

AMIP 模式对大气经向质量输送的模拟评估^{* 1}

赵煜飞^{1, 2} 李建平²

ZHAO Yufei^{1, 2} LI Jianping²

1. 国家气象信息中心, 北京, 100081

2. 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体物理学数值模拟国家重点实验室, 北京, 100029

1. *National Meteorological Information Center, Beijing 100081, China*

2. *LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

2008-12-02 收稿, 2009-03-23 改回.

Zhao Yufei, LI Jianping. 2009. Evaluation of AMIP models on simulating atmospheric mass meridional transport. *Acta Meteorologica Sinica*, 67(6):983-991

Abstract By regarding ERA40 reanalysis data which is more authentic as observation, the simulation capabilities of 8 AMIP AGCMs provided by IPCC AR4 (CNRM-CM3, GISS-MODEL-E-R, GFDL-CM2-1, IAP-FGOALS1-0-G, NCAR-CCSM3-0, MIROC3-2-MEDRES, MPI-ECHAM5 and UKMO-HADGEM1) have been evaluated and compared, which focus on the zonal mean meridional atmospheric mass flux across the equator for the whole and four divided levels. It illuminates that the simulations of NCAR, MPI and UKMO are closer to the observation about the whole level atmospheric mass transport. The annual cycle of whole level atmospheric mass flux simulated in MIROC3 presents notable differences with observation. Especially, unreal northern mass flux occurs in summer. IAP has opposite direction of mass flux from observation in 7 months of an annual cycle. Because of the wide horizontal and vertical range, the reasons are uncertain of lacking abilities on modeling atmospheric mass transport across the equator for the whole level, but then the lower resolution is one of the reasons besides the dynamics frame and parameterization procedures. Dividing the whole atmosphere into four layers by 700, 300 and 70 hPa, the atmospheric mass transport concentrates at p_s 700 hPa and 300-70 hPa cross the equator. The 8 models have better simulation abilities at the layers of p_s 700 hPa (I_1) and 300-70 hPa (I_3) uniformly, which may probably relates with the easiness of describing atmosphere dynamic process at lower and upper troposphere, nevertheless there are more differences between the 8 AGCMs at the layer of 700-300 hPa (I_2). Except MIROC3, the other models have the abilities of simulating the annual cycle of atmospheric mass transport in 70-10 hPa (I_4) ultimately. The deficiency of MIROC3 may be as a result of improper management of ozone. Furthermore, not only at the equator, meridional atmospheric mass transportation also occurs at other latitudes. Whether in winter, summer or annual mean, the differences of mass flux among these models are all notable from 60°S to 60°N. The simulation result of winter is better than summer. No matter in summer, winter and annual mean, IAP-FGOALS1-0-G and NCAR-CCSM3-0 overrate the northern transport between 50°S and 60°S. The all and the one, this study provides not only a fire-new angle of AGCMs evaluation, but also powerful elements while choosing AGCMs for studying atmospheric mass transport and cross-equatorial flow. UKMO-HADGEM1 has good represent while simulating atmospheric mass flux across the equator, and MPI-ECHAM5 show obvious superiority. There are better exhibition of simulation on some special levels about NCAR, GISS and GFDL. The simulation ability of MIROC is not good enough on simulating the whole level and 700-300 hPa, but good enough on p_s 700 hPa and 300-70 hPa. Some shortages are emerged in IAP-FGOALS and CNRM model. Therefore, UKMO-HADGEM1 is the preferred model while studying atmospheric mass meridional transform and those concerned.

Key words Mass flux, Model evaluation, Annual cycle, Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP)

* 资助课题: 国家重点基础发展规划项目(2006CB403600)、国家自然科学基金项目(40821092)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY200706005)。

作者简介: 赵煜飞, 主要从事气候及其资料方面的研究。E-mail: zhaoyf@cma.gov.cn

摘要 从描述南、北半球间大气经向质量传输的角度入手,考察 IPCC 第 4 次评估报告提供的 8 个 AMIP 大气环流模式对越赤道质量通量输送的模拟性能。结果表明:NCAR、MPI 和 UKMO 模式模拟出的越赤道整层大气质量通量与观测大体相一致;MIROC3 模拟的整层大气质量通量年循环与观测结果相去甚远,尤其在夏季模拟出较强的虚假向北大气质量输送;IAP 模拟的整层大气质量通量年循环方向与观测结果在 7 个月份中相反;把垂直大气分为 4 层,各模式对 700 hPa 以下(I_1)和 300—70 hPa(I_3)两层质量通量的模拟能力普遍较好;对 700—300 hPa 层(I_2)质量通量模拟结果偏差较大;除 MIROC3 外,其余模式基本能够模拟出 70—10 hPa(I_4)大气质量通量的季节变化。显然,不仅南、北半球间大气存在质量交换,越过其他纬度同样存在着经向大气质量输送,无论冬季、夏季还是年平均,各模式对越过其他纬度(60°S — 60°N)经向大气质量输送的模拟结果与观测差异明显。整体权衡,UKMO-HADGEM1 在模拟越赤道大气质量通量方面表现突出,MPI-ECHAM5 模式优势较明显;NCAR、GISS 和 GFDL 3 个模式在某些压力层内具有较好的模拟水平;MIROC 模式对整层、700—300 hPa 层的模拟能力较低,而对 700 hPa 以下层和 300—70 hPa 层的模拟水平较高;IAP-FGOALS 和 CNRM 模式在模拟越赤道大气质量通量方面存在一定的不足。

关键词 质量通量,模式评估,季节变化,大气环流模式比较计划(AMIP)

