

况雪源, 张耀存, 刘健, 等. 2009. 冬季黑潮暖流区加热异常对东亚副热带西风急流影响的数值研究[J]. 大气科学, 33 (1): 81-89. Kuang Xueyuan, Zhang Yaocun, Liu Jian, et al. 2009. A numerical study of the effect of anomalous surface heating in the Kuroshio Current region in winter on the East Asian subtropical westerly jet [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (1): 81-89.

# 冬季黑潮暖流区加热异常对东亚副热带西风急流影响的数值研究

况雪源<sup>1, 3</sup> 张耀存<sup>2</sup> 刘健<sup>1</sup> 郭兰丽<sup>2</sup>

1 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008

2 南京大学大气科学系, 南京 210093

3 广西气候中心, 南宁 530022

**摘要** 通过对大气环流格点模式 GAMIL 性能的检验表明, 模式较好地再现了东亚地区大气环流型态、高空西风急流变化及表面加热场的季节变化。在此基础上, 设计敏感性试验研究了冬季西太平洋黑潮暖流关键区加热异常对高空西风急流影响, 数值试验结果表明冬季西太平洋黑潮暖流区加热正异常将引起东亚大槽偏东, 大陆冷高压、阿留申低压及位于低纬太平洋上的西太平洋副高均有所增强, 从而导致了冬季风环流加强。相应地, 东北太平洋上出现了明显的气旋差值环流, 而在中高纬大陆海洋交界地区出现反气旋式差值环流; 同时, 西风急流区南侧的低纬地区位势高度及温度场为正异常, 而北侧的中高纬地区为负异常, 这种分布将使得急流区经向气压梯度和南北温差加大, 导致急流的增强。模式结果分别从热力适应理论及热成风的角度验证了黑潮暖流区表面加热异常对急流的影响机理。

**关键词** 黑潮暖流区 表面加热异常 东亚副热带西风急流 数值研究

**文章编号** 1006-9895 (2009) 01-0081-09

**中图分类号** P434

**文献标识码** A

## A Numerical Study of the Effect of Anomalous Surface Heating in the Kuroshio Current Region in Winter on the East Asian Subtropical Westerly Jet

KUANG Xueyuan<sup>1, 3</sup>, ZHANG Yaocun<sup>2</sup>, LIU Jian<sup>1</sup>, and GUO Lanli<sup>1</sup>

1 State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008

2 Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093

3 Guangxi Climate Center, Nanning 530022

**Abstract** The East Asian Subtropical Westerly Jet (EAWJ) is a narrow and strong westerly wind belt with large horizontal and vertical wind shears over the East Asian subtropical region, which is generally located at the north edge of the Western Pacific subtropical high. It plays a key role in linking weather systems over the mid-latitudes and low latitudes. Its northward jump is the signal of general circulation seasonal transition and the criteria for dividing the natural season of East Asia. Therefore, it is a meaningful work to further study the influencing features for

**收稿日期** 2007-05-21, 2008-1-19 收修定稿

**资助项目** 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX2-YW-315、KZCX2-YW-319, 国家重点基础研究发展规划项目 2004CB720200, 国家自然科学基金项目 40675041、40672210, 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开放课题

**作者简介** 况雪源, 女, 1971 年出生, 高级工程师, 主要从事区域气候变化分析及数值模拟研究工作。E-mail: xykuang@21cn.com

its variations. Based on that climate model GAMIL successfully simulates the pattern and seasonal evolution of East Asian general circulation, the impact of anomalous surface heating in the Kuroshio Current region to the south of Japan and the Tibetan Plateau on the EAWJ is investigated by designing sensitive experiments with the GAMIL. The results indicate that strong heating in the Kuroshio Current region to the south of Japan in winter can cause the eastward shift of the East Asian trough, intensifying of the cold high pressure in the continent, Aleutian low pressure and western Pacific subtropical high, as a result, leads to strong winter monsoon circulation. Corresponding to variations of the geopotential height field, cyclonic difference circulation over the northeastern Pacific Ocean and anticyclonic difference circulation over the mid-high latitudes adjacent to the ocean are observed. The anomaly of geopotential height over the low latitudes south of the EAWJ is positive and the opposite situation occurs to the north of the EAWJ. Therefore, the meridional difference of air temperature is accordingly enlarged and the EAWJ is intensified.

**Key words** Kuroshio Current region, anomalous surface heating, East Asian Subtropical Westerly Jet (EAWJ), numerical study.

## 1 引言

东亚副热带西风急流通常与高空锋区相对应,而锋区内扰动的发展和风暴的生成往往会带来降水,东亚大气环流的季节转换、我国大部分地区雨季的开始和结束都与东亚副热带西风急流位置的南北移动以及强度变化有着密切的关系(叶笃正等, 1958; 陶诗言等, 1958; 况雪源等, 2006; 杨莲梅等, 2007)。大量研究表明,对流层上层西风急流变化与大气加热场有密切联系,例如, Krishnamurti (1961, 1979) 发现三个热带加热中心和冬季北半球的三个西风急流中心有明显的联系。Lau et al. (1987) 发现热带中西太平洋海表加热变化将导致全球大气环流的显著变化。Yang et al. (1990) 进一步研究发现,夏季热带地区的对流加热可以跨赤道影响另一个半球冬季急流的位置和强度,且急流的年际变化与 ENSO 现象有密切联系。董敏等 (1999) 研究表明西风急流中心的季节变化和热带加热场的季节变化是紧密联系在一起。Hou (1998) 通过集合试验结果表明,由于热带加热位移而引起的越赤道 Hadley 环流增强及极向扩展将导致副热带及中纬地区冬季西风的加速。以上的研究多关注于热带地区加热异常的影响,近年来,中纬度副热带地区特别是青藏高原加热异常对上层环流的影响也越来越引起人们的重视。钱永甫等 (1988) 研究发现,如果在夏季忽略青藏高原加热作用,对流层上层的巨大反气旋就不能模拟出来。Zheng et al. (1995) 对青藏高原在东亚的初夏环流季节转换过程中的作用进行研究,结果表明高原热力作用在初夏明显加速了南支西风急流的北跳,而

