

GOALS 模式中大气能量循环的诊断分析与 不同版本计算结果的比较研究

张 韬 吴国雄 郭裕福

中国科学院大气物理研究所大气科学与地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

摘 要 利用大气能量循环框图, 对比分析中国科学院大气物理研究所大气科学与地球流体力学数值模拟国家重点实验室 (LASG/IAP) 全球海-陆-气耦合系统模式 (GOALS) 两个版本 (GOALS-2 和 GOALS-4), 以及观测的全球平均大气能量循环的主要特征, 并从能量循环贮蓄和转换项的纬向平均贡献去解释全球积分值改善和转坏的原因, 以及诊断分析参数化方案变化后产生的影响。结果表明: 模式的两个版本基本上能正确地模拟出全球能量循环的主要特征。旧版本 GOALS-2 能较好模拟全球积分值, 常常是不同符号局地误差的相互抵消结果。新版本 GOALS-4 中某种局地过程的改善在一些情况下导致了全球积分值的转坏。引入辐射日变化参数化方案可能对能量循环各参数的局地贡献有着明显的影响。如纬向平均有效位能向瞬变涡动有效位能的斜压转换率、瞬变涡动有效位能向瞬变涡动动能的斜压转换率以及定常涡动动能的局地贡献有明显改善。南极地区不合实际的上升运动, 是模拟的纬向平均有效位能与纬向平均动能之间的转换项全球积分值为负数的主要原因。

关键词 气候系统 能量循环 定常涡动和瞬变涡动 辐射日变化

文章编号 1006-9895(2006)01-0038-18

中图分类号 P435

文献标识码 A

The Comparison Between Two Versions of the GOALS Model on the Atmospheric Energy Cycle Diagnosis

ZHANG Tao, WU Guo-Xiong, and GUO Yu-Fu

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

Abstract The atmospheric energy cycle diagnosis is a suitable way towards understanding and improvement of climate models. The global mean values of energy cycle from two versions of the State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics (IAP) Global Ocean - Atmosphere - Land System (GOALS) Model (GOALS-2 and GOALS-4) are firstly diagnosed and compared with observational estimates, then the zonal mean contributions to energy cycle reservoirs and conversions are investigated to explain the ameliorations and deteriorations of global integral values, and to diagnose the effects of changes in parameterization schemes.

The results show that the two versions of GOALS model are capable of reproducing the main features of global energy cycle with reasonable accuracy. Specifically, zonal available potential energy (A_z) is converted into available potential energy of stationary eddy (A_{SE}) and transient eddy (A_{TE}), eddy available potential energy is converted into eddy kinetic energy, and the energy conversion induced by transient eddy appears to be larger. Reservoirs of stationary and transient eddy available potential energy (A_{SE} and A_{TE}) have about the same energy content. The nonlinear

conversion between the two eddy reservoirs of available potential energy is directed from the stationary to the transient reservoir. The reservoir of zonal kinetic energy (K_Z) is about as 1–1.5 times large as the sum of the reservoirs of stationary eddy and transient eddy kinetic energy (K_{SE} and K_{TE}). The reservoir of transient eddy kinetic energy (K_{TE}) is between two (January) and three times (July) larger than that of stationary eddy kinetic energy (K_{SE}). Barotropic conversions (C_{K_S} and C_{K_T}) are directed from eddy kinetic energy to zonal kinetic energy. Apart from this basic accordance of observational and model results, it is indicated that the GOALS models also exhibit some significant deviations. Two conversions even show an orientation opposite to their observational counterpart, the zonal conversion C_Z between the zonal reservoirs of available potential energy and kinetic energy and the nonlinear conversion ($C_{K_{TE}-K_{SE}}$) between K_{SE} and K_{TE} .

The analysis of zonal mean cross sections of energy cycle reservoirs and conversions shows that the better simulation of global integral values in the older GOALS-2 version is mostly due to the cancellation of errors of different sign, while the improvements of the representation of certain local processes in the new GOALS-4 version in some cases lead to a deterioration of global integral values. The inclusion of the diurnal cycle of solar radiation may show a significant effect on the local contributions of energy cycle parameters. For example, the local contributions of baroclinic conversion C_{A_T} (conversion from zonal available potential energy A_Z to transient eddy available potential energy A_{TE}), baroclinic conversion C_{E_T} (conversion from transient eddy available potential energy A_{TE} to transient eddy kinetic energy K_{TE}), and stationary eddy kinetic energy K_{SE} are obviously improved. The simulation of unrealistic rising motion in the Antarctic region contributes significantly to the negative global integral values of conversion C_Z from zonal available potential energy to zonal kinetic energy in the models. Because the overestimation of dissipation of transient eddy kinetic energy K_{TE} results in a weaker transient eddy kinetic energy in the models, and the maximum of simulated stationary eddy kinetic energy K_{SE} is also underestimated, the nonlinear barotropic conversion $C_{K_{TE}-K_{SE}}$ from K_{TE} to K_{SE} is thus not well represented in the models, which highlights the need for further improvement in the future.

Key words climate system, energy cycle, stationary eddy and transient eddy, diurnal cycle of solar radiation

1 引言

太阳辐射是驱动大气环流及海洋环流的主要能源。太阳辐射的直接效应是加热大气及其下垫面的海洋和大陆,并因此产生内能,进而转化为维持风场的动能,并最终通过摩擦而耗散,这个过程被称为大气能量循环。在评估模式结果的许多可行的方法中,全球能量循环^[1~3]的分析占有显著的地位^[4, 5],这是因为大气的许多重要诊断特征反映在 Lorenz 能量循环的能量贮蓄和能量转化率中。要深入洞察相关的相互作用过程的物理背景,就还需在谱域^[6~8]或在混合时间/空间域^[9, 10]研究质量加权的全球平均项的贡献。

大气能量循环是诊断大气环流的一个非常有用的工具,它能正确地反映气候系统中多圈层相互作用和转化的真实物理机制。本文将利用 Ulbrich 和 Speth^[10]定义的能量循环公式,通过对中国科学院大气物理研究所大气科学与地球流体力学数值模拟国家重点实验室(LASG/IAP)全球海-陆-气耦合系

统模式(GOALS)^[11, 12]有无辐射日变化的两个版本的比较,研究其对大气能量循环更合理的模拟。

本文第 2、3 节将分别描述使用的资料情况 and 处理方法,第 4 节对结果进行了详细的讨论,最后是本文结论。

2 模式和观测资料简介

GOALS 模式的第一版本于 1996 年底正式定型,随后不断发展完善,陆续推出第二、三、四版本。其中第二版本 GOALS-2 和第四版本 GOALS-4 分别参加了国际耦合模式比较计划第一阶段(CMIP I)和第二阶段(CMIP II)的比较研究,本文将分析讨论这两个版本的长时间积分结果。GOALS-2 和 GOALS-4 的基本动力框架完全相同^[13],它们都是用模式变量诊断得到的云^[14]代替国际卫星云气候学计划(ISCCP)资料的云^[15]。GOALS-4 较之 GOALS-2 的改进,主要表现在三个方面:首先,GOALS-4 的大气模式考虑了太阳辐射的日变化^[16],而 GOALS-2 则只考虑了月变化;其次,海

洋与大气模式的耦合, GOALS-2 只考虑了热通量交换和动量交换, 而 GOALS-4 则在此基础上进一步引入海-气间的淡水通量交换; 第三, 海洋模式与大气模式的耦合方案不同, GOALS-2 采用“修正的月通量距平耦合方案”^[17], GOALS-4 则采用逐日耦合^[18]。这两个模式版本均成功控制了气候漂移, 完成了 200 年的长期积分。

本文去掉了模式刚开始积分几年的结果以便于消除耦合模式调整时期所造成的系统误差, 对两个版本模式都各取 10 年积分结果来求其平均值, 但仅考虑了 1 月份和 7 月份的模式资料。

作为真实大气的估计值, 使用美国国家环境预报中心与美国国家大气研究中心 (NCEP/NCAR) 7 个 1 月 (1991~1997) 和 7 个 7 月 (1990~1996) 两个时次 (0000UTC 和 1200UTC) 的经向风、纬向风、垂直速度、温度和相对湿度的再分析资料, 水平分辨率均是 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 经纬度网格, 垂直方向有 11 个等压面层, 分别为 10 hPa、30 hPa、50 hPa、100 hPa、150 hPa、200 hPa、300 hPa、500 hPa、700 hPa、850 hPa 和 1000 hPa。选取这 11 层等压面是为了与模式资料的输出层次相匹配。

3 处理方法

在能量循环分析中, Ulbrich 和 Speth^[10] 把 Arpe 等^[19] 的公式进行了扩展, 使之能区分定常波 (月平均) 和瞬变波 (与月平均的离差)。本文采用所谓的“混合时空域”全球大气能量循环框图^[3] (图 1)。文中不同的能量贮蓄和转换项的计算是根据文献^[10]中所用的能量循环公式来实现的, 我们也将沿用文献^[10]公式中的符号。各能量储蓄和转换项的收支方程如下所示, 方程中各项具体表达式可参阅附录。

$$\frac{\partial A_Z}{\partial t} = G_Z - C_{A_S} - C_{A_T} - C_Z,$$

$$\frac{\partial A_{SE}}{\partial t} = G_{SE} + C_{A_S} - C_{E_S} + C_{A_{TE}-A_{SE}},$$

$$\frac{\partial A_{TE}}{\partial t} = G_{TE} + C_{A_T} - C_{E_T} - C_{A_{TE}-A_{SE}},$$

$$\frac{\partial K_{TE}}{\partial t} = -D_{TE} + C_{E_T} + C_{K_T} - C_{K_{TE}-K_{SE}},$$

$$\frac{\partial K_{SE}}{\partial t} = -D_{SE} + C_{E_S} + C_{K_S} + C_{K_{TE}-K_{SE}},$$

$$\frac{\partial K_Z}{\partial t} = -D_Z - C_{K_S} - C_{K_T} + C_Z,$$

其中, A_Z 和 K_Z 分别代表月平均纬向平均环流的有效位能和动能的贮蓄, C_Z 表示纬向平均有效位能 (A_Z) 向纬向平均动能 (K_Z) 的转换项。 A_{SE} 和 K_{SE} 代表各自月平均 (即定常的) 纬向涡动的贮蓄, A_{TE} 和 K_{TE} 分别表示瞬变涡动有效位能和瞬变涡动动能的贮蓄。 C_{A_T} (从 A_Z 向 A_{TE} 的转换), C_{E_T} (从 A_{TE} 向 K_{TE} 的转换) 和 C_{K_T} (从 K_Z 向 K_{TE} 的转换) 表示由于瞬变波引起的转换项, C_{A_S} (从 A_Z 向 A_{SE} 的转换), C_{E_S} (从 A_{SE} 向 K_{SE} 的转换) 和 C_{K_S} (从 K_Z 向 K_{SE} 的转换) 表示定常波引起的各自转换项。定常波和瞬变波贮蓄项之间的非线性转换用 $C_{A_{TE}-A_{SE}}$ (从 A_{TE} 向 A_{SE} 的转换) 和 $C_{K_{TE}-K_{SE}}$ (从 K_{TE} 向 K_{SE} 的转换) 来表示。 G_Z , G_{SE} 和 G_{TE} 分别表示 A_Z , A_{SE} 和 A_{TE} 的制造项。 D_Z , D_{SE} 和 D_{TE} 分别表示 K_Z , K_{SE} 和 K_{TE} 的耗散项。我们估算不同贮蓄的制造项 (G_Z , G_{SE} , G_{TE}) 和耗散项 (D_Z , D_{SE} , D_{TE}) 的全球平均时, 是根据收支方程并忽略不同贮蓄项的时间导数而作为剩余项来得到的。Ulbrich 和 Speth^[10] 对欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 再分析资料的研究表明, 上述对不同贮蓄项时间导数的忽略是合理的。

