

曾刚, 孙照渤, 林朝晖, 等. 2010. 不同海域海表温度异常对西北太平洋副热带高压年代际变化影响的数值模拟研究 [J]. 大气科学, 34 (2): 307–322. Zeng Gang, Sun Zhaobo, Lin Zhaohui, et al. 2010. Numerical simulation of impacts of sea surface temperature anomaly upon the inter-decadal variation in the northwestern Pacific subtropical high [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (2): 307–322.

不同海域海表温度异常对西北太平洋副热带高压年代际变化影响的数值模拟研究

曾刚^{1, 3} 孙照渤¹ 林朝晖² 倪东鸿¹

1 南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044

2 中国科学院大气物理研究所国际气候和环境科学中心, 北京 100029

3 中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广州 510080

摘 要 采用 1950~2000 年逐月观测的不同海域(全球、热带外、热带、热带印度洋—太平洋、热带印度洋及热带太平洋)海表温度分别驱动 NCAR CAM3 全球大气环流模式, 进行了多组长时间积分试验, 对比观测资料, 讨论了这些海域海表温度异常(SSTA)对西北太平洋副热带高压年代际变化的影响。结果表明: 全球、热带、热带印度洋—太平洋和热带印度洋海表温度变化均对夏季西北太平洋副热带高压的年代际变化有重要作用, 即在这些海域的海表温度变化影响下, 西北太平洋副热带高压均在 1970 年代中后期发生了年代际变化, 其后副高面积增大、强度增强、位置偏西、偏南, 这与观测结果较一致; 热带太平洋海表温度变化对夏季西北太平洋副热带高压的年代际变化也有重要作用, 在其作用下, 夏季西北太平洋副热带高压的强度、面积在 1960 年代后期发生年代际变化, 南界在 1970 年代中后期发生年代际变化, 这些时段以后副高强度增强、面积增大、偏南; 热带印度洋海表温度驱动模拟的西北太平洋副热带高压变化比热带太平洋海表温度驱动模拟的副高更接近于观测结果, 且年代际变化更显著, 其差异的可能原因在于两区海表温度在 1970 年代中后期以后的年代际变化能在孟加拉湾—中国东南沿海区域强迫产生的异常环流不同, 前者强迫产生出反气旋性环流异常, 有利于副高的增强、面积增大和西伸, 而后者强迫产生出气旋性环流异常, 不利于副高的西伸; 热带太平洋和热带印度洋海表温度在 1970 年代中后期的冷、暖年代际背景变化对夏季西北太平洋副热带高压年代际变化有重要作用; 热带外海表温度变化对西北太平洋副热带高压年代际变化作用较小。

关键词 西北太平洋副热带高压 年代际变化 海表温度异常 数值模拟

文章编号 1006-9895(2010)02-0307-16

中图分类号 P461

文献标识码 A

Numerical Simulation of Impacts of Sea Surface Temperature Anomaly upon the Interdecadal Variation in the Northwestern Pacific Subtropical High

ZENG Gang^{1, 3}, SUN Zhaobo¹, LIN Zhaohui², and NI Donghong¹

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 International Center for Climate and Environment Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

收稿日期 2009-02-09, 2009-09-18 收修定稿

资助项目 江苏省高校自然科学基金基础研究面上项目 07KJB170067, 广州热带海洋气象研究所热带基金项目, 中国科学院知识创新工程领域前沿项目 IAP09312, 国家自然科学基金资助项目 40775059、40701021

作者简介 曾刚, 男, 1973 年出生, 博士, 副研究员, 主要从事东亚季风和海气相互作用研究。E-mail: zenggangted@hotmail.com

Abstract Impacts of regional sea surface temperature anomaly (SSTA) on the interdecadal variation of the North-western Pacific Subtropical High (NWPSH) are studied by numerical simulation with the NCAR CAM3 global atmospheric circulation model driven by 1950–2000 monthly SST in different sea areas (global, extratropical, tropical, tropical Indian Ocean–Pacific, tropical Indian Ocean, and tropical Pacific), in comparison with observational data. Results suggest that the change in the global, tropical, tropical Indian Ocean–Pacific, and tropical Indian Ocean SST has great effect on the interdecadal variation of the subtropical high. The SST in these sea areas varies, the interdecadal variation of the subtropical high occurs in the middle–late 1970s, followed by its area enlarging, its intensity enhancing, and its position more westward or southward than normal, which is in better concord with observations; the variation of the tropical Pacific SST also influences the interdecadal change of NWPSH in summer, and as a result, the high’s area and strength change in the late 1960s on an interdecadal basis and its southern border undergoes interdecadal variation in the middle–late 1970s, afterward, the high’s intensity enhances, its area enlarges and its location is south of mean, which is opposite to the weaker impact offered by the extratropical SST. The variation of NWPSH driven by the SST in the tropical Indian Ocean is more consistent with the observations and more significant on the interdecadal scale than that driven by the SST in the tropical Pacific Ocean, and a possible reason is due to the contrast of anomalous circulation over the Bay of Bengal–Southeast China between them, with the former exerting anomalous anticyclone in favor of the intensity enhancing and enlarging and westward extension of the area, and the latter exerting anomalous cyclone unfavorable to the westward extension of the area. As a background, the interdecadal variations of the tropical Pacific and Indian SSTs occurring in the late 1970s have important effects upon the equivalent scale change in the NWPSH.

Key words the northwestern Pacific subtropical high, interdecadal variation, sea surface temperature anomaly, numerical simulation

1 引言

西北太平洋副热带高压是北半球中、低纬度重要的环流系统之一,是东亚夏季风环流系统的重要成员(Tao and Chen, 1987),其活动和变异直接影响着全球大气环流系统变化和气候异常,是控制我国东部地区夏季雨带移动和降水多寡的重要因素之一,常被作为我国夏季气候预测的重要因子(Zhou and Yu, 2005; 黄先香等, 2006)。早在 20 世纪 60 年代初,我国气象学家(陶诗言等, 1962; 黄土松等, 1962)就已经开始对西北太平洋副热带高压的活动规律进行了研究。最近,刘屹岷和吴国雄(2000)、吴国雄等(2002, 2008)对西北太平洋副热带高压的研究进行了系统总结。

影响西北太平洋副热带高压变化的因素很多,既有内部的动力过程也有外强迫的作用(方之芳等, 1986; 陈明萱, 1986; 吴国雄等, 2002, 2008; 祁莉等, 2008; Zhou et al., 2009)。海表温度是影响西北太平洋副热带高压异常变化的重要外强迫因子之一,两者的相互关系是人们一直非常关注的问

题之一。Angell (1981) 指出,赤道太平洋海温偏高时,西北太平洋副热带高压加强而且中心轴线南移,而且海温的影响以滞后 1~2 个季节最显著。Zhang et al. (1996, 1999) 分析了 ENSO 成熟期对东亚大气环流和我国降水的影响,认为夏季 ENSO 成熟期时,西太平洋副高偏西,导致长江中下游地区降水偏多,而华北和华南降水偏少。彭加毅和孙照渤(2000)研究指出,春季赤道东太平洋海温异常与夏季西北太平洋副热带高压的南北位置、强度以及西伸的年际变化有密切的关系。一些观测和数值模拟研究(Sui et al., 2007; Wu and Zhou, 2008)指出,西北太平洋副热带高压在 1980 年代准 3~5 年周期振荡突出,而 1990 年代则准 2~3 年周期振荡突出,且分别与热带西太平洋和赤道中东太平洋海表温度异常有关。Sun 和 Ying (1999) 比较了强、弱西北太平洋副热带高压年外逸长波辐射、垂直环流和海温异常的差异,发现与副高异常有关的垂直环流是由热带东太平洋海温异常导致的季风环流变化引起的。陈烈庭(1982)提出了一个关于西北太平洋副热带高压与赤道太平洋海温相互作用的

可能过程。印度洋海温对西北太平洋副热带高压的影响, 也有许多学者作过相关研究(蒋国荣等, 1991; 吴国雄和刘还珠, 1995; 吴国雄等, 2000; 袁媛和李崇银, 2009)。吴国雄和刘还珠(1995)利用 Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) 数值模式进行海温异常对大气环流及降水影响试验, 发现赤道印度洋中部的海温异常能导致中国华南及江南的降水异常, 以及西北太平洋副热带高压增强且偏南。其后, 吴国雄等(2000)利用热力适应理论讨论了印度洋海温异常影响西太平洋副热带高压异常的物理机制, 指出两级热力适应是印度洋海温异常影响西北太平洋副热带高压并进而影响中国天气气候的物理机制。以上研究表明, 热带海温异常对副高能产生不同程度的影响。关于中高纬度海温变化对副高影响的研究也逐渐为人们所重视(蒋国荣等, 1991; 李丽平等, 2003), 如蒋国荣等(1991)研究表明, 北太平洋海温与副高的南北位置变动有较好相关。

在年代际尺度上, 许多观测研究(彭加毅等, 1999; Chang et al., 2000; 龚道溢和何学兆, 2002; 谭桂容和孙照渤, 2004)表明, 西北太平洋副热带高压的强度、位置在 1970 年代中后期经历了一次年代际突变过程, 表现为突变后的副高强度加强、位置偏南、偏西。Chang et al. (2000)指出, 对于西北太平洋副热带高压年代际变化, 异常的下边界强迫可能是一个最重要的原因。龚道溢和何学兆(2002)的研究表明, 西太平洋副高 1970 年代中后期发生的年代际尺度变化的机制中, 热带太平洋和印度洋海表温度的年代际变化可能都起到了非常重要的作用。最近, Zhou et al. (2009)提出了热带印度洋—西太平洋海表温度增暖引起西北太平洋副热带高压西伸年代际变化的可能机制: 热带印度洋—西太平洋海表温度的增暖引起其上空对流增强, Walker 环流增强, 热带中、东太平洋上空对流减弱, 强迫出的 ENSO/Gill 型响应在西北太平洋产生反气旋异常, 有利于西北太平洋副热带高压西伸, 这是影响西北太平洋副热带高压西伸的主要强迫作用; 其次, 热带印度洋—西太平洋海表温度的增暖引起其上空对流增强, 阿拉伯海、印度半岛、孟加拉湾、海洋性大陆及南海等季风盛行区降水增多, 季风区的非绝热加热增加, 激发出 Kelvin 响应, 从而有利于西北太平洋副热带高压西伸, 这种