纯动力的作用却显著减弱了南支西风急流的北跳,甚至使北跳后的急流南退。王安宇等 (1983) 和王谦谦等 (1984) 的研究指出,冬季大地形的动力作用对东亚大气环流的影响比热力作用重要,而夏季则是大地形的热力作用比动力作用重要。巩远发和纪立人 (1998) 用一个全球谱模式对西太平洋副热带高压西伸北进的中期天气过程中青藏高原热源的作用进行研究,认为高原的热力作用主要表现在对副高北侧锋区的形成、锋区强度以及与锋区对应的对流层中上层西风急流的强度有较大的影响,有高原热力作用时,锋和西风急流的强度都强,反之则很弱。

由此可见,非绝热加热在决定东亚副热带西风急流的位置和强度等方面起着很重要的作用,我们通过对地表加热场与高空西风急流的耦合变化特征研究表明,西太平洋黑潮暖流区加热异常将会引起冬季高空西风急流强度的变化响应,青藏高原表面感热是夏季急流强度和位置的关键影响因子,并基于诊断结果及热力适应理论,解释了东亚地表加热场对对流层上层西风急流影响的可能机理(况雪源等, 2007)。为了进一步验证此结论,本文利用对东亚大气环流模拟性能较好的全球大气模式,通过设计不同的数值试验方案,研究冬季西太平洋暖流区表面加热异常东亚副热带西风急流的影响。

## 2 资料和模式简介

选用的模式为中国科学院大气物理研究所 (IAP) 大气科学与地球流体力学数值模拟国家重点实验室 (LASG) 研制开发的新一代全球大气格点模式 GAMIL1.0 (Grid-Atmospheric model of

IAP LASG)。模式基于 NCAR 的 CAM2 参数化方案及一个新的动力学框架 (Kiehl et al., 1996; Wang et al., 2004), 这个新的动力学方案充分考虑了斜压大气原始静力平衡方程的积分属性及重力波传播特征, 包括了一个等面积权重网格以减弱极地高频波的影响, 一个半解析和扣除补偿方案以有效模拟纬向重力波并使得模式在极地区域计算稳定, 并采用二次线性守恒的完全离散有限差分方法来解原始方程组。不仅如此, GAMIL 的分辨率可根据计算机性能进行调整而不需要任何过滤及平滑仍能保持稳定, 特别地, 一些重要的积分属性仍能保持不变, 例如: 水平平流及垂直平流算子的反对称性、标准层结近似下的质量守恒和能量守恒。对水汽方程的求解采用了 Yu (1994) 的两步保形平流方案。模式垂直方向为 26 层, 为  $p-\sigma$  混合坐标, 本文中选取水平分辨率为  $2.8125^\circ$  (经度)  $\times$   $2.8125^\circ$  (纬度)。模式详细说明参见文献 (Wang et al., 2004)。

我们选用来自 LASG 的 1980~1998 年共 19 年的积分资料, 检验模式对东亚大气环流型和季节变化的模拟性能。模式积分过程如下: 首先用 1979~2001 年多年月平均海温及海冰资料驱动大气模式进行 15 年的起转过程 (spin-up) 积分, 然后按照气候模式诊断和比较中心 (PCMDI) 指定的方式生成 1978 年 (过渡年) 的逐月海温海冰积分一年, 最后用 PCMDI 提供的 1979~2002 年的逐月海温海冰资料驱动进行正式积分。选取 NCEP/NCAR 再分析月平均资料作为对比资料 (Kalnay et al., 1996), 包括风场、气温场、垂直速度场、地面气压场、地表气温、感热通量、潜热通量场等要素, 时间为 1961~2000 年共 40 年, 其中等压面资料垂直分辨率为 12 层, 水平分辨率为  $2.5^\circ$  (经度)  $\times$   $2.5^\circ$  (纬度), 地表通量资料水平分辨率为 T62 的高斯网格。

### 3 GAMIL 对东亚地区大气环流模拟性能检验

#### 3.1 东亚大气环流型态模拟

从 GAMIL 模拟的冬季东亚大气环流图上可以得知, 在 100 hPa 及 500 hPa 位势高度场上, 位于中高纬地区的东亚大槽位置模拟得较好; 海平面气压场上, 大陆冷高压及北太平洋上阿留申低压的位

置及强度都模拟得较好 (图略)。位于对流层低层的 850 hPa 风场上, 大陆冷高压反气旋式环流、阿留申低压气旋式环流、西太平洋副热带高压反气旋式环流及越赤道气流都在模式中成功再现, 还可看到, 东亚海陆交界区域上空较强的偏北气流体现了东亚冬季风的明显特征 (图 1a)。在 200 hPa 风场上, 与东亚大槽后相对应的西北气流及位于太平洋上空的西南气流, 加上中纬地区西风带, 三支气流在西太平洋上空汇集, 形成明显的西风急流区 (图 1b)。图 1c 上 200 hPa 纬向风的分布特征主要体现在在日本南部西太平洋上空的西风急流, 这与我们用再分析资料得到的结果是非常吻合的。将模拟结果与 NCEP/NCAR 再分析资料对比得知, 模拟的东亚大槽稍偏强, 位置偏南, 南亚高压和阿留申低压亦略偏弱。但环流的形势对应较好, 总的来看, GAMIL 对东亚地区冬季大气环流型态的模拟是比较成功的。

