang Huijun, Xue Feng. 2003. Interannual variability of Somali jet and its influences on the inter-hemispheric water vapor transport and on the East Asian summer rainfall [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 46 (1): 18–25.

王会军, 范可. 2006. 西北太平洋台风生成频次与南极涛动的关系 [J]. 科学通报, 51 (24): 2901–2914. Wang Huijun, Fan Ke. 2007. Relationship between the Antarctic oscillation in the western North Pacific typhoon frequency [J]. Chinese Science Bulletin, 52 (4): 561–565.

Wang H J, Fan K. 2005. Central–North China precipitation as reconstructed from the Qing Dynasty: Signal of the Antarctic Atmospheric Oscillation [J]. Geophy. Res. Lett., 32: L24705, doi:10.1029/2005GL024562.

王兴东, 陶诗言. 1984. 西太平洋越赤道气流的初步研究 [J]. 海洋学报, 6 (2): 160–173. Wang Xingdong, Tao Shiyan. 1984. The preliminary study on the cross-equatorial flow over the western Pacific [J]. Acta Oceanologica Sinica (in Chinese), 6 (2): 160–173.

薛峰, 王会军, 何金海. 2003. 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 [J]. 科学通报, 48 (3): 287–291. Xue Feng, Wang Huijun, He Jinhai. 2003. Interannual variability of Mascarene high and Australian high and their influences on summer rainfall over East Asia [J]. Chinese Science Bulletin, 48 (5): 492–497.

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]. J. Meteor. Soc. Japan, 82 (4): 1173–1186.

薛峰, 何卷雄. 2005. 南半球环流变化对西太平洋副高东西振荡的影响 [J]. 科学通报, 50 (15): 1660–1662. Xue Feng, He Juanxiong. 2005. Influence of the southern hemispheric circulation on east–west oscillation

of the western subtropical high [J]. Chinese Science Bulletin, 50 (14): 1532–1536.

薛峰. 2005. 南半球环流变化对东亚夏季风的影响 [J]. 气候与环境研究, 10 (3): 401–408. Xue Feng. 2005. Influence of the southern circulation on East Asian summer monsoon [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (3): 401–408.

赵宗慈, 王绍武. 1979. 南北半球大气环流与气候的相互作用 [J]. 气象学报, 37 (2): 58–68. Zhao Zongci, Wang Shaowu. 1979. Interactions between the circulation and climate in Northern and Southern Hemispheres [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 37 (2): 58–68.