

澳大利亚东侧环流及海温异常与长江中下游夏季旱涝的关系

刘舸^{1, 2} 张庆云¹ 孙淑清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 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 利用 NCEP/NCAR 再分析资料、NOAA 的 SST 资料和 1951~2005 年中国 160 站月降水总量资料, 研究了南极涛动, 特别是澳大利亚东侧的环流及局地海温异常与长江中下游夏季旱涝的关系。研究发现, 澳大利亚东侧位势高度异常与长江中下游夏季降水存在显著正相关, 并由此定义了一个澳大利亚东侧位势高度指数 (GHIEA)。当 GHIEA 指数偏大 (小) 时, 也即澳大利亚东侧位势高度偏高 (偏低), 这种气压异常扰动可能通过 Rossby 波传播到北半球副热带地区, 形成南北半球高度场的遥相关, 使我国南海至菲律宾北部副热带地区位势高度增加 (减小), 也即副高较强 (弱) 且偏南西伸 (偏北偏东), 从而造成长江中下游地区降水偏多 (少)。夏季南极涛动与长江中下游夏季降水的显著相关的原因主要是澳大利亚东侧局地位势高度异常造成的。澳大利亚东侧位势高度偏高 (低), 南极涛动指数 (I_{AO}) 也随之偏大 (小), 澳大利亚东侧位势高度异常通过南北半球高度场遥相关影响到北半球副热带地区的大气环流, 进而使长江中游夏季降水偏多 (少)。另外, 从局地海温异常角度也能部分解释澳大利亚东侧位势高度异常与长江中下游夏季降水存在显著正相关的可能成因: 当澳大利亚东侧局地海域 SST 偏高 (低) 时, 对应 GHIEA 指数偏高 (低), 也即澳大利亚东侧位势高度偏高 (低)。同时, 当澳大利亚东侧局地海域 SST 偏高 (低) 时, 南海地区 SST 也易于偏高 (低), 使西太平洋副高较强并偏南西伸 (较弱并偏北偏东), 从而造成长江中下游降水偏多 (少)。

关键词 长江中下游 夏季旱涝 澳大利亚高压 南极涛动 SST

文章编号 1006-9895 (2008) 02-0231-11

中图分类号 P461

文献标识码 A

The Relationship between Circulation and SST Anomaly East of Australia and the Summer Rainfall in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River

LIU Ge^{1, 2}, ZHANG Qing-Yun¹, and SUN Shu-Qing¹

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

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract There are many factors influencing the summer rainfall in the middle and lower reaches of the Yangtze River. Except for the direct influence of the Northern Hemisphere atmospheric circulation systems, the indirect influence of many atmospheric circulation systems of the Southern Hemisphere also plays an important role in the summer rainfall in the middle and lower reaches of the Yangtze River, for example, the Antarctic Oscillation.

In this paper, based on the NCEP/NCAR reanalysis data, sea surface temperature (SST) from NOAA and the

收稿日期 2006-09-18, 2006-12-05 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2004CB418303, 国家自然科学基金资助项目 40523001, 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX3-SW-226

作者简介 刘舸, 男, 1976 年出生, 博士生, 主要从事天气、气候诊断和统计分析研究。E-mail: liuge@mail.iap.ac.cn

precipitation data from 160 stations in China, the relationship between the flood/ drought in the middle and lower reaches of the Yangtze River and the Antarctic Oscillation (in particular, the atmospheric circulation and SST east of Australia) is studied. The result indicates that, the geopotential height anomaly east of Australia is significantly positively correlated with the summer rainfall in the middle and lower reaches of the Yangtze River. According to this positive correlation, an index, the Geopotential Height Index East of Australia (GHIEA) is defined to characterize the influence on the rainfall in the middle and lower reaches of the Yangtze River. While the GHIEA, namely, the geopotential height east of Australia is stronger (weaker), the geopotential height from the South China Sea to the north of Philippines is stronger (weaker). The western Pacific Subtropical High is stronger (weaker) and extends southward and westward (northward and eastward). Therefore the rainfall in the middle and lower reaches of the Yangtze River is more (less) corresponding to the variation of the subtropical high. Below is the reason that the GHIEA in the Southern Hemisphere can lead the anomaly of the summer rainfall in the middle and lower reaches of the Yangtze River; the geopotential height anomaly disturbances may propagate from the area east of Australia to the subtropical area of the Northern Hemisphere by means of Rossby wave, so that the teleconnection between the Northern Hemisphere and the Southern Hemisphere occurs. The teleconnection associates the GHIEA with the summer rainfall in the middle and lower reaches of the Yangtze River.

Mainly for the geopotential height anomaly east of Australia, the Antarctic Oscillation in summer (June - August) is closely related to the summer rainfall in the middle and lower reaches of the Yangtze River. While the GHIEA is stronger (weaker), the Antarctic Oscillation Index (AAO) is stronger (weaker). The summer rainfall in the middle and lower reaches of the Yangtze River is more (less).

In addition, the local SST anomaly can partly explain the significantly positive correlation between the GHIEA and the summer rainfall in the middle and lower reaches of the Yangtze River. If the local SST east of Australia is greater (lower), the GHIEA, as well as the geopotential height east of Australia is stronger (weaker). While the SST anomaly east of Australia is positive (negative), the SST over the South China Sea is greater (lower). The positive (negative) SST anomaly over the South China Sea may result in the anomaly of the western Pacific subtropical high. It makes the subtropical high stronger (weaker) and western and southern (northern and eastern), so the summer rainfall in the middle and lower reaches of the Yangtze River is more (less).

Key words the middle and lower reaches of the Yangtze River, summer flood /drought, Australian high, Antarctic Oscillation (AAO), SST

1 引言

影响我国长江中下游地区夏季旱涝的因素很多,广大气象工作者对此做了大量的研究工作。张庆云等^[1]指出东亚夏季环流偏弱是长江流域发生暴雨洪涝灾害的气候特征。张顺利等^[2]概括出在太平洋副热带高压、南海季风涌、中高纬度冷空气和青藏高原中尺度对流系统的最佳组配(或锁定)的条件下,容易造成长江流域的大范围、长时间的降水。闵锦忠等^[3]研究发现,夏季热带西太平洋上空对流活动强(弱)时,长江中下游地区夏季降水显著偏少(多)。其中西太平洋副热带高压在夏季热带西太平洋对流和长江中下游地区降水之间起到了桥梁作用,通过副高的东西位置、面积、强度异常等影响东亚夏季异常,进而造成长江中下游地区降