从 GAMIL 模拟的夏季大气环流型态的分布状况来看, 850 hPa 的风场体现了东亚夏季风环流特征, 从印度洋转为偏西风的越赤道气流、南海地区的越赤道气流及西太平洋副高西侧的偏南气流在中国东部地区汇合, 形成东亚夏季风气流, 控制了中国大部分地区, 是东亚夏季降水的主要影响系统 (图 1d)。200 hPa 风场明显与南亚高压系统相对应, 体现为控制中低纬地区的巨大的反气旋环流 (图 1e)。从我们关心的 200 hPa 纬向风场的分布特征来看 (图 1f), 东风北推至  $30^\circ\text{N}$  左右, 西风急流明显减弱, 中心移至青藏高原, 这都与我们分析的结果一致。表明 GAMIL 对夏季东亚大气环流的模拟亦是成功的, 这也是我们选用 GAMIL 来研究地表加热场对急流影响的重要原因。

#### 3.2 季节变化模拟

在上面分析中, 我们得知 GAMIL 对冬、夏季东亚地区大气环流型态模拟都比较成功, 那么该模式对我们关心的研究对象——西风急流的季节变化模拟效果如何? 在诊断结果中提到的影响西风急流的表面加热关键区——西太平洋黑潮暖流区及青藏高原的热状况的模拟情况又如何? 首先, 从急流中心位置及强度的季节变化 (图 2) 来看, 急流中心经度位置在秋、冬季及盛夏季节模拟得较好, 但在春夏过渡季节有较大的误差: 模拟的急流中心 3 月份在  $135^\circ\text{E}$ , 但 4~6 月则很快地西移, 模拟的最大

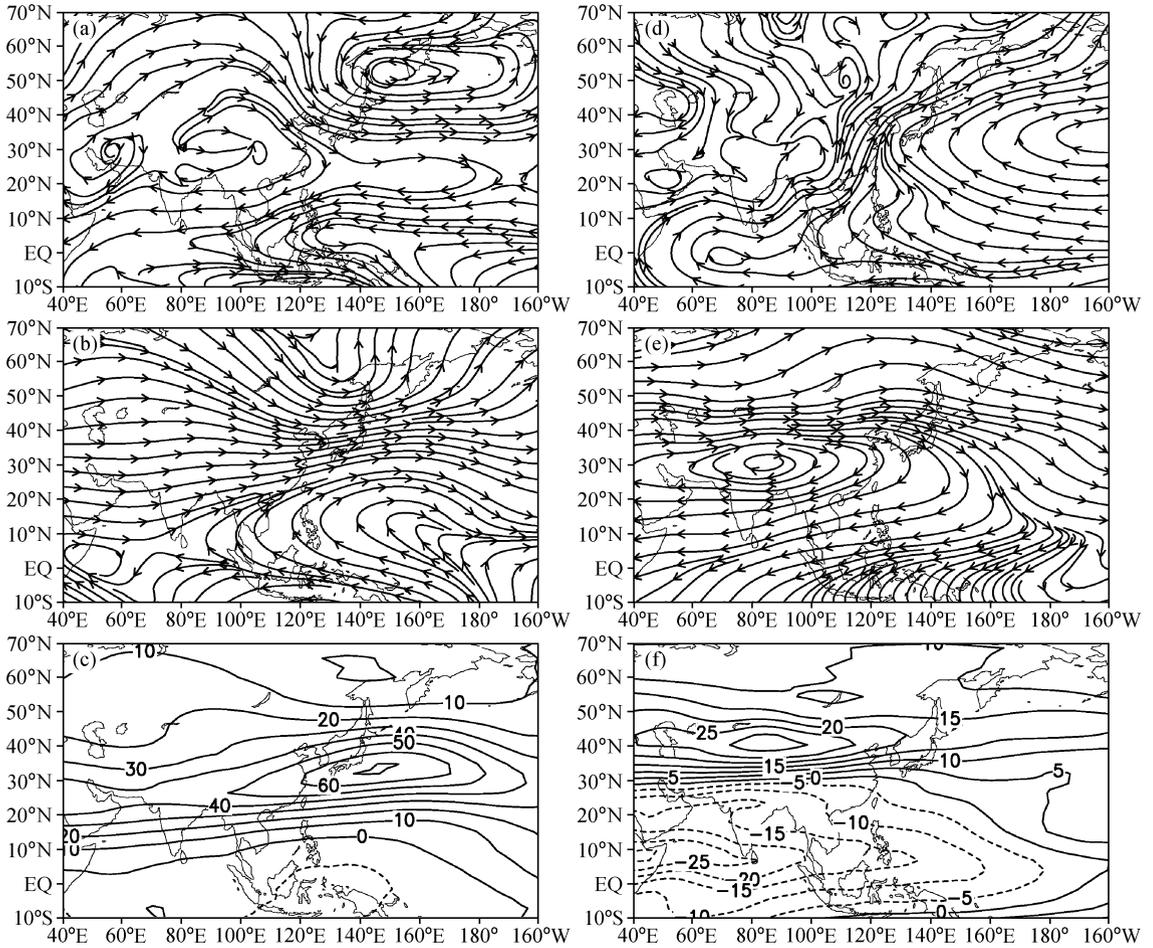


图1 GAMIL对冬季(a~c)和夏季(d~f)东亚大气环流型态的模拟情况(单位: m/s): (a,d) 850 hPa 流场; (b,e) 200 hPa 流场; (c,f) 200 hPa 纬向风场

Fig. 1 The performance of GAMIL in simulating East Asian general circulation patterns in winter (a-c) and summer (d-f): (a, d) 850-hPa streamline field; (b, e) 200-hPa streamline field; (c, f) 200-hPa zonal wind

急流中心在4月即出现在中国东部大陆上空。从文献(Zhang et al., 2006)中得知,由于青藏高原直接对高层大气产生强大的非绝热加热作用,春夏过渡季节东亚上空出现了两个西风急流核,一个在西太平洋上空,另一个在青藏高原上空,前者随时间减弱,后者随时间加强。由于我们所选的急流中心只是追踪最大西风中心,所以当青藏高原上的西风强于西太平洋上空,急流中心即出现“西移”。所以模拟结果出现急流中心“西移”的提前可能是由于模式中青藏高原表面的加热偏强,这可能与模式的陆面参数化过程有关。从急流中心的纬度变化状况来看,冬季和春季模拟情况较好,而在夏季和秋季则有一定的误差: NCEP/NCAR资料的西风急流中心于8月份达到其最北位置,而模式模拟结果在7

