

海陆气全球耦合模式能量收支的误差*

张 韬 吴国雄 郭裕福

(中国科学院大气物理研究所, LASG, 北京, 100029)

摘 要

通过分析 GOALS 模式两个版本 GOALS-1.1 和 GOALS-2 的能量收支, 并与观测对比, 结果表明: 模式模拟的地表净短波辐射通量在高纬地区偏低, 而净长波辐射通量又偏高, 导致极地表面温度偏低, 感热通量在高纬地区为很高的负值。而在陆地上感热加热作用显著偏强, 使地表有较大的向上净能量给大气, 引起陆地上有些暖中心也偏强, 这也解释了模式模拟地表面空气温度场的误差原因。海洋上潜热通量偏低, 特别是在副热带洋面上偏少更明显。陆地上的欧亚和北美大陆大部分地区潜热通量仍偏低。这也是模式降水在大部分地区偏少的重要原因。两模式大气顶 OLR 偏低的模拟主要是在中低纬度, 大气顶净短波辐射通量的模拟在中低纬度虽然与 NCEP 结果接近, 但与地球辐射收支试验 ERBE 资料比较仍偏小较多, 说明改进中低纬度云-辐射参数化方案对改进全球能量收支的模拟有重要意义。GOALS-2 模式中诊断云方案模拟的云量除赤道地区外普遍偏小, 尤以中纬度为甚, 造成那里能量收支出现大的误差, 这表明了更好的云参数化方案的引入是今后模式发展的重要任务之一。

关键词: 气候系统, 耦合模式, 能量收支, 云参数化方案。

1 引 言

一个气候系统模式及其分量模式应能很好地模拟出气候系统的能量分布。大气顶净的能量通量决定着整个气候系统(比如, 大气和有重要作用的地表面)的有效位能。同时, 这种辐射能量也能转化为其他形式的能量(如动能、潜热能和感热能), 并在水平和垂直方向上以这些能量形式重新分布。以前的观测研究主要是利用历史的或现代的资料对全球大气能量收支进行检验。Kiehl 和 Trenberth^[1]以及 Trenberth^[2]对这些研究进行了总结。Yang 等^[3]对美国国家环境预报中心和美国国家大气研究中心(NCEP-NCAR)中的地球辐射收支再分析资料同卫星资料进行了对比研究。Yu 等^[4]利用现有的资料对大气能量收支的一致性也进行了研究, 指出, 平均来说, 大气需要额外的 20 W/m^2 左右的能量来平衡收支。这些观测研究的成果为进行模式气候系统能量收支的研究提供了有益的事实依据。

较早的模拟研究是 Kiehl 和 Ramanathan^[5]对美

国国家大气研究中心(NCAR)的公用气候模式(CCM1)的地球辐射收支进行了分析, Kiehl 等^[6]对第二版本(CCM2)也进行了分析。最近 Kiehl 等^[7]对公用气候模式的最新版本(CCM3)进行了更为细致的研究, 不仅包括 CCM3 的辐射收支, 还对模式在大气顶和地表面的整个大气能量收支进行了分析。以上的模拟研究中, 多数局限于讨论单独大气模式的情况。

气候系统是大气圈、海洋圈、陆地表面、冰雪圈和生物圈组成的复杂系统, 大气能量收支作为一个纽带, 将各子系统紧密地联系在一起。客观再现全球能量收支, 是气候模式, 特别是海气陆耦合系统模式的性能评估的重要内容之一。中国科学院大气物理研究所大气科学与地球流体力学国家重点实验室(LASG/IAP)长期致力于气候模式的发展, 特别是 20 世纪 90 年代中期以来, 逐步建立起一套全球海洋大气陆地耦合系统模式(简称为 GOALS 模式)^[8,9], 该模式参加了国际耦合模式比较计划(CMIP), 并广泛用于气候研究^[9]。

* 初稿时间: 2001 年 6 月 18 日; 修改稿时间: 2001 年 9 月 27 日。

资助课题: 国家自然科学基金项目(49875012, 40135020), 《国家重点基础研究发展规划》(G1998040900) 和中国科学院知识创新工程重要方向项目(ZK CX2-SW-210)

Guo 等^[10]系统地评估了 GOALS 几个版本模式对大气变量(温度、气压和降水)和海洋变量(海温等)的模拟性能。这些变量模拟好坏的原因很大程度上与模式对大气能量收支的模拟有关。因此,对气候系统模式能量收支的研究可以使更多学者对模式的模拟性能和存在问题有更深入的了解。文中依据 NCEP/NCAR 再分析资料并结合地球辐射收支试验(ERBE)和地表辐射收支(SRB)资料所揭示的基本事实,对 GOALS 模式两个版本 GOALS-1.1 和 GOALS-2 模式的能量收支进行对比,以便探讨给定的云和诊断云对模式模拟能量收支的差异,为将来改进云方案提供依据。

2 模式和观测资料介绍

文中分析的 GOALS 模式的两个版本 GOALS-1.1 和 GOALS-2 的基本动力框架完全相同。其大气部分是在引进基础上改进的谱模式,水平方向为菱形 15 波截断,其水平分辨率相当于 7.5° (经度) \times 4.5° (纬度);在垂直方向上采用 σ 坐标,分为不等间距的 9 层,有 3 层位于行星边界层。为减小截断误差,模式引入了一个全球平均气温和重力位势高度的标准层结扣除^[11]。辐射加热采用关于整个长波和短波近红外波段气体吸收透过率函数的拟合方案(K-分布)^[12,13]。GOALS 模式在大气模式中耦合了一个比较先进的陆面过程模式,它包括了 1 个植被层和 3 个土壤层,考虑了 11 种类型的植被^[14]。

GOALS 模式的海洋部分为一原始方程格点模式,在垂直方向使用了 η 坐标,分为不等距的 20 层,在温跃层内有 9 层,最大深度是 5500 m。模式在水平方向使用经纬网格,分辨率是 5° (经度) \times 4° (纬度),模式变量分布在 B 网格系统上。模式的海陆分布和海底地形近于真实,由于在球坐标中无法定义极点的速度,北极点被当做孤岛处理^[15]。海洋模式耦合了一个热力学海冰模式,来预报两极的海冰分布和厚度^[16]。

海洋模式和大气模式的耦合考虑了热通量交换和动量交换,耦合方案都采用了“修正的月通量距平耦合方案”^[17]。

GOALS-2 和 GOALS-1.1 的区别在于大气部分,GOALS-2 是用模式变量诊断得到的云^[18]来代替

GOALS-1.1 中给定的 ISCCP 资料的云^[19]。两个版本都有长时间的积分结果,这里只各取 10 a 的积分资料用于计算它们的气候平均值。

文中选取了 NCEP 再分析资料 1980 年 1 月至 1989 年 12 月共 120 个月的月平均地表面感热、潜热和辐射资料以及大气顶辐射资料来计算观测的全球多年平均值以及纬向平均值。同时其他的一些研究结果,如 Kiehl 和 Trenberth^[1]的估计值、大气模式比较计划(AMIP)的多个模式集合平均值也将用来与 GOALS 模式两个版本的全球平均值进行对比分析,以使本文的研究结果更为可信。对于年平均的纬向平均分布,文中还利用了 ERBE 的结果与模式模拟的大气顶辐射收支结果进行比较。另外,SRB 的结果也用来对比分析模拟的地表辐射通量的纬向分布特征。需要说明的是,对于能量收支的地理分布,只利用了现有的 NCEP 再分析资料作为观测值。