季风区降水的非绝热加热机制是影响西北太平洋副热带高压西伸的次强迫作用。

虽然, 关于西北太平洋副热带高压变化规律及其对东亚夏季风和气候影响的研究已经取得了不少成果, 但是过去的工作大多针对副高季节、年际变化规律研究, 对其年代际变化的研究尚少, 而且, 以往研究大多是基于观测诊断分析, 而利用长时间积分数值模式对副高年代际变化的研究还很少。海温作为影响西北太平洋副热带高压的重要外强迫因子之一, 对西北太平洋副热带高压年代际变化的影响如何? 不同区域的海表温度异常对西北太平洋副热带高压的影响有何差异? 这些科学问题需要加以深入研究。本文采用不同区域观测海表温度分别驱动 NCAR CAM3 全球大气环流模式进行多组长时间积分试验, 以此来分析海表温度变化对东亚季风环流系统的重要成员——西北太平洋副热带高压年代际变化的影响。

2 NCAR CAM3 模式简介及试验方案设计

本文所用的 NCAR CAM3 (NCAR Community Atmosphere Model) 全球大气环流模式, 是由 NCAR 最新研制的第六代全球大气环流模式 (Collins et al., 2004, 2006), 它是由 1980 年代的 CCM (Community Climate Model) 逐步发展而成, 依次经历了 CCM0、CCM1、CCM2、CCM3、CAM2.0 等版本。该模式是一个全球谱模式, 采用三角截断, 水平分辨率为 T42, 纬向均匀分布 128 个格点, 经向分布为 64 个高斯格点, 近似为 2.8° (经度) $\times$ 2.8° (纬度), 垂直方向采用 $\sigma-p$ 混合坐标, 从上到下共 26 层, 模式层顶在 2.917 hPa 高度。模式包括辐射、云、对流、陆面及边界层等各种物理过程。相比模式的以前版本, NCAR CAM3 模式在云和降水的物理过程处理、辐射过程、大气气溶胶等方面作了许多改进 (Collins et al., 2006), 如对于海冰提供了一个新的热力学方案, 对水汽的长波吸收率及发射率的参数化方案进行了改进, 对水汽对近红外的吸收方案进行了更新等。有关 NCAR CAM3 模式的详细说明及最新进展可参考 <http://www.cesm.ucar.edu/models/atm-cam/>, 模式动力框架及物理过程可参考 Collins et al. (2006)。

许多研究 (Hurrell et al., 2006; 曾刚等, 2007;

Wei et al., 2007; 魏东等, 2007; Li et al., 2008) 表明, NCAR CAM3 大气环流模式能较好地描述东亚地区大尺度环流及气候特征, 在气候模拟研究中得到了广泛应用。

为了探讨不同海域海表温度异常对东亚夏季风年代际变化的影响, 本文设计了 8 个数值试验 (表 1), 利用 NCAR CAM3 全球大气环流模式进行了数值模拟。考虑到模式大气在引入观测海表温度后需要一段时间调整才能达到准平衡状态, 吴国雄和刘还珠 (1995) 指出模式积分一般在第 6 个月达到准平衡状态。所以, 模式结果取 1951~2000 年进行分析 (去除 1950 年的结果)。其中, GOGA、TOGA、

ETOGA、IPOGA、IOGA 和 POGA 试验都采用了 5 个不同的初值场来驱动 NCAR CAM3 模式, 并得到 5 组集合试验结果, 集合试验的平均结果用于本文研究。

需要说明的是, GOGA 及 TOGA 试验采用了 CCSM 气候变率工作组的模拟输出的结果 (http://www.cesm.ucar.edu/working_groups/Variability/experiments.html), 其它 6 个试验 (ETOGA、IPOGA、IOGA、POGA、POGA-CE 及 IOGA-CE) 均为本文独立设计, 并在南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室的 SGI 大型计算机上运行完成的, 模式采用 T42 水平分辨率, 垂直高

表 1 数值试验方案的设计
Table 1 Scheme of numerical experiments

简称	全称	分辨率	组数	方案设计
GOGA	全球海洋全球大气试验	T42	5	全球 1950~2000 年观测 SST 驱动 NCAR CAM3 大气环流模式积分 51 年。
TOGA	热带海洋全球大气试验	T42	5	热带海洋区域 (20°S~20°N) 为 1950~2000 年观测 SST, 热带外 30°S 以南及 30°N 以北为气候 SST, 20°S~30°S 及 20°N~30°N 之间 SST 为线性插值结果, 以此 SST 驱动大气环流模式积分 51 年。
ETOGA	热带外海洋全球大气试验	T42	5	热带外海洋 (30°S 以南及 30°N 以北海域) 为 1950~2000 年观测 SST, 热带海洋区域 (20°S~20°N) 为气候 SST, 20°S~30°S 及 20°N~30°N 之间 SST 为线性插值结果, 以此 SST 驱动大气环流模式积分 51 年。
IPOGA	热带印度洋-太平洋全球大气试验	T42	5	在 TOGA 试验方案基础上作如下修改: 将热带印度洋-太平洋以外区域 SST 设为气候值, 以此 SST 驱动大气环流模式积分 51 年。
IOGA	热带印度洋全球大气试验	T42	5	在 IPOGA 试验方案基础上作如下修改: 将热带太平洋 SST 设为气候值, 热带印度洋 SST 设为 1950~2000 年观测值, 以此 SST 驱动全球大气环流模式积分 51 年。
POGA	热带太平洋全球大气试验	T42	5	在 IPOGA 试验方案基础上作如下修改: 将热带太平洋 SST 设为 1950~2000 年观测 SST, 热带印度洋 SST 设为气候值, 以此 SST 驱动全球大气环流模式, 积分 51 年。
POGA-CE	热带太平洋年代际背景试验	T42	1	在 POGA 试验方案基础上作如下修改: 在热带太平洋区域 SST 分别用 1958~1975 年平均的 1~12 月 SST (冷背景年代气候 SST) 以及 1981~1998 年平均的 1~12 月 SST (暖背景年代气候 SST) 驱动模式积分 30 年。各取后 25 年并连接成 50 年模拟结果。
IOGA-CE	热带印度洋年代际背景试验	T42	1	在 IOGA 试验方案基础上作如下修改: 在热带印度洋区域分别用 1958~1975 年平均的 1~12 月 SST (冷背景年代气候 SST) 和 1981~1998 年平均的 1~12 月 SST (暖背景年代气候 SST) 分别驱动模式积分 30 年, 各取试验结果的后 25 年并连接成 50 年模拟结果。

度层次为 26 层, 使用模式本身自带的真实地形、海陆分布等边界条件, 积分过程中选用常用的欧拉动力框架, 时间步长为 20 分钟, 积分时间为 51 年, 取后 50 年模拟结果进行分析。各试验中驱动模式所用海表温度资料为 Hurrell et al. (2008) 的 1950 年 1 月~2000 年 12 月逐月观测海表温度场。为与 ECMWF 再分析资料 (Uppala et al., 2005) 对比, 所有试验结果均已采用双线性插值方法插值成 2.5° (经度) $\times 2.5^\circ$ (纬度) 水平网格资料。西北太平洋副热带高压指数 (副高强度、面积、脊线、西伸脊点和北界等指数) 观测资料来源于中国气象局国家气候中心气候系统诊断预测室, 时间范围为 1951~2000 年, 这些指数的定义是根据夏季 500 hPa 位势高度场 588 dagpm 所包围的反气旋环流的一些特征进行的 (赵振国, 1999), 其位势高度场资料来自国家气象中心 T213 再分析资料。

3 西北太平洋副热带高压的年代际变化

为表征西北太平洋副热带高压的强弱和位置变化, 中国气象局国家气候中心定义了 5 个副高指数——副高西伸脊点、脊线位置、北界、面积和强度, 以此来定量表征副高活动特征。Lu (2002) 曾采用 850 hPa 位势高度资料也定义过副高的东西向和南北向指数。为了比较模拟与观测的西北太平洋副热带高压的异同, 本文参照国家气候中心采用的西北太平洋副热带高压各指数的定义方法 (赵振国, 1999), 修改了部分定义标准, 重新定义了反映模拟的西北太平洋副热带高压变化特征的 6 个指数, 即面积、强度、北界、脊线、南界和西伸脊点。这里, 西北太平洋副热带高压是指模式模拟的夏季 500 hPa 高度场上 590 dagpm 等值线所包围的反气旋环流。对模拟的西北太平洋副热带高压各指数的定义表述如下:

(1) 面积指数: 在夏季 500 hPa 高度场上, ($0^\circ \sim 50^\circ \text{N}$, $80^\circ \text{E} \sim 180^\circ$) 范围内被 590 dagpm 包围的格点数代表西太平洋副高面积指数, 用 I_a 表示。

(2) 强度指数: 在夏季 500 hPa 高度场上, ($0^\circ \sim 50^\circ \text{N}$, $80^\circ \text{E} \sim 180^\circ$) 范围内被 590 dagpm 包围的网格点上平均高度值编码 (590 编码为 1, 591 编码为 2, 592 编码为 3, 其余类推) 之和为副热带高压强度指数, 用 I_i 表示。