水异常。谭晶等^[4]发现南亚高压东西位置异常对我国东部降水的影响显著,南亚高压偏东年,西太平洋副高增强西伸,长江流域降水偏多;而南亚高压偏西年,西太平洋副高减弱东撤,长江流域降水偏少。赵勇等^[5]分析了高原热力状况空间差异对我国江淮地区夏季降水的影响,指出与高原主体和高原西部相比,高原东部地表温度变化对7月江淮地区的降水有更好的指示性。高原东部和其北区域的大尺度热力差异比高原本身的热力异常对江淮地区夏季降水有更好的指示意义。除了大气环流系统的影响外,海温异常也是影响长江流域降水的一个重要的因素。孙淑清等^[6]研究发现,当自前冬开始的热带海温呈 La Niña 型异常分布,即赤道中东太平洋显著偏冷,而在西太平洋暖池则为偏暖区,南海及其东北海区的海温偏低时,从印度半岛经孟加拉湾

直至南海以及西太平洋暖池都为强对流活动区,在赤道中东太平洋和中国长江流域地区降水偏少,而当海温呈 El Niño 型分布时,则相反。黄荣辉等^[7]认为当热带西太平洋暖池增暖时,我国江淮流域夏季降水偏少;反之降水偏多。以上研究探讨了北半球以及赤道地区的大气环流和海温异常对江淮流域降水的影响。

实际上,南半球环流异常也能够影响东亚夏季风环流强弱进而影响长江中下游地区的旱涝。从整个纬向平均的大空间尺度来看,南半球中高纬地区大尺度环流第一模态表现为南极涛动(AAO)。南极涛动对东亚夏季风降水有重要影响。高辉等^[8]指出5月南极涛动加强,江淮梅雨量多,出梅晚,梅雨期长。范可^[9]研究发现春季正南极涛动以及南半球副热带高压在春夏季中持续加强有利于长江中下游夏季降水。而从区域性环流系统来看,澳大利亚高压(简称澳高)作为亚澳季风系统成员,对东亚夏季风环流的影响尤为重要。陶诗言等^[10]早在1962年即发现东亚低纬度经向环流盛行期间,澳大利亚也盛行经向环流。施能等^[11]指出,马斯克林高压和澳大利亚高压强度偏强时,我国东部(90°E以东)6~7月份同时降水偏多。薛峰等^[12]认为澳大利亚高压的影响仅限于华南地区,澳大利亚高压增强时,华南多雨。滕代高等^[13]研究表明,当澳高增强时,亚澳季风环流各系统成员强度偏强且位置偏南。

上述研究工作表明,南半球大气环流异常(如南极涛动和澳高异常等)对东亚夏季风环流有显著影响,并与我国东部夏季降水也有一定的关系,但不同作者的结论不尽相同。其中南极涛动和澳高对东亚夏季风环流特别是季风降水的具体影响如何?它们是通过什么途径影响到东亚地区环流异常的?南极涛动和澳高的相互关系又是怎样的?海温在南极涛动和澳高对东亚夏季风环流影响中起着什么样的作用?这些问题都有待进一步研究解决。因此,本文在前人工作的基础上,详细地分析了南极涛动和澳高与我国长江中下游地区夏季降水的关系及其可能机制,并研究了澳高异常在南极涛动中的贡献,最后探讨了海温、南极涛动、澳高与长江中下游降水之间的相互关系。

2 资料与长江中下游旱涝年的选取

本文选用资料包括:(1)1951~2005年中国

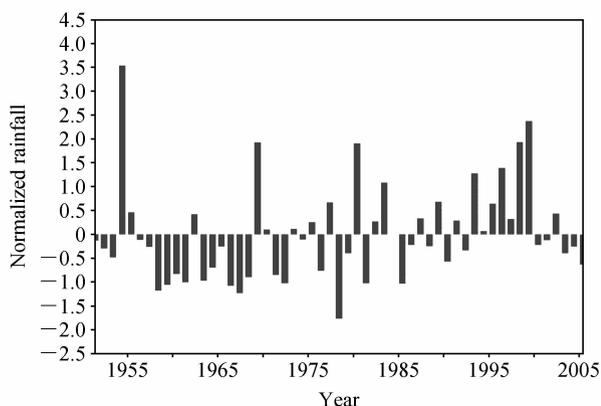


图1 1951~2005年长江中下游地区夏季(6~8月)标准化降水量

Fig. 1 The normalized rainfall in Jun - Aug (JJA) over the middle and lower reaches of the Yangtze River during 1951 - 2005

160站月降水总量资料。参考张庆云等^[14]对长江流域降水偏多、偏少年的定义方法,以“九五”重中之重项目所规定的长江中下游地区17站(南京、合肥、上海、杭州、安庆、屯溪、九江、汉口、钟祥、岳阳、宜昌、常德、宁波、衢县、贵溪、南昌、长沙)6~8月降水量的标准化值表征1951~2005年长江中下游地区夏季降水的逐年变化。并将标准化值大于1的年份定义为涝年,分别为1954、1969、1980、1983、1993、1996、1998、1999共8年,将标准化值小于-1的年份定义为旱年,分别为1958、1959、1961、1966、1967、1972、1978、1981、1985共9年(图1)。(2)1951~2005年的NCAR/NCEP的月平均再分析资料,包括位势高度场、风场等,水平分辨率皆为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 经纬网格。(3)NOAA气候诊断中心的SST扩展重建资料(NOAA Extended Reconstructed Sea Surface Temperature V2),水平网格距为 $2.0^{\circ} \times 2.0^{\circ}$ 。

3 澳大利亚高压异常与长江中下游夏季降水的关系

3.1 GHIEA的定义及其与长江中下游夏季降水的关系

澳高对东亚夏季风环流有重要影响。然而,究竟是澳高的强度变化抑或是澳高移动对长江中下游夏季降水产生影响?为找出影响长江中下游地区夏季降水的关键区,我们作了1951~2005年长江中下游地区夏季降水与同期各层位势高度场的相关,

分析发现从 1000 hPa 至 100 hPa, 澳大利亚东侧都存在显著正相关区, 而不是在澳大利亚的正上方, 即不是与澳高所在位置相合。其中在 500 hPa 高度上澳高东侧的正相关相对更为显著。这里我们仅给出长江中下游地区夏季降水与同期 500 hPa 位势高度场的相关(图 2)。它显示澳大利亚东侧(25°S~35°S, 150°E~170°E)范围内, 有一个正的高相关区, 相关系数可达 0.4 以上, 通过 1% 的显著性检验。因此, 我们选取澳大利亚东侧(25°S~35°S, 150°E~170°E)范围内 500 hPa 平均位势高度, 并将其标准化后的值定义为澳大利亚东侧位势高度指数(Geopotential Height Index East of Australia, 简称 GHIEA)。为了进一步了解与长江中下游降水密切相关的澳大利亚东侧相关区的空间结构, 我们作了 1951~2005 年长江中下游夏季降水与位势高度场的相关系数在 30°S 上的经度-高度剖面图(图 3)。由图 3 可见, 从 1000 hPa 到 100 hPa 高度上, 澳大利亚东侧的显著相关区(特别是相关系数在 0.4 以上的区域)基本呈现准正压结构, 因此, 仅用 500 hPa 高度上的 GHIEA 指数即可代表从 1000 hPa 到 100 hPa 整个垂直高度上准正压性位势高度的异常与长江中下游夏季降水的关系。夏季(6~8 月) GHIEA 指数与长江中下游夏季降水的相关系数为 0.45, 通过 1% 的显著性检验。而澳高