3 全球的和纬向平均的能量收支

表 1 给出了 GOALS-1.1 和 GOALS-2 的全球陆地、全球海洋以及全球的多年年平均结果,表 2 是 AMIP 的集合平均结果、NCEP 再分析资料结果以及 Kiehl 和 Trenberth(以下简称 K-T)的估计值,其中正值表示方向向下,负值表示方向向上。首先分析大气顶的净短波辐射通量。AMIP 集合平均结果为 239 W/m^2 ,接近于 K-T 的估计值 235 W/m^2 ,而与 NCEP 再分析资料值 226.34 W/m^2 有所差别。GOALS-2 模式结果与 AMIP 较为接近,而 GOALS-1.1 中大气顶吸收的短波辐射通量接近于 NCEP 的结果。但对于大气顶的净辐射通量值,也就是地球的辐射平衡值来看,GOALS-1.1 版本的结果(2.91 W/m^2)远比 GOALS-2 版本的结果(23.17 W/m^2)接近 K-T 的估计值,也与 AMIP 集合平均的结果(4.10 W/m^2)接近。

对比表 1 和表 2,可以看到在模式中(GOALS-1.1, GOALS-2 和 AMIP 结果),地球的平衡值都是正值,而 NCEP/NCAR 再分析资料却是 -10.87 W/m^2 。NCEP 的这种负的平衡值是不真实的,从模式的观点来看也是不理想的。在模式中由于地球系统中自身能量的长期摩擦耗散,地球不可能是能量放射源。研究表明,所有的 GCMs 通过摩擦消耗可辨尺度的动能,但并不用来增加它们的内能^①。在这种情况下

① Kim Jeogn-woo. Simulation of the SAT, Precipitation and Energy Fluxes over the Global Lands Oceans(私人通信)。

下,模式大气只有能量不平衡才能抵消摩擦耗散,也就是模式大气平衡值为正值。虽然 GOALS-1.1 和 GOALS-2 两个版本的大气平衡值都为正值且大小相当,分别为 13.31 W/m^2 和 15.86 W/m^2 ,与 AMIP 正的吸收值(2.90 W/m^2)也定性的一致,但两个版本中摩擦耗散是通过不同的方式来平衡的。GOALS-2 中的摩擦耗散是通过大气顶获得的净辐射能与进入地面向下的净能量之差来平衡的,这与 AMIP 的结果一致;而 GOALS-1.1 中的摩擦耗散却是由大气顶得到的向下的净辐射能与地面向上给大气的能量之

和来平衡的。同时可以推断 K-T 所估算的“平衡值为 0”只有在真实世界里存在,而不是存在于模式气候中。

从表 1 中还可以看到 GOALS 模式的两个版本中,海洋和陆地的大气顶射出长波辐射(OLR)差别不大,海洋上方的大气顶 OLR 与大陆相比稍微有些偏大,这应与海洋上主要的常驻高压系统有关^①。类似的情况也可从表 2 的 AMIP 集合平均结果看到。

总的来说,从大气顶全球平均能量收支来看,

表 1 GOALS 模式两个版本(GOALS 1.1 和 GOALS-2)的全球多年年平均能量收支(单位: W/m^2)

	GOALS-1.1			GOALS-2		
	陆地	海洋	全球	陆地	海洋	全球
表面感热通量	- 40.13	- 18.25	- 24.89	- 51.91	- 11.77	- 23.94
表面潜热通量	- 46.77	- 90.69	- 77.33	- 48.52	- 81.76	- 71.68
表面净长波辐射通量	- 68.47	- 47.42	- 53.85	- 94.67	- 63.18	- 72.73
表面净短波辐射通量	137.25	149.35	145.67	157.74	183.45	175.66
表面能量平衡值	- 18.12	- 7.01	- 10.40	- 37.36	26.74	7.31
大气顶 OLR	- 216.89	- 217.40	- 217.19	- 215.41	- 217.62	- 216.95
大气顶净短波辐射通量	204.14	227.10	220.10	216.23	250.52	240.12
地球能量平衡值	- 12.75	9.70	2.91	0.82	32.90	23.17
大气能量平衡值	5.37	16.71	13.31	38.18	6.16	15.86

表 2 AMIP 集合平均和 NCEP 再分析资料以及 Kiehl 和 Trenberth(简称 K-T)的估计值全球多年年平均能量收支(单位: W/m^2)

	AMIP 集合平均			NCEP	K-T
	陆地	海洋	全球	全球	全球
表面感热通量	- 29.85	- 15.11	- 19.51	- 15.50	- 24
表面潜热通量	- 49.65	- 105.05	- 88.65	- 79.97	- 78
表面净长波辐射通量	- 69.82	- 60.13	- 62.98	- 61.29	- 66
表面净短波辐射通量	152.26	180.78	172.25	161.94	168
表面能量平衡值	2.94	0.49	1.20	5.18	0
大气顶 OLR	- 227.37	- 238.11	- 234.90	- 237.21	- 235
大气顶净短波辐射通量	213.66	249.77	239.00	226.34	235
地球能量平衡值	- 13.71	11.66	4.10	- 10.87	0
大气能量平衡值	- 16.65	11.17	2.90	- 16.05	0

AMIP 集合平均结果最接近 K-T 的估计值, NCEP 与 GOALS-1.1 的主要问题是大气顶净短波辐射通量偏小, GOALS 模式两个版本的共同问题是大气顶射出长

波辐射 OLR 均偏低, 而 NCEP 射出长波辐射 OLR 虽与 K-T 的估计值接近, 但因净短波辐射通量偏低, 造成了 NCEP 大气平衡不合理的负值。

GOALS 模式更大的误差在于地表能量平衡值的模拟中,除了 GOALS-2 的全球地表正的能量平衡值与 NCEP 结果、AMIP 结果定性一致外,两个版本地表的能量平衡值包括海洋和陆地都与 AMIP 结果差别较大。GOALS-2 中海洋表面吸收过多的能量 (26.74 W/m^2) 主要是由于海洋表面向上的潜热加热值偏弱造成的,而陆地上负的能量平衡值 (-37.36 W/m^2) 主要是由于陆地向上的感热加热和地表向上的净长波辐射值偏大的结果,两者比 AMIP 结果都偏大 (22 W/m^2 以上),这也说明陆地表面对大气的加热作用偏强。GOALS-2 模拟的表面空气温度 (SAT) 在陆地上的温度最大值中心偏高^[10] 主要是这个原因造成的,由此表明陆面模式中相关过程的改进仍是必需的。GOALS-1.1 中无论海洋和陆地的负能量平衡值主要是与地表吸收的净短波辐射通量偏少有关。GOALS-2 中海洋和陆地表面吸收的净短波辐射通量都与 AMIP 结果较为一致,同时 GOALS-2 中大气顶吸收的净短波辐射通量(包括海洋和陆地)也比 GOALS-1.1 更接近 AMIP 集合平均结果。另外还看到 GOALS-1.1 版本中大气顶 OLR 比 NCEP 和 AMIP 偏少 20 W/m^2 左右,此缺点在引进云反馈机制后的 GOALS-2 版本中仍然存在,这说明 GOALS-2 引入的云反馈机制虽然从总体上改进了对大气顶和地表短波辐射通量的模拟,但对长波辐射通量的模拟仍然能力不足,这是今后改进云反馈机制时需要注意的一个问题。

