

辐射参数化的变化对模式中中期和月预报的影响*

沈元芳

(中国气象科学研究院,北京 100081)

伊 兰 陈 谊 胡国权

(国家气象中心,北京 100081)

提 要

在 T106 中期数值预报模式和 T63 气候模式中进行了两种辐射过程参数化的对比试验。目前在这两个模式中用作对照积分的辐射方案(OPE)是 ECMWF 的早期业务方案,而新的辐射方案(NEW)是 ECMWF 1989 年 5 月 2 日成为业务的版本。试验结果表明,OPE 高估了短波水的吸收,导致太大的短波大气吸收和地表太小的向下短波辐射;OPE 还低估了长波辐射冷却和大气顶的向外长波辐射(OLR);NEW 增加了地表有效辐射能量和对流层总的冷却,产生了较大的湍流热通量,对流活动加强,降水量明显增加;NEW 还使平流层温度偏暖得到矫正。业务平行试验的统计检验表明,NEW 对 4~7 天中期预报有较显著的改进。

关键词:短波大气吸收 长波辐射冷却 向外长波辐射 湍流热通量

引 言

在大气大尺度数值模式中必须参数化的所有次网络过程中,辐射传输是一个有相对稳定物理基础,并对地球大气气候平衡最重要的物理过程。模拟的模式气候对辐射传输参数化有很强的敏感性。但最新研究表明,辐射传输不仅对长期预报,而且也对中、短期预报,甚至对同化气象观测都十分重要。因此任何辐射方案中存在的系统性误差都会严重地影响气候模拟和分析预报的质量。

目前对辐射传输的理论研究相对成熟,但对辐射的观测不能象常规气象观测那样完全,只能藉助卫星观测得到一个全球尺度上合理的辐射场。因此,对辐射参数化方案的比较和验证在多数情况下还是用精确的辐射模式,例如逐线模式(LBL)或窄带模式(NBM)作为参考。Morcrette 和 Fouquart^[1],Scott 和 Chedin^[2]曾仔细地对本文使用的新辐射方案在长波和短波辐射上与这些精确的模式作了检查,并用卫星观测资料作了验证。

本文通过应用 T63、T106 分析以及 NCEP 再分析资料对试验结果的验证,可以清楚地看到辐射参数化的变化对模式预报的改进。

* 本文由中国气象局气候研究开放课题、国家气象中心 ZX95-01-04 课题和国家“十五”科技攻关项目:“中国气象数值系统技术创新研究”课题共同资助。

2000-09-19 收到,2001-02-22 收到修改稿。

1 方法

表1给出了进行对比试验的例子。

表1 试验例子

项目	数目	模式积分	开始日期
个例	1	T63, 1个月	1997年6月29日
业务平行	50	T106, 7天	1998年11月24日~1999年1月12日

表中 T63 一个月积分用以描述新辐射方案(NEW)对气候的影响,而 T106 预报用以评价 NEW 对中、短期预报的作用。其中业务平行试验中,由于 6 h 资料同化应用了 NEW,因此两种方案试验的初始场是不同的。

T106 和 T63 模式都是 ECMWF 预报模式的早期版本,详细描述可在 Simmons 等^[3]和 Tiedtke 等^[4]中找到。其中 T106 模式由国家气象中心于 1997 年 6 月开发成业务中期预报模式,而 T63 模式将由国家气候中心发展成为业务气候模式。

OPE 的描述最早由 Geleyn 和 Hollingsworth^[5]给出,其中长波参数化经历了一些变化,可参见 Ritter^[6]和 Slingo 等^[7]。