中图法分类号 P435

1 引言

南、北两半球大气间有相互作用并存在空气质量交换现在已是众所周知的事实了。然而,数十年前,一个半球的大气环流能够在多大程度上影响另一半球的环流,在很长的时间里都是一个相当有争议的论题。传统的看法把低纬大气看作是对称的纬东风带的理论也持有这种南北两半球大气互相独立的观点^①。不过,尽管当时资料缺乏,但仍有不少研究指出了南、北两半球大气之间存在相互作用。最先指出南北两半球间、至少赤道地区与高纬度之间大气有相互作用的是 Walker(1924)的统计研究。李宪之^②(1955)开创性的研究清楚地表明南、北两半球间大气有相互作用,发现北半球冬季猛烈的东亚寒潮能越过赤道,侵入南半球至澳大利亚北端,并影响到那里的天气。曾庆存等(2002)指出南北两半球大气的相互作用是热带季风的本质。

南、北两半球间大气的经向流动必然会导致越过赤道的经向大气质量输送,这也是两半球大气相互作用的重要途径之一。Graversen 等(2007)指出全球空气质量变化与由风场计算所得的经向空气质量流之间存在差异。卢楚翰等(2008)研究表明大气质量南、北涛动季节循环明显。

当整层大气质量越过赤道为向北输送时,对应北半球平均地面气压应增大,南半球平均地面气压

应减小;相反,大气质量向南输送时,对应北半球平均地面气压应减小,南半球平均地面气压应增大。根据这一规律,Zhao 等(2006)比较了欧洲中心再分析资料(ERA-40),美国国家环境预报中心(NCEP/NCAR)第 1 套和第 2 套再分析资料以及日本气象厅再分析资料(JRA-25)的大气质量南北输送的差异,结果表明 ERA-40 的再分析资料在这方面最为合理。

气候变化的模拟和预测的重要定量工具就是气候模式,而目前的模式水平尚有很大不确定性,模拟误差较大,模式结果之间差异也很大。因此,检验并完善模式是一项极重要而艰巨的科学任务,模式比较是其中的一个重要科学途径。1989 年,世界气候研究计划(WCRP)的数值实验工作组提出并建立了大气模式比较计划(Atmospheric Model Intercomparison Project,简称 AMIP)。通过模式结果与观测结果及模式结果之间的比较,发现模拟误差并改进模式正是 AMIP 计划的科学意义所在(Gates, et al, 1999)。AMIP 为现阶段大气模式的广泛评估提供了空前的机遇,同时,被期待着为大气模式的改进提供更多的有益信息(Gates, 1992)。很多研究者(Lin, et al, 2006; Annamalai, et al, 2007; Zhang, et al, 2007; Li, et al, 2008; Emanuel, et al, 2008)从不同的角度出发,对 AMIP 计划中的模式的最新模拟结果进行了比较。

① Webster. 董敏. 1983. 两半球的相互作用//“半球间大尺度环流相互作用讨论会”文集, 34-44。

② 成文于 1936 年, 1955 年出版。

本文的工作从描述南、北半球间大气经向质量传输的角度入手,考察 IPCC 第 4 次评估报告提供的 8 个 AMIP 大气环流模式对越赤道质量输送的模拟性能,衡量模式结果是否与大气质量守恒这一根本的属性相匹配,从而对各模式可能存在的问题进行探讨分析。

2 资料

模式资料方面,采用了参加 IPCC 第 4 次评估来自 6 个国家的 8 个全球大气环流模式的试验结果,这 8 个模式分别是 CNRM-CM3(法国国家气象研究中心)、GISS-MODEL-E-R(美国戈达德空间科学研究所)、GFDL-CM2-1(美国地球流体动力实验室)、IAP-FGOALS1-0-G(中国科学院大气物理研究所)、NCAR-CCSM3-0(美国国家大气研

究中心)、MIROC3-2-MEDRES(日本东京大学)、MPI-ECHAM5(德国马普气象研究所)和 UKMO-HADGEM1(英国气象局),各模式基本信息见表 1。

鉴于各模式模拟时段不同,选取了它们公共的时段(1980—1999 年)的逐月经向风场、地面气压场和地面风场资料,并对其中含有多次试验的模式结果进行了集合平均。其中经向风场包含的垂直压力层分别为 1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20(MPI-ECHAM5 中无此层)和 10 hPa(UKMO-HADGEM1 中无此层)。

观测资料方面,采用了欧洲中期数值天气预报中心(ECMWF)提供的 ERA-40 再分析资料,使用的要素场为逐月经向风场、地面风场和地面气压场(N80 高斯格点),其中经向风场和地面风场的水平分辨率均为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$,取 $5^{\circ}\text{S}—5^{\circ}\text{N}$ 平均代表赤道

表 1 参加 IPCC 第 4 次评估的 8 个 AMIP 全球大气环流模式概况

Table 1 The surveys of 8 AMIP AGCMs in the IPCC 4th Assessment Report (AR4)

模式名称	国家	分辨率	模拟时段	试验次数	垂直层
CNRM-CM3	法国	T42L45	1979—2000	1	17
GISS-MODEL-E-R	美国	$72 \times 46\text{L}17$	1979—2000	4	17
GFDL-CM2-1	美国	N45L42	1980—1999	4	17
IAP-FGOALS1-0-G	中国	R42L26	1978—1999	3	17
NCAR-CCSM3_0	美国	T85gxlv3	1978—2000	1	17
MIROC3-2-MEDRES	日本	T42L20	1979—2002	3	17
MPI-ECHAM5	德国	T63L32	1978—1999	3	16
UKMO-HADGEM1	英国	N96L38	1979—2000	1	16

地区要素场,选取的时段与模式相一致。

3 模式对越赤道整层质量通量的模拟

p 坐标系下整层大气经向质量通量 I 可以表示为如下形式(曾庆存等,2002)

$$I = \frac{1}{g} \int_0^{p_s} v dp, \quad (1)$$

其中 p_s 是地面气压, v 代表经向风速,重力加速度 $g=9.80665 \text{ m/s}^2$ 。

根据式(1),计算了上述各模式模拟的越赤道整层大气质量经向输送的年循环(图 1),表 2 列出了观测及各模式的赤道整层大气质量通量的基本特征。表 3 和 4 中第 1 列数值代表各模拟及观测的赤道整层大气质量通量(I)的均方根误差和相关系数。下文着重对 8 个模式的模拟能力逐一分析。

