周波涛. 2012. 气候系统模式对 Hadley 环流的模拟和未来变化预估 [J]. 气候与环境研究, 17 (3): 339-352, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10152. Zhou Botao. 2012. Simulation and projection of Hadley circulation in coupled climate models [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (3): 339-352.

气候系统模式对 Hadley 环流的模拟和未来变化预估

周波涛

国家气候中心,北京 100081

摘 要 针对全球变暖背景下未来 Hadley 环流将如何变化这一问题,评估了气候系统模式对 1970~1999 年 Hadley 环流时空特征的模拟效能,并在此基础上选取能合理模拟 Hadley 环流空间结构、强度指数和边界指数 变化的 3 个模式,通过多模式集合方法预估了未来 Hadley 环流在 A1B 排放情景下的可能演变。预估结果表 明,在全球变暖背景下,相比于 1970~1999 年,到本世纪末期(2070~2099 年),北半球 Hadley 环流在 4 个 季节都将减弱,春季变化幅度相对较弱;南半球 Hadley 环流在冬季和夏季也会减弱,而在春季和秋季的变化 不明显。另外,北半球 Hadley 环流的北边界除在夏季向南收缩外,在其它 3 个季节均向北伸展;南半球 Hadley 环流的南边界在 4 个季节均向极地方向移动。两个半球的 Hadley 环流在垂直方向还将向对流层上层伸展。 关键词 Hadley 环流 气候系统模式 评估 预估 多模式集合 **文章编号** 1006-9585 (2012) 03-0339-14 **中图分类号** P467 **文献标识码** A doi,10.3878/j, issn. 1006-9585, 2011, 10152

Simulation and Projection of Hadley Circulation in Coupled Climate Models

ZHOU Botao

National Climate Center, Beijing 100081

Abstract In order to address the possible change of the Hadley circulation in response to global warming in the future, the ability of coupled climate models in simulating the temporal and spatial features of Hadley circulation is assessed by a comparison with the observation during 1970 – 1999. On this basis, three models which can well reproduce the spatial structure and the temporal change of the intensity and expansion of Hadley circulation are selected as the ensemble to project its possible change under the A1B scenario. The projection results show that the Northern Hemispheric Hadley circulation tends to weaken in four seasons but with weaker change in spring during the late 21st century (2070 – 2099) as compared to the period 1970 – 1979. The Southern Hemispheric Hadley circulation will also weaken in winter and summer, while its change in spring and autumn is not significant. In addition, except a southward shift in summer, the Hadley circulation in the Northern Hemisphere will exhibit a northward expansion in the other three seasons during the late 21st century. The Hadley circulation in the Southern Hemisphere will move poleward in all seasons. Moreover, the upward shift of the Hadley circulation in the vertical may appear in both hemispheres in a warmer climate.

收稿日期 2010-11-19 收到, 2011-03-21 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 40805029,国家重点基础研究发展计划项目 2009CB421407,公益性行业(气象)科研专项 GY-HY200906018

作者简介 周波涛,男,1979年出生,博士,副研究员,主要从事气候变化和机理以及古气候模拟研究。E-mail: zhoubt@ cma.gov.cn

Key words Hadley circulation, climate models, assessment, projection, multi-model ensemble

1 引言

在维持地球气候系统的能量平衡方面,经向 环流发挥着极为重要的作用。经向环流在大气中 表现为 Hadley 环流、Ferrel 环流和极地环流。 Hadley 环流是其中最为重要的组成部分,它指的 是位于赤道到 30°N (S) ~40°N (S) 之间的平均 经向环流,即,大气在近赤道地区上升,然后在 两个半球的高空流向极地方向,并在中纬度地区 下沉,最后在低空流向赤道地区,构成闭合的环 流圈。

Hadley 环流的变化对全球气候具有重要影响。Bjerknes(1966)早在1960年代就提出,强的Hadley 环流能把低纬的西风角动量带到中纬度地区,从而使中纬度西风加强。Chang(1995)和Hou(1998)通过数值模拟研究发现,冬季Hadley 环流异常增强可以导致中纬度温度升高,影响到东亚冬季风的活动(Li,1990; Zhou and Wang, 2008)。此外,春季 Hadley 环流可通过东亚—北太平洋—北美遥相关波列影响同期白令海区域大气环流和海冰面积异常(周波涛和王会军,2007),它还与夏季长江流域降水呈显著正相关(Zhou and Wang, 2006),与西北太平洋热带气旋频数呈显著负相关变化(Zhou and Cui, 2008)。

研究揭示, Hadley 环流在近几十年来具有明显的长期变化。Chen et al. (2002)和 Wielicki et al. (2002)分析了卫星观测的热带地区辐射收支,发现 1990年代冬季 Hadley 环流增强。随后,一些基于再分析资料的研究成果也揭示,近半个世纪以来,冬季北半球 Hadley 环流强度呈线性增长趋势(Quan et al.,2004; Tanaka et al.,2004; Mitas and Clement,2005;周波涛和王会军,2006)。Kobayashi and Maeda (2006)还指出,3~4月的北半球 Hadley 环流以及 9~10月的南半球 Hadley 环流也存在加强的趋势。除强度变化外,Hadley 环流的南北边界范围也发生了变化。卫星观测,向外长波辐射资料,无线电探空资料和再分析资料均显示,1979年以来 Hadley 环流