关于个别贮蓄项和转化项的公式, 不同文献中差别很大。这可能是由于除了形式不同外, 不同特性的局地物理过程可以导致相同的全球积分能量值的缘故^[20, 21]。因此, 了解这些项所描述的特定物理过程的相关知识, 对于揭示我们得到的结果尤为重要。

定常 (时间平均) 和瞬变 (与时间平均的离差) 的大气波动是大气环流的一个重要特征。前者一般是由于非绝热加热和地形强迫影响的结果。两种强迫的相对重要性仍有争论^[22~24]。瞬变波动被认为是由于纬向平均流斜压不稳定的结果。

K_Z 代表纬向平均风场的振幅, K_{SE} 和 K_{TE} 分别表示由于定常波和瞬变波引起的风场的变化。纬向有效位能 A_Z 反映了高纬和低纬之间的温度对比, A_{SE} 和 A_{TE} 分别表示由定常波和瞬变波引起的沿纬圈的温度变化。它们在各自的纬度和气压层上也与静力稳定度有关。

在用于本文的公式中, 斜压转换项 C_{A_S} 和 C_{A_T} 的纬向平均贡献表示沿纬向平均温度梯度方向的涡旋热输送, 而 C_{E_S} 和 C_{E_T} 表示与定常涡动和瞬变涡动有关的暖空气上升和冷空气下沉。这些过程与温带气旋有关, 但也与定常波有联系^[10]。正压转换

项 C_{K_S} 和 C_{K_T} 的局地贡献表示从纬向急流最大值中心向外发散的纬向动量的经向输送(正值)或向急流中心处集中的纬向动量的经向输送(负值),它主要反映扰动的正压性质造成纬向气流减弱或加强的波流相互作用的过程。

最后,非线性转换项($C_{A_{TE}-A_{SE}}$ 和 $C_{K_{TE}-K_{SE}}$)正的纬向平均贡献表示瞬变涡动引起的热量和动量逆定常涡旋热量和动量梯度方向输送。负值表示顺定常涡旋梯度方向输送,即定常波的减弱有利于转化为瞬变涡动能量。

接下来的部分主要是利用纬向平均垂直剖面图来讨论全球平均各能量项地理分布的相关贡献。全球平均值是由各自被积函数区域面积权重来计算的。

4 结果分析

4.1 全球平均

从 1 月和 7 月来看,模式的两个版本都能正确地模拟出全球能量循环的主要特征(图 1、2):由非绝热加热产生的纬向有效位能(A_Z)向定常和瞬变涡动有效位能(A_{SE} 和 A_{TE})转换。1 月份,定常涡动转换率 C_{A_S} 大约是瞬变涡动转换率 C_{A_T} 的 2/3;7 月份,定常涡动转换率仅有瞬变涡动转换率的 1/5。但 GOALS-2 版本模拟的瞬变涡动转换率 C_{A_T} 在 1 月和 7 月都明显偏强太多。考虑涡动有效位能向涡动动能转换时(见图 1、2 中的 C_{E_S} 和 C_{E_T}),也可看到瞬变涡动引起的能量转换项也较大。

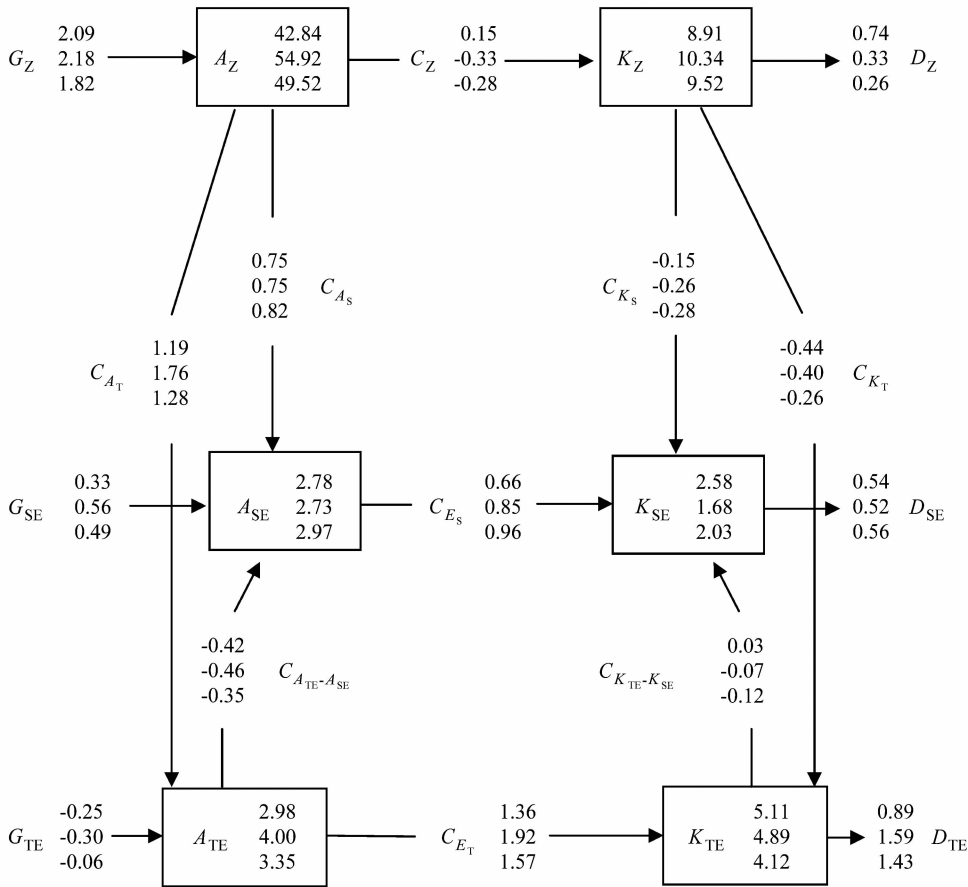


图 1 1 月份全球大气能量循环。贮蓄项(方框内)单位为 J/m^2 ; 转换项单位为 W/m^2 。箭头表示正值的转换方向, 负值时转换方向相反。顶部的数值表示 NCEP/NCAR 再分析资料 1991~1997 年的平均结果; 第二行的值表示 GOALS-2 版本的结果; 最后一行表示 GOALS-4 版本的结果。 G_Z , G_{SE} , G_{TE} , D_Z , D_{SE} 和 D_{TE} 是作为剩余项计算得到的

Fig. 1 The global atmospheric energy cycle for Jan. Reservoirs (in boxes) are in J/m^2 . Conversions are in W/m^2 , with arrows indicating the orientation of conversions for positive values, and the orientation of conversions is reversed for negative values. Top numbers indicate values based on NCEP/NCAR reanalysis data 1991–1997; second row values are for the GOALS-2 model version and last row numbers for the GOALS-4 version. The terms G_Z , G_{SE} , G_{TE} , D_Z , D_{SE} , and D_{TE} are computed as residuals

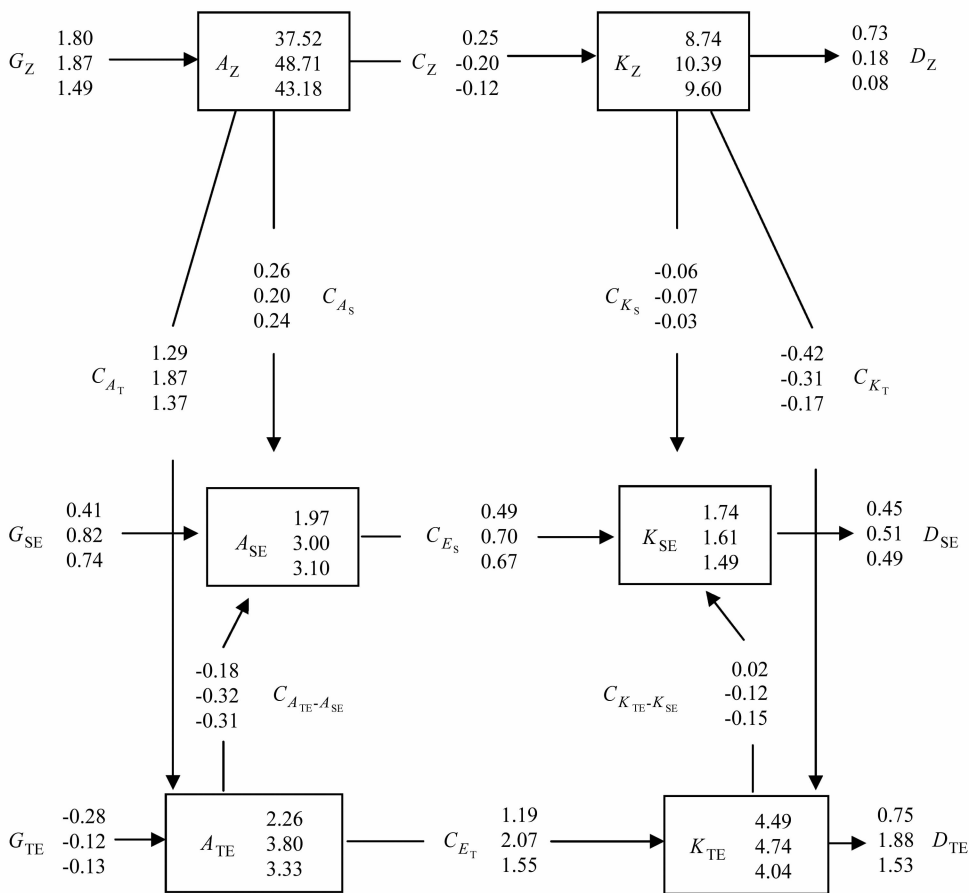


图2 同图1, 但为7月份。最顶部的数值是NCEP/NCAR再分析资料1990~1996年的平均结果

Fig. 2 As in Fig. 1 but for Jul. Values in the top row (NCEP/NCAR reanalysis) are Jul averages over the years 1990–1996

定常涡动和瞬变涡动有效位能(A_{SE} 和 A_{TE})的贮蓄项有着大致相当的能量值, 对于1月和7月都如此。甚至在7月份与定常涡动有关的斜压转换项 C_{A_S} 比相应的瞬变涡动转换项 C_{A_T} 弱得多时也同样成立。