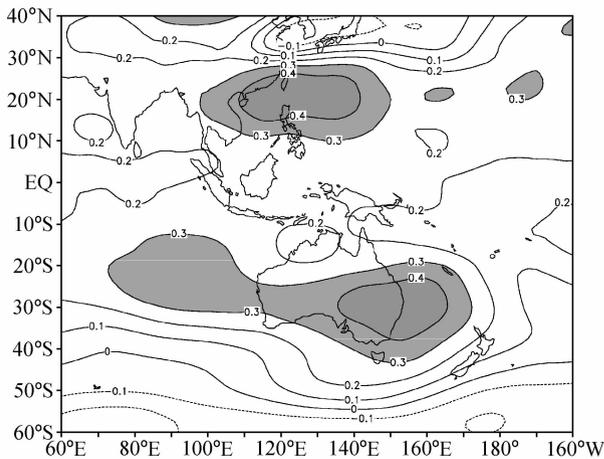


图 2 1951~2005 年长江中下游地区夏季(6~8 月)降水与 500 hPa 位势高度场的相关。阴影为通过 5% 显著性检验的区域

Fig. 2 The correlation between JJA rainfall over the middle and lower reaches of the Yangtze River and geopotential height at 500 hPa during 1951-2005. The shaded areas indicate the correlation is over 95% confidence level by *t*-test

强度指数^[12][(25°S~35°S, 120°E~150°E) 区域海平面气压平均值]与长江中下游夏季降水的相关系数为 0.32。这进一步说明, 并不是澳高强度与长江中下游夏季降水相关最为显著, 可能是澳高的东移(或东扩)对长江中下游降水的影响更为显著。因此, GHIEA 指数在一定程度上更能反映长江中下游地区的夏季旱涝, 该指数大, 长江中下游地区降水偏多, 反之, 当该指数小时, 长江中下游地区降水偏少。

长江流域旱、涝年的合成结果也能说明澳大利亚东侧是影响长江中下游地区降水的关键区。图 4 为长江中下游旱、涝年合成 500 hPa 位势高度距平场。在长江中下游涝年, 澳大利亚东侧为位势高度正距平区, 中心强度为 25 gpm。而在长江流域旱年, 该区域出现位势高度负距平, 负距平中心强度为 -10 gpm。也就是说当澳大利亚东侧位势高度偏高时, 长江中下游地区偏涝, 反之, 当澳大利亚东侧位势高度场偏低时, 长江中下游地区偏旱, 与 GHIEA 指数特征一致。

3.2 GHIEA 与长江中下游降水正相关的可能机制

反映南半球中纬度局地气压变化的 GHIEA 又是通过什么途径影响到北半球的长江中下游地区降水的? 很多研究^[9, 13]表明, 当澳高增强时, 澳高北部的越赤道气流增强, 影响东亚夏季风系统, 进而

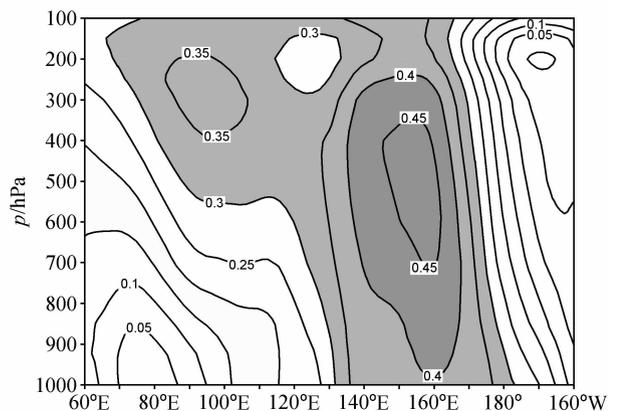


图 3 1951~2005 年长江中下游夏季降水与位势高度场的相关系数在 30°S 上的经度-高度剖面图。阴影为通过 5% 显著性检验的区域

Fig. 3 The longitude-height section of the correlation coefficient between JJA rainfall over the middle and lower reaches of the Yangtze River and the geopotential height along 30°S during 1951-2005. The shaded area indicates the correlation is over 95% confidence level by *t*-test

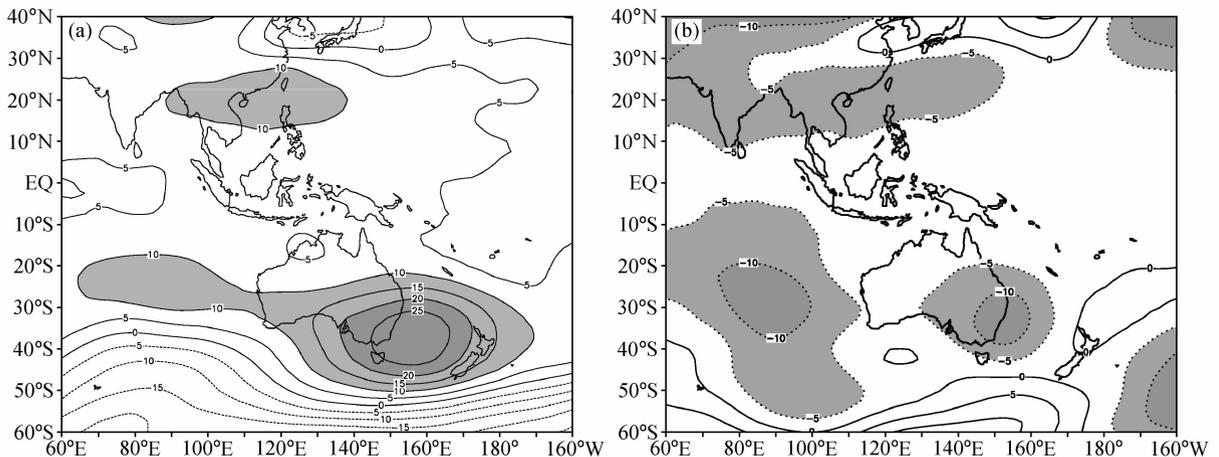


图 4 500 hPa 位势高度距平合成图：(a) 长江中下游涝年，阴影为位势高度距平在 10 gpm 以上的区域；(b) 长江中下游旱年，阴影为位势高度距平在 -5 gpm 以下的区域

Fig. 4 The composite patterns of geopotential height anomalies at 500 hPa: (a) In the flood years over the middle and lower reaches of the Yangtze River, the shaded areas show the anomalies greater than 10 gpm; (b) in the drought years, the shaded areas indicate the anomalies lower than -5 gpm