(3) 北界指数: 用副热带高压北侧 590 dagpm

等值线与 $80^\circ \text{E} \sim 180^\circ$ 范围内经线相交的纬度平均值定义为副热带高压北界指数, 用 I_{nb} 表示。

(4) 南界指数: 用副热带高压南侧 590 dagpm 等值线与 $80^\circ \text{E} \sim 180^\circ$ 范围内经线相交的纬度平均值定义为副热带高压南界指数, 用 I_{sb} 表示。

(5) 脊线指数: 取 $110^\circ \text{E} \sim 180^\circ$ 范围内副热带高压脊线 (500 hPa 纬向东风和西风交界处, $u \approx 0$) 与经线相交的纬度平均值定义为副热带高压脊线指数, 用 I_{rl} 表示。

(6) 西伸脊点指数: 在 ($0^\circ \sim 50^\circ \text{N}$, $80^\circ \text{E} \sim 180^\circ$) 范围内 590 dagpm 等值线最西端所处的经度定义为副热带高压西伸脊点指数, 用 I_{wp} 表示。若在规定范围内存在两个或两个以上副高体, 取 100°E 以东的副高体进行计算。

I_a 越大, 副热带高压体越大; I_i 越大, 副热带高压则越强; I_{nb} 、 I_{sb} 和 I_{rl} 越大, 副热带高压体位置越偏北; I_{wp} 越小, 副热带高压向西伸展就越明显; 反之亦然。

图 1a~g 分别给出了观测、GOGA、ETOGA、TOGA、IPOGA、IOGA 及 POGA 试验的西北太平洋副热带高压 6 个特征指数的时间变化序列。由图 1a 的观测结果可以看出, 副高的强度、面积指数均具有较显著的线性增大趋势, 分别通过 0.05 和 0.01 显著性检验, 且在 1970 年代中后期存在年代际突变, 其后副高面积增大、强度增强; 副高的北界及脊线位置有较弱的负趋势, 即偏南趋势; 西伸脊点的长期变化趋势不明显。这些特征与许多观测研究 (彭加毅等, 1999; 龚道溢和何学兆, 2002) 得出的结论一致。

图 1b 给出了 GOGA 模拟的西北太平洋副热带高压指数序列。从线性趋势上看, 模拟的近 50 年副高强度和面积指数均具有显著的正线性趋势, 副高南界和西伸脊点指数具有显著的负线性趋势, 均通过 0.001 显著性检验, 表明副高强度随时间增强、面积增大、南移和西伸非常明显。而且, 在 1970 年代中后期, 6 个指数中除了北界和脊线指数外, 其他 4 个指数都发生了较明显的突变, 即突变发生后副高强度变强、面积增大、偏南、偏西, 590 dagpm 等值线最南可扩展到 9°N 附近, 最西可伸展到 80°E 附近, 而突变前副高 590 dagpm 等值线最南扩展到 19°N 附近, 向西基本上在 110°E 附近, 可见突变前、后副高差异较明显。

TOGA、IPOGA、IOGA 及 POGA 试验 (图 1d~

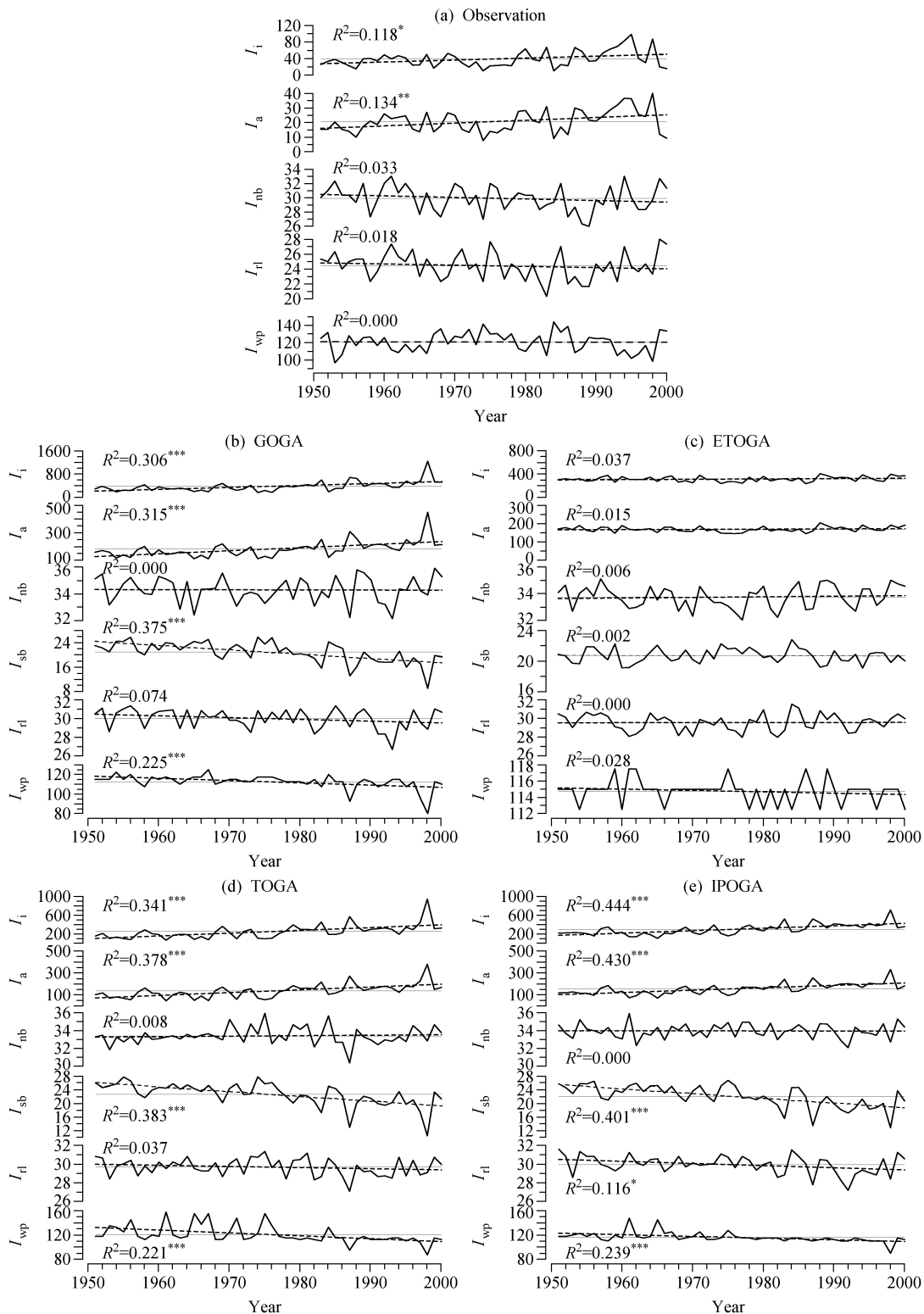


图1 1951~2000年夏季西北太平洋副热带高压强度、面积、北界、南界、脊线和西伸脊点的时间变化序列。虚线：线性趋势； R^2 ：趋势线的方差贡献；*、**、***：线性趋势通过0.05、0.01、0.001显著性检验

Fig.1 Time series of summer the NWPSH (Northwestern Pacific Subtropical High) intensity, area, north border, south border, ridge line, and west point indices during 1951 – 2000 (dashed line: linear trend). R^2 explains the variance of the time series; *, **, *** represent that the linear trends are statistically significant at the 0.05, 0.01, and 0.001 levels, respectively

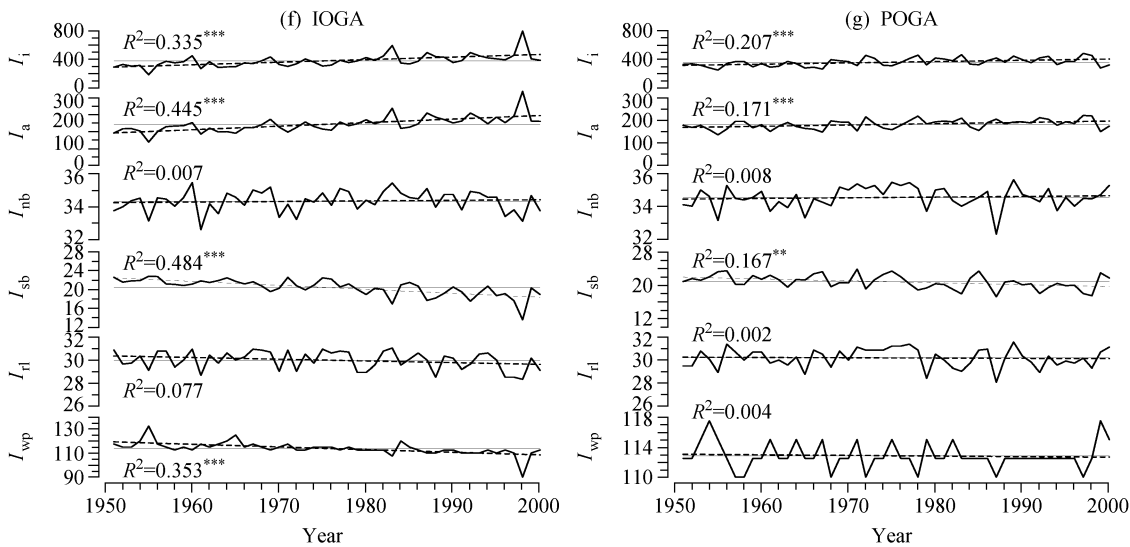


图 1（续）
Fig. 1（Continued）

表 2 各试验模拟的西北太平洋副热带高压特征指数与其观测值的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between the observed and simulated NWPSH indices