呈现向极地方向扩张的趋势(Fu et al., 2006; Hu and Fu, 2007; Seidel and Randel, 2007)。

由于 Hadley 环流对全球诸多地区的气候变化 具有重要的指示意义,因此,其未来可能变化是 一个值得关注的重要问题。Tanaka et al. (2005) 利用速度势函数定义 Hadley 环流强度, 探讨了 A1B 排放情景下夏季 Hadley 环流的未来变化,发 现到 21 世纪末期 Hadley 环流将减弱。Lu et al. (2007) 通过多模式集合研究了 A2 排放情景下年 平均 Hadley 环流对温室气体增加的响应,结果显 示未来 Hadley 环流减弱和向极地方向扩张。 Gastineau et al. (2008) 还分析了 Hadley 环流在 CO2增倍情景下的变化,也发现冬半球 Hadley 环 流减弱,并向极地方向伸展。这些研究成果有助 于认识 Hadley 环流的未来变化。不过,由于 Hadley 环流具有明显的季节性变化,因此,要全 面了解 Hadley 环流的未来变化,还需明晰 Hadley 环流在其它季节(如春季和秋季)的演变情 况。基于此目的,本文从空间型、时间演变趋势 方面系统性评估气候系统模式对 4 个季节 Hadley 环流的模拟能力,并在此基础上选取模拟性能较 好的模式,预估4个季节中 Hadley 环流强度和边 界的未来可能变化,以期对全球气候变化提供一 些参考依据。

2 资料和方法

文中所用的模式数据为 IPCC 数据分发中心提 供的 23 个全球海气耦合气候系统模式的模拟结 果。模式分别为:挪威 BCCR_BCM2_0,加拿 大 CGCM3.1_T47、CGCM3.1_T63,法国 CNRM _CM3,澳大利亚 CSIRO_MK3_0、CSIRO_MK3_ 5,美国 GFDL_CM2_0、GFDL_CM2_1、GISS_ AOM、GISS_EH、GISS_ER、NCAR_CCSM、 NCAR_PCM1,中国 IAP_FGOALS_1.0g,意大 利 INGV_ECHAM4,法国 IPSL_CM4,俄国 IN-MCM3.0,日本 MIROC3.2_hires、MIROC3.2_ medres、MRI_CGCM2.3.2a,德国 MPI_ECHAM5, 英国 UKMO_HADCM3、UKMO_HADGEM1。 IPCC AR4 模拟试验中,包括这些模式对 20世纪

气候的模拟试验(20C3M)和未来3种排放情景 (SRES B1、SRES A1B、SRES A2)下的预估试 验。本文用到了 20C3M 和 SRES A1B 下的模式模 拟数据。

3期

为了评估气候系统模式对 Hadley 环流的模拟 能力,我们还使用了 NCEP/NCAR 再分析资料中 的月平均风场数据 (Kalnay et al., 1996), 并选 取1970~1999年作为评估时段。由于各个模式的 水平分辨率不同,为了便于比较,本文在分析之 前将所有模拟结果插值到 2.5°(纬度) × 2.5° (经度)分辨率的规则网格上。

Hadley 环流的空间结构一般用质量流函数来 表述,质量流函数通过对月平均经向风进行垂直 积分求得,具体计算方法可参见文献 (Orrt and Yienger, 1996)。北半球 Hadley 环流的质量流函 数为正值,南半球 Hadley 环流的质量流函数为负 值。本文还采用了强度指数和边界指数来刻画 Hadley 环流强度和边界随时间的变化。其中,北 半球 Hadley 环流强度指数 (NHCI) 定义为 0°~ 30°N区域里最大质量流函数值,南半球 Hadley 环流强度指数 (SHCI) 定义为 0°~30°S 区域里最

小质量流函数值 (Orrt and Yienger, 1996)。强度 指数绝对值越大,表示 Hadley 环流越强。北半球 /南半球 Hadley 环流边界指数 (NHCE/SHCE) 定义为向极地方向 500 hPa 高度上质量流函数值 为0所在的纬度,NHCE为正值,表示北纬, SHCE 为负值, 表示南纬 (Hu and Fu, 2007; Lu et al., 2007).

文中冬季指的是前一年12月和当年的1月与 2月,春季、夏季和秋季分别为3~5月、6~8月 和 9~11 月。季节划分均相对于北半球而言。

气候系统模式对 Hadley 环流的模 3 拟评估

3.1 空间结构

首先,我们给出了 NCEP/NCAR 资料揭示的 冬、春、夏、秋4个季节的质量流函数的气候态 分布(图1),以此作为气候系统模式模拟评估的 基点。从图1可以看出, Hadley 环流的空间分布 具有很强的季节性。南、北半球 Hadley 环流圈的 共同上升支位置随热赤道作整体性移动。冬季最