影响长江中下游地区的降水。然而，从相关和合成结果（图 2、4）来看，影响长江中下游地区降水的关键区域并不位于澳高位置上，而是在它的东侧。那么，反映澳大利亚正上方气压变化的澳高强度指数和澳大利亚东侧的 GHIEA 对越赤道气流的影响是否一样？为此，我们将澳高强度指数、GHIEA 分别与 1000 hPa 上的 v 风场作相关（图 5）。图 5a 显示，澳高强度指数与 1000 hPa 上的 v 风场在赤道附近有多处显著正相关区，其中 150°E 附近的正相关最为显著，相关系数可达 0.5 以上，并与澳高东侧的大范围正相关区相连，这说明澳高增强引起的东缘强东南气流穿越赤道引起 150°E 附近的越赤道气流加强。也即当澳高增强时，150°E 附近的越赤道气流也随之增强。这与范可^[9]、滕代高等^[13]的研究结果一致。而由图 5b 可见，GHIEA 与 1000 hPa 上的 v 风场的相关在 150°E 附近赤道以北地区未通过 5% 显著性检验。这说明 GHIEA 的强弱变化与越赤道气流之间可能并无直接联系。也就是说，尽管 GHIEA 指数与长江中下游夏季降水显著正相关，但它们之间可能并不是通过该地区越赤道气流的异常联系在一起。这在长江中下游地区旱、涝年夏季 1000 hPa 矢量风距平合成图（图略）上也有体现：长江中下游地区涝（旱）年夏季并未出现明显的越赤道气流增强（减弱）。

那么，又是什么原因使 GHIEA 与长江中下游夏季降水具有显著正相关？图 6 为 1951~2005 年

澳高东侧（25°S~35°S，150°E~170°E）平均位势高度的时间序列（即标准化之前的 GHIEA）与夏季同层位势高度场相关的空间分布。相关系数在 0.6 以上的区域最能体现南北半球高度场的遥相关特征，因此，我们用阴影标出了 0.6 以上的区域。图 6a 中可见，在 500 hPa 高度上，澳高东侧与北半球南海至菲律宾北部副热带地区的相关系数达 0.6 以上，这说明这两处存在显著遥相关。图 6b 显示，在 400 hPa 高度上，这两个区域也存在相关系数在 0.6 以上的显著遥相关。上述结果与 Hines 等^[15]的发现基本一致。而 1000 hPa 高度上的南半球澳高东侧与北半球南海至菲律宾北部副热带地区的遥相关远比 400 hPa、500 hPa 高度上的遥相关弱（图略）。也即是说，这种遥相关现象在低层较弱，而主要发生在对流层的中、上层。结合图 3 可发现，澳大利亚东侧的位势高度场与长江中下游地区降水的相关同样也存在低层相关相对偏弱，而在对流层中、上层相关更为显著的现象。这可进一步说明 GHIEA（即澳大利亚东侧位势高度场的异常）是对流层中、上层的遥相关作用使北半球的环流系统产生异常，从而影响长江中下游地区的降水的。

从图 4 也可发现，在长江中下游涝年，澳大利亚东侧为位势高度正距平时，我国东南至菲律宾北部副热带地区也为正距平，该处位势高度的正距平是西太平洋副热带高压较强，且偏南西伸的体现。因此，长江中下游地区多雨。而在长江流域旱年，

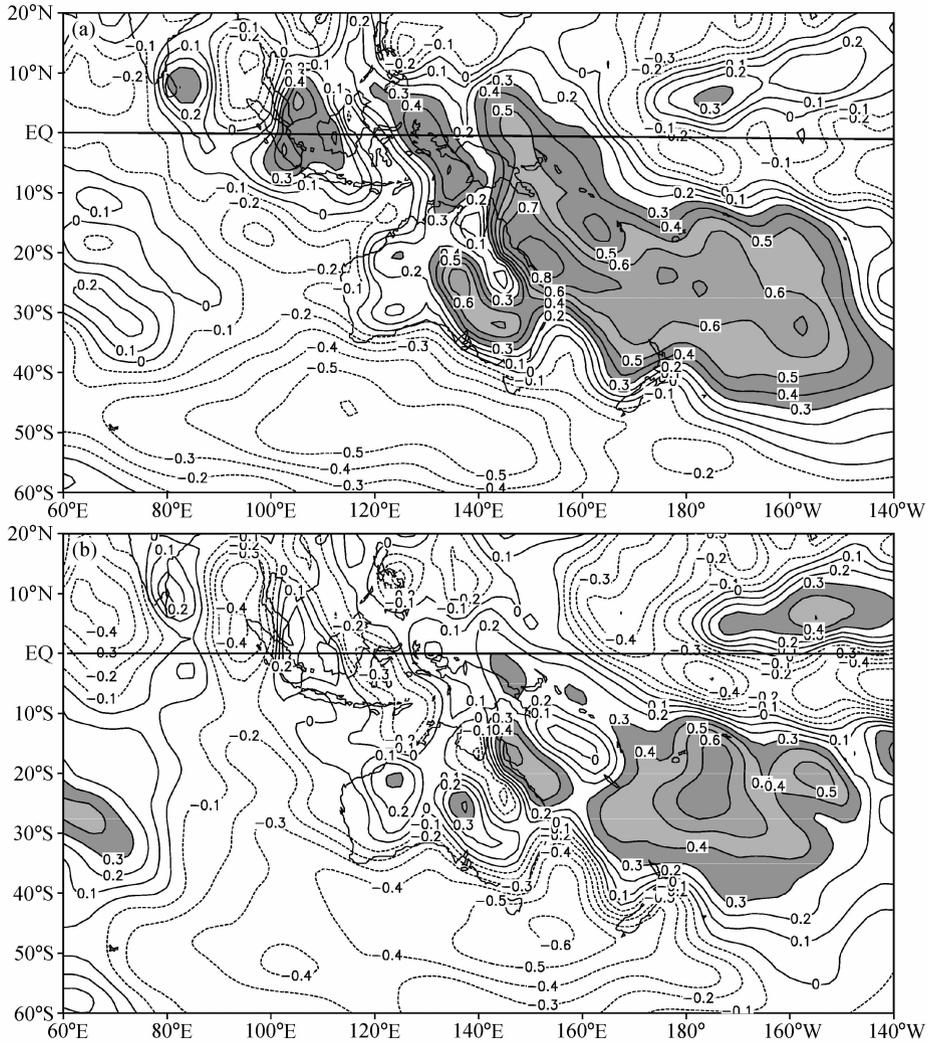


图5 各指数与1000 hPa v 风场的相关: (a) 澳高强度指数; (b) GHIEA。阴影为通过5%显著性检验的区域

Fig. 5 The correlations between v -wind at 1000 hPa and two indices: (a) Australian high index; (b) Geopotential Height Index East of Australia (GHIEA). The shaded areas indicate the correlation is over 95% confidence level by t -test