试验名称	强度	面积	北界	脊线	西伸脊点
GOGA	0.602***	0.655***	0.063	0.283*	0.302*
ETOGA	0.319*	0.335*	0.060	0.107	0.019
TOGA	0.579***	0.632***	0.097	0.381**	0.124
IPOGA	0.577***	0.616***	−0.087	0.256	0.081
IOGA	0.613***	0.646***	−0.165	0.050	0.286*
POGA	0.329*	0.486***	0.010	0.222	−0.093

注：*、**、*** 表示通过 0.05、0.01、0.001 显著性水平检验。

g) 模拟的西北太平洋副热带高压各特征指数的长期变化趋势基本与 GOGA 相同，即副高的强度和面积指数具有显著的正线性趋势，副高的南界和西伸脊点指数具有显著的负线性趋势（POGA 的西伸脊点指数趋势不明显），副高北界和脊线的长期变化趋势不明显（IPOGA 脊线负线性趋势较明显）。TOGA、IPOGA 及 IOGA 试验模拟出的副高的强度、面积、南界、西伸脊点指数均在 1970 年代中后期发生突变，其后副高强度增强、面积增大、偏南、偏西。POGA 试验模拟的副高强度及面积指数在 1960 年代后期发生了年代际变化，其后强度变强、面积变大，而其南界在 1970 年代中后期发生年代际突变，其后位置偏南。

ETOGA 试验（图 1c）模拟的副热带高压 6 个特

征指数的线性趋势不明显，年代际变化也不明显。

为了比较西北太平洋副热带高压各特征指数的模拟值与观测值的差异，计算模拟和观测的各指数的相关系数（表 2）。由表 2 可以发现，对于副高的强度和面积，各试验结果与观测的指数相关均通过了 0.05 的显著性检验，其中 GOGA、TOGA、IPOGA 和 IOGA 还通过了 0.001 显著性水平检验，相关系数由强到弱顺序基本为 GOGA、IOGA、TOGA、IPOGA、POGA、ETOGA，考虑到 ETOGA 模拟的副高强度和面积的变化很小（图 1c），所以从相关系数结果可以表明副高的强度和面积与热带印度洋和热带太平洋海表温度变化密切，尤其是与热带印度洋海表温度变化更密切。各试验模拟的副高北界与观测中的北界相关不密切，未通过 0.05 的显著性水平检验。对于副高脊线，只有 GOGA 和 TOGA 试验模拟的与观测结果分别通过 0.05 和 0.01 显著性水平检验。而副高西伸脊点，也只有 GOGA 和 IOGA 试验模拟的与观测结果通过 0.05 显著性检验。所以，从各试验模拟的副高特征指数与相应的观测特征指数相关分析结果综合来看，各试验模拟的副高指数与观测结果最接近是 GOGA，其次是 IOGA、TOGA、IPOGA 和 POGA，最差是 ETOGA。GOGA 试验由于考虑的是全球海表温度变化，因而对副高的模拟也最真实。对于 TOGA、IPOGA、IOGA 和 POGA 模拟出的副高一些指数与观测结果较密切，而 ETOGA 模拟较差，表明副

高变化与热带、热带印度洋—太平洋、热带印度洋和热带太平洋等区域海表温度变化密切,尤其是与热带印度洋海表温度变化关系更为密切。

为分析由各海区海表温度驱动模式模拟的西北太平洋副热带高压的年代际变化特征,将上述 6 个试验得到的副高特征指数进行 9 年滑动平均,得到其年代际变化曲线(图 2)。

图 2a、b 分别给出了各试验模拟出来的副高强度和面积年代际变化曲线,从中可以看出, GOGA、TOGA、IPOGA 及 IOGA 的副高强度和面积在 1970 年代中后期以后有非常明显的增强增大趋势。POGA 的副高强度和面积自 1960 年代初开始逐渐加强、增大。ETOGA 的副高强度和面积在 1980 年代初以后有弱的增强趋势。

图 2c 给出了 6 个试验模拟的副高西伸脊点的年代际变化。从线性趋势上看,除 ETOGA 和

POGA 外, GOGA、TOGA、IPOGA 及 IOGA 试验均具有较明显的负趋势,即偏西趋势,且均在 1970 年代中后期发生较明显的年代际变化,该时段以后位置偏西。POGA 西伸脊点年代际变化很小。

图 2d~f 分别给出了副高脊线、北界及南界的年代际变化。除 ETOGA 外,其他 5 个试验的副高脊线及南界在 1970 年代后期发生了年代际变化,其脊线、南界偏南。各试验模拟的副高北界在 1970 年代中后期没有显著的年代际变化。

上文根据副高 6 个特征指数的 9 年滑动平均分析了西北太平洋副热带高的年代际变化特征,下面进一步分析 500 hPa 位势高度上副热带高压体的年代际变化特征。许多观测分析(彭加毅等, 1999; Chang et al., 2000; 龚道溢和何学兆, 2002; 谭桂容和孙照渤, 2004)表明,副热带高压在 1970 年代中后期发生了明显的突变。因此,图 3 给出了 1970

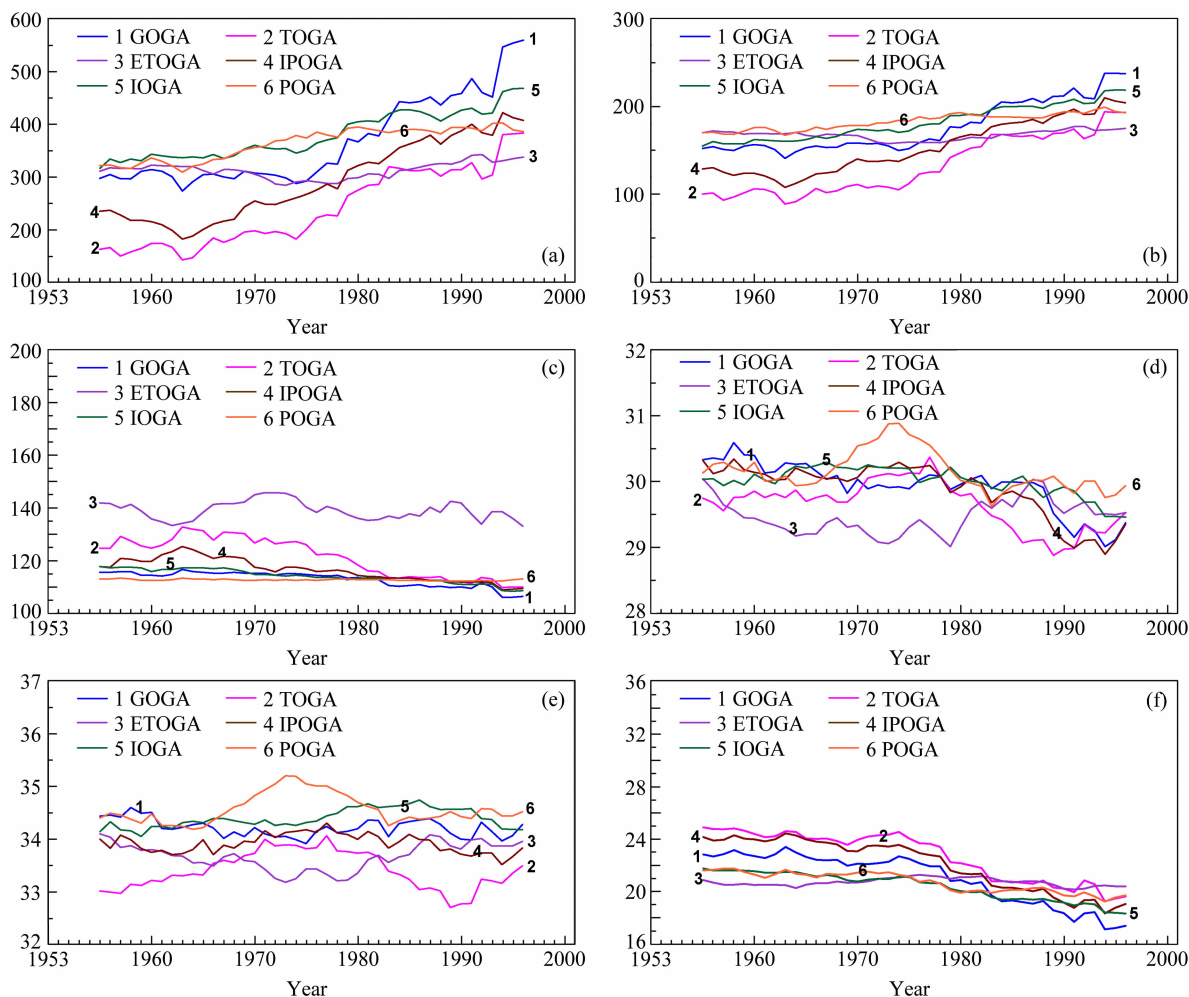


图 2 模式模拟的西北太平洋副热带高压 6 个特征指数的年代际变化(9 年滑动平均): (a) I_1 ; (b) I_a ; (c) I_{wp} ; (d) I_{rl} ; (e) I_{nb} ; (f) I_{sb}

Fig. 2 The interdecadal variations of simulated NWPSH indices (9-year running means): (a) I_1 ; (b) I_a ; (c) I_{wp} ; (d) I_{rl} ; (e) I_{nb} ; (f) I_{sb}