NEW 是 Morcrette^[8~9]根据法国 Lille 大学辐射方案发展的更新版本。表 2 列出了这两种辐射方案的比较。

表2 新辐射方案(NEW)与业务方案(OPE)的比较

项目	方案	量值和方法
太阳常数	ORE	$1376 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$
	NEW	$1370 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (T106 模式), $1365 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (T63 模式)
短波域	OPE	$0.245 \sim 0.78 \mu\text{m}$, $0.78 \sim 4.63 \mu\text{m}$
	NEW	$0.25 \sim 0.68 \mu\text{m}$, $0.68 \sim 4.0 \mu\text{m}$
长波域	OPE	5 个谱区域
	NEW	6 个谱区域($0 \sim 2820 \text{ cm}^{-1}$)
水汽	OPE	1 个短波域, 5 个长波域, 仅有 p 型连续域吸收
	NEW	1 个短波域, 6 个长波域, e 和 p 型连续域吸收
二氧化碳	OPE	浓度 330×10^{-6} , 在两个谱域中与 H_2O 叠加
	NEW	浓度 345×10^{-6} (T106 模式), 348×10^{-6} (T63 模式), 透射函数有较精确的表示
臭氧	OPE	1 个短波域, 1 个长波域与 H_2O 叠加
	NEW	2 个短波域, 长波域($970 \sim 110 \text{ cm}^{-1}$)与其它气体叠加
气溶胶	OPE	常数, 仅随高度而变化
	NEW	短波吸收和散射基于气候模式 5 种类型气溶胶的米参数, 长波吸收中应用发射率公式
云滴吸收和散射*	OPE	云滴的吸收和散射用 LWP 定义的 τ 和 ω , 通过二流公式显式处理(预先给定 g)
	NEW	短波用 LWP 定义的 τ 和 ω , 预先给定 g 和 r_e , 使用 δ -Eddington 的方法, 长波吸收根据 LWP, 应用发射率公式计算
气体吸收	OPE	用光学路径分布方法分开, 吸收系数采用 AFGL(1980 年)
	NEW	用光学路径分布方法分开, 吸收系数采用 AFGL(1982 年)

* 表中 τ 、 ω 、 g 、 r_e 、LWP 分别为光学厚度、单次散射反照率、不对称因子、云滴的有效半径和液态水路径。

在 OPE 短波辐射计算中,使用二流公式与光学路径分布方法。先对气体吸收外的所有过程求解辐射传输方程,然后再包括气体吸收。而长波辐射计算中,散射是可忽略的。使用透射函数快速指数和拟合的二流方法,通过一个参数的尺度近似引入吸收依赖于气压和温度的关系。吸收系数与 AFGL(1980 年)一致。

在 NEW 的短波计算中,也使用二流公式与光学路径分布方法。但谱的区域与 OPE 不同。在长波计算中,使用覆盖 6 个谱区域($0 \sim 2820 \text{ cm}^{-1}$)的宽带通量发射率。6 个谱区域为 $0 \sim 350 \text{ cm}^{-1}$ 和 $1450 \sim 1880 \text{ cm}^{-1}$, $500 \sim 800 \text{ cm}^{-1}$, $800 \sim 970 \text{ cm}^{-1}$ 和 $1110 \sim 1250 \text{ cm}^{-1}$, $970 \sim 1110 \text{ cm}^{-1}$, $350 \sim 500 \text{ cm}^{-1}$, $1250 \sim 1450 \text{ cm}^{-1}$ 和 $1880 \sim 2820 \text{ cm}^{-1}$, 分别对应 H_2O 的旋转和振动旋转谱带的中心, CO_2 的 $15 \mu\text{m}$ 谱带, 大气窗, O_3 的 $9.6 \mu\text{m}$ 谱带, $25 \mu\text{m}$ 窗区, 和 H_2O 的振动旋转谱带的翼。对这些谱区域,我们可以借助于 Morcrette 和 Fouquart^[1] 的窄带模式预先算好的谱带透射率计算谱带通量。吸收依赖于温度和气压,吸收系数与 AFGL(1982 年)一致。计算的 CPU 时间为 OPE 的 98%。

本文对影响辐射计算的输入因子进行修改、调试。例如,太阳常数从 $1376 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 改为 $1370 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (T106 模式), $1365 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (T63 模式); 二氧化碳浓度从 330×10^{-6} 改为 345×10^{-6} (T106 模式), 348×10^{-6} (T63 模式); 长波反照率从 0.01 改为 0.004, 短波反照率仍用模式不同地表的反照率。

2 结 果

本节给出了两种辐射方案对比试验的结果,并用 NCEP 再分析和一些有效的参考资料作了比较和验证。在 T106(或 T63)分析—预报系统中存在着一些系统性误差,在这些误差中,有些明显地与辐射参数化的缺陷有关,例如,大气顶 OLR 场非实际的平滑,地表有效辐射能量偏小以及平流层温度偏暖等;有些误差可能和辐射强迫不适当的三维分布有关,例如,陆面感热通量和洋面潜热通量偏弱,热带和副热带降水偏少等。另外一些误差则可能和目前的辐射参数化无直接的关系,例如副热带急流向极地和向上的切变,热带对流层上部过强的东风带等。