澳大利亚东侧出现位势高度负距平时,我国东南至菲律宾北部副热带地区的位势高度也为负距平。该处位势高度的负距平反映了西太平洋副高较弱,并偏北偏东,长江中下游地区少雨干旱。

南北半球高度场遥相关的一个可能解释是 Rossby 波从一个半球穿过赤道向另一个半球的传播。早在 1982 年 Webster 等^[16]就指出,在对流层上层赤道附近的纬圈上一般为东风,但在太平洋上空,常会出现赤道西风带,当其延伸过赤道时,扰动将通过赤道西风区进行传播。若赤道西风足够强的话,传播还可延伸到相邻的半球。他们给出了两半球相互作用的一个可能机制。而这种机制能否解释上述澳高东侧与北半球南海至菲律宾北部副热带

地区的遥相关? 我们选取 1998 年(长江中下多雨年)和 1958 年(长江中下游少雨年)作个例分析。研究发现,在 1998 年夏季,澳大利亚东侧为位势高度正异常区,在(10°S~10°N, 135°E~170°E)范围内 200 hPa 的平均 u 风场有 34 天表现为西风。6 月 1~27 日这一时期中仅 6 月 10~12 日三天为东风,其它时间皆存在热带地区高层西风通道,而且该时期与 1998 年第一段梅雨期基本吻合。这说明澳高东侧的正异常扰动可通过赤道西风区传播到北半球,形成南北半球高度场遥相关,使北半球南海至菲律宾北部副热带地区位势高度增高,也即副高偏强并偏南西伸,从而造成长江中下游地区降水偏多。而在 1958 年夏季,尽管澳大利亚东侧也为

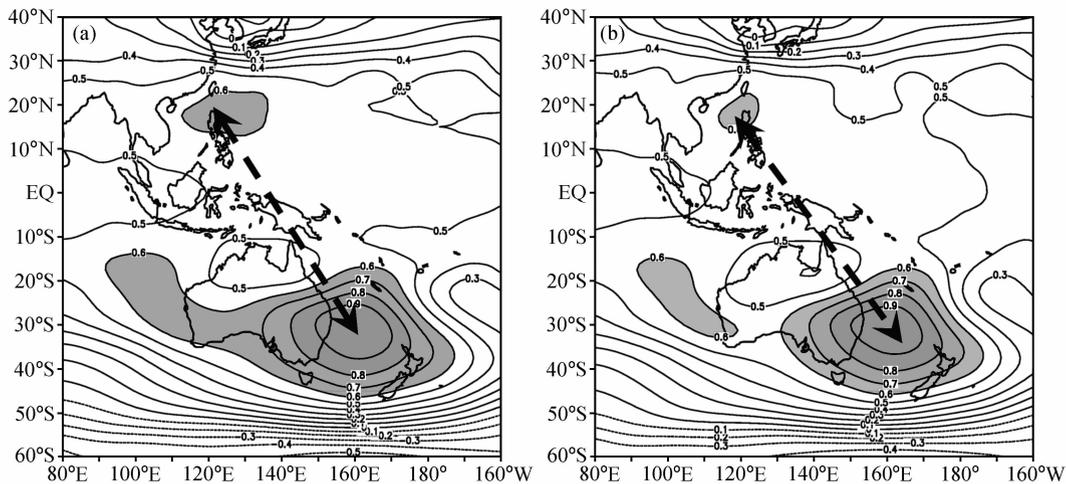


图 6 1951~2005 年澳大利亚东侧 (25°S~35°S, 150°E~170°E) 夏季平均位势高度的时间序列与同期位势高度场相关的空间分布: (a) 500 hPa; (b) 1000 hPa. 阴影为相关系数大于 0.6 的区域; 粗虚线连接南北半球遥相关区

Fig. 6 The correlations between the time series (1951-2005) of average geopotential height east of Australia and geopotential height during JJA at (a) 500 hPa and (b) 1000 hPa. The shaded areas indicate the correlation coefficient is greater than 0.6, the thick dashed line links the teleconnection areas between the Northern Hemisphere and the Southern Hemisphere

位势高度正异常区,但在 200 hPa 高度上,该区域北侧未出现历时较长的赤道西风区,夏季大部分时间都为赤道东风。根据 Webster 的理论,南半球位势高度正异常无法越过赤道东风区传播到北半球,因此,未能形成南北半球高度场的遥相关,北半球南海至菲律宾北部副热带地区位势高度偏低,也即副高偏弱并偏北偏东,从而造成长江中下游地区降水偏少。上述个例分析初步印证了 Webster 的理论,但具体动力过程和机理尚需进一步研究。范可^[9]也指出南北半球的中高纬环流作用在高层是非常显著,南半球高纬到东亚沿岸的经向 Rossby 波列,有可能是南半球高纬与西太平洋副高、鄂霍次克海高压及影响长江中下游夏季降水的途径。南半球澳大利亚东侧与北半球我国南海至菲律宾北部副热带地区的遥相关主要表现在对流层中、上层,在低层相对较弱。而我们知道 Rossby 波的传播也是在对流层中上层较为明显,因此有理由相信,这种遥相关现象和 Rossby 波的传播可能有一定的联系。

综上所述, GHIEA 与长江中下游夏季降水具有显著正相关的可能机制是: GHIEA 偏大(小),也即澳大利亚东侧位势高度较高(低),这种气压异常扰动可通过 Rossby 波传播到北半球副热带地区,形成南北半球遥相关,使北半球南海至菲律宾北部副热带地区位势高度增高(降低),也即副高

偏强(偏弱)并偏南西伸(偏北偏东),从而造成长江中下游地区降水偏多(少)。

3.3 南极涛动与澳大利亚东侧环流异常及长江中下游夏季降水的关系

南极涛动能反映整个南半球中、高纬度纬向平均大尺度的环流变化,它对东亚夏季风降水有一定影响。而南极涛动能否显著影响长江中下游地区的降水?