观测资料(ERA-40)中 I 有如下的年变化特征(图 1 和表 2):在一年的 12 个月中,11、12、1、2 和 3

月共 5 个月,质量通量大于零,意味着从南半球越过赤道向北输送大气质量;4 到 10 月,质量通量小于零,即从北半球越过赤道向南输送大气质量;质量通量在 3—4 月由向北输送转为向南输送;10—11 月由向南输送转为向北输送;6 月向南输送的整层大气质量通量达最大值,为 $-4.3 \times 10^2 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$,向北输送的整层大气质量通量在 1 月达到最大值,为 $2.9 \times 10^2 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 。

CNRM-CM3 能大体模拟出夏季质量通量向南、冬季向北的特点,从模拟的输送强度角度分析,在一年中大多数月份,模式都低估了大气的质量传输;质量通量在 3—4 月由向北输送转为向南输送,9—10 月由向南输送转为向北输送;其中,5 月向南的质量输送最大,达 $-1.1 \times 10^2 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$;12 月向北质量输送最大,达 $1.7 \times 10^2 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$;6、7 月的质量通量却很小,甚至小于 5、8 月的质量通量,这样的季节循环并不合理,与观测结果有一定差距。

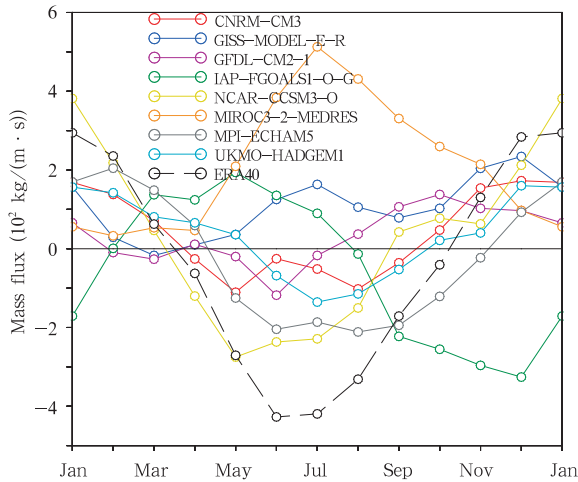


图1 AMIP全球大气环流模式模拟的和观测的纬向平均的赤道整层质量通量的年循环

Fig.1 The annual cycle of zonal mean atmospheric mass flux for the whole level at the equator from the 8 AMIP AGCMs and observation

表2 8个AMIP全球大气环流模式模拟的及观测的赤道整层大气质量通量基本特征

Table 2 Some basic characters of the whole level atmospheric mass flux at the equator from the 8 AMIP AGCMs and observation

	正值月份数	由正值变 负值月份	由负值变 正值月份	年平均 值
ERA-40(观测)	5	3-4	10-11	-0.60
CNRM-CM3	6	3-4	9-10	0.33
GISS-MODEL-E-R	11	2-3	3-4	1.02
GFDL-CM2-1	7	1-2;4-5	7-8;3-4	0.30
IAP-FGOALS1-0-G	6	7-8	1-2	-0.50
NCAR-CCSM3-0	7	3-4	8-9	0.03
MIROC3-2-Me-	12	-	-	2.19
dres				
MPI-ECHAM5	5	4-5	11-12	-0.33
UKMO-HADGEM	8	5-6	9-10	0.28

注：“-”表示未出现与表头说明相符合的月份，“;”分隔开了符合表头说明的两个结果。

GISS-MODEL-E-R 整层大气质量通量的模拟结果偏差较大。除3月以外的11个月的I均大于零(向北输送),其中12月输送最强,达 $1.7 \times 10^2 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$;模拟出的6-8月向北质量通量也较大,这与观测的结果几乎相反,同时也不符合半球平均地面气压的变化特征。

GFDL-CM2-1 模拟的I的年循环特征与观测存在一定差距,一年中的2、3、5、6和7月I小于零,向南输送,6月向南输送达最大值,约为 $-1.2 \times 10^2 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$;向北输送的最大值出现在10月,达 $1.$

$4 \times 10^2 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 。除在4月质量通量向南输送间断,转为向北输送外,质量通量的另两次转向发生在1-2月(由正转负)和7-8月(由负转正);而观测的结果中,夏季和冬季正是质量输送最强的季节,无论着眼于I的季节循环特征,还是输送强弱,模式的表现均不尽如人意。

IAP-FGOALS1-0-G 是基于LASG/IAP大气环流谱模式(SAMIL)的气候系统模式的新版本。模拟出的I的年循环与观测的结果差异明显;质量通量在7-8月由向北输送转为向南输送,1-2月由向南输送转为向北输送,在12月达到向南输送的最大值,为 $-3.3 \times 10^2 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$;向北输送的最大值出现在5月,为 $1.9 \times 10^2 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 。在一年12个月中,7个月(1、4、5、6、7、11和12月)IAP-FGOALS1-0-G 模拟结果与观测的I方向相反。此模式与观测之间的均方根误差(表3)为各模式中的次大值,相关系数(表4)为负值。因此,此模式对越赤道整层经向大气质量输送的模拟能力有待大幅提高。

对整层大气质量通量的年循环特征的模拟,在NCAR-CCSM3-0中呈现出较好的结果。质量通量在3-4月由向北转为向南输送,与观测的转向时段相同;8-9月由向南输送转为向北输送,比观测转向时段提早2个月;在5月达到向南输送的最大值,为 $-2.8 \times 10^2 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$,低估了大气质量向南输送;向北输送的最大值出现在1月,为 $3.8 \times 10^2 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$,高估了向北输送;此模式与观测的均方根误差(表3)为各模式中最小,与观测的相关系数(表4)也通过了99.9%显著性检验。由此,NCAR-CCSM3-0具有非常优秀的模拟整层大气质量通量的能力。