定常涡动和瞬变涡动有效位能(A_{SE} 和 A_{TE})贮蓄项之间非线性转换的方向是由定常涡动贮蓄项向瞬变涡动贮蓄项转换, 虽然此项夏季比冬季弱, 但它也是不容忽视的。

纬向平均动能 K_Z 的贮蓄项大约是定常涡动动能和瞬变涡动动能贮蓄项之和的1~1.5倍。瞬变涡动动能贮蓄项大约是定常涡动动能贮蓄项的2倍(1月份)至3倍(7月份)。正压转换方向(C_{K_S} , C_{K_T})是从涡动动能向纬向平均动能转换。

除了模式结果和观测资料基本一致外, 图1和图2也指出了一些明显重要的偏差。有两个转换项, 如纬向平均有效位能与纬向平均动能之间的转

换项 C_Z , 以及定常涡动动能与瞬变涡动动能之间的非线性转换项 $C_{K_{TE-K_{SE}}}$ 甚至模拟的方向与观测相反。由于 $C_{K_{TE-K_{SE}}}$ 全球积分值约等于0, 因此它的符号不好判断^[25]。该值的纬向平均贡献将在随后关于涡动动能的部分中加以讨论。 C_Z 是不同符号的局地大值相互抵消的结果。关于 C_Z 的不确定性, Lambert^[4]在不同大气环流模式(GCMS)结果变率的研究中也谈到过。

以下各节将更细致分析各能量贮蓄和转换项纬向平均垂直分布, 进一步讨论模式误差及其可能产生的原因。

4.2 纬向平均有效位能

无论是1月还是7月, 模式两个版本的纬向平均有效位能 A_Z 的全球积分值与观测相比都明显偏高(图1、2)。它反映的物理背景是模式高纬和低纬之间的经向温度梯度较大, 从而使 A_Z 的值偏高。在GOALS-2版本中, 1月份热带对流层低层的温

度稍有偏高或偏低(大约为 $1\sim 2$ K), 但极区温度异常偏冷(比观测低 5 K 以上)(图略), 因此温度对比增大。在对流层高层 300 hPa 以上, 极区温度也偏低很多(大约比观测低 15 K 以上), 热带地区则稍有偏低(200 hPa 附近)或明显偏高(100 hPa 附近温度比观测高 6 K 左右), 因此, 对流层高层至平流层温度对比偏大也非常显著。据此可知, GOALS-2 模拟的 A_z 值在 1 月份较大是由于对流层低层和高层的温度对比偏大综合影响的结果。7 月份, GOALS-2 模拟的温度在对流层 500 hPa 以下高纬地区比观测异常偏高, 它导致经向温度梯度减小, 应该使 GOALS-2 的 A_z 值比 NCEP 偏小, 但对流层 500 hPa 以上的大部分地区, 热带的增温比 1 月份更加显著, 而极区异常偏冷依然存在, 导致经向温度梯度较大, 因此就总体影响而言, GOALS-2 模拟的全球积分值仍然比观测偏大(图 2)。

GOALS-4 模式中, A_z 全球平均值有所减小主要是由于对流层热带地区温度偏低较为明显(大约 $3\sim 4$ K)而极区温度异常偏高, 使经向温度梯度在对流层中低层减小的缘故(图略)。而 GOALS-4 模拟的 A_z 全球积分值仍比观测偏大主要原因还是由于对流层 300 hPa 以上的经向温度梯度仍然较强。GOALS-2 中, 300 hPa 至 500 hPa 之间的两个正温度误差中心在 GOALS-4 中已明显减弱, 中低纬地区近地层的正温度误差在 GOALS-4 中为负温度误差所代替, 冬夏皆如此。但 GOALS-4 高纬地区正温度误差反而比 GOALS-2 更为明显。Guo 等^[26]和邵慧等^[16]的研究都指出辐射日变化的引入可使中低纬地面温度降低, 高纬温度升高, 因而纬向温差的误差减少。本文的结果表明, 引入辐射日变化对温度场的这种影响不但在近地面存在, 而且扩展到对流层中上部。

4.3 纬向有效位能向涡动有效位能的斜压转换

虽然旧版本 GOALS-2 中 A_z 偏高很多, 但除了 C_{A_T} 外, 从纬向有效位能(A_z)向定常涡动有效位能(A_{SE})的斜压转换 C_{A_S} 和再分析资料相比并没有显著偏强(图 1), 甚至还偏少(图 2)。这可能是由于纬向平均贡献的正负系统误差相互抵消的结果。在新版本 GOALS-4 中, 由于经向温度梯度减小了(斜压性随 A_z 数值的减小而减小), 导致瞬变热输送减少, 从纬向有效位能(A_z)向瞬变涡动有效位能(A_{TE})的斜压转换明显减小(图 1、2)。

为了更深入了解这些变化的原因, 我们利用这些转换项的纬向平均贡献来讨论。

与观测相比, GOALS-2 模拟的 1 月份中纬度对流层中层纬向有效位能(A_z)向瞬变涡动有效位能(A_{TE})的斜压转换(C_{A_T})偏低约 $20 \times 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Pa}^{-1}$ (图 3c), 7 月份对流层中层偏少可达 $40 \times 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Pa}^{-1}$ 左右(图 3d)。负的偏差明显与该纬度处经向温度梯度减小(图略)引起的斜压性减弱有关, 这是由于沿温度梯度方向的涡动经向热输送(决定着 C_{A_T} 的贡献)依赖于斜压涡动强度。较大的正误差在 1 月份出现在对流层低层 $30^\circ\text{N}\sim 60^\circ\text{N}$ 以及 75°S 附近, 7 月份出现在 25°S 以南。近地面异常高的正值是由于低层垂直稳定性降低的结果, 同时也是最低层瞬变涡动热输送增大的结果(后面将会讨论这个问题)。定常涡动转换 C_{A_S} 的局地贡献也有与 C_{A_T} 类似的误差结构分布特征, 因此 C_{A_S} 的全球积分值不是显著偏大, 与局地的正负系统误差抵消的结果有关。

与旧版本相比, GOALS-4 中关于 C_{A_T} 的贡献在对流层中层的负误差明显偏大(图 3e、f), 说明新版本 C_{A_T} 的斜压性减弱在该处更为显著, 这是与前面提到的对流层中层较小的经向温度对比以及导致的斜压性减弱相联系的。同样, 7 月份 300 hPa 处及 60°N 以北符号相反的正偏差的减小(对比图 3d、f)也说明了新版本 C_{A_T} 的斜压性与旧版本相比在这些区域是减弱的, 在这种情况下, 纬向平均温度场的分布特征也表明了局地斜压性的增强(正的偏差)。

在新、旧版本模式中, 近地面异常高的 C_{A_T} 误差原因不是一目了然的。直接的影响是由于对流层中层冷却引起对流层低层不稳定的结果, 因为静力稳定度参数是 C_{A_T} 表达式中影响因子之一。由于模式的中低纬低层垂直温度梯度增大(即变得不稳定), 中纬度的不稳定作为间接的影响, 将会导致瞬变涡旋活动增强, 因此增大经向涡动热输送。在新版本(GOALS-4)中, 近地面气压层的垂直温度梯度没有和旧版本(GOALS-2)模式一样大大增强, 因此 C_{A_T} 局地贡献正的偏差没有那么大。但这两个影响并不能解释两个版本模式中低层 65°S 以南地区出现较大正误差(图 3)的原因。此处 C_{A_T} 值偏大与两个版本模式中大气过于稳定的区域有较强的涡动热输送有关。由于这些误差的位置靠近南极, 最

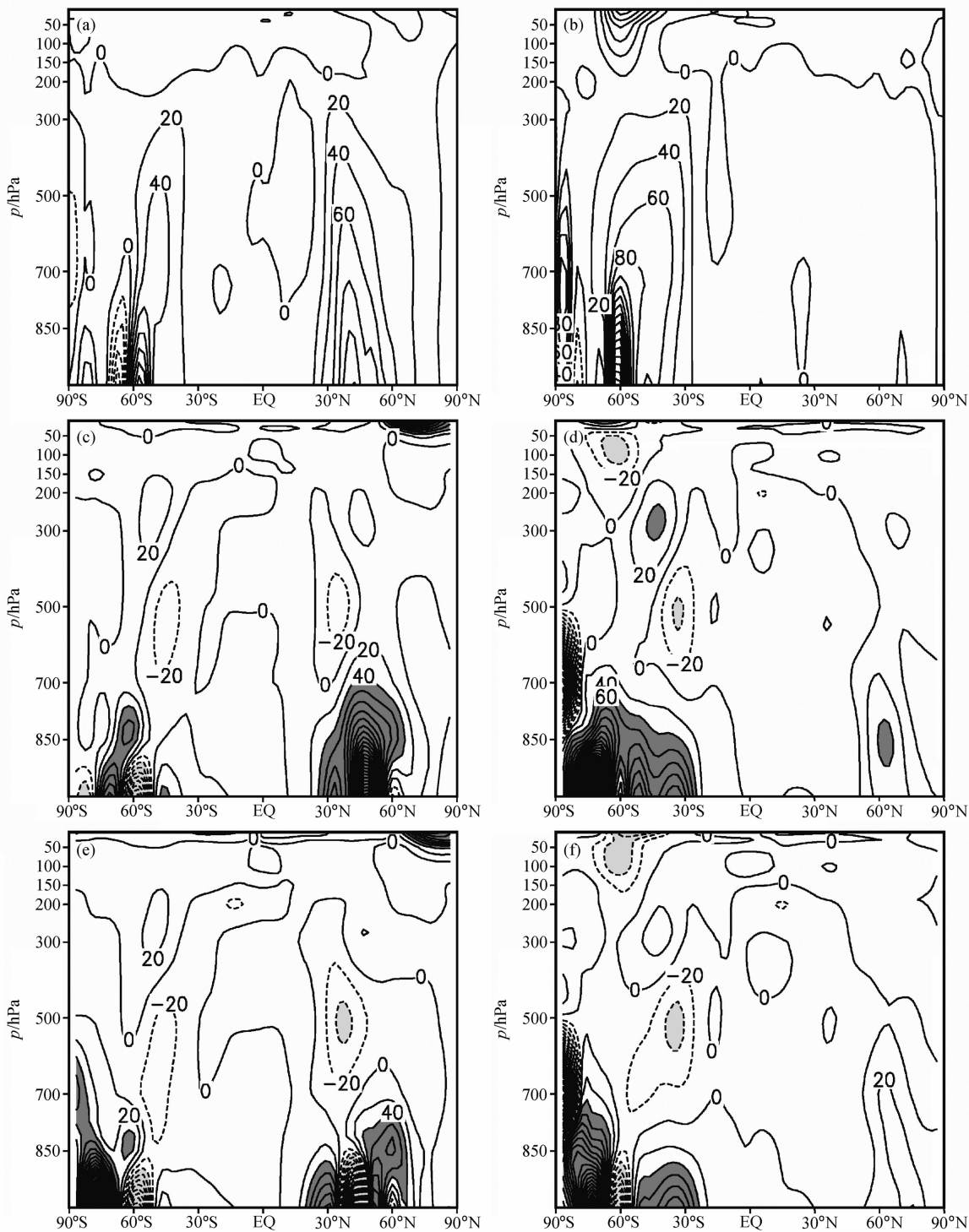


图3 转换项 C_{AT} ($A_Z \rightarrow A_{TE}$) 的纬向平均垂直剖面(单位: $10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Pa}^{-1}$); 1月 (a) 和 7月 (b) NCEP 资料; 1月 (c) 和 7月 (d) GOALS-2 与 NCEP 的差值; 1月 (e) 和 7月 (f) GOALS-4 与 NCEP 的差值