月达到一个次北的位置,但在8月份南退,9月份再北进并于10月达到最北的位置。从中心风速的变化来看,模拟的急流强度整体来说稍弱于再分析资料,但季节变化还是模拟得较为成功。

对西太平洋黑潮暖流区(25°N~40°N, 120°E~150°E)表面热通量的模拟与再分析资料吻合得较好(图3),特别是感热通量,除在7~9月略偏大,10月到第二年1月略偏小之外,整个季节变化模拟得非常成功,而潜热加热在4~12月模拟值较再分析资料稍偏小。对青藏高原(27.5°N~37.5°N, 80°E~100°E)表面热通量的季节变化模拟,潜热要好于感热,模拟的高原表面感热通量在整年均均为正值,没有体现出高原冬季为冷源、夏季为热源的季节变化特征,这使得模式中青藏高原的加热作用

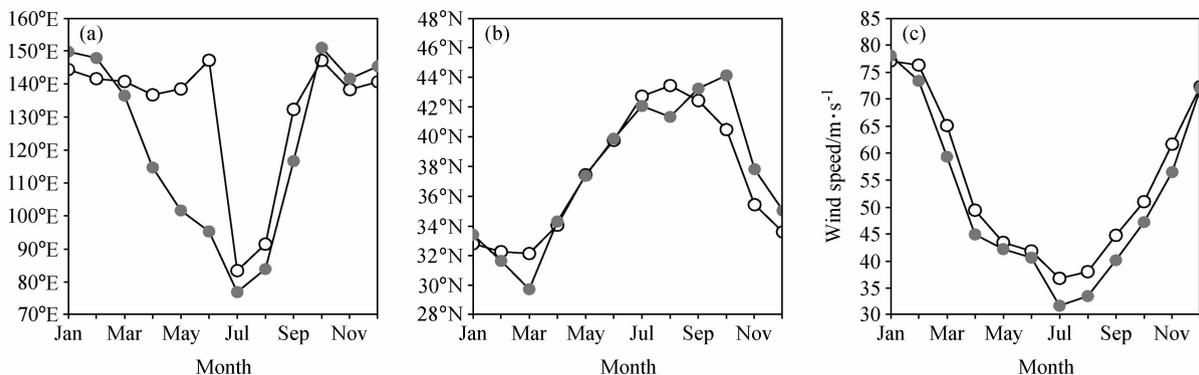


图2 NCEP/NCAR (空心圆) 和 GAMIL 模拟 (实心圆) 急流中心的季节变化: (a) 经度位置; (b) 纬度位置; (c) 中心纬向风速  
Fig. 2 Seasonal evolutions of (a) longitude, (b) latitude and (c) zonal wind speed of the East Asian subtropical westerly jet (EAWJ) center from NCEP/NCAR data (empty dot lines) and GAMIL (solid dot lines)

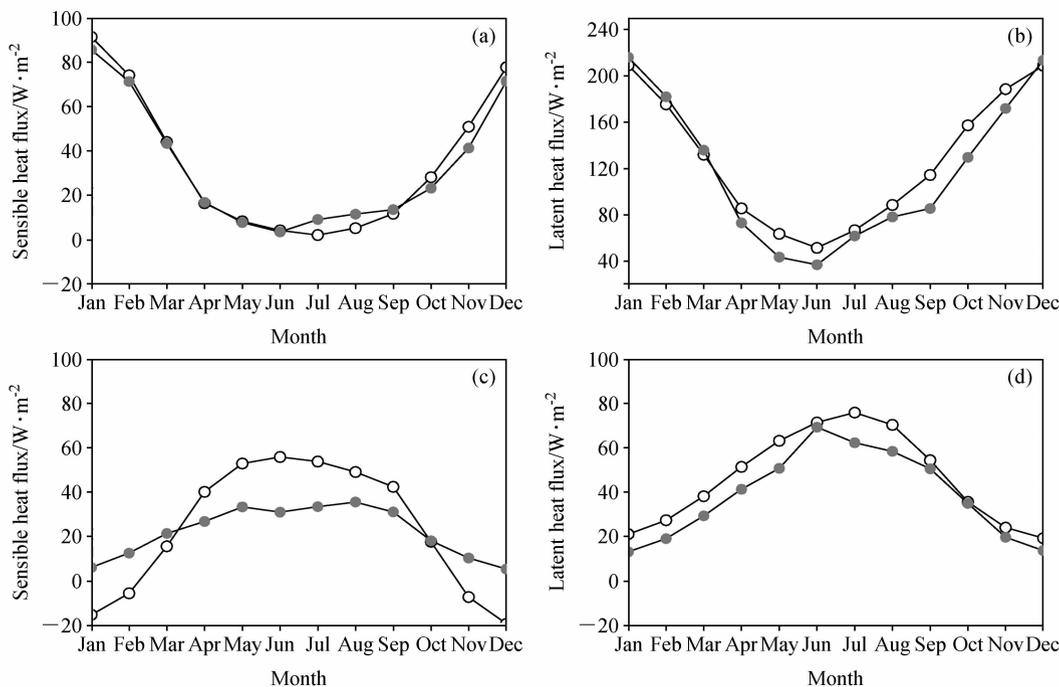


图3 NCEP/NCAR (空心圆) 及 GAMIL 模拟 (实心圆) 西太平洋黑潮暖流区 (a,b) 和青藏高原区域 (c,d) 的表面热通量变化: (a,c) 地表感热通量; (b,d) 潜热通量