MIROC3-2-MEDRES 模拟出的整层大气质量通量的年循环与观测的结果相差颇大。全年的I值均大于零,向北输送大气质量。7月,向北输送的质量通量最大,为 $5.1 \times 10^2 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 与观测结果 $-4.2 \times 10^2 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 差距很大。模拟结果的年平均值为 $2.19 \times 10^2 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$,在8个模式中年平均质量通量输送最强,与观测的年平均质量通量 $-0.6 \times 10^2 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 的结果差别可观。并且,此模式与观测之间的均方根误差为各模式中最大(表3),相关系数(表4)为较高的负值。可以说,此模式模拟出了较强而虚假的向北质量输送,对越赤道整层经向大气质量输送的模拟水平较低,有待改进。

表 3 8 个 AMIP 全球大气环流模式模拟的与观测的赤道整层与分层质量通量的均方根误差(单位: $10^2 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$)
Table 3 RMS errors in the whole level atmospheric mass flux at the equator between simulations from the 8 AMIP AGCMs and observation(units: $10^2 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$)

	I	I_1	I_2	I_3	I_4
CNRM-CM3	1.92	10.19	9.55	10.22	0.48
GISS-MODEL-E-R	3.02	11.71	3.04	12.38	0.50
GFDL-CM2-1	2.46	5.45	4.23	5.01	0.44
IAP-FGOALS1-0-G	3.88	16.49	10.07	9.31	0.52
NCAR-CCSM3-0	1.25*	10.65	5.51	12.25	0.52
MIROC3-2-ME-	4.86	5.00	6.53	4.37	0.85
DRES					
MPI-ECHAM5	1.43	7.38	5.65	2.68*	0.40*
UKMO-HADGEM	1.91	2.02*	2.43*	4.07	0.66

注: * 标记的数值为 8 个模式中的最小均方根误差。

整层大气质量通量的年循环特征在 MPI-ECHAM5 中有着较接近真实的表现。质量通量在 4—5 月由向北输送转为向南输送; 11—12 月由向南输送转为向北输送, 两次转向时间均比观测晚一个月。换言之, 模拟出的年循环大约比观测推迟一个月; 8 月, 达到向南输送最大值, 为 $-2.1 \times 10^2 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$; 向北输送的最大值出现在 2 月, 达 $2.0 \times 10^2 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$, 与观测结果相比, 偏弱。由表 3, 此模式与观测之间的均方根误差为各模式中的次小值, 相关系数(表 4)亦通过了 99.9% 信度检验。总的来说, MPI-ECHAM5 模拟越赤道整层大气质量通量能力较好。

UKMO-HADGEM1 模拟出的 I 值年循环与观测结果在某些方面比较一致。质量通量在 5—6 月由向北转为向南输送; 9—10 月由向南转为向北输送, 两次转向时间分别比观测晚 2 个月和早 1 个月。这样, 模式模拟出的平均质量通量向南的月份比观测少 3 个月; 相比之下, 更多月份的质量通量呈向南输送, 在 7 月达到向南输送的最大值, 为 $-1.4 \times 10^2 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$; 向北输送的最大值出现在 12 月, 达 $1.6 \times 10^2 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$, 与观测结果相比, 偏弱。综合以上分析, UKMO-HADGEM1 具有较高的模拟越赤道整层大气质量通量的水平。

综上所述, NCAR-CCSM3-0 模拟大气整层质量通量的季节循环特征最具优势, MPI-ECHAM5 和 UKMO-HADGEM1 模式对大气整层质量通量的季节循环特征模拟较好; CNRM-CM3、GISS-MODEL-E-R 和 GFDL-CM2-1 3 个模式与观测结果有一定差距, 模拟能力一般; MIROC3-2-MEDRES(模拟结

表 4 8 个 AMIP 全球大气环流模式模拟与观测的赤道整层与分层质量通量的相关系数
Table 4 Same as Table 3 but for correlation coefficients between observation and simulation

	I	I_1	I_2	I_3	I_4
CNRM-CM3	0.91*	0.99*	-0.27	0.96*	0.93*
GISS-MODEL-E-R	0.15	1.00*	0.70	0.98*	0.95*
GFDL-CM2-1	0.48	1.00*	0.67	1.00*	0.94*
IAP-FGOALS1-0-G	-0.55	0.98*	-0.55	0.99*	0.92*
NCAR-CCSM3-0	0.92*	1.00*	0.91*	0.99*	0.92*
MIROC3-2-ME-	-0.84	0.99*	0.05	1.00*	0.44
DRES					
MPI-ECHAM5	0.88*	0.99*	0.89*	1.00*	0.97*
UKMO-HADGEM	0.92*	1.00*	0.83*	0.99*	0.88*

注: * 为通过 99.9% 显著性检验的相关系数。

果与观测间均方根误差最大)和 IAP-FGOALS1-0-G 两个模式在模拟大气整层质量通量方面与观测存在一定差距, 有待进一步的改进和完善。

4 模式对分层的越赤道质量通量的模拟

根据经向风的垂直廓线(图略), 将垂直方向的大气分为 4 层, 以 700、300 和 70 hPa 为分界, 分别为 $p_s-700 \text{ hPa}$ 、 $700-300 \text{ hPa}$ 、 $300-70 \text{ hPa}$ 和 $70-10 \text{ hPa}$ (模式大多含有的最高层为 10 hPa)。定义这 4 层大气的越赤道经向质量通量分别为:

$$I_1 = \frac{1}{g} \int_{700 \text{ hPa}}^{p_s} v dp$$

$$I_2 = \frac{1}{g} \int_{300 \text{ hPa}}^{700 \text{ hPa}} v dp$$

$$I_3 = \frac{1}{g} \int_{70 \text{ hPa}}^{300 \text{ hPa}} v dp$$

$$I_4 = \frac{1}{g} \int_{10 \text{ hPa}}^{70 \text{ hPa}} v dp$$

各模式模拟与观测的分层质量通量(I_1-I_4)之间的均方根误差和相关系数分别列于表 3 和表 4。从 AMIP 全球大气环流模式模拟及观测分 4 层的越赤道质量通量的年循环分布(图 2)表明, $p_s-700 \text{ hPa}$ (I_1) 和 $300-70 \text{ hPa}$ (I_3) 这两层内经向质量通量较大; $700-300 \text{ hPa}$ (I_2) 和 $70-10 \text{ hPa}$ (I_4) 这两层内的质量通量相对很小。由图 2a 可以看到, 8 个模式对于 $p_s-700 \text{ hPa}$ (I_1) 质量通量的模拟能力较好, 基本能反映出质量通量的季节变化特征。模拟出的大气质量输送方向, 均与观测较为接近; 观测资料中质量通量由负转正和由正转负分别出现在 4—5 月和 11—12 月; NCAR-CCSM3-0 和 UKMO-HADGEM1 模式中通量的由负转正的时段与观测完