Fig. 3 The meridional and vertical cross sections of zonal mean conversion C_{AT} ($A_Z \rightarrow A_{TE}$) for Jan (a) and Jul (b) from NCEP reanalysis, for Jan (c) and Jul (d) from difference between GOALS-2 and NCEP reanalysis, and for Jan (e) and Jul (f) from difference between GOALS-4 and NCEP reanalysis. Units: $10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Pa}^{-1}$

可能的原因是模式大气对陡峭地形和海冰影响的响应有问题。

4.4 纬向有效位能向纬向动能的转换

从纬向有效位能向纬向动能转换率 C_z 的全球积分值来看, 两个版本模式中该值的符号与观测值相反(图 1、2)。我们知道, 这一项主要反映纬向平均的垂直运动 $[\omega]$ 与平均温度 $[T]$ 的相关特征, 在暖区上升、冷区下沉处, $C_z > 0$, 有效位能 A_z 向纬向动能 K_z 转换, 是 Hadley 环流中的特点。Ferrel 环流则相反, $C_z < 0$, 消耗纬向动能, 向有效位能转换。因此, GOALS 模式 C_z 全球积分值为负可能与直接环流和间接环流强弱的综合影响有关。

两个模式的上升运动区(负值)和下沉运动区(正值)在中低纬地区与观测基本一致, 但 1 月份模拟的上升、下沉运动中心位置接近对流层低层, 而观测事实却是在对流层中高层 400 hPa 左右(图略)。因此, 模拟的 C_z 值中心位置偏低主要是由于上升、下沉运动中心位置偏低造成的。7 月份情况类似, 中低纬地区模拟的最大上升、下沉运动集中在 700 hPa 附近, 而观测到的较强上升、下沉运动区却从对流低层 850 hPa 一直延伸到高层 250 hPa。垂直运动的最大误差是在南极地区出现了不合实际的较强上升运动(负值), 而观测结果南极是下沉区(正值)。从模式气候系统的能量收支分析^[27]可知, 与 NCEP 资料相比, 模拟的南极地区地气系统大约有偏多 30 W/m² 的净短波辐射通量收入, 这是造成南极地区模拟误差的根本原因。其直接的一个后果是模拟的南极地区大部分大气层温度偏高, 特别是 7 月对流层中低层可偏暖 10 K 以上, 而对流层上层却偏冷, 这种模拟的温度误差的垂直分布是导致南极地区强上升运动的一种原因。这种误差使得模式中冷区为上升运动, 导致 C_z 为负值, 这也就是模式的 C_z 值在高纬地区有较大误差的根本原因。

4.5 涡动有效位能以及向动能的转换

斜压转换项 C_{A_T} 和 C_{A_S} , 定常涡动和瞬变涡动有效位能(A_{SE} 和 A_{TE}), 这两个涡动贮蓄项之间的非线性转换, 以及分别向动能的转换项 C_{E_S} 和 C_{E_T} 都是描述斜压涡旋活动某种特征的。因此它们之间的平均场以及模式与实际情况的偏差都有相应的结构特征。

当考虑全球积分时(图 1、2), 斜压转换项 C_{E_S} 在两个版本模式的冬夏季比再分析资料结果都显著

偏高, 这种增长并不与 C_{A_S} 的变化相对应(模式与观测的 C_{A_S} 差别不大, 甚至夏季还偏低)。因此, 它们肯定是由定常涡动有效位能的非绝热加热制造率的变化引起, 或者由该贮蓄项从前一个月到后一个月的时间变化所产生的。对于本研究所考虑的月份, Ulbrich 和 Ponater^[25]发现后者的影响居于次要地位。因此, GOALS 模式的定常涡动有效位能的非绝热加热制造率应该比观测值偏强。的确, 当我们把定常涡动的非绝热制造率当作余项来计算时, 对比模式与再分析资料结果, 发现模式中 A_{SE} 的非绝热加热制造率(G_{SE})偏高。

与 GOALS-2 相比, GOALS-4 中 C_{E_T} 全球积分值的改善是与 C_{A_T} 的全球积分值的改善相一致的(图 1、2)。前面已经指出, 比较新旧版本模式, 斜压转换项 C_{A_T} 和 C_{A_S} 具有随季节和所考虑的大气区域变化的明显局地特征。这些项的局地变化分布形式总的来说与 C_{E_S} 和 C_{E_T} 类似的变化相一致。图 4 给出了描述暖空气上升、冷空气下沉的斜压转换项 C_{E_T} 的观测和模拟结果。可以看到, 两个模式能基本模拟出中纬度对流层的 C_{E_T} 的最大值中心, 而且冬半球强于夏半球的变化特征也能合理再现(对比图 4a~f)。两个模式的 C_{E_T} 误差区域, 以及 GOALS-4 比 GOALS-2 的改善区域(图 4g~j)和它们的 C_{A_T} 转换项(图 3c~f)基本一致。因此, 从纬向平均贡献进一步证实了前面的讨论结果。虽然模式中 C_{E_T} 的局地误差主要原因是与 C_{A_T} 的局地误差有关, 但瞬变涡动有效位能非绝热加热制造率的影响也不容忽视(图 1、2)。

为了了解 GOALS 模式局地非绝热加热异常的确切原因, 必须用两个模式特定的加热场资料来进行详细研究。由于加热场资料在两个模式积分时没有保存下来, 因此这个问题有待于将来进一步研究。

4.6 纬向平均动能和正压转换

与 GOALS-2 相比, GOALS-4 模拟的纬向平均动能 K_z 的全球积分值更合乎实际, 定常波引起的转换项 C_{K_S} 几乎没什么变化, 但瞬变波引起的转换 C_{K_T} 的积分值好像变得更糟(图 1、2)。

从纬向平均(图 5)来看, 两个模式基本上能模拟出观测到的副热带急流、冬半球高纬度高空的极夜急流、夏半球低纬度高空东风急流等主要特征(图 5a~f)。但两个模式中的夏半球高空东风急流

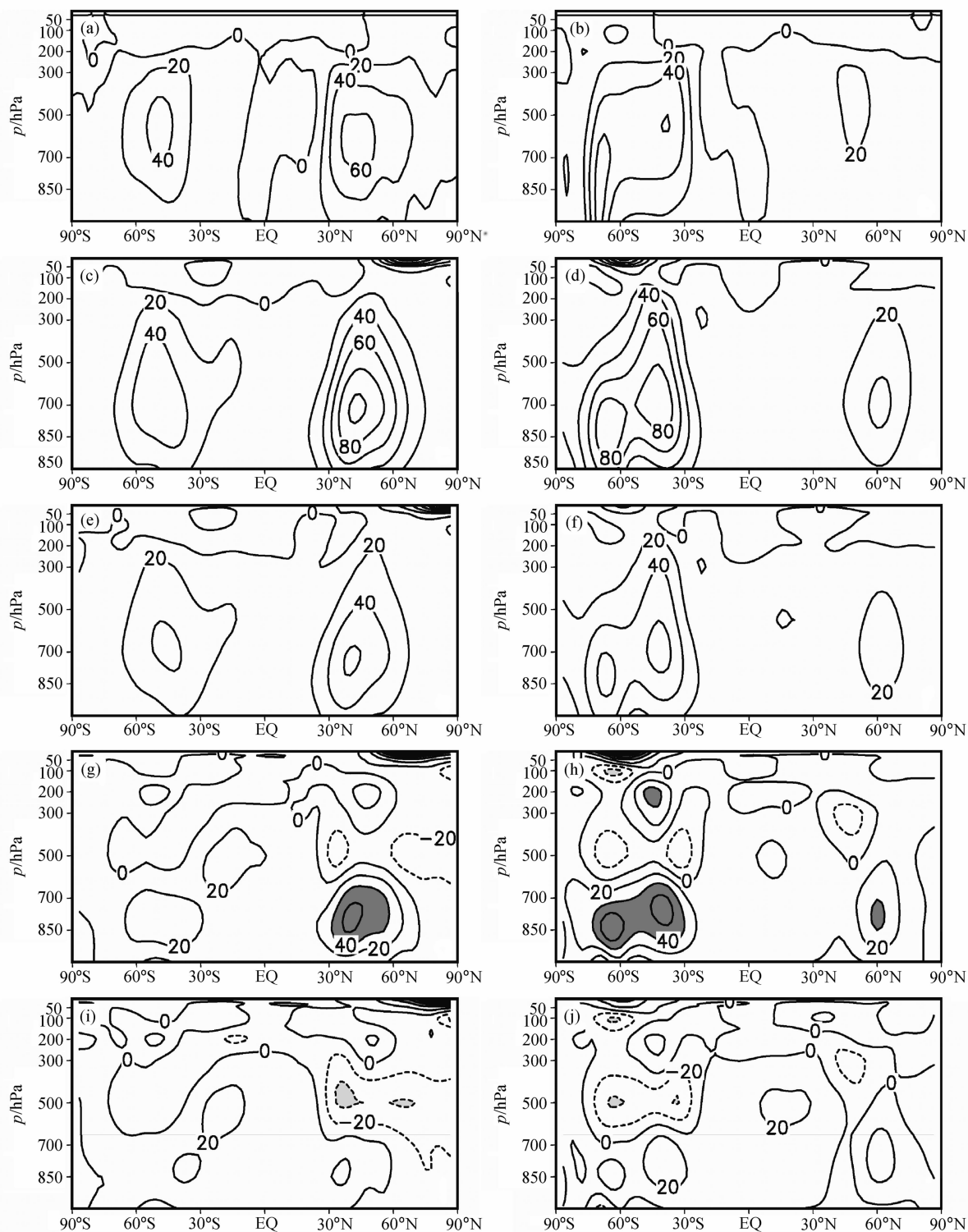


图4 $C_{E_T}(A_{TE} \rightarrow K_{TE})$ 转换项 (单位: $10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Pa}^{-1}$): 1月(a)和7月(b)NCEP资料; 1月(c)和7月(d) GOALS-2; 1月(e)和7月(f) GOALS-4; 1月(g)和7月(h) GOALS-2与NCEP的差值; 1月(i)和7月(j) GOALS-4与NCEP的差值

Fig. 4 Conversion $C_{E_T}(A_{TE} \rightarrow K_{TE})$ for Jan (a) and Jul (b) from NCEP reanalysis, for Jan (c) and Jul (d) from GOALS-2, for Jan (e) and Jul (f) from GOALS-4, for Jan (g) and Jul (h) from difference between GOALS-2 and NCEP reanalysis, and for Jan (i) and Jul (j) from difference between GOALS-4 and NCEP reanalysis. Units: $10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Pa}^{-1}$