参考龚道溢等^[17]和高辉等^[8]的工作,将南极涛动指数(I_{AO})定义如下:

$$I_{AO} = \Delta H_{30} - \Delta H_{60}, \quad (1)$$

其中, ΔH_{30} 和 ΔH_{60} 分别为 30°S、60°S 纬圈平均 1000 hPa 位势高度对 1951~2005 年多年平均的距平。对 1951~2005 年夏季 I_{AO} 进行标准化处理,得到夏季南极涛动指数年际变化序列。研究发现,夏季南极涛动指数与同期长江中下游降水的相关系数为 0.28,通过 5% 显著性检验。也就是说,夏季南极涛动指数与同期长江中下游降水有较显著的相关。

实际上,真正两半球的相互作用发生在小于纬向平均的空间尺度内^[16]。因此,南极涛动与北半球长江中下游夏季降水的关系,更可能是上一节中所述的局地南北半球高度场遥相关的一种体现。为了分析澳高东侧位势高度异常在南极涛动中的贡献,我们将 I_{AO} 分解为仅含澳高东侧位势高度贡献

的南极涛动指数 I_{AO1} 和去除澳高东侧位势高度贡献的南极涛动指数 I_{AO2} ，这样可以清楚地看出澳高东侧位势高度变化在南极涛动中所起的重要作用。具体分解方法如下：

$$I_{AO1} = \Delta H_{30}^1 - \Delta H_{60}, \quad (2)$$

$$I_{AO2} = \Delta H_{30}^2 - \Delta H_{60}, \quad (3)$$

其中， ΔH_{30}^1 为 $150^\circ\text{E} \sim 170^\circ\text{E}$ 范围内 30°S 上平均 1000 hPa 位势高度对 1951~2005 年多年夏季平均的距平， I_{AO1} 表示仅含澳高东侧位势高度异常的南极涛动； ΔH_{30}^2 为 $150^\circ\text{E} \sim 170^\circ\text{E}$ 以外的 30°S 上平均 1000 hPa 位势高度对 1951~2005 年多年夏季平均的距平， I_{AO2} 则表示去除澳高东侧局地位势高度异常后的南极涛动。

图 7 为南极涛动指数 (I_{AO}) 和澳高东侧位势高度异常所体现的南极涛动 (I_{AO1}) 的时间序列，两者的相关系数高达 0.94，这说明澳高东侧局地位势高度异常在很大程度上反映了 30°S 纬圈环流的变化，它对南极涛动的贡献很大。

进一步工作发现，澳高东侧位势高度异常所体现的南极涛动 (I_{AO1}) 与长江中下游地区夏季降水的相关系数为 0.36，通过 5% 的显著性检验，且比南极涛动 (I_{AO}) 与长江中下游夏季降水的相关系数 (0.28) 大。而去除澳高东侧位势高度异常后的南极涛动 (I_{AO2}) 与长江中下游地区夏季降水的相关系数仅有 0.07，远未通过显著性检验。由此可推断，南极涛动与长江中下游夏季降水相关密切的原因主要在于澳高东侧局地位势高度异常。

综上所述，尽管南极涛动反映的是南半球中、

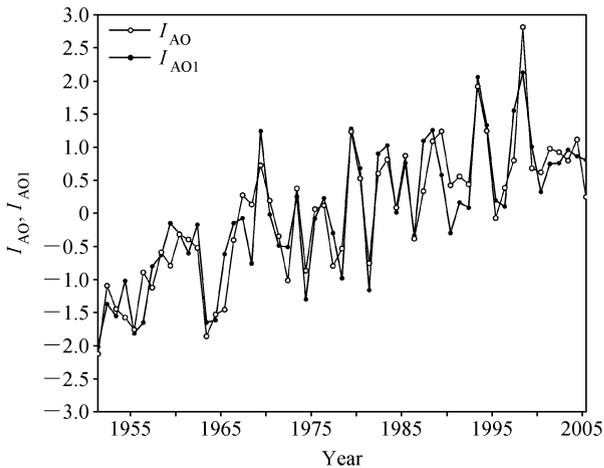


图 7 1951~2005 年 I_{AO} 和 I_{AO1} 的时间序列

Fig. 7 Time series of I_{AO1} and I_{AO}

高纬度纬向平均大尺度的环流变化，而实际上，与长江中下游夏季降水密切相关的主要南半球系统还是澳高东侧局地位势高度的异常。澳高位置东移或东扩 (西缩)，南极涛动指数 (I_{AO}) 也随之偏大 (小)，澳大利亚东侧位势高度异常通过南北半球高度场遥相关影响到北半球副热带地区的大气环流，进而使长江中游夏季降水偏多 (少)。

4 澳高异常东扩与澳大利亚东部局地海温异常

海洋作为外源强迫会对大气环流产生影响，那么对澳高的强度及位置有重要影响的关键海温异常区的空间分布如何？图 8 为 1951~2005 年 GHIEA 指数与 SST 的相关分布。澳大利亚东侧的 SST 与 GHIEA 的关系最为密切，相关系数为 0.7 以上。这表示澳大利亚东侧 SST 升高 (降低) 有利于该地区澳高东移或东扩 (西缩)。因此，我们选取澳大利亚东侧 ($25^\circ\text{S} \sim 35^\circ\text{S}$, $160^\circ\text{E} \sim 170^\circ\text{E}$) 范围内的平均 SST 与 500 hPa 位势高度场作相关 (见图 9)。图 9 显示在澳大利亚东侧和南海至菲律宾以东的副热带地区为显著正相关区，相关系数可达 0.4 以上，通过 1% 的显著性检验。而且它们与图 6a 中的

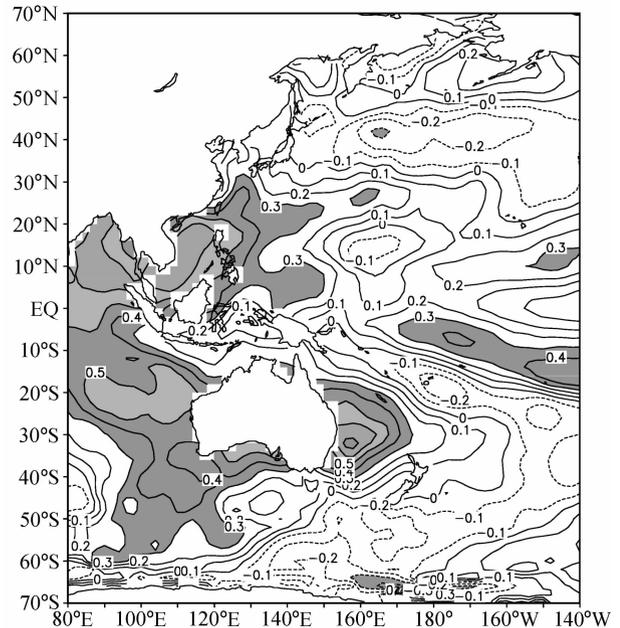


图 8 GHIEA 与 SST 的相关。阴影为通过 5% 显著性检验的区域

Fig. 8 The correlation between GHIEA and SST during JJA. The shaded areas indicate the correlation is over 95% confidence level by t -test

