李忠贤,周天军,孙照渤,等. 2011. GAMIL 模式海气湍流通量参数化方案的改进及其对大气环流年际变率模拟效果的影响 [J]. 大气科 学,35 (2):311-325. Li Zhongxian, Zhou Tianjun, Sun Zhaobo, et al. 2011. Improvement of air - sea turbulent fluxes parameterization scheme in GAMIL model and its impact on simulation of interannual variations of atmospheric circulation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (2): 311-325.

## GAMIL 模式海气湍流通量参数化方案的改进及 其对大气环流年际变率模拟效果的影响

李忠贤1,2 周天军2 孙照渤1 陈海山1 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

**摘 要** 通过引入中尺度对流运动对海表湍流通量的贡献,改进了大气环流模式 GAMIL1.0 的海气湍流通量参数化方案。利用 1979 年 1 月至 2000 年 12 月的观测海温资料驱动 GAMIL1.0 模式,研究了海气湍流通量参数化改进对大气环流年际变化模拟效果的影响。结果表明:采用改进的海气湍流通量参数化方案,模拟的热带海表湍流热通量得到增强,模式对热带降水年际变化的模拟能力得到明显提高,凝结潜热对大气的加热作用更趋合理,模式对冬季 (DJF) 北太平洋地区和夏季 (JJA) 南太平洋中纬度地区大气环流年际变化的模拟能力有显著提高,可以更好地模拟出冬季南方涛动、北太平洋涛动的年际变化和空间分布特征,特别是显著地改善了此前GAMIL1.0 模式存在的模拟的南方涛动强度偏弱的问题。

关键词 GAMIL1.0 模式 海气湍流通量参数化 数值模拟
 文章编号 1006-9895 (2011) 02-0311-15
 中图分类号 P461
 文献标识码 A

## Improvement of Air – Sea Turbulent Fluxes Parameterization Scheme in GAMIL Model and Its Impact on Simulation of Interannual Variations of Atmospheric Circulation

LI Zhongxian<sup>1,2</sup>, ZHOU Tianjun<sup>1</sup>, SUN Zhaobo<sup>1</sup>, CHEN Haishan<sup>1</sup>, and NI Donghong<sup>1</sup>

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

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

**Abstract** The parameterization scheme (GAMIL scheme) of air – sea turbulent fluxes in the GAMIL1. 0 model is improved by considering the contribution of the mesoscale convection to the sea surface fluxes. The new parameterization scheme is named GAMIL\_rev scheme. The interannual variability of general circulation is simulated by the GAMIL1. 0 model with the original parameterization scheme (GAMIL scheme) and GAMIL\_rev scheme of air – sea turbulent fluxes, where the model is driven by the observational SST data from January 1979 to December 2000.

**收稿日期** 2010-01-27, 2010-11-05 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40905045,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 (LASG)开放课题,江苏省 "333 高层次人才培养工程"项目

作者简介 李忠贤,男,博士,讲师,研究方向:海气相互作用及短期气候预测。E-mail: lizhongxian@nuist.edu.cn

312

Results show that, using GAMIL \_ rev scheme, the simulated tropical sea surface turbulent heat fluxes are strengthened, and the simulating capability of interannual variability of precipitation in the tropics is significantly improved, where the condensation latent heat released by precipitation is simulated more reasonably. The reasonable heating significantly improves the simulations of the interannual variability of general circulation, especially over the North Pacific in winter (DJF) and the middle-latitude South Pacific in summer (JJA). The interannual variability and spatial patterns of the Southern Oscillation (SO) and the North Pacific Oscillation in winter are represented much better by the GAMIL \_ rev scheme than by the GAMIL scheme. Especially, the weak intensity of SO simulated by the GAMIL1. 0 model is significantly strengthened by considering the enhancement of sea surface fluxes contributed by the mesoscale convection.

Key words GAMIL1.0 model, air-sea turbulent fluxes parameterization, numerical simulation

## 1 引言

在大气环流模式中如何准确描述海洋表面热通 量是非常关键的,尤其是在西太平洋暖池、东太平 洋冷舌、ITCZ 及信风带等关键区域(张强等, 2001)。在大气环流模式中,由于受到气象要素时 空分辨率的制约,通常是根据整体空气动力学方法 来计算海气界面的感热、潜热和动量通量(赵鸣, 2000;赵鸣和曾旭斌,2000)。整体空气动力学方 法基于近地层 Monin-Obukhov 相似理论 (Monin and Obukhov, 1954), 它适用于定常、水平均匀 的下垫面条件。然而,观测到的大尺度网格内的中 尺度对流活动将导致水平风速等发生不均匀变化, 后者有利于局地湍流通量的增加(Saxen and Rutledge, 1998),这种由中尺度对流运动引起的海表 湍流通量增加通常被称为"中尺度加强"(张强等, 2001)。观测分析表明,由中尺度对流运动引起的 月平均海面热通量约占总量的10%,在赤道西太 平洋暖池和其他主要降水带,当风速较弱且多变 时,甚至可占总量的 30% 以上 (Ledvina et al., 1993)。根据 TOGA 浮标观测资料, Esbensen and McPhaden (1996) 发现水汽蒸发量的中尺度加强 可以占到总蒸发量的 30%,并指出水汽蒸发量的 中尺度加强主要是由于中尺度风速变化引起的;当 海表风速低于3m/s时,海气湍流通量交换主要取 决于对流运动。因此,在大尺度模式的海气湍流通 量参数化方案中考虑中尺度加强作用是非常必要的 (Mondon and Redelsperger, 1998).