图 1 NCEP/NCAR 再分析资料中 1970~1999 年平均的质量流函数(单位: 10¹⁰ kg•s⁻¹): (a) 冬季; (b) 春季; (c) 夏季; (d) 秋季 Fig. 1 Mass streamfunction (10¹⁰ kg • s⁻¹) for the NCEP/NCAR reanalysis data during 1970-1999; (a) Winter; (b) spring; (c) summer; (d) autumn

"泰勒"图是评估气候系统模式模拟能力的一种有效方法。它是将模式模拟的均方根误差、标准差与观测的比率、以及空间序列与观测的相关 系数置于一张图中,以此综合反映模式的模拟能力(Taylor,2001)。其中,均方根误差表征模拟 的空间型与观测的相似度,均方根误差越接近0 表示模拟能力越高。标准差比率表征模式对中心 振幅的模拟能力。空间相关系数表征模式对主要 中心位置的描述能力。利用此方法,我们定量评价了气候系统模式对 Hadley 空间结构的模拟能力。图 2 是各个模式模拟的 35°S~35°N 间质量流函数的均方根误差、其标准差与 NCEP/NCAR 的比率,和空间序列与 NCEP/NCAR 相关的"泰勒"分布。图中模式到参考点的距离表示均方根误差,模式到原点的半径距离表示标准差的比率,模式与纵坐标轴的角度表示相关系数的反余弦。如图所示,4 个季节中,所有模式模拟的 Hadley环流的空间分布与 NCEP/NCAR 的相关系数均大于 0.7。从均方根误差来看,模式对夏季 Hadley环流的空间结构模拟的最好,冬季和秋季次之。



图 2 Hadley 环流空间序列的泰勒分布图:(a) 冬季;(b) 春季;(c) 夏季;(d) 秋季。图中方块表示参考点 NCEP/NCAR,字母代 表模式名称(参见表 1)。各个模式到原点的半径距离代表其相对于 NCEP/NCAR 的标准差;模式到参考点的距离代表其均方根误差;模式在图中方位角的余弦代表模式与 NCEP/NCAR 的相关系数

Fig. 2 Taylor diagram of the spatial pattern of the Hadley circulation: (a) Winter; (b) spring; (c) summer; (d) autumn. The square in the diagram denotes the reference point (NCEP/NCAR), and each letter represents one model (see Table 1). The radial distance from the model point to the origin is proportional to the standard deviation of the modeled pattern relative to the observed one. The root mean squared difference is shown by the distance from the model point to the reference point. The correlation between the model and the observation is given by the cosine of the azimuthal angle of the model point

夏季,除3个模式(t、u、v)(字母代表的模式 名称见表1,下同)外,其它模式模拟的均方根误 差(相对 NCEP/NCAR)均不超过0.5。冬季和 秋季,模拟的均方根误差在0.5以上的模式分别 有4个(t、u、v、x)和5个(l、q、t、u、v), 其余的均小于0.5。春季,23个模式中只有12个 模式(c、d、e、f、g、k、m、n、o、p、s、w) 模拟的均方根误差在0.5以内。

从对"泰勒"图的分析可知,有 12 个模式 (c、d、e、f、g、k、m、n、o、p、s、w)能够 很好的模拟出 Hadley 环流在 4 个季节的空间分 布,这些模式模拟的 Hadley 空间序列相对于 NCEP/NCAR 的均方根误差小于 0.5,与 NCEP/ NCAR 的相对误差为± 0.5 间,相关系数高 于 0.9。

3.2 变化趋势

同样,首先给出了 NCEP/NCAR 资料揭示的 1970~1999 年南北半球 Hadley 环流的强度指数 和边界指数随时间的演变。由图 3 可见,NHCI 在冬季和春季具有显著的线性增强趋势(每 10 a 的趋势系数分别为 5.25×10⁹ kg • s⁻¹和 4.64 ×10⁹ kg • s⁻¹,通过 95%的信度),在夏季呈现 显著的减弱趋势(每 10 a 的递减率为 1.65×10⁹ kg • s⁻¹,通过 95%的信度),而在秋季的变化不 明显。SHCI 在冬季和秋季存在显著的负趋势(每 10 a 的趋势系数分别为 - 2.01×10⁹ kg • s⁻¹和 -5.35×10⁹ kg • s⁻¹,通过 95%的信度),在春 季和秋季的变化不明显。图 4 是 Hadley 环流边界 指数的时间变化序列。如图所示,NHCE 在冬季 和春季的趋势变化不明显,在夏季为弱的正趋势,

表1	莫式模拟的 NHCI 和 SHCI 在 1970~1999 年的趋势系数		
Fable 1	Coefficients of the linear trends of the NHCI and SHCI during 1970 -	1999 simulated l	y models