全相同;其余 6 个模式中质量通量由负转正均出现在 3—4 月;除 IAP-FGOALS1-0-G 和 MIROC3-2-

2-MEDRES 中质量通量由正转负发生在 10—11 月外,其余模式与观测结果相同,为 11—12 月。

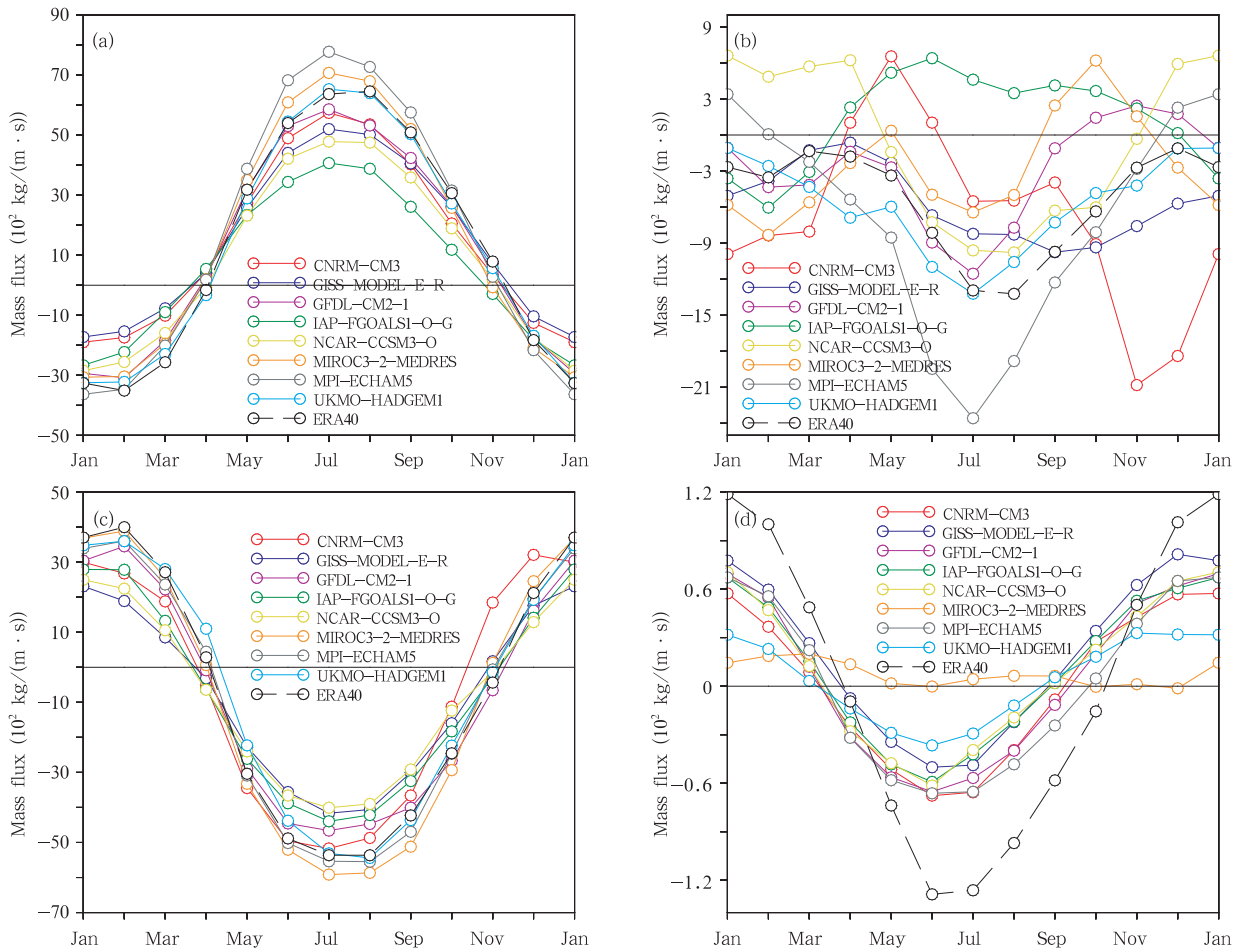


图 2 AMIP 全球大气环流模式模拟的和观测的赤道上纬向平均的分层质量通量的年循环 (a. I_1 , b. I_2 , c. I_3 , d. I_4)

Fig. 2 The annual cycle of zonal mean atmospheric mass flux for the divided four levels from the 8 AMIP models and observation (a. I_1 , b. I_2 , c. I_3 , d. I_4)

从模拟出的质量输送强弱的角度分析,不同模式与观测有着或大或小的偏差。夏季, MPI-ECHAM5 和 MIROC3-2-MEDRES 表现出虚假的偏强质量输送;UKMO-HADGEM1 与观测十分接近;GFDL-CM2-1、CNRM-CM3、GISS-MODEL-E-R、NCAR-CCSM3-0 和 IAP-FGOALS1-0-G 的模拟质量通量小于观测的结果,并依次与观测的差距加大。冬季,除 MPI-ECHAM5 的向南质量通量偏强外,其他模式模拟的向南质量通量都偏弱,其中 UKMO-HADGEM1、MIROC3-2-MEDRES 和 GFDL-CM2-1 3 个模式与观测最为接近。全年 12 个月中,8 个模式与观测质量通量之间