两处遥相关位置非常一致, 形成从澳大利亚东侧至北半球副热带地区的经向波列。这表示澳大利亚东侧的局地海温异常很可能是引起南北半球遥相关的

原因之一。

而澳大利亚东侧的局地 SST 又是怎样影响到北半球大气环流异常, 从而激发出南北半球的遥相关波列的? 图 10 为澳大利亚东侧 (25°S~35°S, 160°E~170°E) 范围内平均 SST 与 SST 的相关分布, 由图可见, 澳大利亚东侧的 SST 与印度尼西亚海域至南海地区 SST 相关显著, 相关系数可达 0.5 以上, 通过 1% 显著性检验。这说明澳大利亚东侧海域与南海、印度尼西亚海域的海温有很高的一致性。在长江中下游旱、涝年 SST 距平合成图 (图略) 上也能看出: 在长江中下游涝年, 澳大利亚东侧局地海域为 SST 的正距平区, 其值为 0.2°C 以上。同时, 南海地区也是高于 0.2°C 的 SST 正距平区。相反地, 在长江中下游早年, 这两处为 SST 的负距平区 (低于 -0.2°C)。即当澳大利亚东侧和南海的海温一致偏高时, 长江中下游降水偏多; 反之, 当澳大利亚东侧和南海的海温一致偏低时, 长江中下游降水偏少。

这样, 我们可从海温异常角度得到 GHIEA 与长江中下游降水的另一种可能联系机制。当澳大利亚东侧局地海域 SST 偏高 (低) 时, 对应 GHIEA 偏高 (低), 也即澳高东移或东扩 (西缩)。同时, 当澳大利亚东侧局地海域 SST 偏高 (低) 时, 南海地区 SST 也易于偏高 (低)。罗绍华等^[18]指出, 当

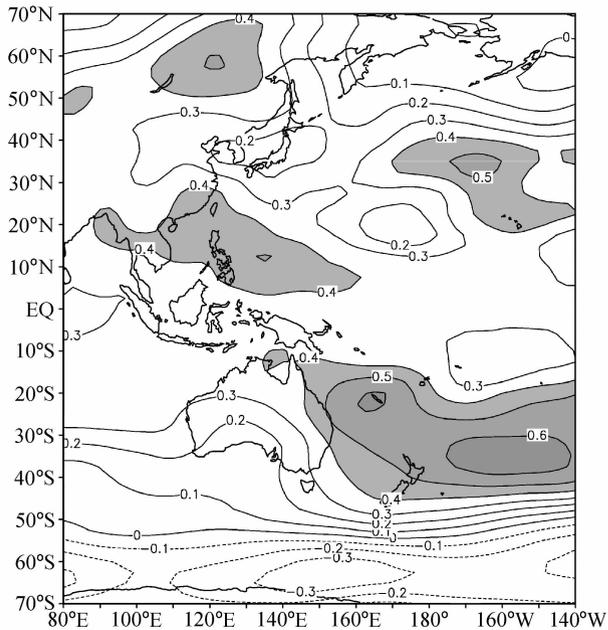


图 9 澳大利亚东侧 (25°S~35°S, 160°E~170°E) 范围内的平均 SST 与 500 hPa 位势高度场的相关。阴影为相关系数大于 0.4 的区域

Fig. 9 The correlation between SST averaged over (25°S - 35°S, 160°E - 170°E) and geopotential height at 500 hPa during JJA. The shaded areas indicate the correlation coefficient is greater than 0.4

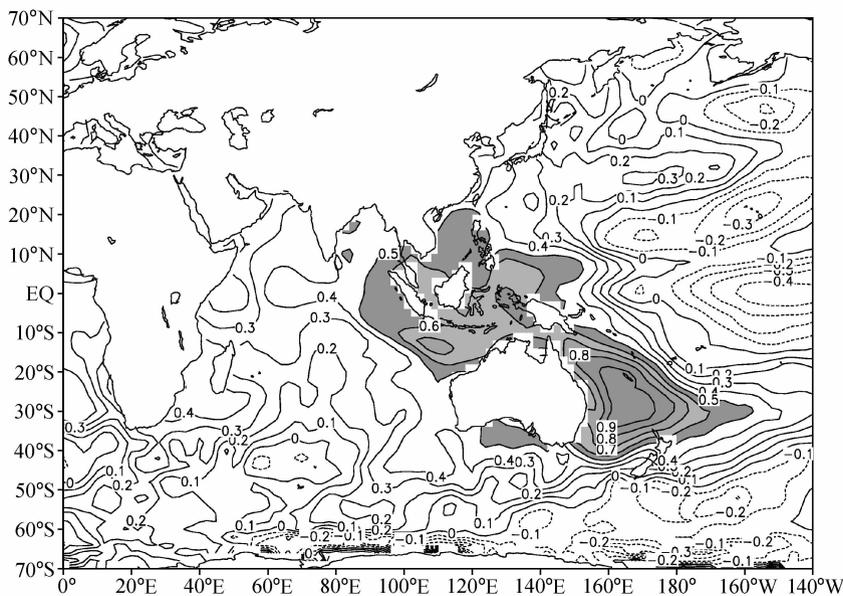


图 10 澳大利亚东侧 (25°S~35°S, 160°E~170°E) 范围内平均 SST 与 SST 的相关分布。阴影为相关系数大于 0.5 的区域

Fig. 10 The correlation between SST averaged over (25°S - 35°S, 160°E - 170°E) and SST during JJA. The shaded areas indicate the correlation coefficient is greater than 0.5

南海地区 SST 偏高(低)时,西太平洋副高较强并偏南西伸(较弱并偏北偏东),从而造成长江中下游降水偏多(少)。即澳大利亚东侧海温与南海海温的一致性也能产生南北半球的遥相关现象,从而使得 GHIEA 与长江中下游降水显著正相关。

5 小结与讨论

本文研究了南半球的南极涛动,特别是澳大利亚东侧的环流及局地海温异常与长江中下游夏季旱涝的关系。另外,分析了澳大利亚东侧位势高度异常在南极涛动中的贡献。得到主要结论如下:

(1) 研究指出澳大利亚东侧位势高度异常与长江中下游夏季降水密切相关,并由此定义了一个澳大利亚东侧位势高度指数(GHIEA)。该指数在一定程度上更能反映长江中下游地区的夏季旱涝。当该地区位势高度升高时(也即澳高加强、东扩),长江中下游地区降水偏多,反之,当该地区位势高度降低时,长江中下游地区降水偏少。

(2) GHIEA 与长江中下游夏季降水存在显著正相关,但它们之间可能并不是通过越赤道气流的异常联系,而是通过南北半球高度场的遥相关联系在一起的。当 GHIEA 指数偏大(小)时,澳大利亚东侧位势高度偏高(偏低),即澳高东移或东扩(西缩)。这种气压异常扰动通过 Rossby 波传播到北半球副热带地区,形成南北半球高度场的遥相关,使我国南海至菲律宾北部副热带地区位势高度增加(减小),也即副高较强(弱)且偏南西伸(偏北偏东),从而造成长江中下游地区降水偏多(少)。

(3) 夏季南极涛动与长江中下游夏季降水的显著相关的原因主要是澳大利亚东侧局地位势高度异常造成的。澳大利亚东侧位势高度偏高(低),南极涛动指数也随之偏大(小),澳大利亚东侧位势高度异常通过南北半球高度场遥相关影响到北半球副热带地区的大气环流,进而使长江中游夏季降水偏多(少)。