Fig. 3 Seasonal variation of surface heat fluxes in (a, b) the Kuroshio Current region and (c, d) the Tibetan Plateau from NCEP/NCAR data (empty dot lines) and GAMIL (solid dot lines): (a, c) Sensible heat flux; (b, d) latent heat flux

较早出现, 部分解释了高层西风急流中心提前“西移”的原因。而表面潜热通量虽然较再分析资料稍偏弱, 且峰值出现在 6 月, 与再分析资料中的 7 月有差异, 但基本模拟出了潜热的季节变化特征。由于模拟对急流的模拟冬季好于夏季, 加上人们对青藏高原热力作用已作过大量工作, 所以本文只对西太平洋黑潮暖流区表面热通量异常对急流的影响进行数值试验及研究。

## 4 冬季西太平洋暖流区加热异常对西风急流影响的数值研究

### 4.1 数值试验方案

由上面的分析得知, 总体来说, GAMIL 较为成功地再现了东亚大气环流及地面要素和热量场的型态及季节变化, 这是我们运用该模式进行敏感性试验的基础。诊断分析的结果表明, 冬季西太平

洋黑潮暖流区表面热通量的异常通过海气相互作用及热力适应理论,引起大气环流场的响应,是影响冬季东亚副热带西风急流强度变化的关键海区。我们利用 GAMIL 模式设计相应的数值试验对此结论进行验证,试验方案设计如下:

CTNL: 控制试验。首先采用 1 月多年平均大气状态为初始场,利用有季节变化的气候态海温场及海冰场作为外强迫场,从 1 月 1 日开始积分至 10 月 31 日。再以积分所得 10 月 1 日大气状态为初始场,从 10 月 1 日积分至第二年的 3 月 2 日,选取 12 月至第二年 2 月的平均场作为控制实验对冬季的模拟结果。

HT+: 加热正异常试验。与控制试验一样,从头年的 10 月 1 日积分至第二年 3 月 2 日,但冬季(12~2 月)积分时段西太平洋黑潮暖流区(选取 25°N~40°N, 120°E~150°E)海表向大气的感热及潜热通量输送在原来基础上增大 30% (约 1.5 倍标准差的异常)。

HT-: 加热负异常试验。与 HT+ 一样只是冬季(12~2 月)西太平洋黑潮暖流区海表向大气的感热及潜热均减小 30%。

从西太平洋黑潮暖流区加热正异常 (HT+) 及负异常 (HT-) 试验与控制试验 (CTNL) 表面热通量的差异图上可以看到 (图略), 在我们所给定加热异常的区域范围, 海表感热与潜热通量有了显著的变化: HT+ 试验中, 二者的总加热效应与控制试验相比增大了 50~140 W/m<sup>2</sup> 左右, 由于原场加热分布的不均匀性, 所以我们按一定比例给出的异常亦具有空间分布的不均匀性。在结果分析中将 HT+ 与 CTNL 的结果相减即得到黑潮暖流区加热正异常对大气环流的影响; 而 HT- 与 CTNL 的结果相减则得到黑潮暖流区加热负异常对大气环流的影响。为了将这种影响放大, 我们主要探讨 HT+ 与 HT- 结果的差异。

## 4.2 结果分析

### 4.2.1 对高度场及海平面气压场的影响

图 4 给出了加热正异常 HT+ 与加热负异常 HT- 试验的位势高度及海平面气压差值分布。从 100 hPa 的差值场来看, 40°N 以北的中高纬地区基本为负值区, 最大负中心位于北太平洋上空, 中心值达到 -80 gpm 以上, 表明黑潮暖流区加热的正异常将导致上层中高纬度高度场的偏低, 东亚大槽

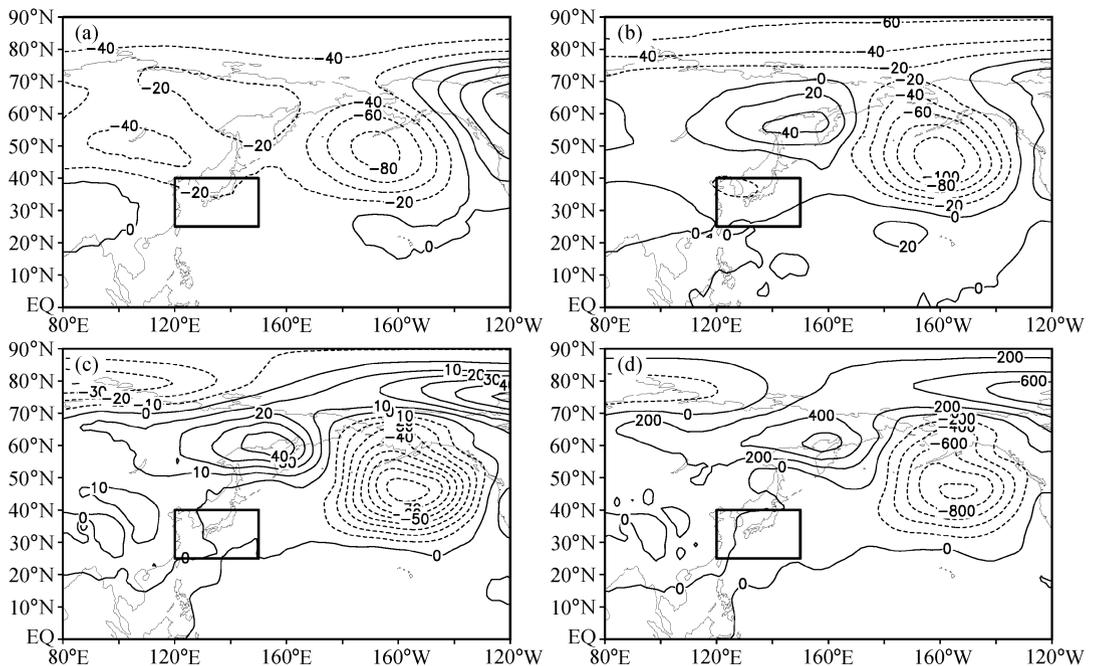


图 4 HT+ 与 HT- 试验位势高度场 (a~c, 单位: gpm) 及海平面气压 (d, 单位: hPa) 差异: (a) 100 hPa; (b) 500 hPa; (c) 850 hPa。矩形框为加热异常区域