的相关系数都通过了 99.9% 的信度检验(表 4), UKMO-HADGEM1 对 p_s-700 hPa(I_1) 的模拟能力相对最优(均方根误差也为 8 个模式中最小,表 3);MIROC3-2-MEDRES 和 GFDL-CM2-1 的模拟能力较好(均方根误差较小,表 3)。

对于 700—300 hPa 质量通量(I_2) 的模拟,与观测最为接近的模式为 UKMO-HADGEM1(图 2b),此模式与观测之间的均方根误差最小(表 3);夏季, MPI-ECHAM5 模拟出的向南的质量输送较观测结果偏强很多;IAP-FGOALS1-0-G(均方根误差最大,表 3)、CNRM-CM3 和 MIROC3-2-MEDRES 3 个模式对于质量通量 I_2 的刻画水平较低。

各模式对于 300—70 hPa 质量通量 I_3 的模拟也较好(图 2c), 基本能模拟出质量通量的季节变化特征。从模拟的输送方向来看, 都与观测结果较为接近; 观测资料中质量通量由正转负和由负转正分别出现在 4—5 月和 11—12 月; MIROC3-2-MEDRES、MPI-ECHAM5 和 UKMO-HADGEM1 模拟的通量由正转负的时段与观测相同, 其余 5 个模式中质量通量由正转负均出现在 3—4 月; GFDL-CM2-1、IAP-FGOALS1-0-G、NCAR-CCSM3-0 和 UKMO-HADGEM1 模式中质量通量由负转正时段与观测完全相同, 其余模式为 10—11 月。总之, 只有 UKMO-HADGEM1 模式通量的方向转换的时段与观测完全吻合。

考查模拟的质量输送大小, 夏季, MPI-ECHAM5 和 MIROC3-2-MEDRES 模拟出的向南质量输送要强于观测的结果; UKMO-HADGEM1 与观测十分接近; CNRM-CM3、GFDL-CM2-1、IAP-FGOALS1-0-G、GISS-MODEL-E-R 和 NCAR-CCSM3-0 的模拟结果低估了质量通量, 并依次与观测的差距加大。冬季, MIROC3-2-MEDRES、UKMO-HADGEM1 和 MPI-ECHAM5 的向北质量通量较为接近观测结果; 11 和 12 月, CNRM-CM3 的质量通量大于观测的质量输送, 差值均超过了 $10 \times 10^2 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$, 其他模式模拟的向北质量通量均偏小。综合而言, 8 个模式与观测质量通量之间的相关系数都通过了 99.9% 的信度检验(表 4), 其中 MPI-ECHAM5(均方根误差也为 8 个模式中最小, 见表 3)、UKMO-HADGEM1 和 MIROC3-2-MEDRES(均方根误差较小, 见表 3)对 300—70 hPa 层(I_3)越赤道质量通量模拟能力相对较好。

作为 4 层中的最高层, 70—10 hPa(I_4)的质量通量(图 2d)最小。其中 MIROC3-2-MEDRES 的结果几乎全年都为较小的向北质量输送, 季节变化非常小, 相比观测以及其他模式结果差别较大, 与观测质量通量间相关系数未通过 99.9% 的信度检验(表 4), 均方根误差最大(表 3), 模拟水平较差; 其他 7 个模式的结果比较接近, 与观测质量通量之间的相关系数均通过了 99.9% 信度检验(表 4), 与观测的不同之处在于: (1) 模拟的质量输送无论在冬季还是夏季都不及观测结果强; (2) 模拟质量通量方向由向北转为向南均发生在 3—4 月, 由向南转为向北比观测提前 1 个月或者 2 个月; (3) 可能是由于缺少 10 hPa 层, UKMO-HADGEM1 模拟结果在全年都较大地低估了 I_4 , 与观测之间的均方根误差次大。相比之下, 与观测之间均

方根误差最小的是 MPI-ECHAM5 模式, 说明它对 I_4 的模拟能力相对最好; GFDL-CM2-1 与观测的均方根误差次小, 它能较好地展现这一层的基本特征。

5 对越过其他纬度整层大气质量通量的模拟

不仅南、北半球间存在大气质量的交换, 越过其他纬度同样存在着经向大气质量输送。

各模式 7 月的整层大气经向质量输送的经向分布(图 3a)可谓千差万别, 大多数模式与观测在热带地区和南半球的差异较北半球中高纬要大。其中与观测结果最为接近是 NCAR-CCSM3-0, 可是仍在一些纬度范围与观测结果差别较大, 尤其是 45° — 55°S 的模式结果出现可能虚假的正值; CNRM-CM3 在北半球中纬度的整层质量输送较观测结果偏强, 热带偏弱; MIROC3-2-MEDRES 的结果与观测相差最大, 几乎在 60°S — 60°N 内都与观测反向; GISS-MODEL-E-R 也在大多数纬度与观测反向; GFDL-CM2-1 的模拟结果中, 南半球中低纬质量通量方向向北, 与观测反向, 且最强的向北质量输送出现在 10°S 附近; UKMO-HADGEM1 与 MPI-ECHAM5 的模拟结果相对较为接近, 均在 20°S 和 20°N 附近有较强的向北质量通量, 与观测中较弱的向北质量通量不符; IAP-FGOALS1-0-G 中, 绝大多数纬度的经向质量通量方向向北, 与观测反向, 且最强的向北质量输送出现在 10°N 附近。

1 月(图 3b), 8 个模式对整层质量通量的模拟能力优于 7 月。就热带地区而言, 除 IAP-FGOALS1-0-G 外, 其他模式都能模拟出质量通量向北输送这一特点, 其中 NCAR-CCSM3-0 模拟偏强, 其他 6 个模式模拟偏弱; NCAR-CCSM3-0 和 IAP-FGOALS1-0-G 在南半球 60° — 50°S 间模拟出了很强的向北质量输送, 有待改进; GFDL-CM2-1、NCAR-CCSM3-0、CNRM-CM3 和 IAP-FGOALS1-0-G 四个模式对北半球中高纬的质量输送模拟存在较强的向北偏差; 观测结果中, 10° — 20°N 的质量通量非常小, 不到 $1 \times 10^2 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$, 而各模式模拟的质量通量都偏大, 其中 NCAR-CCSM3-0 在此范围的质量通量向北, 其他 7 个模式的模拟结果为大气质量通量向南输送。