			NHCI			SHCI		
代码	模式名称	冬季	春季	夏季	冬季	秋季		
b	BCCR BCM2 0	0.23*	0.48*	0.10	0.03	0.25		
с	CGCM3.1_T47	-0.15	-0.32	-0.21*	-0.35*	-0.14*		
d	CGCM3.1_T63	0.42*	-0.41	-0.01*	-0.23*	0.85		
е	CNRM CM3	0.13*	0.17*	-0.18*	-0.27*	-0.70*		
f	CSIRO_MK3_0	0.31*	0.22*	-0.49*	0.18	-0.36*		
g	CSIRO_MK3_5	-0.22	0.73*	-0.73*	-0.04*	-0.55*		
h	GFDL_CM2_0	-0.13	-0.13	0.14	0.18	-0.53*		
i	GFDL_CM2_1	-0.06	-0.81	-0.04*	-0.33*	-0.23*		
j	GISS_AOM	-0.60	-0.06	0.00	0.08	0.11		
k	GISS_EH	-0.66	-0.23	0.03	-0.07*	0.03		
1	GISS_ER	-0.01	0.24*	0.11	0.07	0.34		
m	IAP_FGOALS_1.0g	0.97*	0.14*	0.17	-0.09*	0.55		
n	INGV_ECHAM4	-0.82	-0.45	-0.15*	0.07	0.35		
О	INMCM3.0	-0.38	-0.03	-0.03*	0.07	0.04		
р	IPSL_CM4	-0.16	0.31*	-0.01*	-0.34*	0.65		
q	MIROC3. 2 _ hires	0.14*	0.06*	-0.03*	-0.40*	0.60		
r	MIROC3. 2 _ medres	-0.03	0.15*	-0.54*	-0.09*	-0.56*		
s	MPI_ECHAM5	-0.15	0.41*	0.10	-0.08*	-0.04*		
t	MRI_CGCM2. 3. 2a	0.58*	-0.64	0.26	0.36	0.22		
u	NCAR_CCSM	-0.54	-0.03	0.43	0.41	0.01		
v	NCAR_PCM1	-0.45	-0.38	0.09	0.39	-0.25*		
w	UKMO_HADCM3	-0.84	-0.37	-0.00	0.00	0.29		
x	UKMO_HADGEM1	-0.37	-0.22	-0.24*	0.00	-0.39*		
	多模式集合 (MME)	0.08*	0.38*	-0.47*	-0.05*	-0.54*		

* 表示与 NCEP/NCAR 相一致的趋势。



图 3 NCEP/NCAR 再分析资料中 1970~1999 年 NHCI (左列)和 SHCI (右列)的时间序列(实线)及趋势(虚线): (a、e)冬季; (b、f)春季; (c、g)夏季; (d、h)秋季

Fig. 3 Time series (solid line) and linear trend (dashed line) of NHCI (left column) and SHCI (right column) for the period 1970-1999 in the NCEP/NCAR reanalysis data: (a, e) Winter; (b, f) spring; (c, g) summer; (d, h) autumn

在秋季为显著的正趋势(通过90%的信度),北半球 Hadley环流范围向极地方向扩张。SHCE在4个季节均为显著的负趋势(通过95%的信度),南半球 Hadley环流范围也向极地方向扩张。

接下来分析了气候系统模式对具有显著长期 变化趋势的 Hadley 环流强度指数和边界指数的模 拟状况。由表1可见,几乎所有的模式都低估了 Hadley 环流强度指数的变化趋势。Mitas and Clement (2006)的研究也发现大多模式不能模拟 出冬季 Hadley 环流显著增强的趋势。另外,大部 分模式只能模拟出某一季节的 Hadley 环流强度指 数变化趋势,只有模式 CNRM_CM3 能够再现 NCEP/NCAR 再分析资料揭示的所有显著趋 势。模式 CSIRO_MK3_0、CSIRO_MK3_5、



图 4 同图 3, 但为 NHCE (左列)和 SHCE (右列) Fig. 4 Same as the Fig. 3, but for NHCE (left column) and SHCE (right column)

MIROC3. 2_hires 和 MIROC3. 2_medres 表现相对 较好。气候系统模式对 Hadley 环流边界指数趋势 的模拟能力明显优于其对强度指数趋势的模拟。 从表 2 可以看到,有 6 个模式 (CGCM3. 1_T63、 CNRM_CM3、CSIRO_MK3_0、CSIRO_MK3_5、 MRI_CGCM2. 3. 2a 和 UKMO_HADGEM1) 能够 同时模拟出与 NCEP/NCAR 相一致的变化趋势, 尽管这些模式模拟的气候趋势也弱于 NCEP/ NCAR 再分析资料。 综合上述分析可知,多数模式能够刻画 Hadley 环流某一方面的特征。但是,如果同时考虑模 式对 Hadley 环流空间结构以及强度指数和边界指 数变化特征的模拟能力,只有 3 个模式 (CNRM _CM3、CSIRO_MK3_0、CSIRO_MK3_5) 表现 良好。由于多模式集合 (MME) 方法可以减小单 模式模拟的不确定性和模式间的离差,所以该方 法在气候模式模拟预估分析中被广泛应用。在随 后的分析中,我们选取上述模拟能力相对较好的 3 个模式(CNRM_CM3、CSIRO_MK3_0、CSIRO _MK3_5)作为 MME 组合。MME 能够合理的模 拟出冬、春、夏、秋4个季节的 Hadley 环流空间 分布型态(图略),以及再现 NCEP/NCAR 再分 析资料反映的 Hadley 环流强度指数和边界指数的 显著变化趋势(见表1和表2)。