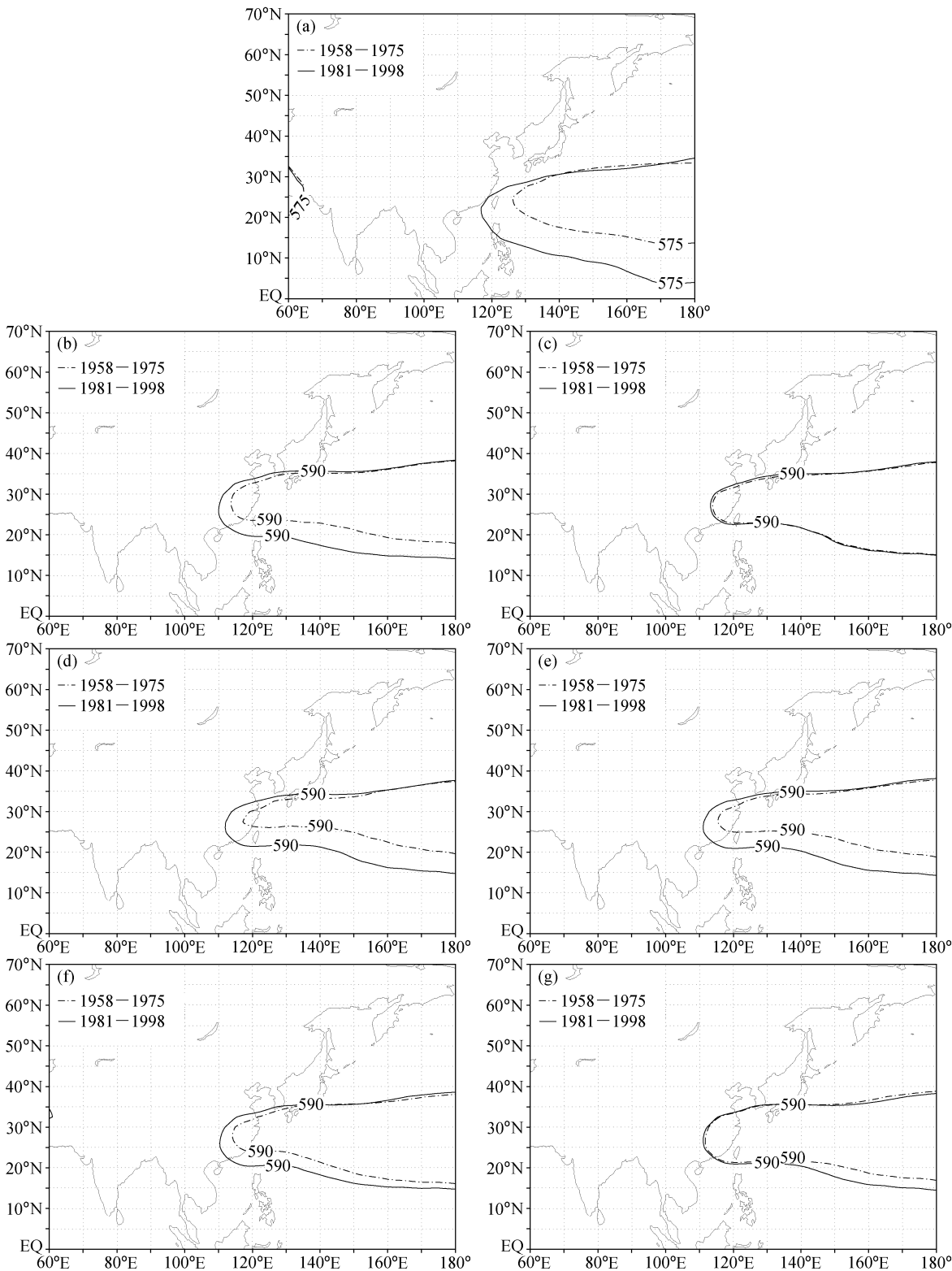


图 3 观测和模拟的夏季 500 hPa 西北太平洋副热带高压体 1958~1975 年(虚线)和 1981~1998 (实线)的位置(单位: dagpm): (a) EC-MWF; (b) GOGA; (c) ETOGA; (d) TOGA; (e) IPOGA; (f) IOGA; (g) POGA

Fig. 3 Locations of summer NWP SH body at 500 hPa during 1958 - 1975 (dashed line) and 1981 - 1998 (solid line) from observation and simulations (units: dagpm): (a) ECMWF; (b) GOGA; (c) ETOGA; (d) TOGA; (e) IPOGA; (f) IOGA; (g) POGA

年代中后期突变前、后副高体的位置变化。由于 ECMWF 再分析资料的 500 hPa 位势高度气候场值比模拟值低(图略),所以取 575 dagpm 所围反气旋作为副热带高压体。由图 3a 的 ECMWF 再分析资料结果可以看出,1970 年代中后期突变后,副高面积增大、位置偏西、偏南。ETOGA 试验(图 3c)结果中,副高体位置在突变前后基本无变化,表明热带外海表温度对副高的年代际变化影响小。由 GOGA、TOGA、IPOGA、IOGA 和 POGA 试验结果(图 3b、d~g)可以清楚地发现,相比 1970 年代中后期突变前,副高在突变后副高面积增大、位置偏西(POGA 偏西不明显)、偏南。因此,上述分析进一步表明,全球、热带、热带印度洋—太平洋、热带印度洋和热带太平洋等区域海表温度变化均能影响副高的年代际变化,并且在 1970 年代中后期以后,副高面积增大、位置偏西(POGA 偏西不明显)、偏南,而热带外海表温度对副高年代际变化的影响小。

下面来比较 1970 年代中后期副高突变前、后时期它的特征指数变化情况(表 3)。由表 3 可见,副高强度的突变前、后年代际差异最显著的 IPOGA 试验,通过 0.01 显著性水平检验,其次是 TOGA 和 IOGA,通过 0.05 显著性水平检验, GOGA 和 POGA 试验的年代际变化差异接近 0.05 显著性水平检验,ETOGA 的年代际差异最不显著。副高面积的年代际差异最显著的是 IPOGA,通过 0.01 显著性水平检验,其次是 GOGA、TOGA 和 IOGA 试验,通过 0.05 显著性水平检验,POGA 的年代际差异(t 检验值为 1.83)接近 0.05 显著性水平检验(t 检验值为 2.03),而 ETOGA 的年代际差异最不显著。各试验的副高北界和脊线年代际差异均不显著。南界的年代际差异显示,除了 ETOGA 无变化外,其他 5 个试验的年代际差异显著,均偏南。西伸脊点的年代际变化显示,只有 TOGA 试验的年代际差异通过 0.05 显著性水平检验,其偏西幅度为 16.5° (经度);IPOGA 和 IOGA 的年代际差异接近 0.05 显著性水平检验(t 检验值分别为 -2.02 和 -1.96),偏西幅度分别为 9.6 和 5.1° (经度);而 GOGA 尽管在 1970 年代中后期以后副高偏西 6.7° (经度),但未通过 0.05 的显著性水平检验,POGA 和 ETOGA 的西伸脊点年代际差异最不显著,偏西幅度不到 1° (经度)。所以,

从模拟的副高年代际变化显著性分析结果看, GOGA、TOGA、IPOGA 和 IOGA 较显著,而 POGA 次之,ETOGA 年代际变化最不显著,表明热带印度洋海表温度变化相对热带太平洋海表温度变化来说,其对副高的年代际变化具有更为重要的作用。

由以上分析还可以看出,IOGA 与 POGA 模拟的副高变化存在较大差异,如 IOGA 模拟的副高强度、面积、西伸脊点与观测相关关系均比 POGA 与观测的相关关系强,而且从模拟副高的年代际变化看,前者也比后者变化显著。所以,有必要分析两者产生此差异的可能原因。图 4a 和 4b 分别给出了 POGA 和 IOGA 模拟的流函数和旋转风(无辐散风)在 1970 年代中后期突变前后的差值分布图。从图 4a 可以看出,年代际差异显著区主要表现在热带东太平洋区南北两侧存在一对反气旋性环流异常,在热带印度洋 10°N 附近南北两侧存在一对气旋性环流异常,孟加拉湾—中国东南沿海为气旋性环流异常中心,不利于西北太平洋副热带高压的西伸。在 IOGA 试验(图 4b)中,可以看到热带印度洋和亚洲南部存在一对反气旋性异常环流,孟加拉湾—中国东南沿海为反气旋性环流异常中心,亚洲大陆—西北太平洋都为反气旋异常控制,这种环流配置有利于西北太平洋副热带高压增强、面积增大和西伸。所以,热带印度洋和热带太平洋海表温度变化对西北太平洋副热带高压在 1970 年代中后期年代际变化影响的差异可能主要在于两者在孟加拉湾—中国东南沿海区域所强迫出的异常环流不同,前者为反气旋性环流异常,有利于西北太平洋副热带高压的增强、面积增大和西伸,而后者为气旋性环流异常,不利于副高的西伸。Zhou et al. (2009) 利用数值模式进行了理想试验,揭示出热带印度洋—西太平洋海表温度偏暖有利于西北太平洋副热带高压西伸,本文的 IOGA 试验则进一步证实了热带印度洋海表温度在 1970 年代中后期偏暖后有利于西北太平洋副高偏西。

综上所述, GOGA、TOGA、IPOGA 和 IOGA 试验均能模拟副高在 1970 年代中后期发生的年代际变化,即其后副高强度增强、面积增大、位置偏西、偏南。POGA 试验模拟出的副高强度、面积在 1960 年代存在年代际变化,其后强度增强、面积增大,副高南界和脊线在 1970 年代中后期或 1980 年

表 3 模拟的西北太平洋副热带高压 6 个特征指数在 1970 年代中后期的年代际变化值
Table 3 The differences of simulated six WNSPH indices between 1958 - 1975 and 1981 - 1998