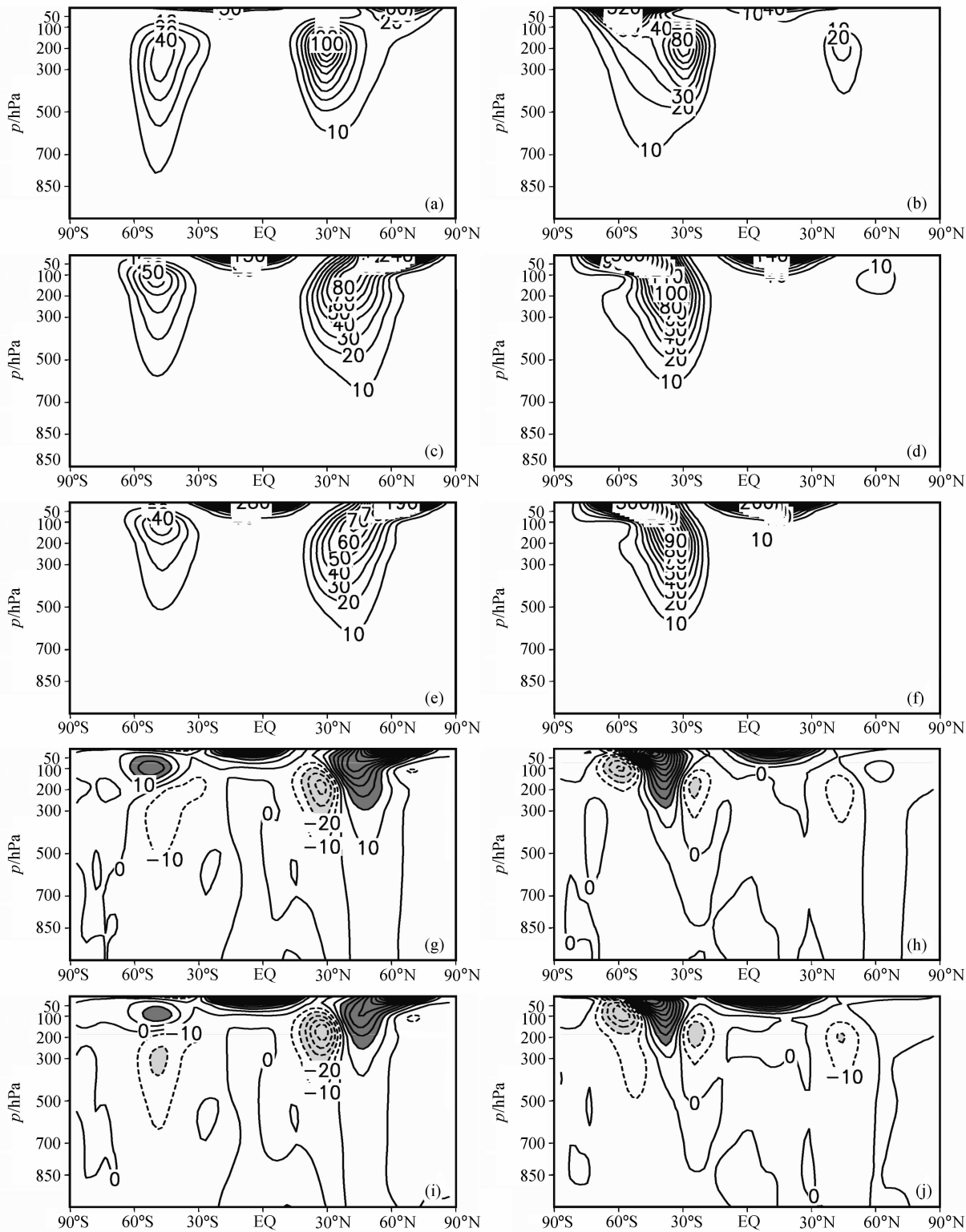


图5 同图4, 但为 K_z 贮蓄项(单位: $\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Pa}^{-1}$)

Fig. 5 As in Fig. 4, but for the reservoir of zonal kinetic energy K_z . Units: $\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Pa}^{-1}$

偏强太多, 夏半球的副热带急流也明显偏弱。1 月份, 北半球的副热带急流在 30°N 附近减少, 在

45°N 处增大, 说明急流中心最大值向极地方向移至 45°N (由图 5g、i 的局地正误差表示)。两个模式对

极夜急流的模拟误差也基本相同,即冬季偏强(图 5g、i),夏季偏弱(图 5h、j)。对比 GOALS-2 和 GOALS-4 结果,可发现 K_Z 全球积分值在 GOALS-4 中改善的原因是由于副热带急流和极夜急流强度有所减弱的结果。

正压转换项 C_{K_T} 全球积分值在 GOALS-4 中变糟的原因主要是由于副热带急流轴附近的负误差减少(图 6b、c)。因此,新版本中局地误差的改善可

能使模式中正负系统误差的抵消不如旧版本,导致全球积分值可能变坏。我们注意到,两个模式对北半球夏天的 C_{K_T} 负值中心(图 6a)基本上都没能模拟出来(图 6b、c 中北半球副热带急流附近的正误差表示),这表明模拟的瞬变涡动动量经向输送在北半球夏天副热带急流附近明显偏弱,也就是说瞬变涡动动能向纬向平均动能的转换偏弱,它可能是北半球夏天模拟的副热带急流偏弱(图 5b、d、f)的主

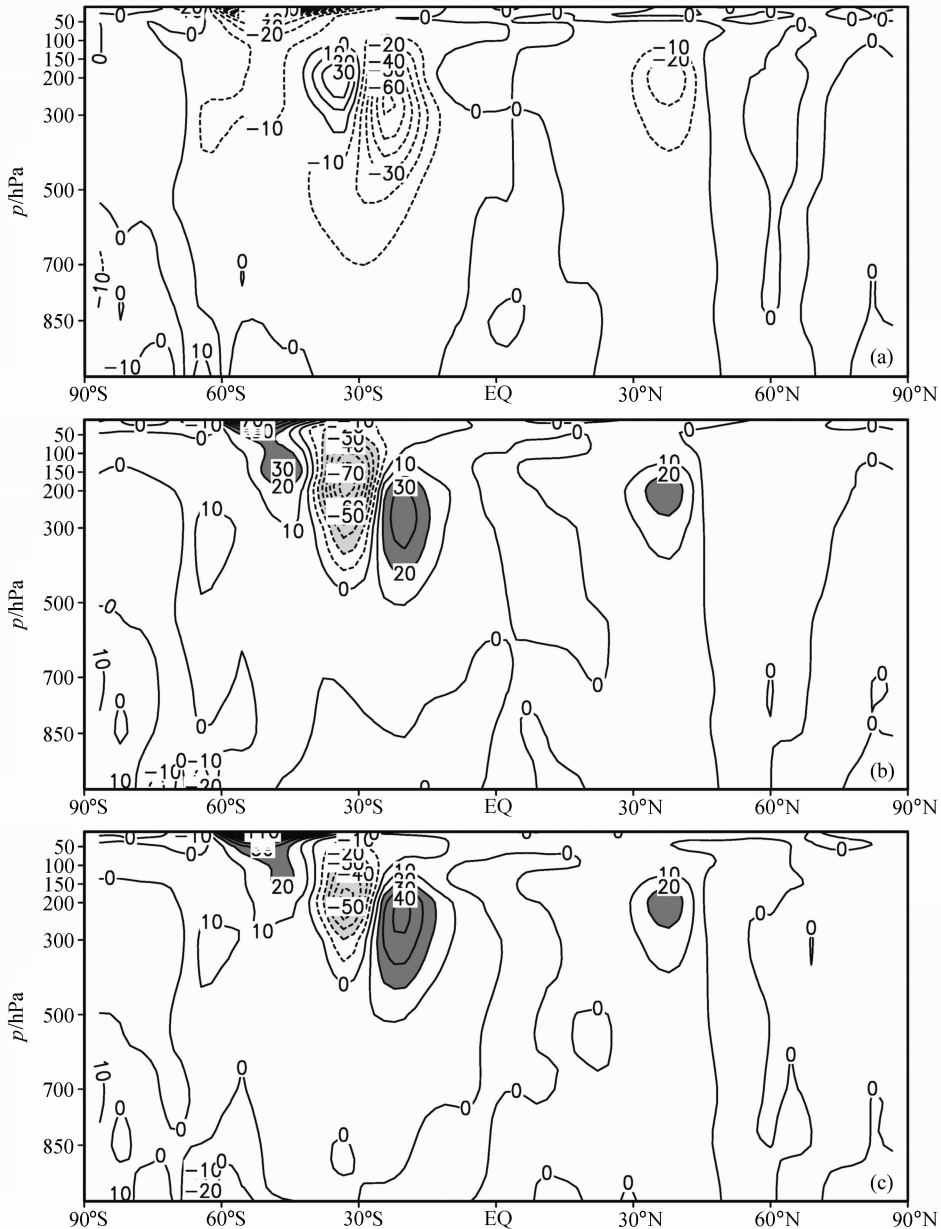


图 6 7 月份 C_{K_T} ($K_Z \rightarrow K_{TE}$) 转换项(单位: $10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Pa}^{-1}$): (a) NCEP 资料; (b) GOALS-2 与 NCEP 的差; (c) GOALS-4 与 NCEP 的差

Fig. 6 Conversion C_{K_T} ($K_Z \rightarrow K_{TE}$) in Jul (units: $10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Pa}^{-1}$): (a) NCEP reanalysis; (b) difference between GOALS-2 and NCEP reanalysis; (c) difference between GOALS-4 and NCEP reanalysis

要原因。

4.7 涡动动能

与 GOALS-2 相比, GOALS-4 模拟的定常涡动贮蓄项 K_{SE} 的全球积分值 1 月份有了提高(图 1), 但 7 月份反而减少(图 2), 而且两个模式都比观测偏低。

旧版本 GOALS-2 中 1 月份 30°N 处的 K_{SE} 局地最大值(归因于副热带急流的贡献)不到再分析资料能量值的一半, 而且位置比正常偏北 5° (图 7c)。新版本 GOALS-4 模拟的 K_{SE} 能量最大值的位置则较为正确(图 7e)。虽然该纬度处绝对误差减少, 但模拟的能量仍只占观测结果的 1/2。赤道上方对流层 K_{SE} 极大值的模拟 GOALS-4 比 GOALS-2 更接近实际, 但 55°N 处极地急流产生的对流层最大值在两个模式中都没能模拟出来(图 7a、c、e)。7 月份定常涡动动能 K_{SE} 的分布形式与 1 月份不同, 高值带几乎在整个对流层顶都有。相对较弱的最大值出现在两半球纬向平均急流处(45°N , 30°S)和 15°N 。另外一个最大值根据 1 月份的结果, 我们认为与极地急流有关(图 7b)。和观测相比, GOALS-2 在南半球模拟较差, 两个中心基本上没能模拟出来, 南极高空也出现了不合实际的大值(图 7d)。在新版本 GOALS-4 中, 南半球的两个中心能得到合理的再现, 但强度稍弱, 与极地急流有关的 K_{SE} 最大值位置偏向极地, 移至 65°S 。虽然北半球夏天 45°N 处的最大值在 GOALS-4 中没模拟出来(图 7f), 而这主要是由于副热带急流的模拟 GOALS-4 不如 GOALS-2 的缘故(图 5d、f), 但 GOALS-4 在整个对流层顶的分布形式明显更接近观测。还可看出, 南极高空和低纬度对流层低层误差减小(对比图 7d 和 f)的局地改善是 GOALS-4 的 7 月份 K_{SE} 全球积分值反而不如 GOALS-2 的主要原因。