图 1 给出了 GOALS-1.1, GOALS-2, NCEP 和 ERBE 资料中大气顶吸收的短波辐射通量、向外的长波辐射通量和净辐射通量(短波辐射通量减去长波辐射通量)的多年年平均纬向分布,其中 ERBE 资料在高纬度地区缺测。总的说来,两个版本都能模拟出 3 种通量向极地逐渐递减的特征,观测到的中

低纬吸收的短波辐射通量大于向外的长波辐射通量而高纬地区相反的这种特征也能被 GOALS 模式的两个版本模拟出来。但 GOALS-1.1 和 GOALS-2 模拟的大气顶 OLR 在中低纬度比 NCEP 资料和 ERBE 资料偏少约 20 W/m^2 ,北半球高纬地区也偏少约 15 W/m^2 。由图可见,表 1 中两模式版本模拟的大气顶射出长波辐射 OLR 偏低的误差主要发生在较低纬度上,其中 GOALS-2 在 $15^\circ\text{S} \sim 15^\circ\text{N}$ 之间偏低更多(图 1a)。图中还可看出 GOALS-1.1 版本模拟的大气顶吸收的短波辐射通量较接近于 NCEP 资料,但略偏少,而 GOALS-2 版本几乎在各个纬度带都稍高于 NCEP 资料,但在中低纬度,这三者都比 ERBE 观测结果小不少。联系到 OLR 偏低的模拟,看来中低纬度是能量收支模拟误差较大的区域。大气顶吸收的短波辐射与向外的长波辐射通量的净影响如图 1b 所示,可以看到 GOALS-1.1 和 GOALS-2 模拟的大气顶净辐射在中低纬有能量剩余(正值),而在高纬和极地出现负值,这意味着有能量通过大气和海洋环流从低纬向极地输送,这与观测结果一致。两个版本的模拟结果较接近 ERBE 资料,尤其是 GOALS-1.1 版本更为接近,它们都比 NCEP 资料偏高,尤以 GOALS-2 模拟的大气顶净辐射通量偏大,甚至远大于 ERBE 观测结果,这也是表 1 中 GOALS-2 的地球平衡值 (23.17 W/m^2) 较大的原因。从图 1b 中也可以看到 NCEP 资料的全球平均地球平衡值为负值 (-10.98 W/m^2),这主要是由于 NCEP 资料中地-气系统中低纬度净辐射收入过低,加热不足的结果,究其原因仍然是 NCEP 资料中中低纬短波净辐射偏低。

地表的净长波和净短波辐射通量如图 2 所示,其中负值表示方向向上。图 2a 说明两个版本的 GOALS 模式在两半球的副热带地区净长波辐射通

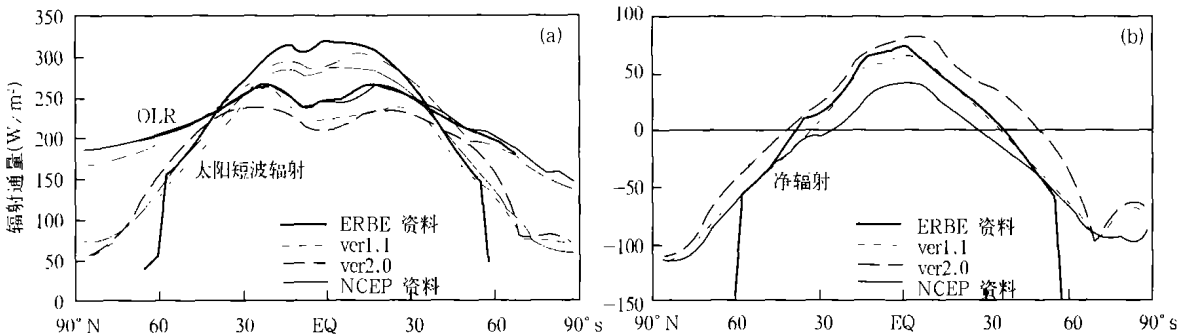


图 1 多年年平均的大气顶辐射通量纬向分布

(a. 大气顶向外长波辐射通量(OLR)和大气顶吸收的短波辐射通量, b. 大气顶净辐射通量。单位: W/m^2)

量有最大值(绝对值),而在热带地区出现极小值(绝对值),这种分布特征与 NCEP 和 SRB 资料基本一致。NCEP 和 SRB 资料随纬度变化的趋势很一致,但数值上在各个纬度带几乎都有差别,因为 Rossow

和 Zhang^[20] 的观测结果表明地表净长波辐射通量大约有 20 W/m^2 的不确定性。GOALS-1.1 模拟结果在热带地区与 NCEP 资料较一致,其他地区差别较大,而此版本与 SRB 资料相比情况刚好相反,即

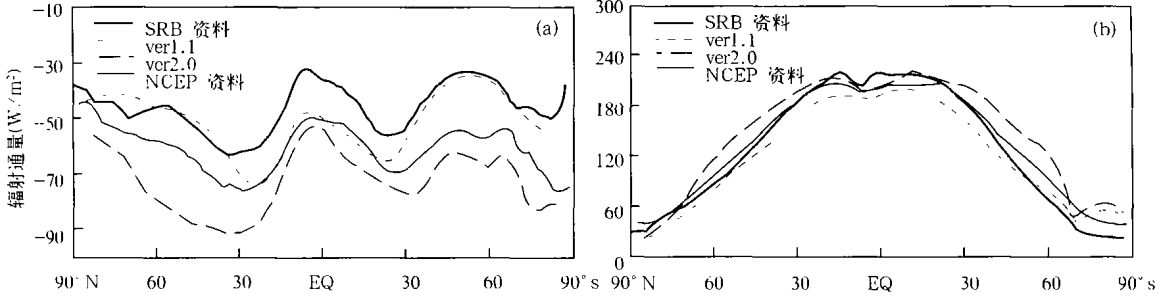


图2 多年年平均的地表辐射通量纬向分布 (a. 净长波, b. 净短波。单位: W/m^2)

在热带地区差别较大,而在其他地区则基本一致。GOALS-1.1 和 GOALS-2 较大的差别主要是在热带以外的地区。这是由于 GOALS-2 向下的长波辐射通量在热带以外地区比 GOALS-1.1 偏低(图略),因此净长波辐射通量(向上减向下)偏高较多,尤以中纬度为甚。Kiehl 等^[7] 指出地表净长波辐射通量主要与云底高度、云量和对流层湿度有关。文中还给出了 GOALS-1.1 和 GOALS-2 年平均总云量的分布图(图 3)。图中 ISCCP 的云也就是 GOALS-1.1 中所给定的云。总体来说,ISCCP 总云量比 GOALS-2 偏多,在热带以外的中纬度地区,GOALS-