Miller et al. (1992)的研究表明,当风速低于 5 m/s时,欧洲中期天气预报中心(ECMWF)模 式对于海气湍流通量参数化非常敏感。考虑自由对 流运动对海气湍流通量的影响后,ECMWF模式 对冬、夏季降水分布和印度季风环流特征的模拟效 果有明显改善,可以更好地模拟出大气环流的年际 变化和季节内变化(Miller et al., 1992; Palmer et al., 1992)。Slingo et al.(1994)和 Ju and Slingo(1995)的研究也表明,在气候模式中考虑中尺 度加强作用对气候模拟非常重要。研究表明,在 CAM3模式中引入中尺度加强作用后,模式对冬 夏季大气环流年际变化的描述能力有了很大提高 (李忠贤, 2008;李忠贤等, 2009)。

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(IAP LASG)长期致力于气候系统模式的发展,其大气环流模式GAMIL(Grid Atmospheric Model of IAP LASG),被广泛地应用于东亚气候年代际变化(Zhou et al., 2009c)、亚澳季风年际变率(Zhou et al., 2009a, 2009b)、20世纪气候变化(李立娟等, 2007; Kucharski et al., 2009)、西风急流(况雪源等, 2009)、东亚冬季风(Yang et al., 2007)、印度季风(Kucharski et al., 2009)等的模拟研究。研究发现,GAMIL1.0模式存在南方涛动指数对 Niño3 区海温响应偏弱的问题(Scaife et al., 2009)。本文尝试通过在 GAMIL1.0模式的海气湍流通量参数化方案中引入中尺度加强作用,改进该模式对大气环流年际变化的模拟能力。

# 2 GAMIL1.0 模式海气湍流通量参数化方案及其改进

GAMIL1.0模式是中国科学院大气物理研究 所LASG发展的一个大气环流格点模式,模式垂 直方向为26层,为σ坐标,本文选取水平格点分 辨率为60×128,约2.8°(经度)×2.8°(纬度)。模 式采用一个新的动力学框架,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 响以及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求解原始方 程组(王斌和季仲贞,2006)。对水汽方程的求解采 用了两步保形平流方案(Yu,1994)。GAMIL1.0 模式的物理过程大多采用 NCAR CAM2 (Community Atmospheric Model, Version 2) 中的物理方 案,其中包括耦合了 NCAR 的陆面模型 (Community Land Model) (Collins et al., 2003)。

GAMIL1.0模式采用整体空气动力学方法计 算海气界面的动量、感热和潜热通量(Collins et al., 2003),即

$$\tau = \rho C_{\rm D} U^2, \qquad (1)$$

 $H = -\rho c_{p} C_{\rm H} (\theta_{\rm a} - \theta_{\rm s}) U, \qquad (2)$ 

$$E = -\rho L_{\rm e} C_{\rm E} (q_{\rm a} - q_{\rm s}) U, \qquad (3)$$

其中,  $\tau$  为由上向下的动量通量; H 为感热通量; E 为潜热通量;  $C_D$ 、 $C_H$ 、 $C_E$ 分别是动量、感热和 潜热通量的整体交换系数,依赖于大气稳定度和动 量、热量以及水汽粗糙度长度; U 为模式最底层大 气的水平风速;  $c_p$  为空气定压比热容;  $\rho$ 、 $\theta_a$ 和  $q_a$ 分别为模式最底层大气的空气密度、位温和比湿;  $\theta_s$ 和  $q_s$  为海表温度  $T_s$ 的位温和饱和比湿;  $L_e$  为 蒸发潜热。

参照 Zeng et al. (2002) 提出的方法,本文通 过对表面风速的修正(Brunke et al., 2003),将中 尺度加强作用引入到 GAMIL1.0 模式中,以改进 其海气湍流通量参数化方案。具体做法如下:

在公式(2)、(3)中将表面风速U更换为S, 公式(1)中U<sup>2</sup>更换为US。S= $\sqrt{U^2+U_g^2}$ ,其中  $U_g=\sqrt{(U_{gb})^2+(U_{gr})^2}$ 。 $U_{gb}$ 、 $U_{gr}$ 分别为由边界层 自由对流和降水深对流运动引起的对流性阵风 (Mondon and Redelsperger, 1998; Redelsperger et al., 2000),且

$$\begin{split} U_{\rm gb} &= \beta \Big( g \, \frac{z_{\rm i}}{\theta_{\rm v}} \, \overline{w' \theta'_{\rm v}} \Big)^{1/3} \,, \\ U_{\rm gr} &= \lg (1 + 67R - 0.48R^2) \,. \end{split}$$