副高特征指数	数值试验	气候平均	标准差	突变前平均	突变后平均	突变前后差异
				(1958~1975 年)	(1981~1998 年)	(突变后减突变前)
强度	GOGA	381	174	303	494	191
	TOGA	247	147	180	346	166 *
	ETOGA	315	44	309	322	13
	IPOGA	296	113	223	392	169 **
	IOGA	381	89	347	444	98 *
	POGA	361	57	340	397	57
面积	GOGA	181	57	154	221	67 *
	TOGA	135	60	104	180	76 *
	ETOGA	169	14	166	171	5
	IPOGA	155	48	127	196	69 **
	IOGA	182	34	167	209	42 *
	POGA	182	20	175	194	18
北界	GOGA	34. 3°N	0. 9°N	34. 1°N	34. 1°N	0°N
	TOGA	33. 4°N	0. 9°N	33. 6°N	33. 2°N	-0. 4°N
	ETOGA	33. 7°N	0. 8°N	33. 5°N	33. 8°N	0. 3°N
	IPOGA	33. 9°N	0. 8°N	33. 9°N	33. 8°N	-0. 1°N
	IOGA	34. 3°N	0. 6°N	34. 3°N	34. 4°N	0. 1°N
	POGA	34. 5°N	0. 6°N	34. 6°N	34. 4°N	-0. 2°N
南界	GOGA	20. 8°N	3. 3°N	22. 5°N	18. 2°N	-4. 3°N *
	TOGA	22. 7°N	3. 3°N	24. 2°N	20. 0°N	-4. 2°N *
	ETOGA	20. 7°N	0. 9°N	20. 6°N	20. 6°N	0°N
	IPOGA	22. 1°N	3. 2°N	23. 7°N	19. 3°N	-4. 4°N **
	IOGA	20. 3°N	1. 8°N	21. 2°N	18. 9°N	-2. 3°N *
	POGA	20. 7°N	1. 6°N	21. 4°N	19. 7°N	-1. 7°N *
脊线	GOGA	30. 0°N	1. 0°N	30. 0°N	29. 5°N	-0. 5°N
	TOGA	29. 7°N	0. 9°N	29. 9°N	29. 2°N	-0. 7°N
	ETOGA	29. 5°N	0. 9°N	29. 3°N	29. 6°N	0. 3°N
	IPOGA	29. 9°N	1. 0°N	30. 1°N	29. 4°N	-0. 7°N
	IOGA	29. 9°N	0. 8°N	30. 1°N	29. 7°N	-0. 4°N
	POGA	30. 1°N	0. 8°N	30. 3°N	29. 8°N	-0. 5°N
西伸脊点	GOGA	112. 6°E	7. 1°E	115. 0°E	108. 3°E	-6. 7°E
	TOGA	120. 7°E	14. 5°E	128. 3°E	111. 8°E	-16. 5°E *
	ETOGA	114. 8°E	1. 4°E	115. 3°E	114. 6°E	-0. 7°E
	IPOGA	116. 1°E	8. 2°E	120. 7°E	111. 1°E	-9. 6°E
	IOGA	113. 9°E	5. 4°E	115. 7°E	110. 6°E	-5. 1°E
	POGA	112. 9°E	1. 7°E	112. 8°E	112. 4°E	-0. 4°E

注：*、** 表示通过 0.05、0.01 显著性水平检验。

代初存在年代际变化，其后位置偏南。ETOGA 试验表明，热带外海表温度对副高年代际变化的影响较小。热带印度洋海表温度变化相对热带太平洋海表温度变化来说，其对副高的年代际变化具有更为重要的作用，其可能原因在于 1970 年代中后期以

后热带印度洋海表温度变化能在孟加拉湾—中国东部沿海区域强迫出反气旋性环流异常，有利于副高增强、面积增大和西伸，而热带太平洋海表温度变化在该区强迫出的是气旋性环流异常，不利于副高的西伸。

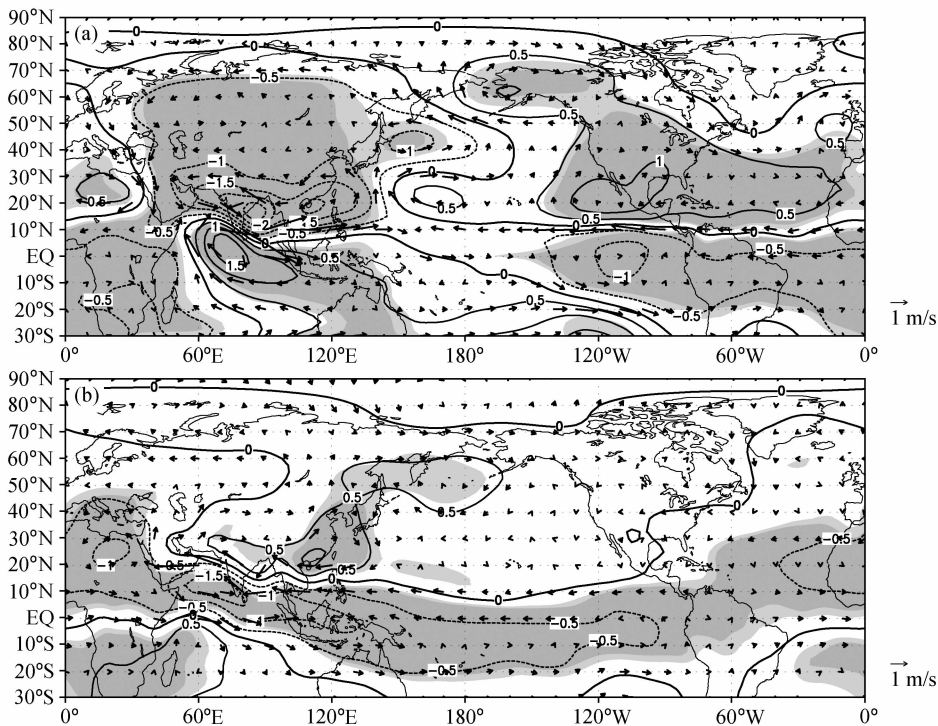


图4 模拟的夏季(6~8月)850 hPa流函数(单位: $10^6 \text{ m}^2/\text{s}$)及旋转风(无辐散风,单位: m/s)年代际差异图(1981~1998年减1958~1975年): (a) POGA; (b) IOGA。阴影: 流函数差异通过0.05显著水平检验区

Fig. 4 Differences of simulated horizontal streamfunction ($10^6 \text{ m}^2/\text{s}$) and rotational (non-divergent) wind at 850 hPa for Jun-Aug between 1981-1998 and 1958-1975; (a) POGA; (b) IOGA. Shaded areas are statistically significant at the 5% level according to Student *t*-test

4 热带太平洋、印度洋海表温度的年代际背景变化对西太平洋副高年代际变化的影响

许多研究(Zhang et al., 1997; Chang et al., 2000; Huang, 2001; Zeng et al., 2007; 杨明珠等, 2007; 曾刚等, 2007)表明, 热带中东太平洋及热带印度洋海温均在1970年代中后期发生了一次年代际突变过程, 海温的气候背景发生了年代际变化, 由冷背景年代变为暖背景年代。龚道溢和何学兆(2002)在西北太平洋副高1970年代后期发生的年代际尺度变化的机制研究中指出, 热带太平洋与印度洋海表温度的年代际变化可能都起到了非常重要的作用。前文分析也证实了热带太平洋和印度洋海表温度与西北太平洋副热带高压存在较密切的关系。所以, 下面我们设计了POGA-CE和IOGA-CE试验(设计方案见表1), 来探讨热带太平洋和热带印度洋海表温度的年代际背景变化是否对西北太平洋副热带高压的年代际变化有影响。

将热带太平洋(热带印度洋)1958~1975年平

均的1~12月海温驱动全球大气环流模式的试验称为热带太平洋(热带印度洋)冷背景试验, 将1981~1998年平均的1~12月海温驱动全球大气环流模式试验称为热带太平洋(热带印度洋)暖背景试验。每个试验进行30年积分, 各取后25年模拟结果, 并将两个试验结果连接成50年的资料场进行分析, 即1~25年模拟结果为热带太平洋(热带印度洋)冷背景模拟结果, 26~50年为热带太平洋(热带印度洋)暖背景模拟结果。为了进行合成分析, 取11~40年作为气候平均态进行气候异常处理。

根据西北太平洋副热带高压6个特征指数的定义, 计算得到它们的时间变化序列, 图5a和5b分别为POGA-CE和IOGA-CE试验结果。由图5a可以看出, POGA-CE模拟的西北太平洋副热带高压强度、面积存在正线性趋势, 且均在模拟的20年代中后期发生弱的年代际变化, 其后西北太平洋副热带高压偏强、面积增大; 西北太平洋副热带高压的南界指数有较显著的负线性趋势, 自模拟的20年代中后期以后副高偏南。副高的北界和西伸脊点线性趋势不明显。进一步分析POGA-CE模拟的