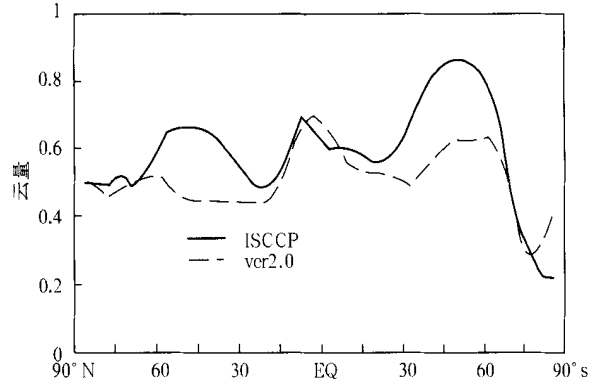


图3 多年年平均的总云量纬向平均分布

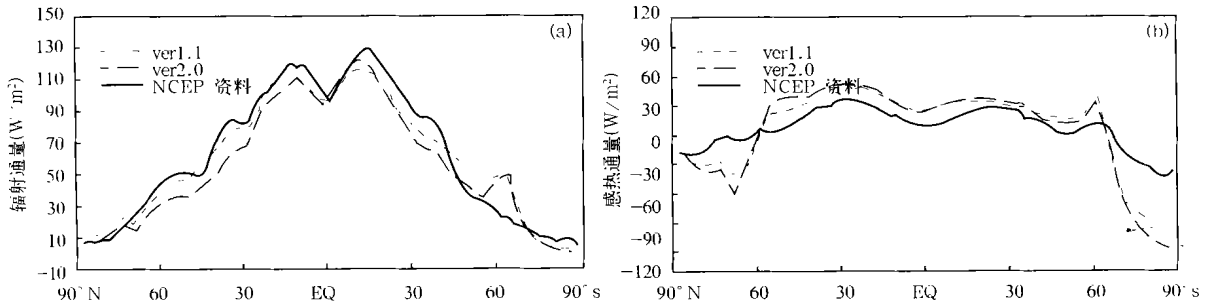


图4 多年年平均的地表面潜热通量(a)和感热通量(b)纬向平均分布(单位: W/m^2)

2 的总云量明显偏少,这是图 2a 中 GOALS-2 与 GOALS-1.1 地表净长波辐射通量有较大差别的主要原因之一。从地表的净短波辐射通量(图 2b)分布可以看到,GOALS-1.1 模拟的结果比 GOALS-2 和两种观测资料都偏低,尤其在 $55^\circ\text{S} \sim 55^\circ\text{N}$ 之间。而 GOALS-2 除了在赤道附近比 SRB 资料稍微偏低外,

在绝大多数纬度都比两种资料偏大,尤以中纬度偏大明显,这与 GOALS-2 模拟的云量偏低也直接相连,这也是 GOALS-2 模拟的全球平均地表面净短波辐射通量值比 NCEP 偏大的原因(表 1)。

总之,比较 GOALS-2 和 GOALS-1.1 的地表净短波辐射通量,可以看到两者之间的差别主要是在

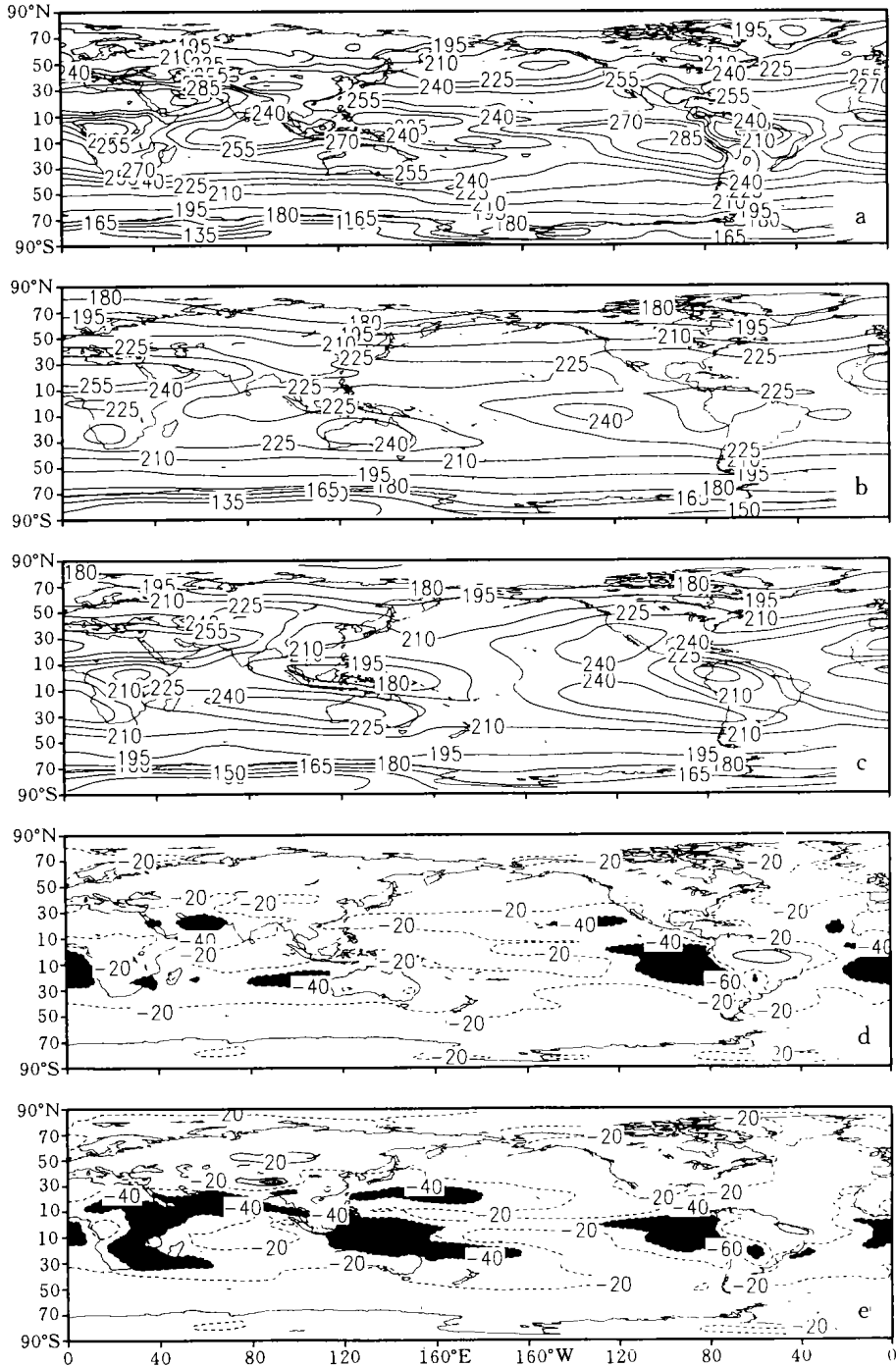


图5 多年年平均的大气顶向外长波辐射通量(OLR)的地理分布

(a. NCEP资料, b. GOALS-1.1 模拟结果, c. GOALS-2 模拟结果,

d. GOALS-1.1 与NCEP 差值, e. GOALS-2 与NCEP 差值. 单位: W/m^2)

中纬度地区, GOALS-2 模拟结果明显偏高, 这主要是由于 GOALS-2 在这些地区云量偏少的缘故。GOALS-2 模拟的大气顶吸收的短波辐射通量在中纬度也偏高(图 1a), 这主要也是由于总云量误差造成