在模式积分过程中,当模式网格点上最底层大气处于不稳定状态时,取 $U_{g} = \sqrt{(U_{gb})^{2} + (U_{gr})^{2}};$ 当模

式最底层大气处于稳定状态时,取Ug=0。

为了讨论方便,本文将改进前、后的GAMIL1.0模式的海气湍流通量参数化方案分别简称为GAMIL方案和GAMIL\_rev方案。从GAMIL1.0模式本身携带的大气初始场开始,采用由气候模式诊断和比较计划(Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison,简称PCMDI)提供的1979年1月至2000年12月逐月观测的海温和海冰资料驱动模式,进行两组数值试验,试验中海气湍流通量参数化分别采用GAMIL 方案和GAMIL\_rev方案。

观测资料有:(1)欧洲中期天气预报中心再分 析资料(ERA40),包括1979年1月至2000年12 月逐月海平面气压场及500hPa位势高度场。为了 便于比较,利用双线性插值方法,将模拟结果插值 到2.5°×2.5°的网格点上,与ERA40资料的分辨 率一致。(2)CMAP(the Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation)月平均降水 资料,时间跨度为1979年1月至2000年12月, 分辨率为2.5°×2.5°。文中冬季和夏季分别指北半 球冬季(DJF)和北半球夏季(JJA),冬季指上年 12月~当年2月(如1980年冬季指1979年12 月~1980年2月),其中1979年冬季为1979年 1~2月。

## 3 冬季 (DJF) 大气环流年际变化的 数值模拟

#### 3.1 冬季海平面气压场

图1给出了GAMIL 方案和GAMIL\_rev方 案模拟的冬季海平面气压(SLP)与ERA40资料 的相关系数。由图1可见,GAMIL\_rev方案模拟 的热带太平洋和北太平洋SLP年际变化好于 GAMIL方案,尤其是在热带东太平洋和东北太平 洋地区。GAMIL方案模拟的冬季热带东太平洋 SLP与ERA40资料的相关系数为0.6左右(图 1a),GAMIL\_rev方案模拟的该区域SLP与 ERA40资料的相关系数达0.8左右(图1b)。 GAMIL方案模拟的东北太平洋SLP与ERA40资料的相关系数为0.2~0.4,未通过0.05信度的显 著性检验;而GAMIL\_rev方案模拟的结果与 ERA40资料的相关系数超过了0.4,最大相关系 数为0.6,通过0.01信度的显著性检验。



图 1 ERA40 资料冬季(DJF)海平面气压与模拟结果的相关系数:(a)GAMIL 方案模拟结果;(b)GAMIL\_rev 方案模拟结果。圆点 区域表示相关系数大于等于 0.4

Fig. 1 Correlation coefficients of winter (DJF) sea level pressure (SLP) between ERA40 data and model simulations (areas with dots denote the correlation coefficients larger than and equal to 0.4): (a) GAMIL scheme simulation; (b) GAMIL\_rev scheme simulation

#### 3.2 冬季 500 hPa 位势高度场

图 2 给出了模拟结果与 ERA40 资料冬季 500 hPa 位势高度场的相关系数。对比图 2a 和 2b 可见, GAMIL\_rev 方案模拟的冬季北太平洋至北大西洋 500 hPa 位势高度年际变化明显优于 GAMIL 方 案。在北美大陆上,GAMIL 方案模拟的 500 hPa 位势高度与 ERA40 资料的相关系数为 0.2 左右, 而 GAMIL\_rev 方案模拟结果与 ERA40 资料的相 关系数为 0.4~0.6。在北大西洋北部,GAMIL\_ rev 方案模拟的 500 hPa 位势高度与 ERA40 资料 的相关系数为 0.4 左右,而 GAMIL 方案模拟结果 与 ERA40 资料为负相关关系。此外,GAMIL\_ rev 方案模拟的北太平洋中部 500 hPa 位势高度与 ERA40 资料的相关系数也明显高于 GAMIL 方案 模拟结果。然而,在改进参数化方案之后,南半球 中高纬度局部区域也存在模拟结果变差的情况。

#### 3.3 冬季南方涛动年际变化的模拟

图 3 给出了模拟结果和 ERA40 资料的 1979~ 2000 年冬季南方涛动指数 (SOI) 的年际变化。在 观测分析中,南方涛动指数 (SOI) 被定义为 Tahiti 岛和 Darwin 岛的标准化海平面气压距平差, 本文模式结果和再分析资料的 SOI 采用与 Tahiti 岛 (17°33'S,149°37'W) 和 Darwin 岛 (12°23'S, 130°44'E) 地理位置最接近的两个格点进行定义, 即 SOI = SLP\* (17.5°S,150°W) – SLP\* (12.5°S, 130°E),其中 SLP\* 为标准化海平面气压距平。由 图 3 可见,GAMIL\_rev 方案模拟的冬季 SOI 年 际变化比 GAMIL 方案更接近 ERA40 资料,