4 Hadley 环流未来变化预估

为了对 Hadley 环流的未来空间变化有一个清晰的认识,图 5 给出了 MME 模拟的 21 世纪中期前(2020~2049年)和 21 世纪末期(2070~2099年)的质量流函数空间分布,以及其与 1970~1999年的质量流函数之差。由图可见,21 世纪中期前和 21 世纪末期这两个时段的质量流函数及差

异分布十分类似,只是后一时段比前一时段的变 化幅度要大。

具体来讲,以 21 世纪末期为例,冬季(图 5e),北半球 Hadley 环流中心区域的质量流函数 差值为负,30°N 附近零线区域的质量流函数差值 为正;南半球 Hadley 环流中心区域为正差值,其 南侧的零线区域为负差值。这种异常特征表明,相对于 1970~1999 年,到本世纪末期(2070~2099 年)北(南)半球 Hadley 环流将减弱并向北(南)扩展。春季(图 5f),南、北半球 Hadley 环流中心区域分别为负的和正的差值分布,不过,这种差异并不显著,通不过 95%的信度。此外,30°N(30°S) 附近零线区域为正(负)异常,北(南)半球 Hadley 环流中向极地方向扩张。夏 季(图 5g),北(南)半球 Hadley 环流中心区域

表 2 模式模拟的 NHCE 和 SHCE 在 1970~1999 年的趋势系数 Table 2 Coefficients of the linear trends of the NHCE and SHCE during 1970 - 1999 simulated by models

		NHCE			SHCE	
代码	模式名称	秋季	冬季	春季	夏季	秋季
b	BCCR BCM2 0	0.04*	0.14	-0.04*	0.15	-0.20*
с	CGCM3.1_T47	-0.51	-0.08*	-0.43*	-0.04*	-0.60*
d	CGCM3.1_T63	0.19*	-0.64*	-0.19*	-0.16*	-0.30*
е	CNRM _ CM3	0.19*	-0.64*	-0.67*	-0.76*	-1.25*
f	CSIRO_MK3_0	0.01*	-0.93*	-0.16*	-0.61*	-0.25*
g	CSIRO_MK3_5	0.29*	-0.06*	-0.30*	-0.01*	-0.17*
h	GFDL_CM2_0	-0.02	-0.07*	0.02	0.30	0.00
i	GFDL _ CM2 _ 1	-0.02	-0.07*	0.02	0.30	0.00
j	GISS_AOM	-0.04	0.64	0.14	-0.35	-0.05*
k	GISS_EH	0.02*	0.68	-0.70*	-0.01*	0.48
1	GISS_ER	-1.29	-1.22*	-0.58*	-0.43*	-0.11*
m	IAP_FGOALS_1.0g	0.56*	-0.64*	0.30	0.39	-0.19*
n	INGV_ECHAM4	-0.27	-1.19*	-0.47*	-0.37*	0.39
О	INMCM3.0	-0.76	-0.62*	-0.82*	-0.51*	-0.66*
р	IPSL_CM4	0.05*	-0.22*	0.72	-0.07	0.01
q	MIROC3. 2 _ hires	-0.02	-1.04*	0.23	-0.21	-0.59*
r	MIROC3. 2 _ medres	0.59*	-0.73*	-0.59*	-0.01	0.19
s	MPI_ECHAM5	-0.09	-0.79*	-1.01*	0.01	0.36
t	MRI_CGCM2. 3. 2a	0.87*	-0.04*	-0.14*	-0.11*	-0.10*
u	NCAR_CCSM	-0.01	-1.09*	0.01	0.21	0.28
v	NCAR_PCM1	0.22*	-0.83*	-0.19*	0.61	-0.17*
w	UKMO_HADCM3	2.13*	-0.88*	-0.70*	0.23	-1.13*
x	UKMO_HADGEM1	0.11*	-0.12*	-0.14*	-0.47*	-0.94*
	MME	0.17*	-0.55*	-0.38*	-0.46*	-0.56*

*表示与 NCEP/NCAR 相一致的趋势。



图 5 MME 模拟的 A1B 情景下 (a-d) 2020~2049 年和 (e-h) 2070~2099 年的质量流函数(等值线)空间分布及其与 1970~1999 年 的差异(阴影): (a、e) 冬季; (b、f) 春季; (c、g) 夏季; (d、h) 秋季

Fig. 5 MME simulation of climatology of the mass streamfunction (contour) under the A1B scenario for the periods (a - d) 2020 - 2049 and (e - h) 2070 - 2099, and its differences (shading) relative to the period 1970 - 1999: (a, e) Winter; (b, f) spring; (c, g) summer; (d, h) autumn

为负(正)异常,亦即,本世纪末期 Hadley 环流 强度将会减弱。30°N(30°S)附近零线区域为负 异常,北(南)半球 Hadley 环流边界范围将向南 收缩(扩张)。秋季(图5h),北(南)半球 Hadley环流中心区域为负异常,其北(南)侧零线区 域为正(负)异常,说明北(南)半球环流到本 世纪末期将减弱(加强)并向极地方向伸展。图 5还显示,在北(南)半球 Hadley 环流中心所处 的对流层上层为正(负)的质量流函数差值,这 意味着未来 Hadley 环流在垂直方向将向上层 扩展。