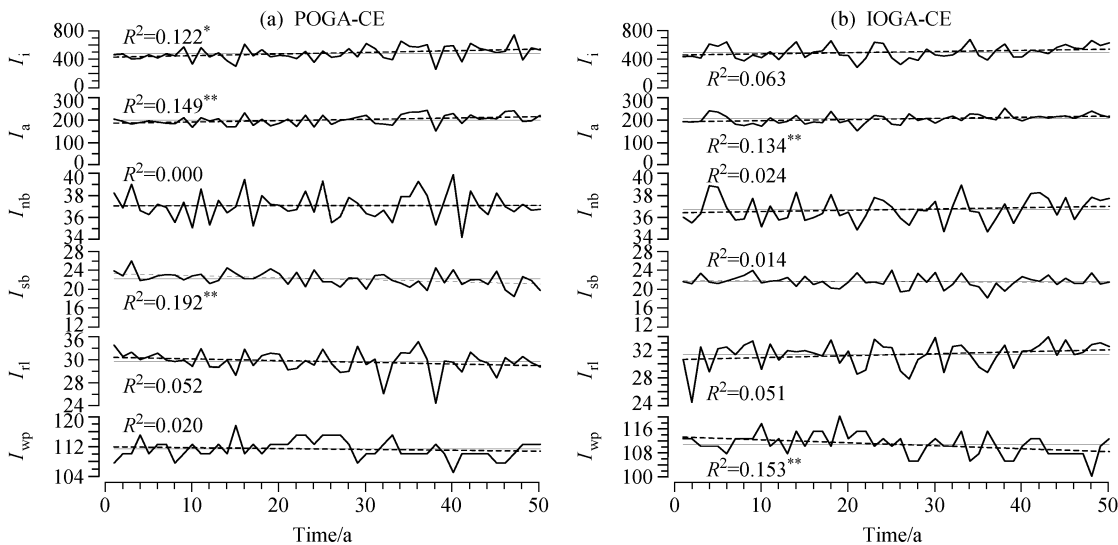


图 5 海表温度年代际背景试验模拟的西北太平洋副热带高压 6 个特征指数的时间变化序列。说明同图 1
Fig. 5 Same as Fig. 1, but for time series of simulated six NWPSH indices driven by cool (1951–1978 average) and warm (1981–1998 average) SSTs

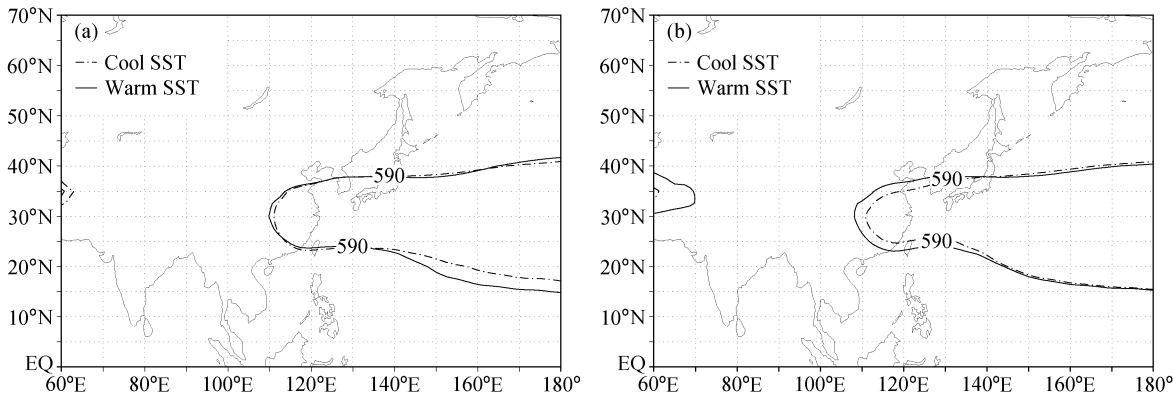


图 6 海表温度年代际背景试验的夏季西北太平洋副热带高压体位置变化：(a) POGA-CE；(b) IOGA-CE。
Fig. 6 The locations of simulated summer NWPSH body driven by cool (1958–1975 average) and warm (1981–1998 average) SSTs; (a) POGA-CE; (b) IOGA-CE

冷、暖背景年代合成的 500 hPa 副高体变化（图 6a），可以看出，副高在暖背景年代比在冷背景年代的面积大、位置偏南、稍偏西，与 POGA 试验的弱夏季风年代结果一致，表明热带太平洋海表温度的年代际背景变化对副高强度、面积和南界的年代际变化有重要影响。由 IOGA-CE 结果（图 5b）可以看出，西北太平洋副热带高压面积有显著的正线性趋势，西伸脊点有显著负线性趋势，自模拟的 20 年代中后期以后副高面积偏大、偏西。进一步分析冷、暖背景年代合成的 500 hPa 副高体变化（图 6b），可以看出，IOGA-CE 模拟的副高在暖背景年代比在冷背景年代的面积大，位置明显偏西，

表明热带印度洋海表温度的年代际背景变化对副高面积和西伸脊点的年代际变化有重要影响。

5 结论与讨论

本文利用 NCAR CAM3 全球大气环流模式进行了一系列数值试验，并与观测结果进行了对比分析，探讨了不同海域海表温度异常对西北太平洋副热带高压年代际变化影响，结果表明：

（1）数值试验结果表明，全球、热带、热带太平洋—印度洋和热带印度洋海表温度变化对夏季西北太平洋副热带高压的年代际变化均有作用，在其作用下，西北太平洋副热带高压均在 1970 年代中

后期发生年代际变化,其后副高面积增大、强度增强、偏西、偏南,与观测结果较一致。

(2) 热带太平洋海表温度变化对西北太平洋副热带高压的年代际变化也有作用,在其作用下,西北太平洋副热带高压的强度、面积在 1960 年代后期发生年代际变化,南界在 1970 年代中后期发生年代际变化,这些时段以后副高强度增强、面积增大、偏南。

(3) 热带印度洋海表温度变化驱动模式模拟的副高比热带太平洋海表温度驱动模式模拟的副高更接近观测结果,且年代际变化也更显著,表明热带印度洋海表温度变化相对于热带太平洋海表温度变化来说,对副高的年代际变化具有更为重要的作用。两区海表温度变化对副高年代际变化影响差异的可能原因在于:1970 年代中后期以后热带印度洋海表温度变化能在孟加拉湾—中国东南沿海强迫产生反气旋性环流异常,有利于副高增强、面积增大和西伸,而热带太平洋海表温度变化在该区强迫产生气旋性环流异常,不利于副高西伸。

(4) 热带太平洋和热带印度洋海表温度的冷、暖年代际背景变化均对夏季西北太平洋副热带高压年代际变化有重要作用:西北太平洋副热带高压在热带太平洋暖背景年代比在冷背景年代强度强、面积大、偏南;西北太平洋副高在热带印度洋暖背景年代比冷背景年代面积大、位置偏西。

(5) 热带外海表温度变化对西北太平洋副热带高压年代际变化作用较小。

本文讨论了全球、热带、热带印度洋—太平洋、热带印度洋及热带太平洋海表温度变化对西北太平洋副热带高压的影响,得出了一些有意义的结果,但仍存在一些有待进一步深入研究的问题:① 由于本文结果只是 NCAR CAM3 单个模式模拟的结果,需要利用其他模式进行验证或多模式集合进行研究;② 对于热带太平洋和热带印度洋对副高影响的物理过程及其物理机制尚待进一步深入探讨;③ 本文对海区的划分还很粗糙,仍需进一步细分海区,深入研究大西洋、北太平洋、南半球海洋以及海表温度的异常分布型等对东亚夏季风年代际变化的影响;④ 文中只研究了海表温度对大气环流的影响,没有考虑大气对海洋的反馈作用,因此,需要进一步利用海气耦合模式研究海气相互作用对副高的影响。

致谢 感谢两位匿名审稿人对本文提出的宝贵意见。感谢南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室提供的 SGI 大型计算机计算条件。感谢美国 CCSM 气候变率工作组提供的 GOGA 和 TOGA 试验输出结果。

参考文献 (References)

- Angell J K. 1981. Comparison of variation in atmospheric quantities with sea surface temperature variations in the equatorial eastern Pacific [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 109: 230–243.
- Chang C P, Zhang Y S, Li T. 2000. Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and tropical Pacific SSTs. Part I: Roles of the subtropical ridge [J]. *J. Climate*, 13: 4310–4325.
- 陈烈庭. 1982. 北太平洋副热带高压与赤道东部海温的相互作用 [J]. *大气科学*, 6 (2): 148–156. Chen Lieting. 1982. Interaction between the subtropical high over the North Pacific and the sea surface temperature of the eastern equatorial Pacific [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 6 (2): 148–156.
- 陈明萱. 1986. 海面温度对西北太平洋副热带高压的影响 [J]. *海洋学报*, 8 (3): 307–313. Chen Mingxuan. 1986. The impact of sea surface temperature on the Western North Pacific high [J]. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 8 (3): 307–313.
- Collins W D, Rasch P J, Boville B A, et al. 2004. Description of the NCAR community atmosphere model (CAM3) [R]. Tech. Rep. NCAR/TN-464 STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 226.
- Collins W D, Rasch P J, Boville B A, et al. 2006. The formulation and atmospheric simulation of the Community Atmosphere Model Version 3 (CAM3) [J]. *J. Climate*, 19 (11): 2144–2161.
- 方之芳, 高玉庄, 代民. 1986. 极地海冰对北太平洋副热带高压影响的可能途径 [J]. *海洋学报*, 8 (5): 558–565. Fang Zhifang, Gao Yuzhuang, Dai Min. 1986. Possible way of the impact of polar sea ice on the North Pacific subtropical high [J]. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 8 (5): 558–565.
- 龚道溢, 何学兆. 2002. 西太平洋副热带高压的年代际变化及其气候影响 [J]. *地理学报*, 57 (2): 185–193. Gong Daoyi, He Xuezhao. 2002. Interdecadal change in western Pacific subtropical high and climatic effects [J]. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 57 (2): 185–193.
- Huang R H. 2001. Decadal variability of the summer monsoon rainfall in East Asia and its associated with the SST anomalies in the tropical Pacific [J]. *CLIVAR Exchanges*, 6 (2): 7–8.
- 黄士松, 汤明敏, 霍义强, 等. 1962. 副热带高压位置一年中南北变动的一些特征及其意义 [J]. *南京大学学报 (自然科学)*, 2: 41–56. Huang Shisong, Tang Mingmin, Huo Yiqiang, et al. 1962. Some characteristics and meaning of the northward progression and southward retrogression of the subtropical high [J]. *J. Nanjing University (Natural Sciences)* (in Chinese), (2): 41–56.
- 黄先香, 炎利军, 施能. 2006. 华南前汛期旱涝影响因子和预报方