图 2 ERA40 资料冬季 (DJF) 500 hPa 位势高度场与模拟结果的相关系数。其余同图 1

Fig. 2 Same as Fig. 1, but for correlation coefficients of winter (DJF) 500-hPa geopotential height between ERA40 data and model simulations



图 3 模拟结果和 ERA40 资料的 1979~2000 年冬季(DJF) SOI 年际变化曲线。实线: ERA40 资料; 点线: GAMIL 方案模拟结果; 虚线: GAMIL\_rev 方案模拟结果

Fig. 3 Interannual variations of winter (DJF) Southern Oscillation Index (SOI) from observations and simulations from 1979 to 2000. Solid line: ERA40 data; dot line: GAMIL scheme simulation; dashed line: GAMIL \_ rev scheme simulation

GAMIL 方案和 GAMIL \_ rev 方案模拟的 SOI 与 ERA40 资料的相关系数分别为 0.51 和 0.61, 后 者明显高于前者。

图 4 为 ERA40 资料和模拟结果的冬季 SLP 场 投影到由 ERA40 资料计算的冬季 SOI 上所得的回 归系数分布。由图 4a 可见,当冬季 SOI 增加 1 个 标准差时,热带东南太平洋 SLP 升高 4~5 hPa, 热带西太平洋 SLP 降低 5~6 hPa,呈现出明显的 南方涛动的空间分布形态。比较图 4a 和 4b 可以看 出,GAMIL 方案基本上模拟出了南方涛动的空间 形态,但模拟的热带东南太平洋 SLP 的回归系数 偏低,说明 GAMIL 方案模拟的大气环流对 ENSO 的响应偏弱。此前基于 CLIVAR C20C 国际计划的 多模式比较分析,发现 GAMIL1.0 模式对实际海 温强迫的响应,在全球十多个大气环流模式中是比 较弱的(Scaife et al., 2009),本文的结果与其一致。可喜的是,相对原方案(GAMIL 方案)而言,采用改进的海气湍流通量参数化方案(GAMIL\_rev方案),GAMIL1.0模式显著改善了对南方涛动(Southern Oscillation,SO)强度的模拟效果(图4c)。

SO 的变化,本质上是热带 Walker 环流变化的结果。图 5 为 ERA40 资料和模拟结果的冬季200 hPa 辐散风和速度势函数异常投影到 Niño3 区海表面温度异常(SSTA)上所得的回归系数分布。由图 5a 可见,冬季 Niño3 区海温升高时,200 hPa热带西太平洋暖池附近为辐合区,热带中东太平洋为辐散区,这种风场分布体现了大气环流对热带东太平洋 SSTA 的非绝热加热响应(Weng et al., 2009)。冬季 Niño3 区 SSTA 为正时,热带



图 4 ERA40 资料(a) 以及 GAMIL 方案(b) 和 GAMIL\_rev 方案(c) 模拟结果的冬季(DJF) SLP 场投影到由 ERA40 资料计算的 SOI 上所得的回归系数分布(单位: hPa)

Fig. 4 Regression coefficients of winter (DJF) SLP from (a) observations, and (b) GAMIL and (c) GAMIL \_ rev scheme simulations against the SOI calculated from observational data (units: hPa)



图 5 同图 4,但为 200 hPa 辐散风异常(箭头;单位:m/s)和速度势函数异常(等值线;单位:10<sup>5</sup> m<sup>2</sup>/s)投影到 Niño3 区 SSTA 上 所得的回归系数分布

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for regression coefficients of winter (DJF) anomalous 200-hPa divergent winds (arrow, units: m/s) and velocity potential (contour, units:  $10^5 \text{m}^2/\text{s}$ ) against the Niño3 SST Anomaly (SSTA)

中东太平洋大气环流异常表现为低层辐合和高层辐散,大气呈上升运动;热带西太平洋暖池大气环流 异常表现为低层辐散和高层辐合,大气呈下沉运 动。比较图 5a 和 5b 可以看出,GAMIL 方案模拟的 200 hPa 高度上热带中太平洋大气辐散和西太平洋暖池大气辐合强度偏弱,上述两个区域速度势函

数的回归系数值分别为 $-12 \times 10^5$  m<sup>2</sup>/s 和 12×10<sup>5</sup> m<sup>2</sup>/s,而 ERA40 资料中相应区域速度势函数的回 归系数值分别为 $-20 \times 10^5$  m<sup>2</sup>/s 和 24×10<sup>5</sup> m<sup>2</sup>/s, 说明 GAMIL 方案模拟的大气环流对 ENSO 的响 应偏弱,这验证了图 4 的结果。此外,相对于 ERA40 资料结果而言,GAMIL 方案模拟的西太 平洋暖池区 200 hPa 大气辐合中心位置偏东。而采 用 GAMIL\_rev 方案后,模式更好地模拟出了大 气环流对冬季热带海温异常的非绝热加热响应, 200 hPa 上热带中太平洋地区和西太平洋暖池区的 速度势函数对冬季 Niño3 区 SSTA 的回归系数分 别为 $-20 \times 10^5$  m<sup>2</sup>/s 和 16×10<sup>5</sup> m<sup>2</sup>/s (图 5c),更 加接近观测结果。