20°S — 20°N , IAP-FGOALS1-0-G 与观测结果的年平均质量通量(图 3c)最为接近, NCAR-CCSM3-0 模拟出的质量通量为向南输送, 与观测结果方向相反, 其余 6 个模式都模拟出了比观测偏强

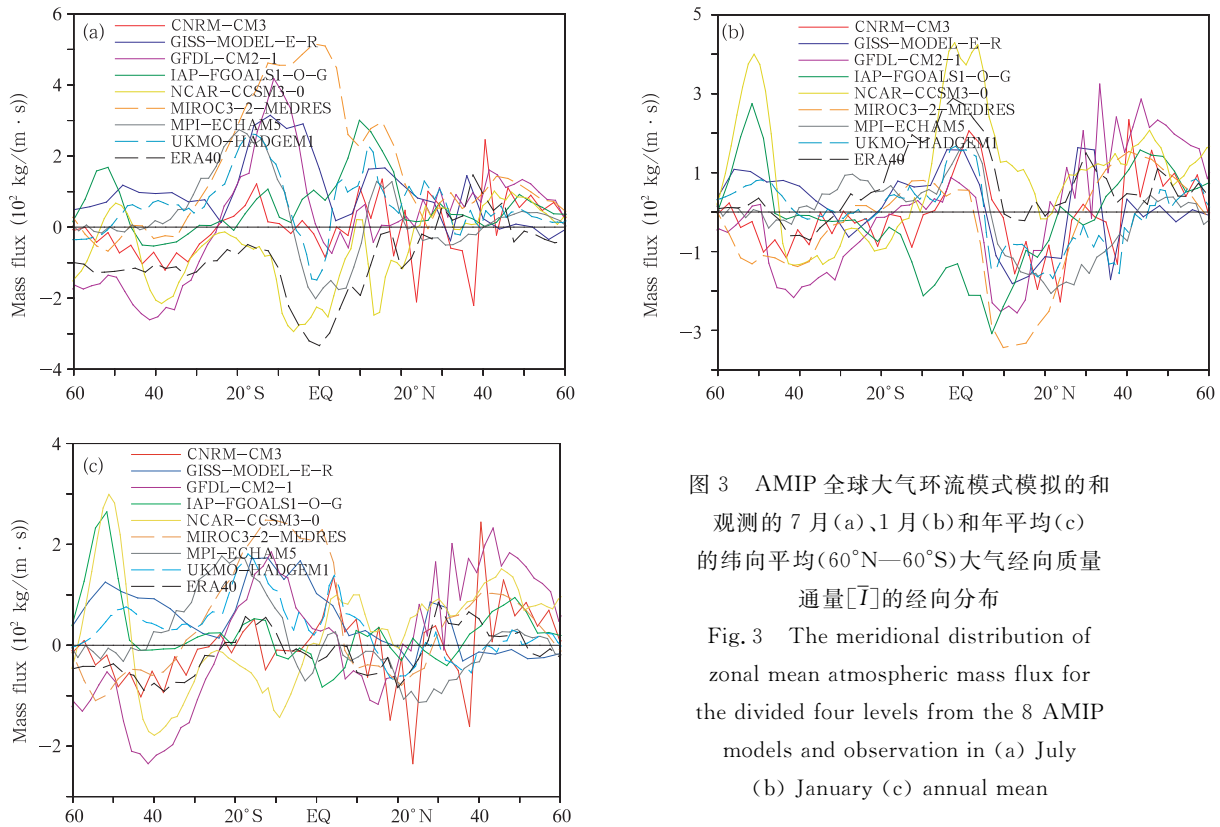


图3 AMIP全球大气环流模式模拟的和观测的7月(a)、1月(b)和年平均(c)的纬向平均(60°N—60°S)大气经向质量通量 \bar{I} 的经向分布

Fig. 3 The meridional distribution of zonal mean atmospheric mass flux for the divided four levels from the 8 AMIP models and observation in (a) July (b) January (c) annual mean

的向北大气质量传输; NCAR-CCSM3-0 和 IAP-FGOALS1-0-G 在南半球 60°—50°S 模拟出了很强的向北质量输送; GFDL-CM2-1、NCAR-CCSM3-0、CNRM-CM3 和 IAP-FGOALS1-0-G 四个模式对北半球中高纬的质量输送模拟存在较大的向北偏差。

6 结论和讨论

利用较为可靠的 ERA-40 再分析资料(观测资料)与 IPCC AR4 AMIP 试验提供的 8 个大气环流模式(CNRM-CM3、GISS-MODEL-E-R、GFDL-CM2-1、IAP-FGOALS1-0-G、NCAR-CCSM3-0、MIROC3-2-MEDRES、MPI-ECHAM5 和 UKMO-HADGEM1)模拟结果进行了对比分析,以评估各大气环流模式对南、北半球间大气经向质量输送的模拟能力。就纬向平均的越赤道整层大气质量通量来说,NCAR-CCSM3-0、MPI-ECHAM5 和 UKMO-HADGEM1 3 个模式的结果大体上与观测资料较为一致; MIROC3-2-MEDRES(模拟结果与观测差距最大)和 IAP-FGOALS1-0-G 两个模式在模拟大气整层质量通量方面不容乐观,由于水

平和垂直范围都很大,造成它们在模拟赤道地区整个大气层经向运动方面不足的原因不确定性较高,不过,这两个模式的分辨率都较低,所以除了动力框架以及参数化方案等外,较低的分辨率可能也是造成误差的原因之一。