Fig. 4 The geopotential height differences (gpm) at (a) 100 hPa, (b) 500 hPa and (c) 850 hPa and (d) the sea level pressure difference (hPa) between experiments HT+ (with positive anomalous heating) and HT- (with negative anomalous heating). The rectangle stands for the anomalous heating area

增强。而从 500 hPa 的差异图上可看到, 形势分布与 100 hPa 不太一致, 其中北太平洋上空为负差异, 中心值达  $-100$  gpm, 东亚大陆为正差异区, 中心位于高纬的东西伯利亚地区, 这种分布表明加热的正异常将引起东亚大槽东移。从 850 hPa 及海平面气压的差异分布来看, 加热的正异常将导致大陆冷高压及北太平洋上阿留申低压均得到加强, 且位置稍向东移, 同时位于低纬太平洋上的西太平洋副高亦增强, 这种分布形势将使得东亚冬季风得到加强。

我们按照 500 hPa 上差异大值区作出 HT+ 与 HT- 的位势高度差异的垂直剖面 (图 5)。从沿  $40^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$  平均的垂直剖面来看, 与上面的分析一致, 差异最明显的地方出现在北太平洋上, 从低层到高层都为负差异区, 差异中心位于  $300\sim 200$  hPa 高度, 在  $160^{\circ}\text{E}$  以西的中高纬大陆上, 对流层中低层为正差异值区, 而对流层高层为负差异区

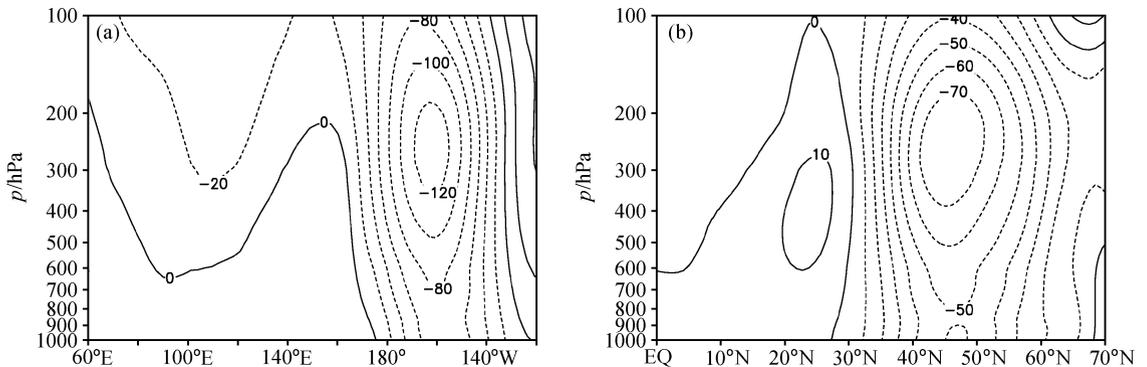


图 5 HT+ 与 HT- 试验位势高度场差异 (单位: gpm): (a) 沿  $40^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$  平均垂直剖面; (b) 沿  $180^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{W}$  平均垂直剖面

Fig. 5 The vertical cross sections of geopotential height differences (gpm) between experiments HT+ and HT- averaged over (a)  $40^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$  and (b)  $180^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{W}$

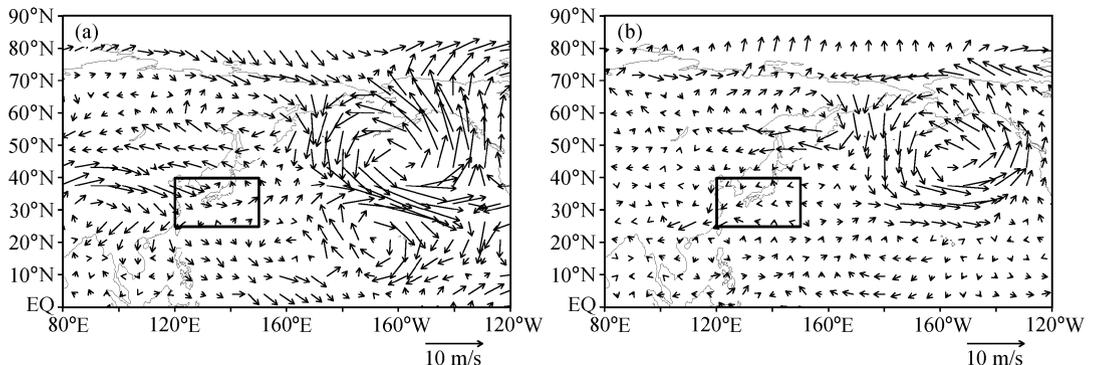


图 6 HT+ 与 HT- 试验风场差异: (a) 200 hPa; (b) 850 hPa。矩形框为加热异常区域

Fig. 6 The wind vector differences between experiments HT+ and HT- at (a) 200 hPa and (b) 850 hPa. The rectangle stands for the anomalous heating area

( $140^{\circ}\text{E}\sim 170^{\circ}\text{E}$  的大陆海洋毗邻地区, 正差异可达到 300 hPa 以上), 但差异远不如海洋上显著。即环流对加热异常响应的最明显区域并不在加热异常区的正上空, 而是在其下游地区, 如何理解这种现象? 这有可能是由于冬季强大西风带的平流效应, 黑潮暖流区的加热异常效应主要体现在其下游的海洋上空。从  $180^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{W}$  的剖面来看,  $10^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$  以南的低纬地区为正差异区, 而  $30^{\circ}\text{N}\sim 65^{\circ}\text{N}$  左右的中高纬为明显负差异区, 这种分布将导致  $30^{\circ}\text{N}$  地区明显的经向气压梯度的加大, 这与下面所看到的急流增强是相对应的。