GOALS-4 中瞬变涡动动能 K_{TE} 冬夏季的全球积分值都比 GOALS-2 偏低(图 1、2)。与观测相比, GOALS-4 模拟的 K_{TE} 也偏低。联系到瞬变涡动有效位能向瞬变涡动动能的转换项 C_{E_T} (K_{TE} 的主要能量来源)模式值反而比观测值偏大, 可以认为模式中瞬变涡动动能的耗散项取值过大(图 1、2)是造成 K_{TE} 误差的主要原因。从垂直剖面(图 8)看, 两个模式的 K_{TE} 误差区域基本相同。副热带急流最大值处的能量值都比观测偏低, GOALS-4 偏低更明显, 这与前面提到的 GOALS-4 斜压性减弱相一

致。低纬度以及对流层高层模拟都偏高, 比较而言, GOALS-4 误差较小。

前面提到, 两个模式版本模拟的非线性转换项 $C_{K_{TE}-K_{SE}}$ 的全球积分值与观测符号相反(图 1、2)。虽然它的全球平均值信号不好解释(由于它近似为 0), 但描述瞬变涡动量逆着和沿着定常涡动量梯度方向输送的纬向平均贡献却能够得到解释。旧版本 GOALS-2 中对对应副热带急流和极地急流的 K_{SE} 最大值之间的位置 $C_{K_{TE}-K_{SE}}$ 的贡献是正的, 但局地值太小以至无法抵消低纬负的贡献(图 9b)。根据 Ulbrich 和 Speth^[10]的解释, 非线性转换项最大贡献位于急流之间的位置, 即 $C_{K_{TE}-K_{SE}}$ 正的最大值处于 K_{SE} 是局地最小值、 K_{TE} 是局地最大值的位置。因为较强的 K_{SE} 对比和较大的 K_{TE} 值意味着需要较强的局地转换率来起平滑作用, 这个事实可以认为大气中有一种物理强迫机制使得大气达到更为均匀的状态。GOALS-2 模式中急流所对应的 K_{SE} 最大值和 K_{TE} 都比观测偏低, 因而 $C_{K_{TE}-K_{SE}}$ 的局地正值比观测偏弱是可以理解的。新版本 GOALS-4 的低纬度 $C_{K_{TE}-K_{SE}}$ 负贡献比 GOALS-2 有所改善, 但局地正的贡献却比 GOALS-2 偏弱。这也不难理解, 因为 1 月份 GOALS-4 的 K_{TE} 值比 GOALS-2 偏小(图 8c、e), 从而导致瞬变涡动动能向定常涡动动能的转换 $C_{K_{TE}-K_{SE}}$ 正的贡献也偏弱(对比图 9b、c)。

4.8 讨论

GOALS-2 版本模式对能量循环各项的全球积分值和对这些积分值有贡献的局地(纬向平均)过程给予了相当实际的估算。然而, 在许多情况下正确的全球积分值实际上仅仅是因为显著局地误差的相互抵消。GOALS-2 中与实际最显著的偏差是纬向平均温度分布。对流层中低层经向温度对比被减弱, 但高层经向温度对比异常偏高, 总的说来, 斜压性增强。因为斜压性被改变, 所以影响了有效位能的贮蓄项和斜压转换项。由于温度误差的垂直分布, 另一个直接影响这些能量循环项的因子, 即垂直稳定度在中低纬度减小了。

新版本 GOALS-4 中由于辐射日变化方案的引入使中低纬温度降低, 高纬温度偏高, 导致斜压性减弱, 但高层的温度误差没有改进。与经向温度梯度的变化相联系, 斜压能量转化项和涡动有效位能局地过程的贡献发生了有利的变化。然而全球积分值并不总是得到改善, 因为新版本中正负误差的抵

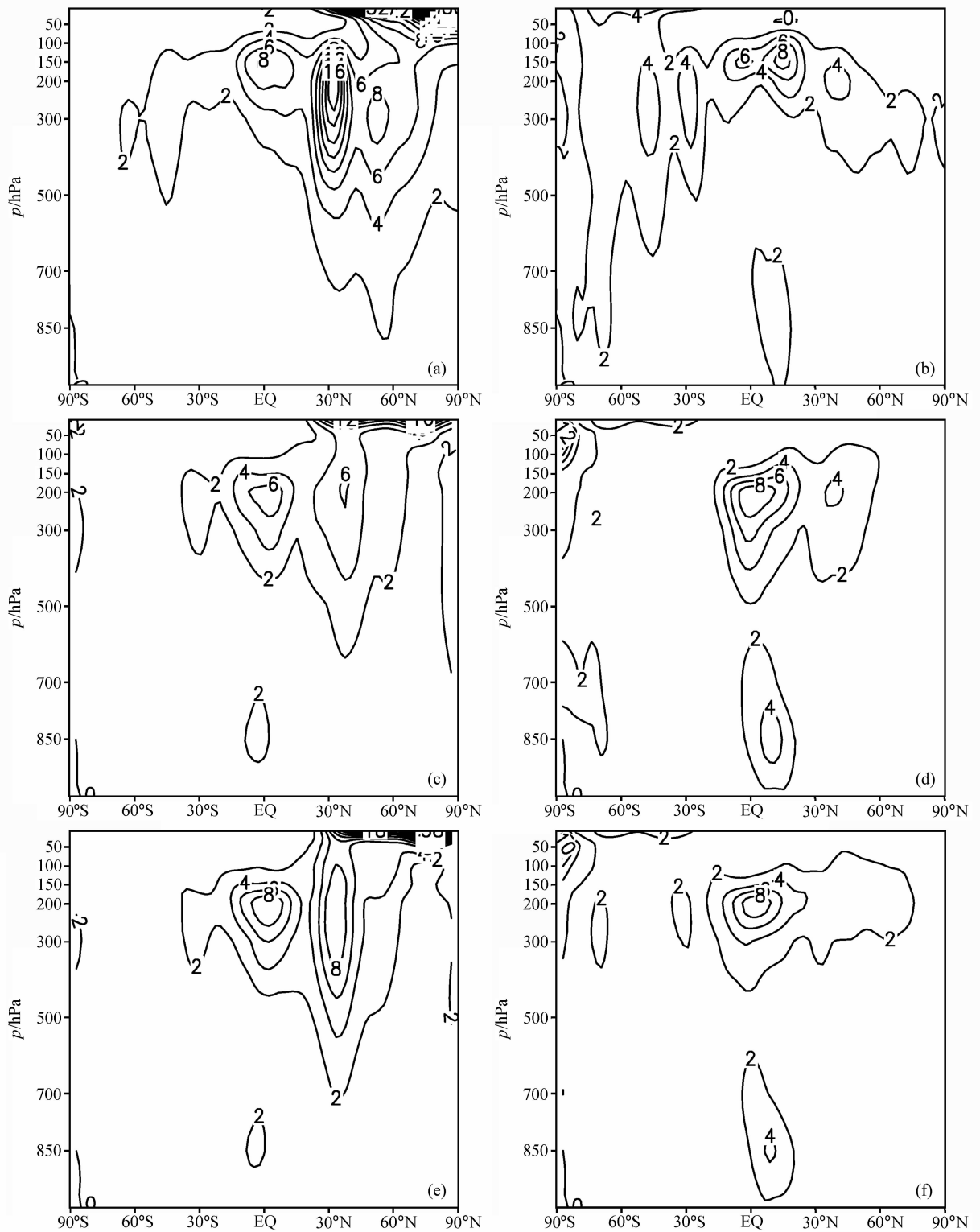


图 7 K_{SE} 贮蓄项(单位: $J \cdot m^{-2} \cdot Pa^{-1}$): 1 月(a)和 7 月(b) NCEP 资料; 1 月(c) 和 7 月(d) GOALS-2; 1 月(e)和 7 月(f) GOALS-4

Fig. 7 The reservoir of stationary eddy kinetic energy K_{SE} for Jan (a) and Jul (b) from NCEP reanalysis, for Jan (c) and Jul (d) from GOALS-2, and for Jan (e) and Jul (f) from GOALS-4. Units: $J \cdot m^{-2} \cdot Pa^{-1}$

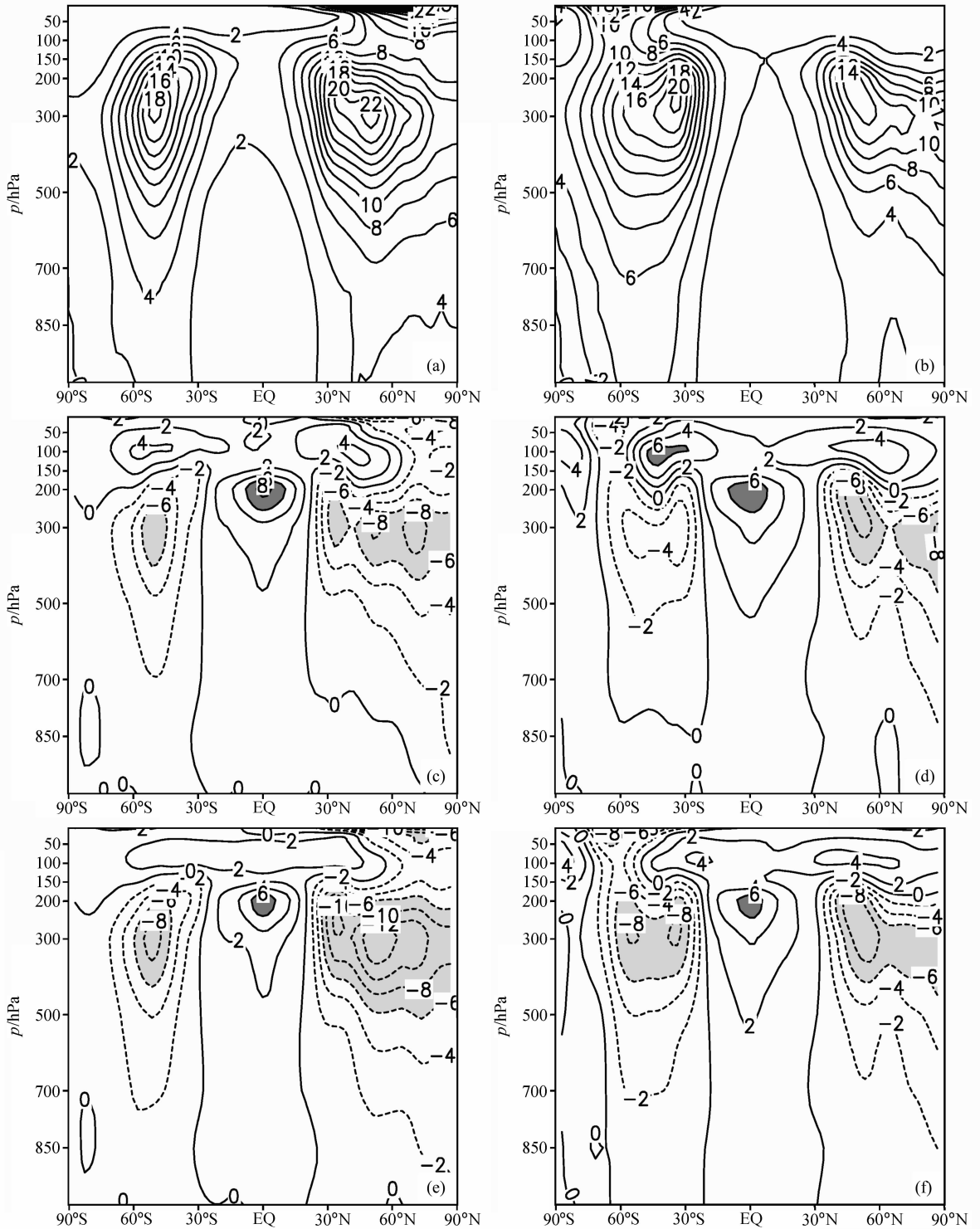


图 8 同图 3, 但为 K_{TE} 贮蓄项(单位: $J \cdot m^{-2} \cdot Pa^{-1}$)