图 6 进一步给出了 2010~2099 年 MME 模拟的 Hadley 环流强度指数随时间的变化。如图所示, NHCI 除在春季表现为弱的负趋势外,其它 3 个季节均呈现显著的下降趋势(通过 95%的信度)。冬季、春季、夏季和秋季, NHCI 每 10 a 分别减弱 $1.13 \times 10^9 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $0.29 \times 10^9 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $0.48 \times 10^9 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $0.49 \times 10^9 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。对单个

模式而言,3个模式一致模拟出与 MME 相同的变 化趋势,尽管模拟的趋势强度存在差异。因此, 在 A1B 排放情景下,未来北半球 Hadley 环流可 能会变弱。对于 SHCI 而言,MME 模拟结果显 示,春季和秋季的变化趋势不明显,主要体现年 际振荡特征。而在冬季和夏季具有明显的上升趋 势,每 10 a 的变化趋势系数分别为 0.19×10^9 kg·s⁻¹和 0.75×10^9 kg·s⁻¹,分别通过 90%和 95%的信度检验。由于 SHCI 为负值,负的趋势 表示南半球 Hadley 环流增强。因此,在 A1B 排 放情景下,未来南半球 Hadley 环流强度在冬季和 夏季将会减弱。单个模式模拟结果显示,除模式



图 6 MME 预估的 A1B 情景下 NHCI (左列) 和 SHCI (右列) 的时间序列(实线) 及趋势(虚线): (a、e) 冬季; (b、f) 春季; (c、g) 夏季; (d、h) 秋季

Fig. 6 Time series (solid line) and linear trend (dashed line) of NHCI (left column) and SHCI (right column) projected by MME simulation under the A1B scenario: (a, e) Winter; (b, f) spring; (c, g) summer; (d, h) autumn



图 7 同图 6, 但为 NHCE (左列)和 SHCE (右列) Fig. 7 Same as the Fig. 6, but for NHCE (left column) and SHCE (right column)

CSIRO_MK3_0 模拟的夏季 SHCI 为弱的负趋势 外,其余模拟结果与 MME 相一致。

图 7 为 2010~2099 年 MME 模拟的 Hadley 环流边界指数的演变。可见,NHCE 在冬季、春 季和秋季为显著的正趋势(95%的信度),在夏季 为显著的负趋势(95%的信度),揭示未来北半球 Hadley 环流范围在冬季、春季和秋季可能会向极 地方向扩张,但在夏季却向赤道方向收缩。 SHCE 在 4 个季节中均呈现显著的负趋势(通过 95%的信度),表示未来南半球 Hadley 环流范围 将向极地方向伸展。单个模式模拟的 Hadley 环流 边界指数未来变化趋势相一致,唯一不同之处是 模式 CNRM_CM3 模拟的冬季 NHCE 呈现很弱的 负趋势。

5 结论和讨论

利用 23 个气候系统模式在现代气候背景 (20C3M)和未来温室气体排放情景(A1B)下的 模拟结果,并结合 NCEP/NCAR 再分析资料,评 估了各模式对 Hadley 环流时空特征的模拟效能, 并在此基础上预估了未来 Hadley 环流的可能 演变。

结果表明,大多数模式对现代气候条件下4 个季节中的 Hadley 环流的空间型态具有很好的模 拟能力,模式模拟的 Hadley 环流空间分布与 NCEP/NCAR 的相关系数均大于 0.7,而且对夏 季 Hadley 环流的空间结构模拟的最好,冬季和秋 季次之。不过,不同模式对 Hadley 环流强指数和 边界指数的演变特征的刻画能力存在明显差异, 而且大都低估了 Hadley 环流指数的变化趋势。

在对单个模式的模拟评估的基础上,选取了 对 Hadley 环流空间结构、强度指数和边界指数变 化均模拟较好的3个模式(CNRM CM3、CSIRO MK3 0、CSIRO MK3 5) 进行多模式集合预估。 预估结果显示,在未来全球变暖背景下,NHCI 在4个季节呈现下降趋势; SHCI 在冬季和夏季具 有明显的上升趋势,而在春季和秋季变化趋势不 明显。NHCE 在冬季、春季和秋季表现为显著的 正趋势,而在夏季为显著的负趋势; SHCE 在 4 个季节中均为显著的负趋势。也就是说,相比于 1970~1999年,到本世纪末期,北半球 Hadley 环流强度可能减弱,其北边界除在夏季向赤道方 向收缩外,在其余季节均向极地方向扩展;南半 球 Hadlev 环流强度在冬季和夏季也将减弱,而且 其南边界在4个季节中均向南扩展。此外,两个 半球的 Hadley 环流在垂直方向还将向对流层上层 伸展。