#### 4.2.2 对风场的影响

根据热力适应理论, 表面加热异常将会引起环流的响应, 从图 6 给出的 HT+ 与 HT- 试验的 200 hPa 及 850 hPa 的流场差异分布来看, 这点得到了进一步的验证。基于热力适应的理论 (吴国雄等, 2002), 表面加热的正异常, 将会产生较强的反气

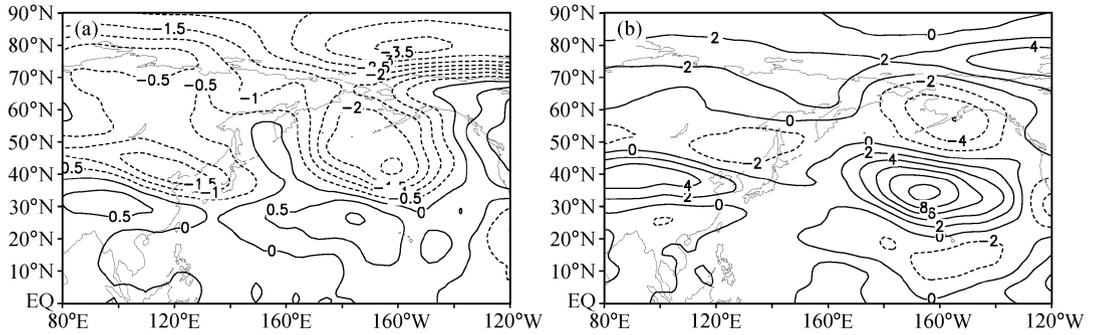


图7 HT+与HT-试验 500 hPa 气温场 (a, 单位: K) 和 200 hPa 纬向风场 (b, 单位: m/s) 差异

Fig. 7 The differences of (a) 500-hPa air temperature (K) and (b) 200-hPa zonal wind (m/s) between experiments HT+ and HT-

旋涡源, 根据位涡守恒公式, 加热区上空将出现异常的偏北气流, 其西侧为反气旋异常环流, 东侧为气旋异常环流, 从而低层的大陆冷高压及对流层中上层的东亚大槽亦随之增强。从图 6 上看到, 东北太平洋上出现明显的气旋差值环流, 而在中高纬大陆海洋交界地区出现反气旋式差值环流, 还可以看到, 由于西风带的平流作用, 出现的位置偏东。这使得位于东亚大槽南侧下游的西风带气流出现明显的西风差值。在大陆 ( $30^{\circ}\text{N}\sim 40^{\circ}\text{N}$ ,  $80^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$ ) 处也有较明显的西风差值, 说明急流中心上游的西风亦加强了。在急流中心所在位置亦为西风差值, 表明西风急流有所加强。

#### 4.2.3 对温度场及西风急流的影响

从风场的变化中已证实表面加热异常对环流的影响作用, 为了再从热成风这个角度来验证这个问题 (Kuang et al., 2005), 图 7 给出了 HT+ 与 HT- 试验 500 hPa 温度场及 200 hPa 纬向风场的差异分布。从温度场来看,  $30^{\circ}\text{N}$  以南的低纬地区为正差异区, 以北的地区为负差异区, 这种分布将加大  $30^{\circ}\text{N}$  左右的经向温度梯度, 使得急流加强。从图 7b 纬向风的差异上这点得到了较好的验证, 在  $28^{\circ}\text{N}\sim 40^{\circ}\text{N}$  左右的西风急流区为明显的西风差异, 但差异大值区则分别出现在太平洋中部上空及大陆上空, 在急流中心所在的日本南部西太平洋上空这种差异则不甚明显, 这可能是由于急流中心变率较小及上面所述的西风带的平流作用所导致的。

所以从上面两个敏感性试验的结果来看, 与诊断分析的结果较为一致, 分别从热力适应理论及热成风的角度进一步验证了黑潮暖流区表面加热异常对急流的影响机理。

## 5 结论

本文在对 GAMIL 模拟东亚地区大气环流型态及季节变化性能检验的基础上, 研究了冬季西太平洋黑潮暖流区加热异常对急流强度的影响, 得出以下结论:

(1) 从模拟结果与 NCEP/NCAR 再分析资料对比得知, GAMIL 对东亚地区冬、夏季大气环流型态的模拟是成功的。冬季东亚大槽、西太平洋上空西风急流、大陆冷高压及阿留申低压都在模式中得到了较好的再现; 模式也较好地模拟了南亚高压、西太平洋副高、大陆低压及越赤道气流等夏季风环流系统。

(2) 从西风急流季节变化的模拟情况来看, 急流中心经度位置在秋、冬季及盛夏季节模拟得较好, 在春夏过渡季节有较大的误差; 急流中心的纬度及中心强度的季节变化模拟较为成功。对西太平洋黑潮暖流区表面热通量季节变化的模拟与再分析资料吻合得较好, 对青藏高原表面热通量的模拟潜热好于感热。

(3) 数值试验结果表明, 西太平洋黑潮暖流区加热正异常将引起东亚大槽偏东、大陆冷高压及北太平洋上阿留申低压均得到加强, 且位置东移, 位于低纬太平洋上的西太平洋副高亦同时增强, 东亚冬季风环流加强。相应地, 东北太平洋上出现了明显的气旋差值环流, 而在中高纬大陆海洋交界地区出现反气旋式差值环流, 同时, 急流区南侧的低纬地区位势高度及温度场为正异常, 而急流北侧的中高纬地区为负异常区, 这种分布将使得急流区经向气压梯度和南北温差加大, 导致急流的增强, 分别从热力适应理论及热成风的角度验证了黑潮暖流区