(4) 澳大利亚东侧局地海域海温异常是长江中下游降水异常的一个重要外因,它所引起的高度场的变化呈波列向北半球传播引起副热带高压异常。当澳大利亚东侧局地海域 SST 偏高(低)时,对应 GHIEA 指数偏高(低),澳大利亚东侧位势高度偏高(低),即澳高东移或东扩(西缩)。同时,当澳大利亚东侧局地海域 SST 偏高(低)时,南海地区

SST 也易于偏高(低),使西太平洋副高较强并偏南西伸(较弱并偏北偏东),从而造成长江中下游降水偏多(少)。

(5) 南北半球位势高度场的上述遥相关现象的动力过程和机理值得进一步深入研究。澳大利亚东侧局地海温异常等外源强迫又是通过怎样的物理机制对澳高加强东扩,激发波列向北传播从而对长江中下游降水造成影响的? 这些问题也有待深入研究。

参考文献 (References)

- [1] 张庆云, 陶诗言, 陈烈庭. 东亚夏季风指数的年际变化与东亚大气环流. 气象学报, 2003, **61** (5): 559~567
Zhang Qingyun, Tao Shiyang, Chen Lieting. The interannual variability of East Asian summer monsoon indices and its association with the pattern of general circulation over East Asia. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2003, **61** (5): 559~567
- [2] 张顺利, 陶诗言, 张庆云, 等. 长江中下游致洪暴雨的多尺度条件. 科学通报, 2002, **47** (6): 467~473
Zhang Shunli, Tao Shiyang, Zhang Qingyun, et al. Large and meso- α scale characteristics of intense rainfall in the middle and lower reaches of Yangtze River. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2002, **47** (6): 467~473
- [3] 闵绍忠, 李春, 吴芄. 夏季热带西太平洋对流与长江中下游降水关系的研究. 大气科学, 2005, **29** (6): 947~954
Min Jinzhong, Li Chun, Wu Peng. A study of the relationship between summer tropical convection over the western Pacific and the rainfall in the middle-lower reaches of the Yangtze River. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (6): 947~954
- [4] 谭晶, 杨辉, 孙淑清, 等. 夏季南亚高压东西振荡特征研究. 南京气象学院学报, 2005, **28**(4): 452~460
Tan Jing, Yang Hui, Sun Shuqing, et al. Characteristics of the longitudinal oscillation of south Asia high during summer. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2005, **28** (4): 452~460
- [5] 赵勇, 钱永甫. 青藏高原地表热力差异与我国江淮地区夏季降水的关系. 大气科学, 2007, **31** (1): 145~154
Zhao Yong, Qian Yongfu. Relationships between the surface thermal anomalies in the Tibetan Plateau and the rainfall in the Jianghuai area in summer. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, **31** (1): 145~154
- [6] 孙淑清, 马淑杰. 海温异常对东亚夏季风及长江流域降水影响的分析及数值试验. 大气科学, 2003, **27** (1): 36~52
Sun Shuqing, Ma Shujie. Analysis and numerical experiment on the relationship between the 1998 summer monsoon activities and SSTA in tropical regions. *Chinese Journal of Atmos-*

- pheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27** (1): 36~52
- [7] 黄荣辉, 孙凤英. 热带西太平洋暖池的热状态及其上空的对流活动对东亚夏季气候异常的影响. *大气科学*, 1994, **18** (2): 141~151
- Huang Ronghui, Sun Fengying. Impacts of the thermal state and the convective activities in the Tropical western warm pool on the summer climate anomalies in East Asia. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1994, **18** (2): 141~151
- [8] 高辉, 薛峰, 王会军. 南极涛动的年际变化对江淮梅雨的影响和预报意义. *科学通报*, 2003, **48** (增刊 2): 87~92
- Gao Hui, Xue Feng, Wang Huijun. Influence of interannual variability of Antarctic oscillation on mei-yu along the Yangtze and Huaihe River valley and its importance to prediction. *Chinese Science Bulletin*, 2004, **48** (Supplement 2): 61~67
- [9] 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*, 2006, **49** (3): 672~679
- Fan Ke. Atmospheric circulation anomalies in the Southern Hemisphere and summer rainfall over Yangtze River valley. *Acta Geophysica Sinica* (in Chinese), 2006, **49** (3): 672~679
- [10] 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** (2): 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 Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1962, **32** (2): 91~103
- [11] 施能, 朱乾根. 南半球澳大利亚、马斯克林高压气候特征及其对我国东部夏季降水的影响. *气象科学*, 1995, **15** (2): 20~27
- Shi Neng, Zhu Qian'gen. The climatic features of the Australian high and the Mascarene high in southern hemisphere and their influence on summer precipitation in eastern China. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1995, **15** (2): 20~27
- [12] 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 Feng, Wang Huijun, He Jinhai. Interannual variability of Mascarene high and Australian high and their influences on summer rainfall over East Asia. *Chinese Science Bulletin*, 2003, **48** (5): 492~497
- [13] 滕代高, 刘宣飞, 张增信, 等. 澳大利亚高压的年际变化及其对应的亚澳季风. *南京气象学院学报*, 2005, **28** (1): 86~92
- Teng Daigao, Liu Xuanfei, Zhang Zengxin, et al. Interannual variation of Australian high and its effect on Asia-Australia monsoon circulation system in summer. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2005, **28** (1): 86~92
- [14] 张庆云, 陶诗言. 亚洲中高纬环流对东亚夏季降水的影响. *气象学报*, 1998, **56** (2): 199~211
- Zhang Qingyun, Tao Shiyun. Influence of Asian mid-high latitude circulation on East Asian summer rainfall. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1998, **56** (2): 199~211
- [15] Hines K M, Bromwich D H. A pole to pole west Pacific atmospheric teleconnection during August. *Journal of Geophysical Research*, 2002, **107** (D18), 4359, doi:10.1029/2001JD001335
- [16] Webster P J, Holton J R. Cross-equatorial response to middle-latitude forcing in a zonally varying basic state. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1982, **39** (4): 722~733
- [17] 龚道溢, 王绍武. 南极涛动. *科学通报*, 1998, **43** (3): 296~301
- Gong Daoyi, Wang Shaowu. Antarctic oscillation: Concept and applications. *Chinese Science Bulletin*, 1998, **43** (9): 734~7370
- [18] 罗绍华, 金祖辉. 南海海温变化与初夏西太平洋副高活动及长江中、下游汛期降水关系的分析. *大气科学*, 1986, **10** (4): 409~418
- Luo Shaohua, Jin Zuhui. Statistical analyses for sea surface temperature over the South China Sea, behavior of subtropical high over the west Pacific and monthly mean rainfall over the Changjiang middle and lower reaches. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 1986, **10** (4): 409~418