#### 3.4 冬季北太平洋涛动年际变化的模拟

图 6 给出了模拟结果和 ERA40 资料的 1979~2000 年冬季北太平洋涛动指数 (NPOI) (龚道溢和王 绍 武,2000)的 年际 变 化。图 6 表明,GAMIL 方案对 1999 年冬季北太平洋涛动位相的模拟结果与观测资料相反,而GAMIL\_rev 方案的模拟结果与观测资料基本一致。GAMIL 方案模拟的 NPOI 与 ERA40 资料的相关系数为 0.34,通过了 0.1 信度的显著性检验;GAMIL\_rev 方案模拟的 NPOI 与 ERA40 资料的相关系数为 0.49,通过了 0.02 信度的显著性检验。

图 7 给出了 ERA40 资料和模拟结果的冬季 SLP 场投影到由 ERA40 资料计算的冬季 NPOI 上 所得的回归系数分布。图 7a 显示,阿留申低压中 心的回归系数为-2.4 hPa,北太平洋副热带高压 中心的回归系数为 0.6 hPa,呈现出典型的北太平 洋涛动的空间分布形态。由图 7b 和 7c 可见, GAMIL 方案未能模拟出北太平洋涛动的空间分布 形态;而GAMIL\_rev方案基本上模拟出了北太 平洋涛动的空间分布形态,尤其是阿留申低压,但 相对 ERA40 资料而言,该方案模拟的北太平洋涛 动的两个中心强度偏弱、位置偏东,模式模拟的阿 留申低压、北太平洋副热带高压的范围也存在一定 偏差。

#### 3.5 冬季热带降水和海表湍流热通量年际变化的 模拟

为何采用考虑中尺度加强作用的参数化 (GAMIL\_rev方案),能够提高模式对大气环流异 常的模拟能力?鉴于占全球总降水约 2/3 的热带降 水通过潜热加热为大气环流提供了 3/4 以上的能量 (Kummerowet al., 2000),其年际变化对热带及热 带外大气环流和气候产生重要影响(Collins et al., 1997),下文将比较分析 GAMIL 方案和 GAMIL\_ rev 方案对热带太平洋降水的模拟情况。

图 8 给出了模拟结果和 CMAP 资料的 1979~2000 年冬季热带太平洋区域 (10°S~10°N, 120°E~80°W) 平均降水的年际变化。GAMIL 方案和 GAMIL\_rev 方案模拟的上述区域降水与 CMAP 资料的相关系数均为 0.85,说明模式可以较好地 模拟出冬季热带太平洋降水的年际变化。但是 GAMIL 方案模拟的冬季热带太平洋降水偏小,而 GAMIL\_rev 方案模拟的降水有所增加,更加接近 CMAP 资料。可见,考虑中尺度加强作用,冬季 热带太平洋区域降水的模拟得到改善,凝结潜热对 大气的加热作用更趋合理。

为了分析中尺度加强作用对冬季海表湍流热通 量模拟结果的影响,图9给出了GAMIL方案和





Fig. 6 Same as Fig. 3, but for interannual variations of winter (DJF) North Pacific Oscillation Index (NPOI)



图 7 同图 4,但为 SLP 场投影到由 ERA40 资料计算的 NPOI 上所得的回归系数分布(单位:hPa) Fig. 7 Same as Fig. 4, but for regression coefficients of winter (DJF) SLP against the NPOI calculated from observations (units: hPa)

GAMIL\_rev 方案模拟的 1979~2000 年冬季热带 西太平洋区域 (140°E~180°, 20°S~20°N) 平均 海表 湍 流 热 通 量 的 年 际 变 化。由 图 9 可 见, GAMIL\_rev 方案模拟的海表湍流热通量基本上大 于 GAMIL 方案模拟的结果,前者 22 年冬季平均 比后者大 9.6  $W/m^2$ ,增加了 6.0%; 两者的最大 差异出现在 1984 年冬季, GAMIL\_rev 方案模拟 结果比 GAMIL 方案模拟结果大 26.9 W/m<sup>2</sup>, 增 加了 16.7%。由此可见,考虑中尺度加强作用后, 模拟的冬季热带西太平洋海表湍流热通量有明显增 加,热带海洋的加热效应得到增强,从而改善了冬 季大气环流年际变化的模拟效果。



图 8 模拟结果和 CMAP 资料的 1979~2000 年冬季(DJF) 热带太平洋降水的年际变化曲线。实线: CMAP 资料; 点线: GAMIL 方案 模拟结果; 虚线: GAMIL\_rev 方案模拟结果

Fig. 8 Interannual variations of winter (DJF) tropical Pacific precipitation from observations and simulations from 1979 to 2000. Solid line: CMAP data; dot line: GAMIL scheme simulation; dashed line: GAMIL\_rev scheme simulation



图 9 GAMIL 方案(实线)和 GAMIL\_rev 方案(虚线)模拟的 1979~2000 年冬季(DJF)热带西太平洋海表湍流热通量的年际变化曲线

Fig. 9 Interannual variations of winter (DJF) sea surface turbulent heat flux from GAMIL scheme simulation (solid line) and GAMIL \_ rev scheme simulation (dashed line) from 1979 to 2000 over the western tropical Pacific