的。联系到 GOALS-2 模拟的地表净长波辐射偏强, 可见改进诊断云的参数化方案是今后模式改进的重要任务。

地表的潜热加热与感热加热也是两种很重要的

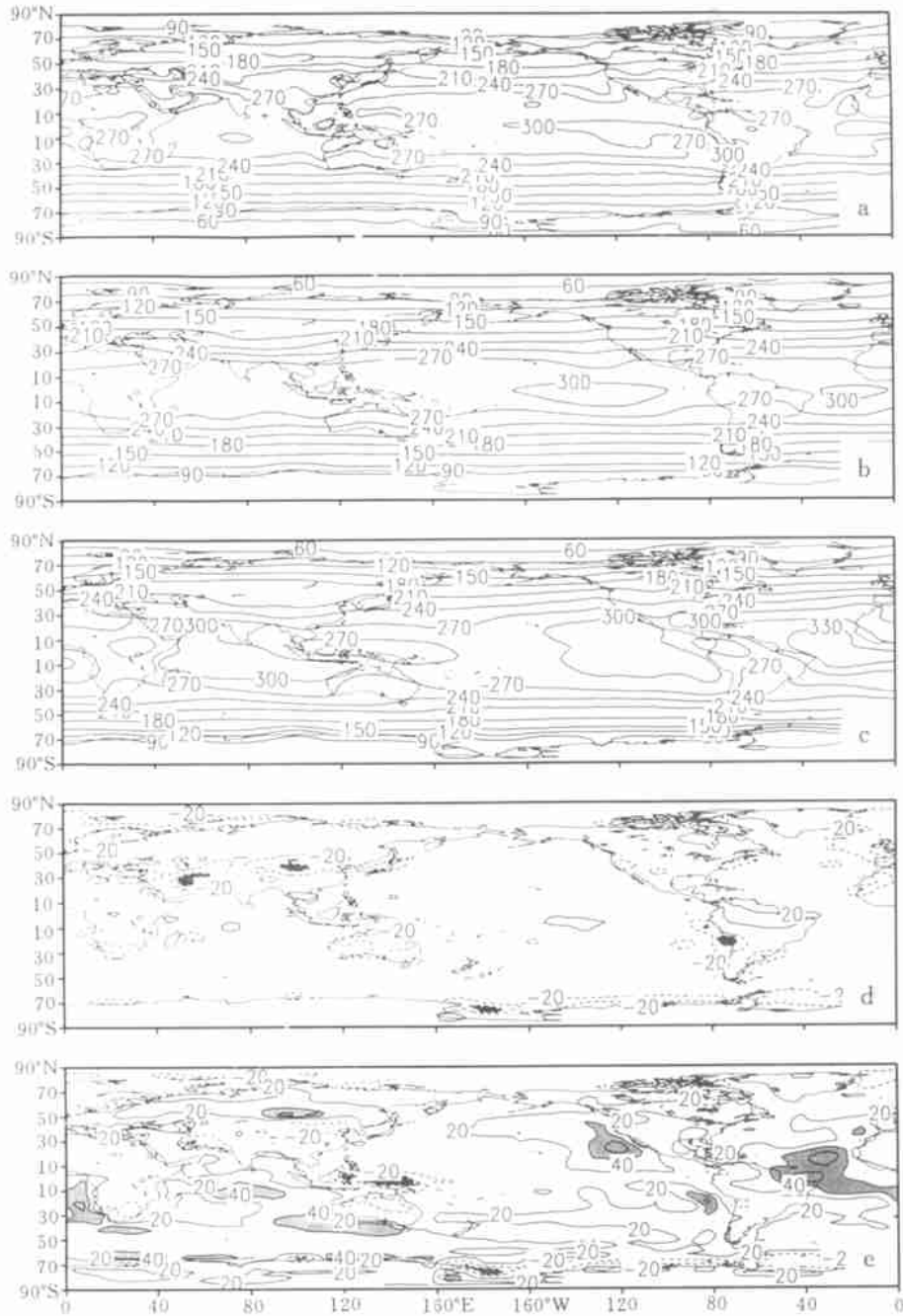


图6 同图5, 但为大气顶吸收的净短波辐射通量(单位: W/m^2)

加热源。其纬向平均分布如图4所示。总的说来, 潜热通量在 $15^{\circ}N$ 和 $15^{\circ}S$ 各有一个最大值, 且南半球稍偏大, 这个特征在 GOALS 的两个模式中都很好反映出来。但两个版本在 $40^{\circ}S \sim 70^{\circ}N$ 之间比 NCEP 结果稍微偏低, GOALS-2 尤为明显, 特别是南北半球中纬度偏低更多。南半球中高纬度地区, 两个版本反而比 NCEP 都偏大很多(图4a)。从图4b来看, 两个版本模式的感热通量分布形式基本一致,

在 $60^{\circ}N \sim 60^{\circ}S$ 之间是正的感热通量, 但他们比 NCEP 资料偏强约 $15 W/m^2$ 左右。在高纬地区是负感热通量, 但比 NCEP 偏强很多(绝对值)。对比模拟的辐射通量的大小(图2a和2b), 不难发现在两半球的高纬地区 GOALS 模式模拟的地表净短波辐射通量偏少和净长波辐射通量偏强形成地表较强的冷却作用, 它是高纬地区的表面空气温度比观测偏低^[10]的主要原因, 使得大气有感热向地表输送, 形

成高纬地区过强的负感热值。

4 能量的地理分布

能量的纬向平均分布对于描述在向极热输送中起重要作用的经向结构非常重要。然而,气候系统内部的运动和变化是由能量的三维分布特征来驱动的^[21],纬向平均可能掩盖了能量通量的区域偏差。因此,为了更好地理解 GOALS 模式两个版本的全球能量收支,我们给出了大气顶和地面各种能量通量的地理分布图,为简单起见,这里主要讨论年平均收支。

观测和模拟的年平均大气顶向外长波辐射通量(OLR)地理分布如图 5 所示。观测到的与热带深对流和大范围的砧云系统有关的长波辐射通量 3 个低值中心(如赤道非洲中心、亚洲季风区至赤道中、西太平洋的低值中心和位于热带的美洲大陆中心,(图 5a),在 GOALS-2 模式中很好的模拟出来了(图 5c),但强度偏强(图 5e)。而 GOALS-1.1 却没能模拟出

这 3 个低值中心(图 5b)。两个版本对东太平洋盆地的 OLR 模拟偏低,因此产生了显著的负偏差(图 5d 和 5e)。总的说来,GOALS-1.1 和 GOALS-2 模拟的大气顶 OLR 几乎在全球都偏弱,且热带地区的误差较大,这与前面讨论的纬向平均结果一致。

观测和模拟的大气顶年平均短波吸收辐射通量如图 6 所示。总的说来,GOALS 模式能抓住大气顶年平均短波吸收通量的主要特征,如热带东太平洋最大值中心、赤道非洲低值中心和西太平洋暖池区低值中心(图 6a)在 GOALS-2 中很好地模拟出来(图 6c),但 GOALS-2 海洋上的误差较大,主要是热带大西洋、东太平洋和南印度洋的误差偏强约 40 W/m^2 以上,而西太平洋暖池区却偏低,南极地区也有不同程度的偏弱(图 6e)。GOALS-1.1 在海洋上的误差明显改善,但陆地上却有较大的负误差,在亚洲大陆以及澳大利亚较为明显。高纬地区与 GOALS-2 版本一样都偏弱(图 6d)。