- 法 [J]. 热带气象学报, 22 (5): 431–438. Huang Xianxiang, Yan Lijun, Shi Neng. 2006. Influence factors and prediction method on flood/drought during the first rainy season in South China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 22 (5): 431–438.
- Hurrell J W, Hack J J, Phillips A S, et al. 2006. The dynamical simulation of the community atmosphere model version 3 (CAM3) [J]. J. Climate, 19 (11): 2162–2183.
- Hurrell J W, Hack J J, Shea D, et al. 2008. A new sea surface temperature and sea ice boundary dataset for the Community Atmosphere Model [J]. J. Climate, 21: 5145–5153.
- 蒋国荣, 沙文钰, 蔡剑平. 1991. 印度洋和北太平洋海温与夏季西太平洋副热带高压长期变动的关系 [J]. 海洋预报, 8 (1): 16–24. Jiang Guorong, Sha Wenyu, Cai Jianping. 1991. Long-range variation relations between sea surface temperature over the North Pacific and Indian Oceans and the west Pacific subtropical high in summer [J]. Marine Forecasts (in Chinese), 8 (1): 16–24.
- Li H M, Dai A G, Zhou T J, et al. 2008. Responses of East Asian summer monsoon to historical SST and atmospheric forcing during 1950–2000 [J]. Climate Dynamics, doi: 10.1007/s00382-008-0482-7.
- 李丽平, 王盘兴, 李弘, 等. 2003. 北太平洋区域浅层海温与海平面气压场年代际异常关系的分析 [J]. 热带气象学报, 19 (4): 357–366. Li Liping, Wang Panxing, Li Hong, et al. 2003. Analysis of interdecadal anomaly relations between subsurface sea temperature and sea level pressure over the North Pacific [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 19 (4): 357–366.
- 刘屹岷, 吴国雄. 2000. 副热带高压研究回顾及对几个基本问题的再认识 [J]. 气象学报, 58 (4): 500–512. Liu Yimin, Wu Guoxiong. 2000. Reviews on the study of the subtropical anticyclone and new insights on some fundamental problems [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 58 (4): 500–512.
- Lu Riyu. 2002. Indices of the summertime western North Pacific subtropical high [J]. Adv. Atmos. Sci., 19 (6): 1004–1028.
- 彭加毅, 孙照渤, 朱伟军. 1999. 70 年代末大气环流及中国旱涝分布的突变 [J]. 南京气象学院学报, 22 (3): 300–304. Peng Jiayi, Sun Zhaobo, Zhu Weijun. 1999. The catastrophe of atmosphere general circulation and China dry and wet pattern in the late 1970s [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 22 (3): 300–304.
- 彭加毅, 孙照渤. 2000. 春季赤道东太平洋海温异常对西太平洋副高的影响 [J]. 南京气象学院学报, 23 (3): 191–195. Peng Jiayi, Sun Zhaobo. 2000. Influence of spring equatorial eastern Pacific SSTA on western Pacific subtropical high [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 23 (3): 191–195.
- 祁张, 张祖强, 何金海, 等. 2008. 气候平均场上西太平洋副热带高压双脊线过程可能成因的动力诊断分析 [J]. 大气科学, 32 (2): 395–404. Qi Li, Zhang Zuqiang, He Jinhai, et al. 2008. Dynamical diagnosis on possible formation cause of climatological western Pacific subtropical high double ridges process [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (2): 395–404.
- Sui C H, Chung P H, Li T. 2007. Interannual and interdecadal variability of the summertime western North Pacific subtropical high [J]. Geophys. Res. Lett., 34, L11701, doi: 10.1029/2006GL029204.
- Sun S Q, Ying M. 1999. Subtropical high anomalies over the western Pacific and its relations to Asia monsoon and SST anomaly [J]. Adv. Atmos. Sci., 16 (4): 559–568.
- 谭桂容, 孙照渤. 2004. 西太平洋副高与华北旱涝的关系 [J]. 热带气象学报, 20 (2): 206–211. Tan Guirong, Sun Zhaobo. 2004. Relationship of the subtropical high and summertime floods/droughts over North China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 20 (2): 206–211.
- 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 Shiyang, Xu Shuying, Guo Qiyun. 1962. The characteristics of the zonal and meridional circulation over tropical and subtropical regions in eastern Asia during summer [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 32 (2): 91–103.
- Tao S Y, Chen L X. 1987. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China [M]//Chang C P, Krishnamurti T N. Monsoon Meteorology. Oxford: Oxford University Press, 60–92.
- Uppala S M, Kalberg P W, Simmons A J, et al. 2005. The ERA-40 reanalysis [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 131: 2961–3012.
- 魏东, 王亚非, 董敏. 2007. NCAR CAM3 模式大气环流对日本东部附近海域海温异常的响应 [J]. 热带气象学报, 23 (5): 435–443. Wei Dong, Wang Yafei, Dong Min. 2007. Response of atmospheric circulation of NCAR CAM3 Model to the sea surface temperature anomaly off the East Coast of Japan [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 23 (5): 435–443.
- Wei D, Wang Y F, Dong M. 2007. Effects of sea surface temperature anomalies off the East Coast of Japan on development of the Okhotsk High [J]. Acta Meteor. Sinica, 21 (2): 234–244.
- Wu B, Zhou T J. 2008. Oceanic origin of the interannual and interdecadal variability of the summertime western Pacific subtropical high [J]. Geophys. Res. Lett., 35, L13701, doi: 10.1029/2008GL034584.
- 吴国雄, 刘还珠. 1995. 降水对热带海表温度异常的邻域响应 I. 数值模拟 [J]. 大气科学, 19 (4): 422–434. Wu Guoxiong, Liu Huanzhu. 1995. Neighbourhood response of rainfall to tropical sea surface temperature anomalies. Part I: Numerical experiment [J]. Chinese Journal of Atmospheric Science (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 19 (4): 422–434.
- 吴国雄, 刘平, 刘屹岷, 等. 2000. 印度洋海温异常对西太平洋副热带高压的影响——大气中的两级热力适应 [J]. 气象学报, 58 (5): 513–522. Wu Guoxiong, Liu Ping, Liu Yimin, et al.

2000. Impacts of the sea surface temperature anomaly in the Indian Ocean on the subtropical anticyclone over the western Pacific—Two-stage thermal adaptation in the atmosphere [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 58 (5): 513–522.
- 吴国雄, 丑纪范, 刘屹岷, 等. 2002. 副热带高压形成和变异的动力学问题 [M]. 北京: 科学出版社. Wu Guoxiong, Chou Jifan, Liu Yimin, et al. 2002. Dynamics of the Formation and Variation of Subtropical Anticyclones (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press.
- 吴国雄, 刘屹岷, 宇婧婧, 等. 2008. 海陆分布对海气相互作用的调控和副热带高压的形成 [J]. *大气科学*, 32 (4): 720–740. Wu Guoxiong, Liu Yimin, Yu Jingjing, et al. 2008. Modulation of land-sea distribution on air-sea interaction and formation of subtropical anticyclones [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Science* (in Chinese), 32 (4): 720–740.
- 杨明珠, 丁一汇, 李维京, 等. 2007. 印度洋海表温度主模态及其与亚洲夏季季风的关系 [J]. *气象学报*, 65 (4): 527–536. Yang Mingzhu, Ding Yihui, Li Weijing, et al. 2007. Leading mode of Indian Ocean SST and its impacts on Asian summer monsoon [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 65 (4): 527–536.
- 袁媛, 李崇银. 2009. 热带印度洋海温异常不同模态对南海夏季风爆发的可能影响 [J]. *大气科学*, 33 (2): 325–336. Yuan Yuan, Li Chongyin. 2009. Possible impacts of the tropical Indian Ocean SST anomaly modes on the South China Sea summer monsoon onset [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 33 (2): 325–336.
- Zhang R, Sumi A, Kimoto M. 1996. Impact of El Niño on the East Asian monsoon: A diagnostic study of the ‘86/87’ and ‘91/92’ events [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 74: 49–62.
- Zhang R, Sumi A, Kimoto M. 1999. A diagnostic study of the impact of El Niño on the precipitation in China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 16: 229–241.
- Zhang Y, Wallace J M, Battisti D S. 1997. ENSO-like interdecadal variability: 1900–93 [J]. *J. Climate*, 10: 1004–1020.
- Zeng G, Sun Z B, Wang W-C, et al. 2007. Interdecadal variability of the East Asian summer monsoon and associated atmospheric circulations [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 24 (5): 915–926.
- 曾刚, 孙照渤, 王维强, 等. 2007. 东亚夏季风年代际变化——基于全球观测海表温度驱动 NCAR Cam3 的模拟分析 [J]. *气候与环境研究*, 12 (2): 221–224. Zeng Gang, Sun Zhaobo, Wang Wei-Chyung, et al. 2007. Interdecadal variation of East Asian summer monsoon simulated by NCAR Cam3 driven by global SSTs [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 12 (2): 211–224.
- 赵振国. 1999. 中国夏季旱涝及环境场 [M]. 北京: 气象出版社, 297pp. Zhao Zhenguo. 1999. Study on Drought–Floods and Its Environment Fields in Summer in China (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 297pp.
- Zhou T J, Yu R C. 2005. Atmospheric water vapor transport associated with typical anomalous summer rainfall patterns in China [J]. *J. Geophys. Res.*, 110, D08104, doi: 10.1029/2004JD005413.
- Zhou T, Yu R, Zhang J, et al. 2009. Why the western Pacific subtropical high has extended westward since the late 1970s? [J]. *J. Climate*, 22: 2199–2215.