## 表面加热异常对急流的影响机理。

## 参考文献 (References)

- 董敏, 余建锐, 高守亭. 1999. 东亚西风急流变化与热带对流加热关系的研究[J]. 大气科学, 23 (1): 62-70. Dong Min, Yu Jianrui, Gao Shouting. 1999. Study on the relationships between variation of East Asia westerly jet and tropical convective heating [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 23 (1): 62-70.
- 巩远发, 纪立人. 1998. 西太平洋副热带高压中期变化的数值试验 I. 青藏高原热源的作用 [J]. 热带气象学报, 14 (2): 106-112. Gong Yuanfa, Ji Liren. 1998. Numeric experiment of the mid-term variation of the western Pacific subtropical high. I. The heat source impact of the Tibeteau Plateau [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 14 (2): 106-112.
- Hou A Y. 1998. Hadley circulation as a modulator of the extratropical climate [J]. J. Atmos. Sci., 55: 2437-2457.
- Lau K M, Boyle J S. 1987. Tropical and extratropical forcing of the large-scale circulation: A diagnostic study [J]. Mon. Wea. Rev., 115: 400-428.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77: 437-472.
- Kiehl J T, Gent P R, Bonan G B, et al. 1996. Description of the NCAR Community Climate Model (CCM3), NCAR Tech. Note NCAR/TN-420+STR, 152pp.
- Krishnamurti T N. 1961. The subtropical jet stream of winter [J]. J. Meteor., 18: 172-191.
- Krishnamurti T N. 1979. Compendium of Meteorology, Vol. 2, Part 4: Tropical Meteorology, Rep. 364, World Meteorological Organization, Geneva.
- Kuang Xueyuan, Zhang Yaocun. 2005. Seasonal variation of East Asian subtropical westerly Jet and its association with heating fields over East Asia [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 22 (6): 831-840.
- 况雪源, 张耀存. 2006. 东亚副热带西风急流位置异常对长江中下游夏季降水的影响 [J]. 高原气象, 25 (3): 382-389. Kuang Xueyuan, Zhang Yaocun. 2006. Impact of position abnormalities of the East Asian subtropical westerly jet on summer precipitation in the middle-lower reaches of the Yangtze River [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 25 (3): 382-389.
- 况雪源, 张耀存. 2007. 东亚副热带西风急流与地表加热场的耦合变化特征 [J]. 大气科学, 31 (1): 77-88. Kuang Xueyuan, Zhang Yaocun. 2007. The Characteristics of the coupling variation between the subtropical westerly jet and the surface heating fields over East Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (1): 77-88.
- 钱永甫, 颜宏, 王谦谦, 等. 1988. 行星大气中地形作用的数值研究 [M]. 北京: 科学出版社, 217pp. Qian Yongfu, Yan Hong, Wang Qianqian, et al. 1988. Numeric Study on the Orographic Effect in Planetary Atmosphere [M] (in Chinese). Beijing: Science Press, 217pp.
- 陶诗言, 赵煜佳, 陈晓敏. 1958. 东亚的梅雨与亚洲上空大气环流季节变化的关系 [J]. 气象学报, 29 (2): 119-134. Tao Shiyuan, Zhao Yujia, Chen Xiaomin. 1958. The associations between Meiyu in East Asia and seasonal variation of the general circulation of atmosphere over Asia [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 29 (2): 119-134.
- 王安宇, 胡琪, 秦广言. 1983. 东亚加热场和大地形对大气环流季节变化影响的数值试验 [J]. 高原气象, 2 (1): 30-38. Wang Anyu, Hu Qi, Qin Guangyan. 1983. Numeric study on the impact of heating field and large topography on the seasonal variation of the general circulation over East Asia [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 2 (1): 30-38.
- Wang Bin, Wan Hui, Ji Zongzhen, et al. 2004. Design of a new dynamical core for global atmospheric models based on some efficient numerical methods [J]. Science in China (Ser. A), 47 (Suppl.): 4-21.
- 王谦谦, 王安宇, 李学锋, 等. 1984. 青藏高原大地形对夏季东亚大气环流的影响 [J]. 高原气象, 3 (1): 13-26. Wang Qianqian, Wang Anyu, Li Xuefeng, et al. 1984. The effect of the Tibet Plateau to the general circulation over East Asia [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 3 (1): 13-26.
- 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, 314pp. Wu Guoxiong, Chou Jifan, Liu Yimin, et al. 2002. The Dynamics of the Formation and Variation of Subtropical Anticyclone [M] (in Chinese). Beijing: Science Press, 314pp.
- 杨莲梅, 张庆云. 2007. 夏季东亚西风急流 Rossby 波扰动异常与中国降水 [J]. 大气科学, 31 (4): 586-595. Yang Lianmei, Zhang Qingyun. 2007. Anomalous perturbation kinetic energy of Rossby wave along East Asian westerly jet and its association with summer rainfall in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (4): 586-595.
- Yang S, Webster P J. 1990. The effect of summer tropical heating on the location and intensity of the extratropical westerly jet streams [J]. J. Geophys. Res., 95 (D11): 18705-18721.
- 叶笃正, 陶诗言, 李麦村. 1958. 在六月和十月大气环流的突变现象 [J]. 气象学报, 29 (4): 249-263. Ye Duzheng, Tao Shiyuan, Li Maicun. 1958. The abrupt change of circulation over Northern Hemisphere during June and October [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 29 (4): 249-263.
- Yu R C. 1994. A two-step shape-preserving advection scheme [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 11 (4): 479-490.
- Zhang Yaocun, Kuang Xueyuan, Guo Weidong, et al. 2006. Seasonal evolution of the upper-tropospheric westerly jet core over East Asia [J]. Geophys. Res. Lett., 33, L11708, doi: 10.1029/2006GL026377.
- Zheng Qinglin, Wu Jun. 1995. Numerical study on the dynamic and thermodynamic effects of the Qinghai-Xizang Plateau on the seasonal transition in the early summer in East Asia [J]. Acta Meteorologica Sinica, 9 (1): 35-47.