观测和模拟的年平均表面净能量通量(潜

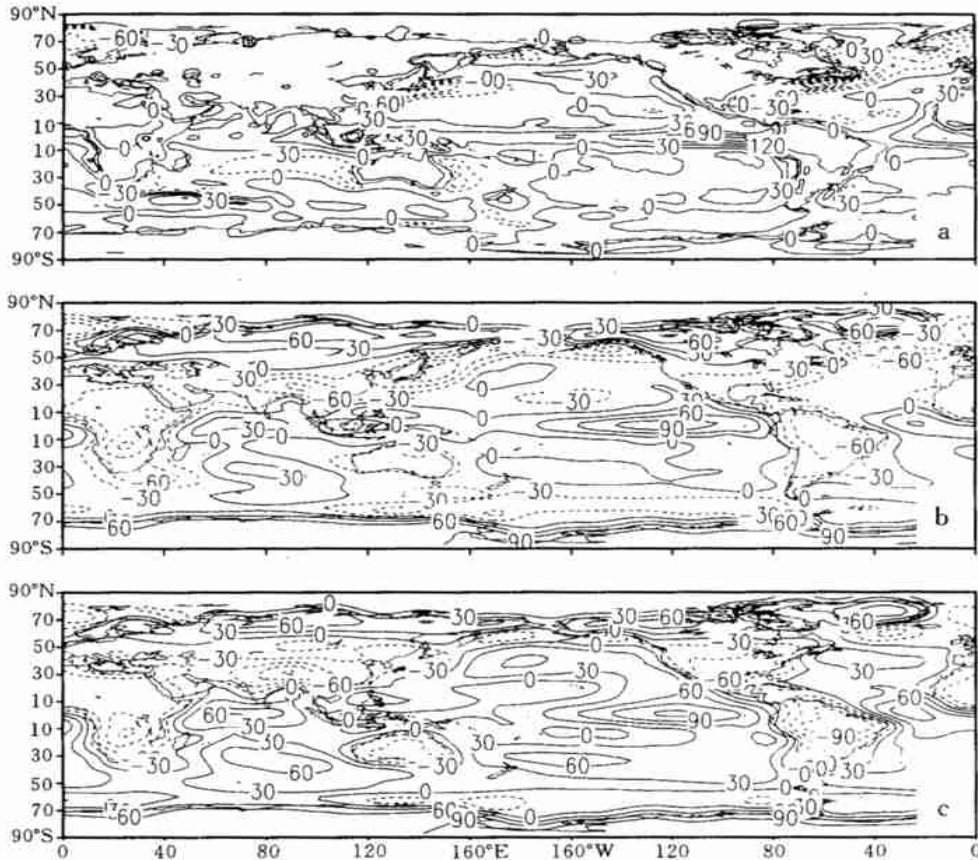


图 7 多年年平均的地表净能量(潜热,感热,净长波和净短波辐射通量之和)的地理分布

(a. NCEP 资料, b. GOALS-1.1 模拟结果, c. GOALS-2 模拟结果, 正值表示方向向下。单位: W/m^2)

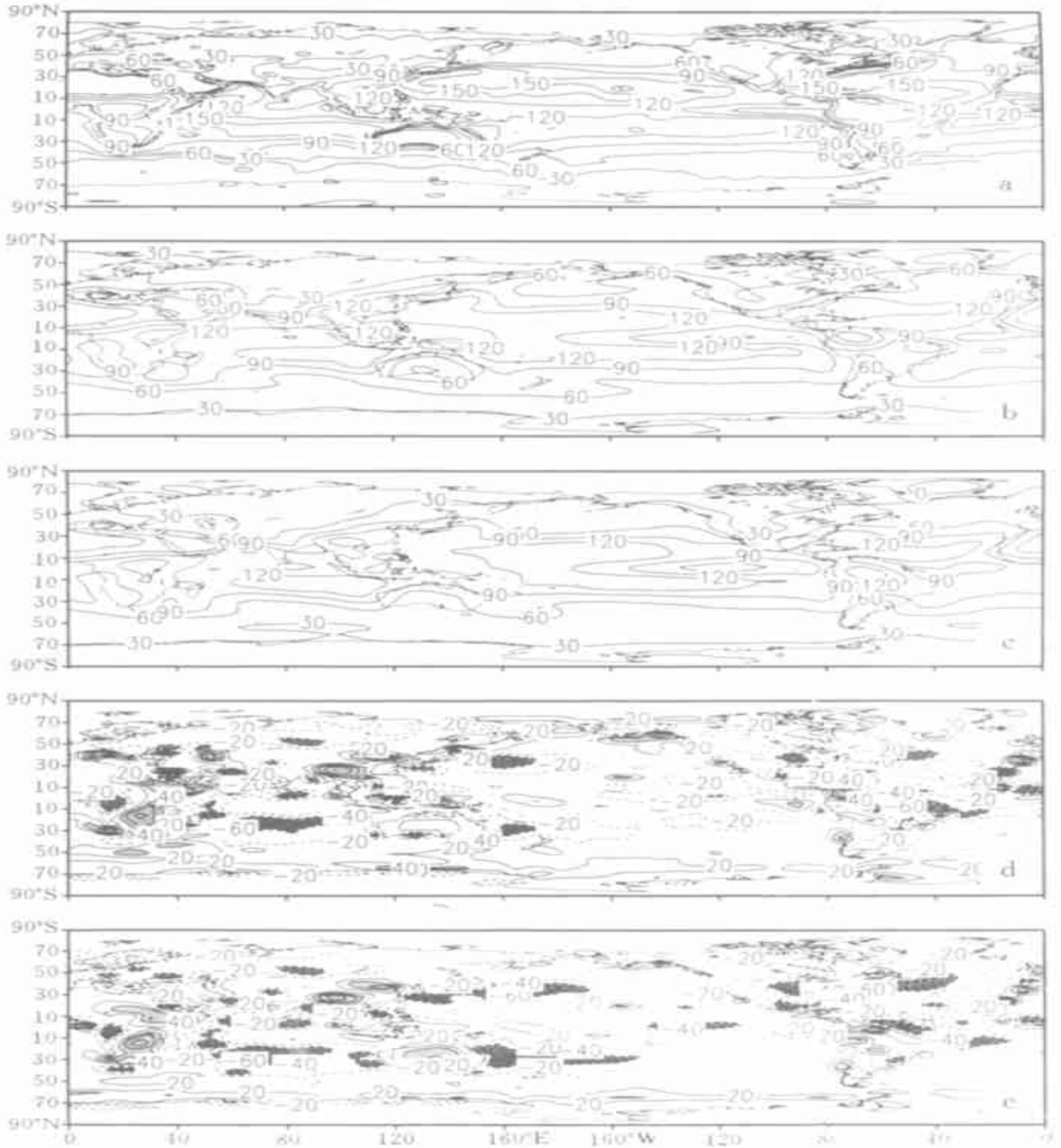


图8 同图5,但为地表面潜热通量(单位: W/m^2)

热,感热,净长波和净短波辐射通量之和)如图7所示。我们看到GOALS模式中进入海洋的净能量通量(正值)和从海洋进入大气的净能量通量(负值)的空间分布形式与NCEP值一致。模式能模拟出赤道地区的能量吸收特征,但印度洋地区与NCEP相比明显偏大。Kiehl等^[7]分析CCM3的能量收支时也发现印度洋地区模拟的海表净能量通量比Large等^[22]的资料偏强。这说明印度洋地区的误差很可