本文旨在探讨 Hadley 环流对 A1B 情景下温 室气体变化的响应,为认识全球变暖背景下 Hadley 环流的时空演变提供参考,而对其中的具体机 制尚未作分析。关于影响 Hadley 环流强度和范围 变化的机理已有一些研究,但尚未形成统一的结 论。一些研究指出,由于温度变化造成的热带对 流层顶高度升高是导致 Hadley 环流向极地方向扩 张的主要原因 (Haigh et al., 2005; Lorenz and DeWeaver, 2007)。不过, Lu et al. (2007)认为, Hadley 环流向极地方向扩张与热带对流层高度变 化关系不大,而与副热带地区静力稳定度增加关 系密切。全球变暖的热力效应使副热带地区静力 稳定度上升,推动斜压不稳定向极区移动从而造 成 Hadley 环流边缘向极地方向扩张。同时,静力 稳定度变化还影响 Hadley 环流强度。静力稳定度 增加(减小)时, Hadley 环流强度减弱(加强) (Mitas and Clement, 2006; Gastineau et al., 2008)。因此,A1B 情景下副热带地区静力稳定度 的增加(Frierson, 2006)可能是导致未来 Hadley 环流减弱和向极地方向扩张的一个因素。另外, 平流层臭氧含量也影响着 Hadley 环流的变化。平 流层臭氧损耗有助于 Hadley 环流加强(郭世昌

等,2008)和向极地方向拓展(Polvani and Kushner,2002)。从该点来讲,在全球变暖背景下,随着臭氧的恢复(Eyring et al.,2007),将 会造成 Hadley环流减弱,并在一定程度上减缓 Hadley环流向极地方向扩展。当然,Hadley环流 对温室气体增加的响应机制十分复杂,它的变化 还受其它因子的影响,这还有待今后作进一步 研究。

最后需要指出的是,本文的结论反映的是当 前全球气候系统模式对 IPCC A1B 情景下未来热 带环流变化的一种可能估计。从当前的很多研究 来看,这种预估仍存在较大的不确定性,主要可 以归结为气候模式本身、温室气体排放情景的不 确定性、以及气候资料的不足等。就目前的水平 而言,模式尚有不确定性,模式的物理过程还需 要进一步改进和完善。如,一些研究揭示平流层 环流对 Hadley 环流变化具有明显影响(Polvani and Kushner, 2002: Haigh et al., 2005), 然而目 前气候模式却低估了平流层—对流层的相互作用 (Miller et al., 2006: 辛晓歌等, 2008)。气候模式 中云参数化和对流方案的不同也会造成模式间的 差异和与实际情况不一致(Mitas and Clemet, 2005)。另外,不同观测资料揭示的 Hadley 环流 变化也不尽一致。例如, NCEP/NCAR 再分析资 料和欧洲中心再分析资料(ERA40)在南半球中 高纬和热带区域存在差异,这种差异导致近几十 年 Hadley 环流的气候态和强度变化存在些许不同 (Mitas and Clemet, 2005; 秦育婧等, 2006)。此 外,NCEP/NCAR、ERA40和向外长波辐射资料 都揭示近几十年来冬季 Hadley 环流变强 (Chen et al, 2002; Wielicki et al., 2002; Mitas and Clemet, 2005; 周波涛和王会军, 2006), 但这种 变强趋势在 NCEP-DOE 再分析资料中却得不到体 现(Mitas and Clemet, 2005)。因此, 使用不同 的再分析资料进行模式评估可能会影响到模式的 选取,从而会给预估带来不确定。解决这些问题 还需要今后不断完善气候系统模式和加强加密热 带地区经向风的观测。

参考文献 (References)

Bjerknes J. 1966. A possible response of the atmospheric Hadley

circulation to equatorial anomalies of ocean temperature [J]. Tellus, 18: 802-829.

- Chang E K M. 1995. The influence of Hadley circulation intensity changes on extratropical climate in an idealized model [J]. J. Atmos. Sci., 52: 2006-2024.
- Chen J Y, Carlson B E, Del Genio A D. 2002. Evidence for strengthening of the tropical general circulation in the 1990s [J]. Science, 295: 838-841.
- Eyring V, Waugh D W, Bodeker G E, et al. 2007. Multimodel projections of stratospheric ozone in the 21st century [J]. J. Geophys. Res., 112; D16303, doi:10.1029/2006JD008332.
- Frierson D M W. 2006. Robust increases in midlatitude static stability in simulations of global warming [J]. Geophys. Res. Lett., 33: L24816, doi:10.1029/2006GL027504.
- Fu Q, Johanson C M, Wallace J M, et al. 2006. Enhanced midlatitude tropospheric warming in satellite measurements [J]. Science, 312: 1179.
- Gastineau G, Le Treut H, Li L. 2008. Hadley circulation changes under global warming conditions indicated by coupled climate models [J]. Tellus, 60A: 863-884.
- 郭世昌, 戴敏, 李琼, 等. 2008. 冬季 Hadley 环流活动与大气臭氧 变化的关系研究 [J]. 云南大学学报(自然科学版), 30 (2): 148-154. Guo Shichang, Dai Min, Li Qiong, et al. 2008. Activity of the Hadley circulation and its correlations with the atmospheric ozone variation during the winter season [J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition) (in Chinese), 30 (2): 148-154.
- Haigh J D, Blackburn M, Day R. 2005. The response of tropospheric circulation to perturbations in lower-stratospheric temperature [J]. J. Climate, 18: 3672-3685.
- Hou A Y. 1998. Hadley circulation as a modulator of the extratropical climate [J]. J. Atmos. Sci., 55: 2437-2457.
- Hu Y, Fu Q. 2007. Observed poleward expansion of the Hadley circulation since 1979 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 7: 5229-5236.
- Kalnay E, Kanamistu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/ NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77: 437-471.
- Kobayashi C, Maeda S. 2006. Phase shift of the seasonal cycle in the Hadley Circulation in recent decades [J]. Geophys. Res. Lett., 33: L22703, doi:10.1029/2006GL027682.
- Li Chongyin. 1990. Interaction between anomalous winter monsoon in East Asia and El Niño events [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 7: 36-46.
- Lorenz D J, DeWeaver E T. 2007. Tropopause height and zonal wind response to global warming in the IPCC scenario integrations [J]. J. Geophys. Res., 112: D10119, doi:10.1029/2006JD008087.
- Lu J, Vecchi G A, Reichler T. 2007. Expansion of the Hadley cell under global warming [J]. Geophys. Res. Lett., 34: L06805, doi:10.1029/2006GL028443.