Fig. 8 As in Fig. 3, but for the reservoir of transient eddy kinetic energy K_{TE} . Units: $J \cdot m^{-2} \cdot Pa^{-1}$

消不如旧版本那么“有效”。

从涡动有效位能的全球平均收支来看, 两个版本模式模拟的 A_{SE} 制造率比观测偏强。比较两个模

式中转换项 C_{As} 和 C_{Es} 的贡献, 可以了解到定常涡动有效位能制造率的模拟偏强是模式中斜压转换项 C_{Es} 误差的重要原因。因此, GOALS 模式中非绝热

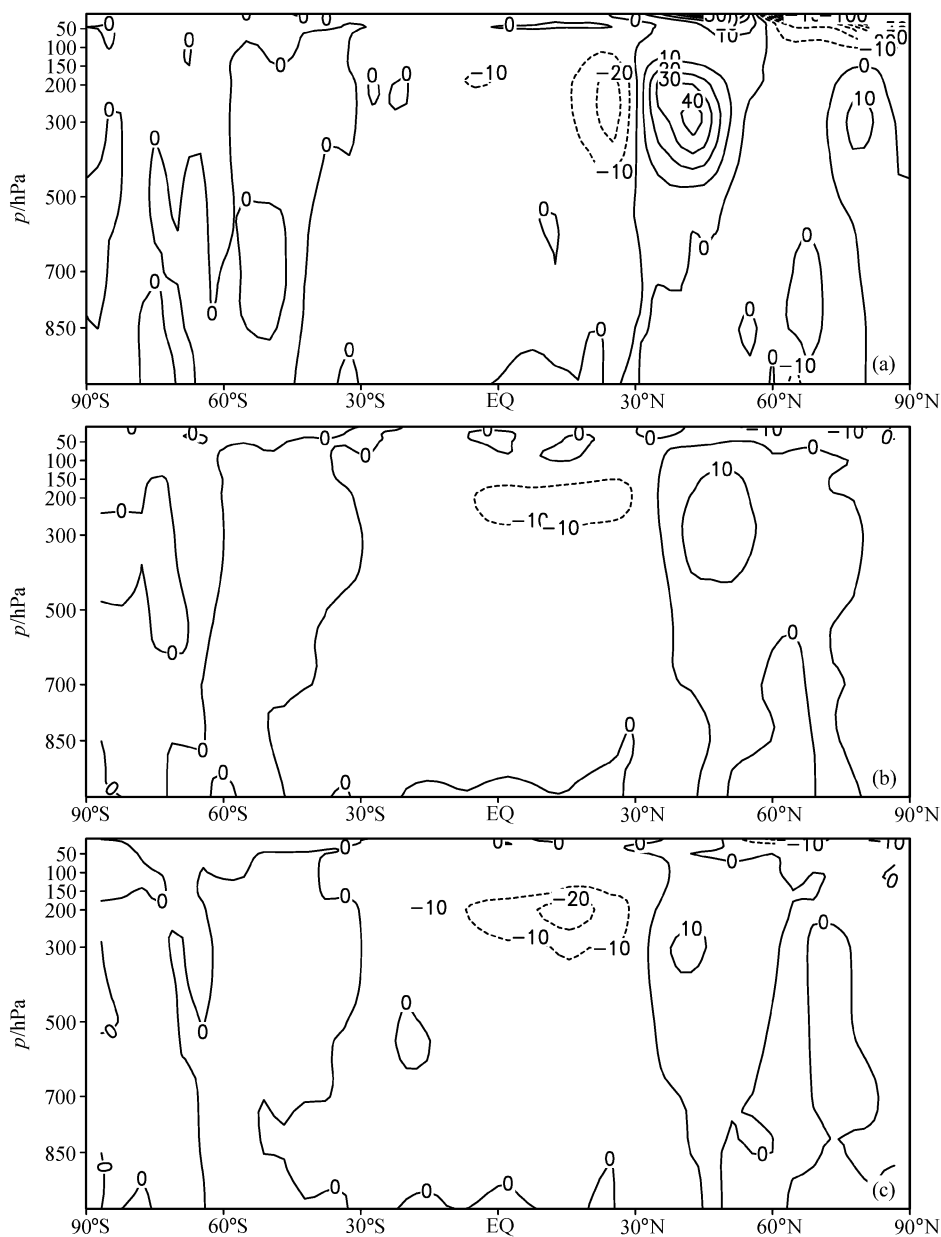


图 9 1 月份 $C_{K_{TE} \rightarrow K_{SE}}$ ($K_{TE} \rightarrow K_{SE}$) 转换项 (单位: $10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Pa}^{-1}$): (a) NCEP 资料; (b) GOALS-2; (c) GOALS-4

Fig. 9 Conversion $C_{K_{TE} \rightarrow K_{SE}}$ ($K_{TE} \rightarrow K_{SE}$) in Jan (units: $10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Pa}^{-1}$): (a) NCEP reanalysis; (b) GOALS-2; (c) GOALS-4

制造率的增强原因应引起我们密切的关注。由前面分析可知模式热带地区上升运动偏弱, 对流发展不强, 导致热带地区模式降水偏少以及与之相联系的潜热非绝热加热率偏弱 (可能是参数化问题)。那么, GOALS 模式非绝热制造率偏强的原因可能是受到辐射冷却作用总体偏弱的影响 (模式的感热作用也有影响, 但主要集中在近地层)。在利用三维空间的不同非绝热加热资料进行有效评估之前, 这个结论还不能被证实。很明显, 有必要对非绝热加

热过程作进一步的诊断研究^[28]。

GOALS 模式瞬变涡动动能在纬向平均副热带急流最大值处明显太弱, 而在低纬地区却异常偏强。与副热带急流相关的纬向平均动能最大值位置比正常位置有些偏移, 极地急流最大值几乎完全消失, 这也是许多气候模式的共同问题^[25]。正如 Arpe 和 Klinker^[29] 指出的那样, 纬向平均急流弱的向极移动在模式 2 天预报以后就明显出现, 而且随着预报时间增长进一步加强。他们也认为长期预报

的结果是极地急流纬向平均动能场的逐渐消失。

瞬变涡动动量输送, 即正压转换项 C_{K_T} 的弱点在高分辨率的 ECMWF 业务预报模式中没有反映出来^[29]。这可能是由于 GOALS 模式 R15 分辨率对涡动动量收支的影响没有完全解决好, 因此高分辨率模式的结果应该能有明显的改进^[30, 31]。

5 结论

大气能量循环的诊断分析是理解和改进气候系统模式的一个很合适的方法。虽然能量循环参数的全球平均值仅限于定性地估算 GOALS 模式, 但能量循环贮蓄和转换项纬向平均贡献能够解释全球平均值改善和转坏的原因, 以及诊断分析参数化方案变化后产生的影响。

模式的两个版本基本上能正确地模拟出全球能量循环的主要特征, 即纬向有效位能(A_Z)向定常和瞬变涡动有效位能(A_{SE} 和 A_{TE})转换, 涡动有效位能向涡动动能转换(C_{E_S} 和 C_{E_T}), 而且瞬变涡动引起的能量转换项较大。定常涡动和瞬变涡动有效位能(A_{SE} 和 A_{TE})的贮蓄项有着大致相当的能量值, 两者之间非线性转换的方向是由定常涡动有效位能贮蓄项(A_{SE})向瞬变涡动有效位能贮蓄项(A_{TE})转换。瞬变涡动动能贮蓄项(K_{TE})大约是定常涡动动能贮蓄项(K_{SE})的 2 倍(1 月份)至 3 倍(7 月份)。正压转换方向(C_{K_S} , C_{K_T})是从涡动动能向纬向平均动能转换。

本文对两个版本(GOALS-2 和 GOALS-4)的具体研究结果如下: GOALS-2 旧版本能较好模拟全球平均值常常是不同符号局地误差的相互抵消结果。因此, GOALS-4 模式中某种局地过程的改善在一些情况下导致了全球积分值的转坏。辐射日变化参数化方案的引入可能对能量循环各参数的局地贡献有着明显的影响。如, 纬向平均有效位能(A_Z)向瞬变涡动有效位能(A_{TE})的斜压转换率 C_{A_T} 和瞬变涡动有效位能(A_{TE})向瞬变涡动动能(K_{TE})的斜压转换率 C_{E_T} 以及定常涡动动能 K_{SE} 的局地贡献有明显改善。

模式两个版本中南极地区不合实际的上升运动是模拟的纬向平均有效位能与纬向平均动能之间的转换项 C_Z 全球积分值为负数的主要原因。模式中瞬变涡动动能的耗散项取值过大造成瞬变涡动动能 K_{TE} 比观测偏低, 且 GOALS 模式中急流所对应的

定常涡动动能 K_{SE} 最大值也比观测偏低, 因而瞬变涡动动能向定常涡动动能的转换 $C_{K_{TE}-K_{SE}}$ 的局地正贡献比观测明显偏弱, 即模式描写不好涡动动能之间的正压非线性转换项, 这些都有待今后研究与改进。