能是现代模式中存在的共同问题。黑潮和墨西哥湾流区从海洋进入大气的能量损失(负值)特征在GOALS 1.1版本中也很好地模拟出来(图7b),但GOALS-2版本在上述两个地区的能量损失特征却不明显(图7c)。另外,GOALS-2对赤道大西洋和东太平洋净通量的模拟比GOALS-1.1和NCEP资料都偏强。从图7a中,我们还发现NCEP资料的净能量通量在陆地和两半球的高纬地区几乎都为0。而

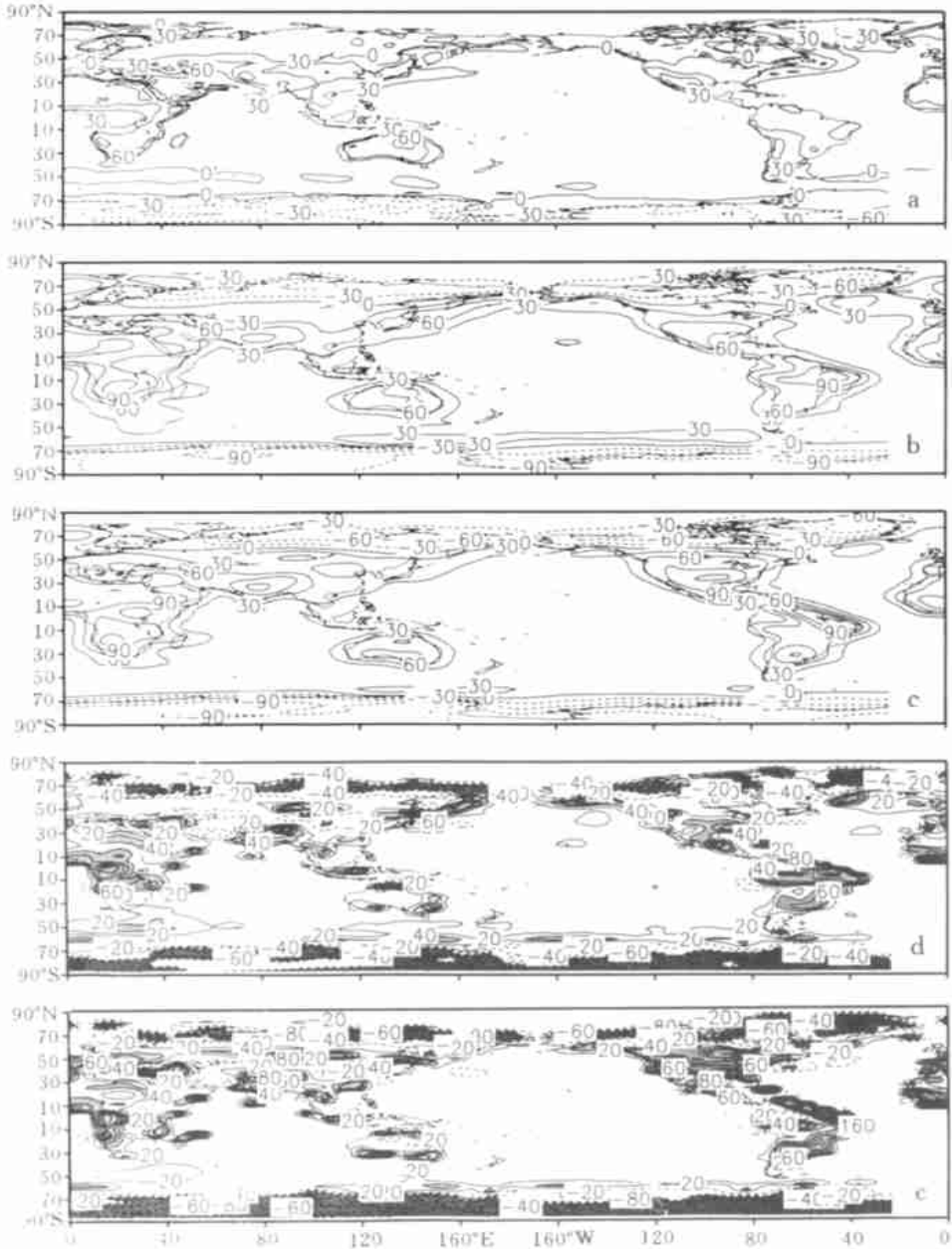


图9 同图5,但为地表面感热通量(单位: W/m^2)

从GOALS两个版本模式中(图7b和7c)不难发现在美洲大陆、南非大陆以及阿拉伯半岛、北印度半岛和中国大部分地区都有较强的净能量从地表进入大气(负值),而在大陆高纬地区都有从大气向下能量的损失(正值),这种净能量通量的模拟结果与极地和大陆高纬地区有较低的表面空气温度,而南美、南非、北美南部和印度半岛等高温中心偏强相联系,Guo等^[10]的模式评估很好地证实了这一点。

图8给出了观测和模拟的潜热通量分布。可以看到GOALS两个版本模式的潜热通量分布特征与

NCEP资料基本一致。热带区域潜热通量在赤道为小值,包括赤道东太平洋冷舌处的极小值都模拟得很好(图8a,b和c)。两个模式的误差基本相同,海洋上潜热通量偏少,特别是在副热带洋面上偏少更明显。陆地上正误差主要集中在非洲大陆、华南和华北以及南美大陆部分地区,潜热通量明显偏大,而欧亚和北美大陆大部分地区潜热通量仍偏少,特别是北部地区(图8d,e)。这也是模式降水在大部分地区偏少^[10]的重要原因。从地表的年平均感热通量来看(图9),观测到的澳大利亚中心、南美大陆中

心、北美南部中心、南部非洲中心以及印度半岛正的感热加热中心都基本模拟出来了(图 9a, b 和 c)。与潜热通量一样,两模式与观测的误差分布形式大体相同。这主要是由于地表感热通量和潜热通量受云方案改变的影响较小的缘故。我们看到主要误差是模式高纬地区为偏强的负感热通量,而中低纬度的陆地感热加热基本都偏强(图 9d, e),这与前面讨论的感热的纬向平均图也很好的一致。

5 总结与讨论

文中对 GOALS 模式的两个版本(GOALS-1.1 和 GOALS-2)的能量收支进行了详细的评估,并把大气顶的辐射通量和地表面能量通量与观测的这些通量的估计值进行了对比研究。总体来说,两个模式各能量收支项的模拟基本上与观测结果较为一致。文中分别讨论了各项能量全球、全球陆地和全球海洋的平均值,讨论了其纬向平均分布和地理分布特征,并从地表各能量项(如感热、潜热和地表净能量)的观测和模拟结果的对比分析中对耦合模式性能评估中几个变量(如表面空气温度、降水等)的误差原因给予了合理的解释,还对两模式中应用卫星观测的云量和诊断云方案而引起辐射能量的差异进行了初步分析。

概括起来,得到了如下一些有益的结论。

(1) 从全球平均来看,GOALS 模式模拟的大气能量平衡值为正值,基本与 AMIP 集合平均结果定性一致。大气顶辐射通量的模拟误差在于 GOALS 模式两个版本的射出长波辐射 OLR 均偏低,并且 GOALS-1.1 的大气顶净短波辐射通量也偏小。对于表面能量通量来说,GOALS-2 中海洋表面吸收过多的能量(正值)主要是由于海洋表面向上的潜热加热值偏弱造成的,而陆地上负的能量平衡值主要是由于陆地向上的感热加热和地表向上的净长波辐射值