## 4 夏季(JJA)大气环流年际变化的 数值模拟

#### 4.1 夏季海平面气压场

图 10 为模拟的夏季 SLP 与 ERA40 资料的相 关系数。由图 10 可见,GAMIL1.0 模式可以较好 地模拟出热带海域夏季 SLP 的年际变化特征。比 较图 10a 和 10b 可见,GAMIL\_rev 方案模拟的夏 季南半球 30°S 附近 SLP 的年际变化更加接近 ERA40 资料,特别是在南太平洋区域。GAMIL\_ rev 方案模拟的夏季南太平洋 30°S 附近 SLP 与 ERA40 资料的相关系数为 0.6 左右,而 GAMIL 方案模拟结果与 ERA40 资料的相关系数仅为 0.4 左右。

#### 4.2 夏季 500 hPa 位势高度场

图 11 为模拟的夏季 500 hPa 位势高度场与 ERA40 资料的相关系数。与夏季 SLP 的情况类 似,GAMIL\_rev 方案模拟的夏季南半球 30°S 附 近 500 hPa 位势高度的年际变化要好于 GAMIL 方 案的模拟结果。GAMIL\_rev 方案模拟的夏季南太 平洋 30°S 附近 500 hPa 位势高度与 ERA40 资料的 相关系数为 0.6~0.8,而 GAMIL 方案模拟结果 与 ERA40 资料的相关系数为 0.4~0.6。由此可 见,GAMIL\_rev 方案比 GAMIL 方案能更好地模



图 10 ERA40 资料夏季 (JJA) 海平面气压与模拟结果的相关系数: (a) GAMIL 方案模拟结果; (b) GAMIL \_ rev 方案模拟结果。圆 点区域表示相关系数大于等于 0.4

Fig. 10 Correlation coefficients of summer (JJA) sea level pressure (SLP) between ERA40 data and model simulations (areas with dots denote the correlation coefficients larger than and equal to 0.4); (a) GAMIL scheme simulation; (b) GAMIL \_ rev scheme simulation

拟出南太平洋中纬度大气环流的年际变化特征。

## 4.3 夏季热带降水和海表湍流热通量年际变化的 模拟

图 12 给出了模拟结果和 CMAP 资料的 1979~2000 年夏季热带太平洋区域 (10°S~10°N, 120°E~80°W)平均降水的年际变化。GAMIL 方案和GAMIL\_rev 方案模拟的上述区域降水与 CMAP资料的相关系数分别为 0.63 和 0.65,说明模式可以较好地模拟出夏季热带太平洋降水的年际变化。但是,GAMIL 方案模拟的夏季热带太平洋降水偏小,而GAMIL\_rev 方案模拟的降水得到增加,更加接近 CMAP 资料。可见,考虑中尺度加强作用的 GAMIL\_rev 方案可以改进对夏季热带太平

洋区域降水的模拟,凝结潜热对大气的加热作用更 加合理。

图 13 给出了 GAMIL 方案和 GAMIL\_rev 方 案模拟的 1979~2000 年夏季热带西太平洋区域  $(20^{\circ}S~20^{\circ}N, 140^{\circ}E~180^{\circ})$  平均海表湍流热通量 的年际变化。由图 13 可见, GAMIL\_rev 方案模 拟的海表湍流热通量大于 GAMIL 方案模拟的结果 (1998 年除外),前者 22 年夏季平均比后者大 9.2 W/m<sup>2</sup>,增加了 6.4%;两者的最大差异出现在 1992 年夏季,GAMIL\_rev 方案模拟结果比 GAMIL 方案模拟结果大 15.6 W/m<sup>2</sup>,增加了 11.5%。由此可见,考虑中尺度加强作用后,模式 对夏季热带西太平洋区域海表湍流热通量的模拟有



图 11 ERA40 资料夏季 (JJA) 500 hPa 位势高度场与模拟结果的相关系数。其余同图 10 Fig. 11 Same as Fig. 10, but for correlation coefficients of summer (JJA) 500-hPa geopotential height between ERA40 data and model simulations





图 13 同图 9, 但为夏季 (JJA) Fig. 13 Same as Fig. 9, but for summer (JJA)

明显增加,使得夏季热带海洋加热效应的模拟得到 增强,从而改善了对夏季大气环流年际变化的模拟 效果。

### 5 结论与讨论

本文采用对流性阵风参数化方法,将边界层自 由对流和降水深对流运动对海表湍流通量的贡献引 入到 GAMIL1.0模式中,改进了模式的海气湍流 通量参数化方案(改进前称为 GAMIL 方案;改进 后称为 GAMIL\_rev 方案)。在此基础上,分别采 用 GAMIL 方案和 GAMIL\_rev 方案,以 1979年 1月至 2000年12月观测海温驱动 GAMIL1.0模 式进行数值试验,比较两种方案对冬季(DJF)、 夏季(JJA)大气环流年际变化模拟性能的差异。 结果表明,对流性阵风参数化方法的引入,显著提 高了 GAMIL1.0模式对海温强迫的响应强度,改 善了该模式原来存在的对海温强迫的敏感度偏低的 问题。主要结果如下:

(1)采用GAMIL\_rev方案,模式可以更好地 模拟出大气环流对冬季热带海温年际变化的响应, 模拟的冬季北太平洋大气环流年际变化比GAMIL 方案模拟结果更加接近观测资料。GAMIL\_rev方 案能更好地模拟出冬季南方涛动、北太平洋涛动的 年际变化和空间分布特征,特别是显著地改善了此 前GAMIL1.0模式存在的模拟的南方涛动强度偏 弱的问题。

(2) GAMIL 方案对夏季热带海洋上空大气环 流年际变化的模拟较好,但未能很好地再现中高纬 度地区大气环流的年际变化特征。而 GAMIL\_rev 方案对夏季南半球 30°S 附近大气环流年际变化的 模拟有改善,特别是南太平洋 30°S 附近。

323

本文将中尺度加强作用引入到 GAMIL1.0 模式的海气湍流通量参数化方案中,达到了通过改进 该方案提高模式对大气环流年际变率模拟能力的目 的。采用考虑中尺度加强作用的 GAMIL\_rev 方 案后,模拟的热带海表湍流热通量得到增强,模式 对热带降水年际变化的模拟能力明显提高,凝结潜 热对大气的加热作用更趋合理,从而使得模式对大 气环流年际变化的模拟能力得到了提高。

降水的模拟效果将直接影响到中尺度加强作用的大小,而GAMIL1.0模式对降水的模拟还存在不足(Zhou et al., 2009b),这可能与模式本身的对流参数化方案等物理过程有关(Li et al., 2007; 李立娟和王斌,2009),因此,今后有必要针对不同的对流参数化方案等进行深入研究。

**致谢** 感谢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李立娟博士、包庆博士、吴波博士等在模 式调试等方面提供的诸多帮助!

#### 参考文献 (References)

- Brunke M A, Fairall C W, Zeng Xubin, et al. 2003. Which bulk aerodynamic algorithms are least problematic in computing ocean surface turbulent fluxes? [J]. J. Climate, 16 (4): 619-635.
- Collins W D, Wang J, Kiehl J T, et al. 1997. Comparison of tropical ocean – atmosphere fluxes with the NCAR community climate model CCM3 [J]. J. Climate, 10 (12): 3047 – 3058.
- Collins W D, Hack J J, Boville B A, et al. 2003. Description of the NCAR Community Atmosphere Model (CAM2.0) [R]. NCAR Tech. Note, 171pp.

- Esbensen S K, McPhaden M J. 1996. Enhancement of tropical ocean evaporation and sensible heat flux by atmospheric mesoscale systems [J]. J. Climate, 9: 2307-2325.
- 龚道溢,王绍武. 2000. 大气涛动对全球低层大气环流的贡献 [J].
  高原气象. 19 (4): 427 434. Gong Daoyi, Wang Shaowu.
  2000. Contribution of the atmospheric oscillations to the global surface pressure system [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 19 (4): 427 434.
- Ju J, Slingo J. 1995. The Asian summer monsoon and ENSO [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 121: 1133-1168.
- 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.
- Kucharski F, Scaife A A, Yoo J H, et al. 2009. The CLIVAR C20C project: Skill of simulating Indian monsoon rainfall on interannual to decadal timescales: Does GHG forcing play a role? [J]. Climate Dyn., 33: 615 - 627, doi: 10. 1007/s00382-008-0462-y.
- Kummerow C, Simpson J, Thiele O, et al. 2000. The status of the tropical rainfall measuring mission (TRMM) after two years in orbit [J]. J. Appl. Meteor., 39 (12): 1965-1982.
- Ledvina D V, Young G S, Miller R A, et al. 1993. The effect of averaging on bulk estimates of heat and momentum fluxes for the tropical western Pacific Ocean [J]. J. Geophys. Res., 98: 20211 – 20217.
- 李立娟,王斌,周天军. 2007. 外强迫因子对 20 世纪全球变暖的综 合影响 [J]. 科学通报, 52 (15): 1820 - 1825. Li Lijuan, Wang Bin, Zhou Tianjun. 2007. Impacts of external forcing on the 20th century global warming [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 52 (15): 1820-1825.
- Li Lijuan, Wang Bin, Wang Y Q, et al. 2007. Improvements in climate simulation with modifications to the Tiedtke convective parameterization in the grid-point atmospheric model of IAP LASG (GAMIL) [J]. Adv. Atmos. Sci., 24: 323-335.
- 李立娟,王斌. 2009. 两种对流参数化方案对辐射能量收支的影响 研究 [J]. 气象学报, 67 (6): 1080 - 1088. Li Lijuan, Wang Bin. 2009. Influence of two convection parameterization schemes on the radiative energy budget [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 67 (6): 1080-1088.
- 李忠贤. 2008. CAM3 模式海气湍流通量参数化的改进及其在气候 模拟中的应用 [D]. 南京:南京信息工程大学. Li Zhongxian. 2008. Improvement of sea surface turbulent fluxes parameterization scheme in CAM3 and its impact on climate simulation [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology.
- 李忠贤,孙照渤,陈海山,等. 2009. CAM3 模式海气湍流通量参数化的改进及其应用[J]. 气象学报,67(6):1101-1112. Li

Zhongxian, Sun Zhaobo, Chen Haishan, et al. 2009. Improvement of sea surface turbulent fluxes parameterization scheme in CAM3 and its impact on climate simulation [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 67 (6): 1101-1112.