- Miller R L, Schmidt G A, Shindell D T. 2006. Forced annular variations in the 20th century Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report models [J]. J. Geophys. Res., 111: D18101, doi: 10. 1029/2005JD006323.
- Mitas C M, Clement A. 2005. Has the Hadley cell been strengthening in recent decades? [J]. Geophys. Res. Lett., 32: L03809, doi:10.1029/2004GL021765.
- Mitas C M, Clement A. 2006. Recent behavior of the Hadley cell and tropical thermodynamics in climate models and reanalyses [J]. Geophys. Res. Lett., 33; L01810, doi:10.1029/2005GL024406.
- Oort A H, Yienger J J. 1996. Observed interannual variability in the Hadley circulation and its connection to ENSO [J]. J. Climate, 9: 2751-2767.
- Polvani L M, Kushner P J. 2002. Tropospheric response to stratospheric perturbations in a relatively simple general circulation model [J]. Geophys. Res. Lett., 29: 1114, doi: 10. 1029/2001GL014284.
- 秦育婧,王盘兴,管兆勇,等. 2006. 两种再分析资料的 Hadley 环 流比较 [J]. 科学通报,52 (12): 1469 - 1473. Qin Yujing, Wang Panxing, Guan Zhaoyong, et al. 2006. Comparison of the Hadley cells calculated from two reanalysis data sets [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 52 (12): 1469-1473.
- Quan X W, Diaz H F, Hoerling M P. 2004. Change of the tropical Hadley cell since 1950 [M] // Diaz H F, Bradley R S, Eds. The Hadley Circulation: Past, Present, and Future. New York: Cambridge University Press, 85-120. 22
- Seidel D J, Randel W J. 2007. Recent widening of the tropical belt: Evidence from tropopause observations [J]. J. Geophys. Res., 112: D20113, doi:10.1029/2007JD008861.
- Tanaka H L, Ishizaki N, Kitoh A. 2004. Trend and interannual variability of Walker, monsoon, and Hadley circulations defined by velocity potential in the upper troposphere [J]. Tellus, 56A: 250-269.
- Tanaka H L, Ishizaki N, Nohara D. 2005. Intercomparison of the intensities and trends of Hadley, Walker, and Monsoon circulations in the global warming projections [J]. Scientific Online Letters on the Atmosphere, 1: 77 – 80.
- Taylor K E. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram [J]. J. Geophys. Res., 106: 7183 -7192.
- Wielicki B A, Wong T M, Allan R P, et al. 2002. Evidence for large decadal variability in the tropical mean radiative energy budget [J]. Science, 295: 841-844.
- 辛晓歌,周天军,宇如聪. 2008. 气候系统模式对北极涛动的模拟 [J]. 地球物理学报,51 (2):337-351. Xin Xiaoge, Zhou Tianjun, Yu Rucong. 2008. The Arctic oscillation in coupled climate models [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 51 (2):337-351.
- 周波涛, 王会军. 2006. Hadley 环流的年际和年代际变化特征及其 与热带海温的关系 [J]. 地球物理学报, 49 (5): 1271-1278.

Zhou Botao, Wang Huijun. 2006. Interannual and interdecadal variations of the Hadley circulation and its connection with tropical sea surface temperature [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 49 (5): 1271-1278.

周波涛,王会军. 2007. Hadley 环流变化与白令海海冰异常的关系 [J]. 科学通报,52 (18): 2194-2198. Zhou Botao, Wang Huijun. 2008. Relationship between Hadley circulation and sea ice extent in the Bering Sea [J]. Chinese Science Bulletin, 53 (3): 444-449.

Zhou Botao, Wang Huijun. 2006. Relationship between the boreal

spring Hadley circulation and the summer precipitation in the Yangtze River valley [J]. J. Geophys. Res., 111: D16109, doi:10.1029/2005JD007006.

- Zhou Botao, Cui Xuan. 2008. Hadley circulation signal in the tropical cyclone frequency over the western North Pacific [J]. J. Geophys. Res., 113: D16107, doi:10.1029/2007JD009156.
- Zhou Botao, Wang Huijun. 2008. Interdecadal change in the connection between Hadley circulation and winter temperature in East Asia [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 25 (1): 24 – 30.