通过比较各模式对分 4 层(p_s —700 hPa, 700—300 hPa, 300—70 hPa 和 70—10 hPa)质量通量的模拟能力,表明 8 个模式对于 p_s —700 hPa(I_1)和 300—70 hPa(I_3)这两层质量通量的模拟能力普遍较好,很可能与这两层分别对应对流层低层和高层,大气活动旺盛,大气动力过程的刻画较为容易有关;对于 700—300 hPa(I_2)质量通量的模拟,8 个模式的结果差别较大,与观测最为接近的模式是 UKMO-HADGEM1。IAP-FGOALS1-0-G(均方根误差最大)、CNRM-CM3 和 MIROC3-2-MEDRES 3 个模式对于 I_2 的模拟能力有待提高; MIROC3-2-MEDRES 模拟 70—10 hPa(I_4)质量通量季节变化方面的偏差,可能源自对平流层臭氧的处理不当。其中与观测之间均方根误差最小的是 MPI-ECHAM5 模式,说明它对 I_4 的模拟能力相对最好。

进一步分析评估夏季、冬季和年平均 8 个模式对越过其他纬度的经向大气质量输送的模拟水平, 结果相差较大。冬季(1月)各模式对整层质量通量的模拟能力要好于夏季(7月)。无论夏季、冬季还是年平均, NCAR-CCSM3-0 和 IAP-FGOALS1-0-G 均高估了在南半球 50°—60°S 向北质量输送; 冬季和年平均, GFDL-CM2-1、NCAR-CCSM3-0、CNRM-CM3 和 IAP-FGOALS1-0-G 四个模式对北半球中高纬的质量输送模拟存在较强的向北偏差。

整体权衡, UKMO-HADGEM1 在模拟越赤道大气质量通量方面表现突出, MPI-ECHAM5 模式优势较明显; NCAR-CCSM3-0、GISS-MODEL-E-R、GFDL-CM2-1 3 个模式在某些压力层内具有较好的模拟水平; MIROC3-2-MEDRES 模式对整层、700—300 hPa 层的模拟能力较低, 而对 700 hPa 以下层和 300—70 hPa 层的模拟水平较高; IAP-FGOALS1-0-G 和 CNRM-CM3 模式在模拟越赤道大气质量通量方面存在一定的不足。目前, IAP-FGOALS1-0-G 模式存在赤道区域偏差、高纬度偏差等主要问题。这可能是由于大气模式在高纬度地区分辨率较低, 使得在高纬地区模拟误差较大(朱益民等, 2008)。

通过研究, UKMO-HADGEM1 应是开展有关大气质量经向传输模拟研究的首选模式。在未来的研究中, 仍有很多相关问题值得进一步开展, 例如, 此文主要讨论了多年气候平均的大气质量通量的模拟能力评估, 而大气环流模式与 ERA-40 描述的经向质量通量的年代际变化怎样? 周期特征怎样? 这些问题有待于今后更为广泛深入的研究。

References

- Annamalai H, Hamilton K, Sperber K R. 2007. The South Asian summer monsoon and its relationship with ENSO in the IPCC AR4 simulations. *J Clim*, 20: 1071-1092
- Emanuel K, Sundararajan R, Williams J. 2008. Hurricanes and global warming: Results from downscaling IPCC AR4 simulations. *Bull Amer Meteor Soc*, 89: 347-367
- Gates W L. 1992. AMIP: The atmospheric model intercomparison

- project. *Bull Amer Meteor Soc*, 73: 1962-1970
- Gates W L, Boyle J S, Covey C, et al. 1999. An overview of the results of the Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP I). *Bull Amer Meteor Soc*, 80(1): 29-55
- Graversen R G, Kallen E, Tjernstrom M, et al. 2007. Atmospheric mass transport inconsistencies in the ERA-40 reanalysis. *Quart J Roy Meteor Soc*, 133: 673-680
- Li Jianping, Zhang Li. 2008. Wind onset and withdrawal of Asian summer monsoon and their simulated performance in AMIP models. *Clim Dyn*, Doi: 10.1007/s00382-008-0465-8
- Li Xianzhi. 1955. A study of cold waves in east Asian// *Treatises of Chinese Neoteric Science—Meteorology (1919—1949)* (in Chinese). Beijing: Science Press, 35-118
- Lin J L, George N Kiladis, Brian E Mapes, et al. 2006. Tropical intraseasonal variability in 14 IPCC AR4 climate models. Part I: Convective signals. *J Clim*, 19: 2665-2690
- Lu C H, Guan Z, Mei S L, et al. 2008. Seasonal cycle of atmospheric mass interhemispheric oscillation. *Chinese Sci Bull*, 53: 3226-3234. Doi: 10.1007/s11434-008-0316-3
- Walker G T. 1924. Correlation in seasonal variations of weather IX: A further study of world weather. *Memoirs of the Indian Meteorological Department*, 24: 275-332
- Zeng Qingcun, Li Jianping. 2002. Interactions between the northern and southern hemispheric atmospheres and the essence of monsoon. *Chinese J Atmos Sci (in Chinese)*, 26(2): 433-448
- Zhang Li, Li Jianping. 2007. Seasonal rotation features of wind vectors and application to evaluate monsoon simulations in AMIP models. *Clim Dyn*, Doi: 10.1007/s00382-007-0327-9
- Zhao Yufei, Li Jianping. 2006. Discrepancy of mass transport between the Northern and the Southern Hemisphere among the ERA-40, NCEP/NCAR, NCEP-DOE AMIP-2 and JRA-25 reanalysis. *Geophys Res Lett*, 33: L20804, doi: 10.1029/2006GL027287
- Zhu Yimin, Yang Xiuqun, Yu Yongqiang, et al. 2008. Decadal variability in the North Pacific as simulated by FGOALS-g fast coupled climate model. *Chinese J Geophysics (in Chinese)*, 51(1): 58-69

附中文参考文献

- 李宪之. 1955. 东亚寒潮侵袭的研究// *中国近代科学论著丛刊—气象学(1919—1949)*. 北京: 科学出版社, 35-118
- 曾庆存, 李建平. 2002. 南北两半球大气的相互作用和季风的本质. *大气科学*, 26(2): 433-448
- 朱益民, 杨修群, 俞永强等. 2008. FGOALS-g 快速耦合模式模拟的北太平洋年代际变率. *地球物理学报*, 51(1): 58-69