- Miller M J, Beljaars A C, Palmer T N. 1992. The sensitivity of the ECMWF model to the parameterization of evaporation from the tropical oceans [J]. J. Climate, 5 (5): 418-434.
- Mondon S, Redelsperger J L. 1998. A study of a fair weather boundary layer in TOGA-COARE: Parameterization of surface fluxes in large scale and regional models for light wind conditions [J]. Bound. -Layer Meteor., 88: 47-76.
- Monin A S, Obukhov A M. 1954. Basic regularity in turbulent mixing in surface layer of the atmosphere [J]. Akad. Nauk. SSSR Tr. Geofiz. Inst., 24: 163-187.
- Palmer T N, Brankovć Č, Viterbo P, et al. 1992. Modeling interannual variations of summer monsoons [J]. J. Climate, 5 (5): 399-417.
- Redelsperger J L, Guichard F, Mondon S. 2000. A parameterization of mesoscale enhancement of surface fluxes for large-scale models [J]. J. Climate, 13 (2): 402-421.
- Saxen T R, Rutledge S A. 1998. Surface fluxes and boundary layer recovery in TOGA COARE: Sensitivity to convective organization [J]. J. Atmos. Sci., 55: 2763-2781.
- Scaife A A, Kucharski F, Folland C K, et al. 2009. The CLIVAR C20C Project: Selected twentieth century climate events [J]. Climate Dyn., 33: 603-614, doi: 10. 1007/s00382-008-0451-1.
- Slingo J M, Blackburn M, Betts A, et al. 1994. Mean climate and transience in the tropics of the UGAMP GCM: Sensitivity to convective parameterizations [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 120: 881-922.
- 王斌,季仲贞. 2006. 大气科学中的数值新方法及其应用 [M]. 北京:科学出版社, 208pp. Wang Bin, Ji Zhongzhen. 2006.
  Studies and Applications of New Numerical Methods in Atmospheric Sciences (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 208pp.
- Weng Hengyi, Behera S K, Yamagata T. 2009. Anomalous winter climate conditions in the Pacific rim during recent El Niño Modoki and El Niño events [J]. Climate Dyn., 32: 663-674.
- Yang Junli, Wang Bin, Guo Yufu, et al. 2007. Comparison between GAMIL and CAM2 on interannual variability simulation [J]. Adv. Atmos. Sci., 24 (1): 82-88.
- Yu R C. 1994. A two-step shape-preserving advection scheme [J]. Adv. Atmos. Sci., 11 (4): 479-490.
- Zeng Xubin, Zhang Qiang, Johnson D, et al. 2002. Parameterization of wind gustiness for the computation of ocean surface fluxes at different spatial scales [J]. Mon. Wea. Rev., 130 (8): 2125-2133.
- 张强, Zeng Xubin, Dickinson R E, 等. 2001. 强对流过程对大尺 度模式洋面通量加强的参数化研究与进展 [J]. 海洋学报, 23
  (3): 133-141. Zhang Qiang, Zeng Xubin, Dickinson R E, et al. 2001. The study of influence of mesoscale enhancement on

subgrid-scale sea surface fluxes of large-scale model [J]. Acta Oceanol. Sinica (in Chinese), 23 (3): 133-141.

- 赵鸣. 2000. 关于海面湍流通量参数化的两种方案试验 [J]. 气象 科学, 20 (3): 317 - 325. Zhao Ming. 2000. On the experiments of two schemes about the computation of fluxes over sea [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 20 (3): 317-325.
- 赵鸣,曾旭斌. 2000. 大气模式中表面水热通量计算的一些问题 [J]. 气象学报,58(3):340-346. Zhao Ming, Zen Xubin. 2000. Some problems in the computation of moisture and heat fluxes over surface for atmospheric models [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 58 (3): 340-346.
- Zhou T, Wu B, Scaife A A, et al. 2009a. The CLIVAR C20C Project: Which components of the Asian – Australian monsoon circulation variations are forced and reproducible? [J]. Climate Dyn., 33: 1051–1068, doi: 10. 1007/s00382-008-0501-8.
- Zhou T, Wu B, Wang B. 2009b. How well do atmospheric general circulation models capture the leading modes of the interannual variability of Asian – Australian monsoon? [J]. J. Climate, 22: 1159 – 1173.
- Zhou T, Yu R, Zhang J, et al. 2009c. Why the western Pacific subtropical high has extended westward since the late 1970s [J].J. Climate, 22: 2199-2215.