附录 大气能量循环各参数的定义式

$$\gamma = -\frac{\kappa}{p} \left(\frac{\partial}{\partial p} [T] - \kappa \frac{[T]}{p} \right)^{-1}, \quad (A1)$$

$$A_Z = \frac{\gamma}{2g} ([T] - \{T\})^2, \quad (A2)$$

$$A_E = A_{SE} + A_{TE}, \quad (A3)$$

$$A_{SE} = \frac{\gamma}{2g} [\overline{T^{*2}}], \quad (A4)$$

$$A_{TE} = \frac{\gamma}{2g} [\overline{T'^2}], \quad (A5)$$

$$K_Z = \frac{1}{2g} ([\bar{u}]^2 + [\bar{v}]^2), \quad (A6)$$

$$K_E = K_{SE} + K_{TE}, \quad (A7)$$

$$K_{SE} = \frac{1}{2g} [\overline{u^{*2}} + \overline{v^{*2}}], \quad (A8)$$

$$K_{TE} = \frac{1}{2g} [\overline{u'^2} + \overline{v'^2}], \quad (A9)$$

$$C_{A_S} = -\frac{\gamma}{g} \left\{ [\bar{v}^* \bar{T}^*] \frac{\partial [\bar{T}]}{r \partial \varphi} + [\bar{\omega}^* \bar{T}^*] \right\} \cdot \left[\frac{\partial}{\partial p} ([T] - \{T\}) - \frac{R}{p c_p} ([T] - \{T\}) \right], \quad (A10)$$

$$C_{A_T} = -\frac{\gamma}{g} \left\{ [\bar{v}' \bar{T}'] \frac{\partial [\bar{T}]}{r \partial \varphi} + [\bar{\omega}' \bar{T}'] \right\} \cdot \left[\frac{\partial}{\partial p} ([T] - \{T\}) - \frac{R}{p c_p} ([T] - \{T\}) \right], \quad (A11)$$

$$C_Z = -([\bar{\omega}] - \{\bar{\omega}\})([\bar{T}_v] - \{\bar{T}_v\}) \frac{R}{g p}, \quad (A12)$$

$$C_{E_S} = -[\bar{\omega}^* \bar{T}_v^*] \frac{R}{g p}, \quad (A13)$$

$$C_{E_T} = -[\bar{\omega}' \bar{T}_v'] \frac{R}{g p}, \quad (A14)$$

$$C_{K_S} = -\frac{1}{g} \left([\bar{u}^* \bar{v}^*] \frac{\partial [\bar{u}]}{r \partial \varphi} + [\bar{u}^* \bar{v}^*] \cdot [\bar{u}] \cdot \frac{\text{tg} \varphi}{r} + [\bar{v}^* \bar{v}^*] \frac{\partial [\bar{v}]}{r \partial \varphi} - [\bar{u}^* \bar{u}^*] \cdot [\bar{v}] \cdot \frac{\text{tg} \varphi}{r} + [\bar{\omega}^* \bar{u}^*] \frac{\partial [\bar{u}]}{\partial p} + [\bar{\omega}^* \bar{v}^*] \frac{\partial [\bar{v}]}{\partial p} \right), \quad (A15)$$

$$C_{K_T} = -\frac{1}{g} \left([\overline{u'v'}] \frac{\partial [\overline{u}]}{r \partial \varphi} + [\overline{u'v'}] \cdot [\overline{u}] \cdot \frac{tg\varphi}{r} + [\overline{v'v'}] \frac{\partial [\overline{v}]}{r \partial \varphi} - [\overline{u'u'}] \cdot [\overline{v}] \frac{tg\varphi}{r} + [\overline{\omega'u'}] \frac{\partial [\overline{u}]}{\partial p} + [\overline{\omega'v'}] \frac{\partial [\overline{v}]}{\partial p} \right), \quad (A16)$$

$$C_{A_{TE}-A_{SE}} = \frac{\gamma}{g} \left(\overline{u'T'}^* \frac{1}{r \cos \varphi} \frac{\partial \overline{T}^*}{\partial \lambda} + \overline{v'T'}^* \frac{\partial \overline{T}^*}{r \partial \varphi} \right), \quad (A17)$$

$$C_{K_{TE}-K_{SE}} = \frac{1}{g} \left(\overline{u'u'}^* \frac{1}{r \cos \varphi} \frac{\partial \overline{u}^*}{\partial \lambda} + \overline{u'v'}^* \frac{\partial \overline{u}^*}{r \partial \varphi} + \overline{u'v'}^* \cdot \overline{u}^* \frac{tg\varphi}{r} + \overline{v'v'}^* \frac{\partial \overline{v}^*}{r \partial \varphi} - [\overline{u'u'}]^* \frac{tg\varphi}{r} \overline{v}^* + \overline{u'v'}^* \frac{1}{r \cos \varphi} \frac{\partial \overline{v}^*}{\partial \lambda} \right), \quad (A18)$$

其中, $\kappa = R/c_p$, c_p 为定压比热, R 为气体常数, g 为地球重力加速度, p 为气压, r 为地球半径, t 为时间, T 为温度, T_v 为虚位温, u 为纬向风, v 为经向风, ω 为 p 坐标中垂直速度, φ 为纬度, λ 为经度, γ 为静力稳定度参数, $\bar{x}$ 表示 x 的时间平均(定常部分), x' 表示与时间平均的离差(瞬变部分), $\{x\}$ 表示全球水平平均, $[x]$ 表示纬向平均, x^* 表示与纬向平均的偏差。

参考文献 (References)

- [1] Lorenz E N. Available potential energy and the maintenance of general circulation. *Tellus*, 1955, **7**: 157~167
- [2] Saltzman B. Equations governing the energetics of the larger scales of atmospheric turbulence in the domain of wavenumber. *J. Atmos. Sci.*, 1957, **14**: 513~523
- [3] Oort A H. On estimates of the atmospheric energy cycle. *Mon. Wea. Rev.*, 1964, **92**: 483~493
- [4] Lambert S J. Spectral energetics of the Canadian climate center general circulation model. *Mon. Wea. Rev.*, 1987, **115**: 1295~1304
- [5] Sheng J, Hayashi Y. Observed and simulated energy cycles in the frequency domain. *J. Atmos. Sci.*, 1990, **47**: 1243~1254
- [6] Kung E C, Tanaka H. Energetics analysis of the global circulation during the special observation period of FGGE. *J. Atmos. Sci.*, 1983, **40**: 2575~2592
- [7] Sheng J, Hayashi Y. Estimation of atmospheric energetics in the frequency domain during the FGGE year. *J. Atmos. Sci.*, 1990, **47**: 1255~1268
- [8] Sheng J, Derome J. An observational study of the energy transfer between the seasonal mean flow and transient eddies. *Tellus*, 1991, **43**: 128~144
- [9] Lau N-C, Oort A H. A comparative study of observed Northern Hemisphere circulation statistics based on GFDL and NMC analyses. Part II: Transient eddy statistics and the energy cycle. *Mon. Wea. Rev.*, 1982, **110**: 889~906
- [10] Ulbrich U, Speth P. The global energy cycle of stationary and transient atmospheric waves: Results from ECMWF analyses. *Meteor. Atmos. Phys.*, 1991, **45**: 125~138
- [11] 吴国雄, 张学洪, 刘辉, 等. LASG 全球海洋-大气-陆面系统模式(GOALS/LASG)及其模拟研究. *应用气象学报*, 1997, **8**(增刊): 15~28
Wu Guoxiong, Zhang Xuehong, Liu Hui, et al. Global ocean-atmosphere-land system model of LASG (GOALS/LASG) and its performance in simulation study. *Quart. J. Appl. Meteor.* (in Chinese), 1997, **8** (Supplement Issue): 15~28
- [12] Zhang Xuehong, Shi Guangyu, Liu Hui, et al. *IAP Global Ocean-Atmosphere-Land System Model*. Beijing: Science Press, 2000. 252 pp
- [13] 张韬. 气候系统中大气能量学的研究. 北京: 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 2001. 200 pp
Zhang Tao. Atmospheric Energetics of the Climate System (in Chinese). Ph. D. dissertation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 2001. 200 pp
- [14] Liu Hui, Zhang Xuehong, Wu Guoxiong. Cloud feedback on SST variability in western equatorial Pacific in a CGCM. *Adv. Atmos. Sci.*, 1998, **15**: 410~423
- [15] Rossow W B, Schiffer R A. ISCCP cloud data products. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1991, **72**: 2~20
- [16] 邵慧, 钱永甫, 王谦谦. 太阳辐射日变化对 R15L9 气候模拟效果的影响. *高原气象*, 1998, **17**: 158~169
Shao Hui, Qian Yongfu, Wang Qianqian. The effects of the diurnal variation of solar radiation on climate modeling of R15L9. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1998, **17**: 158~169
- [17] 俞永强, 张学洪. 一个修正的海气耦合方案. *科学通报*, 1998, **43**: 866~870
Yu Yongqiang, Zhang Xuehong. A modified ocean-atmosphere coupling scheme. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 1998, **43**: 866~870
- [18] Yu Yongqiang, Zhang Xuehong, Liu Hui, et al. Schemes for Coupling the AGCM and OGCM. In: *IAP Global Ocean-Atmosphere-Land System Model*. Edited by Zhang X et al. Beijing: Science Press, 2000. 252 pp
- [19] Arpe K, Brankovic C, Oriol E, et al. Variability in time and space of energetics from a long series of atmospheric data produced by ECMWF. *Beitr. Phys. Atmos.*, 1986, **59**: 321~355
- [20] Oort A H, Peixoto J P. The annual cycle of the energetics of the atmosphere on a planetary scale. *J. Geophys. Res.*,

- 1974, **79**: 2705~2719
- [21] Ponater M, Frenzen G. On the numerical evaluation of the energy conversion integral. *Tellus*, 1987, **39**: 515~520
- [22] Simmons A J. The forcing of stationary wave motion by tropical diabatic heating. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1982, **108**: 503~534
- [23] White G H. An observational study of the Northern Hemisphere extratropical summertime general circulation. *J. Atmos. Sci.*, 1982, **39**: 24~40
- [24] Wallace J M. The climatological mean stationary waves; observational evidence. In: *Large-scale Dynamical Processes in the Atmosphere*. Edited by Hoskins B J, Pearce R P. London; Academic Press, 1983. 27~53
- [25] Ulbrich U, Ponater M. Energy cycle diagnosis of two versions of a low resolution GCM. *Meteor. Atmos. Phys.*, 1992, **50**: 197~210
- [26] Guo Yufu, Yu Yongqiang, Zhang Tao. Evaluation of IAP/LASG GOALS model. In: *IAP Global Ocean-Atmosphere-Land System Model*. Edited by Zhang X, et al. Beijing: Science Press, 2000. 252 pp
- [27] Zhang Tao, Wu Guoxiong, Guo Yufu. Energy budget bias in global coupled ocean-atmosphere-land model. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003, **17**: 287~306
- [28] Zhang Tao, Wu Guoxiong, Guo Yufu. The diabatic heating and the generation of available potential energy: results from NCEP reanalysis. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, **19**: 143~159
- [29] Arpe K, Klinker E. Systematic errors of the ECMWF operational forecasting model in mid-latitudes. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1986, **112**: 181~202
- [30] Boer G J, Lazare M. Some results concerning the effect of horizontal resolution and gravity-wave drag on simulated climate. *J. Climate*, 1988, **1**: 789~806
- [31] Boville B A. Sensitivity of simulated climate to model resolution. *J. Climate*, 1991, **4**: 469~485