偏大的结果。GOALS-1.1 中无论海洋和陆地的负能量平衡值主要是与地表吸收的净短波辐射通量偏少有关。

(2) 两模式大气顶 OLR 偏低的模拟主要发生在中低纬度。大气顶净短波辐射通量的模拟虽然 GOALS-2 与 AMIP 集合平均的全球积分结果基本一致,但与 NCEP 资料相比在热带大西洋、东太平洋和南印度洋上有较大的正误差。GOALS-1.1 模拟的大气顶净短波辐射通量则与 NCEP 资料较为接近,但比 AMIP 集合平均结果偏低。两个版本模拟的大气顶净短波辐射通量在中低纬度也都比 ERBE 资料偏小,这说明改进中低纬度云-辐射参数化方案对改进全球能量收支的模拟有重要意义。

(3) 从两模式感热和潜热的地理分布来看,它们的分布特征和误差区域基本相同,模拟的感热通量在高纬地区为负值,这与那里净短波辐射通量偏少和净长波辐射通量偏强而导致高纬表面空气温度偏低相关,而在陆地上感热加热作用显著偏强,使地表有较大的向上净能量给大气,引起陆地上几个温度暖中心也偏强,这对模式温度场模拟误差原因给予了很好的解释。海洋上潜热通量偏少,特别是在副热带洋面上偏少更明显。陆地上的欧亚和北美大陆大部分地区潜热通量仍偏少。这也是模式降水在大部分地区偏少的重要原因。

(4) 尽管 GOALS-2 中引入云反馈机制有利于改善赤道西太平洋 SST 变率的模拟^[18],但 GOALS-2 中诊断的总云量比 GOALS-1.1 中 ISCCP 给定的云在两半球的中纬度地区明显偏少,导致大气顶和地表的净短波辐射通量(正值)在上述地区比 GOALS-1.1 明显偏强,而向上的地表净长波辐射通量(绝对值)在上述地区也偏强许多,并且也比 NCEP 和 ERBE 观测资料强许多。这说明引入更好的云参数化方案的是今后模式发展的一个重要课题。

参考文献

- 1 Kiehl J T, Trenberth K E. Earth's annuan global mean energy budget. Bull Amcer Meteor Soc, 1997, 78: 197~ 208
- 2 Trenberth K E. Using atmospheric budgets as a constraint on surface fluxes. J Climate, 1997, 10: 2796~ 2809
- 3 Yang Shi-Keng, et al. Evaluation of the earth radiation budget in NCEP-NCAR reanalysis with ERBE. J Climate, 1999, 12: 477~ 493
- 4 Yu R C, Zhang M H, Robert D Cess. Analysis of the atmospheric energy budget: A consistency study of available data sets. J Geophys Res, 1999, 108: 9655~ 9661
- 5 Kiehl J T, Ramanathan V. Comparison of cloud forcing derived from the earth radiation budget experiment with that simulated by the NCAR community climate model. J Geophys Res, 1990, 95: 11679~ 11698
- 6 Kiehl J T, Hack J J, Briegleb B P. The simulated earth radiation budget of the national center for atmospheric research community climate model CCM2 and comparisons with the earth radiation budget experiment (ERBE). J Geophys Res, 1994, 99: 20815~ 20827

- 7 Kiehl J T, Hack J J, Hurrell J W. The energy budget of the NCAR community climate model: CCM3. *J Climate*, 1998, 11: 1151~ 1178
- 8 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
- 9 Zhang X H, Shi G Y, et al. IAP global ocean-atmosphere-land system model. Beijing: Science Press, 2000. 252pp
- 10 Guo Y F, Yu Y Q, Zhang Tao. Evaluation of IAP/LASG GOALS model. In: Zhang X, et al. eds. IAP Global Ocean-Atmosphere-Land System Model. Beijing: Science Press, 2000. 252pp
- 11 Wu G X, Liu H, et al. A nine-layer atmospheric general circulation model and its performance. *Adv Atmos Sci*, 1996, 13: 1~ 18
- 12 Shi G Y. An accurate calculation and representation of the infrared transmissions function of the atmospheric constituents: [dissertation]. Dept of Sci, Tokoku Univ of Japan, 1981. 191pp
- 13 王标. 气候模拟中的辐射传输模式: [学位论文]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 1996. 92pp
- 14 Xue Y K, Sellers P J, et al. A simplified biosphere model for global climate studies. *J Climate*, 1991, 4: 345~ 364
- 15 Zhang X H, Chen K M, et al. Simulation of the meridional circulation with a twenty-layer oceanic general circulation model. *Theor Appl Climatol*, 1996, 55 (1-4): 65~ 87
- 16 Parkinson C L, Washington W M. A large-scale numerical model of sea ice. *J Geophys Res*, 1979, 84: 311~ 337
- 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
- 18 Liu H, Zhang X H, Wu G X. Cloud feedback on variability of SSI of western equatorial pacific in GOALS/LASG model. *Adv Atmos Sci*, 1998, 15: 410 ~ 423
- 19 Rossow W B, Schiffer R A. ISCCP cloud data products. *Bull Amer Meteor Soc*, 1991, 72: 2~ 20
- 20 Rossow W B, Zhang Y C. Calculation of surface and top of atmosphere radiative fluxes from physical quantities based in ISCCP data sets. Part II: Validation and first results. *J Geophys Res*, 1995, 100: 1167~ 1197
- 21 Trenberth K E, Solomon A. The global heat balance: Heat transports in the atmosphere and ocean. *Climate Dyn*, 1994, 10: 107~ 134
- 22 Large W G, Danabasoglu G, Doney S C, et al. Sensitivity to surface forcing and boundary layer mixing in a global ocean model: Annual-mean climatology. *J Phys Oceanogr*, 1997, 27: 2418~ 2447

ENERGY BUDGET BIAS IN GLOBAL COUPLED OCEAN-ATMOSPHERE- LAND MODEL

Zhang Tao Wu Guoxiong Guo Yufu

(IASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract

The energy budget of two versions of GOALS model (GOALS-1.1 and GOALS-2) is described, and compared to the observational estimates. The results illustrate that the simulated net surface shortwave radiation flux is underestimated in the high latitude regions while the net longwave radiation flux is substantially overestimated in that region, which results in the lower surface air temperature (SAT) in the polar region and the strongly negative sensible heat flux in the high latitudes. The overestimated sensible heat flux from surface to atmosphere in continents causes the much warmer SAT centers, which are the reasons for the bias of model SAT. The reasons that the simulated precipitation in most of the regions is less than observation are closely related to the underestimated latent heat flux over most of Eurasian continent and the oceans, especially over the subtropical ocean. It can be seen that the bias in the OLR of the two models lies in mid-latitudes and low latitudes, where the simulated solar absorbed shortwave radiation flux at top of atmosphere is comparable to NCEP reanalysis, but much less than ERBE data. This indicates that the improvement of cloud-radiation parameterized scheme in mid-latitudes and low latitudes is of critical importance to the simulation of global energy budget. The simulated cloud cover from GOALS-2 model with diagnosed cloud scheme is generally less except equator areas, especially in the mid-latitude areas, which causes the large bias of energy budget there. This suggests that the refinement of cloud parameterization is one of the most important tasks in the model's future development.

Key words: Climate system, Coupled model, Energy budget, Cloud parameterization.