下文只对与辐射参数化缺陷有关的系统性误差进行分析讨论。

(1) 短波辐射加热率和长波辐射冷却率

从短波辐射加热率和长波辐射冷却率廓线来看,无论是 T106 初值、短中期预报或 T63 一个月的长期预报,还是全球平均或高、中、低纬度的纬向平均都表示 OPE 与 NEW 有较大的偏离。图 1 为 1998 年 12 月 15 日 T106 模式 7 天预报的全球平均加热率廓线。由图可知,由于 OPE 高估了短波 H_2O 的吸收,导致太大的短波大气吸收(自平流层至对流层底),最大偏差达 0.36 K/d (图 1a)。OPE 还低估了长波辐射冷却(误差主要在对流层中、低层),最大偏差达 0.22 K/d (图 1b)。这个结论与 Morcrette^[8~9] 试验结果一致, Morcrette 通过与气候模式中辐射程序相互比较(ICRCCM)项目中更精确模式,例如逐线模式(LBL)和窄带模式(NBM)的比较,得出 NEW 消除了 OPE 方案中许多系统性误差。在他的试验中,对晴空柱 OPE 高估了短波加热 $15\% \sim 20\%$, 低估了长波冷却 $10\% \sim 15\%$, 这些系统性误差可发生在几百百帕的厚度层中。对应局地偏差在短波中最大达

0.5 K/d,在长波中达 0.7 K/d。

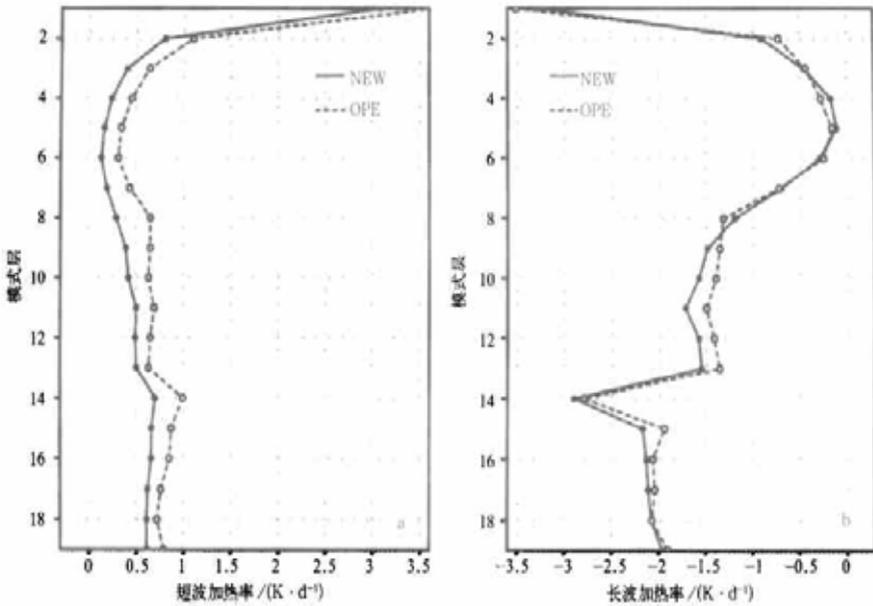


图1 1998年12月15日T106模式7天预报的全球平均加热率廓线
(a)为短波加热率 (b)为长波冷却率

(2) 地表辐射通量

NEW修改了短波 H_2O 的吸收率,减小了晴空短波大气吸收,因此在地表可得到更多的太阳辐射。在长波方面,由于NEW更好地表示了吸收依赖于温度和气压的关系,而给出了更大的向下通量。在热带这个增加是由于水汽连续域的 e 型分量的加强而引起的。向下的长波通量在对流云地区也是增加的,引起了晴空和有云地区更大的差异。长波和短波净辐射的这些变化有时部分地抵消,但NEW在地表给出了更大的净辐射通量。两个方案的地表辐射通量在全球平均的差别可达 $60 \sim 70 W \cdot m^{-2}$,而在Morcrette的试验中,NEW和OPE之间的差别最大可达 $60 W \cdot m^{-2}$ 。

(3) 大气顶的向外长波辐射

NEW订正了OPE低估的大气顶晴空OLR,引起大气顶OLR场在晴空和对流云地区的强烈反差。图2给出了1997年7月T63模式两种辐射方案预报和NCEP再分析的月平均大气顶向外长波辐射(OLR)。由图可见,在NEW中(图2a)位于印度半岛周围的对流云地区OLR的极小值小于 $240 W \cdot m^{-2}$,而位于非洲北部至阿富汗的晴空地区的极大值大于 $330 W \cdot m^{-2}$,两者差值达 $90 W \cdot m^{-2}$ 以上。在OPE中(图2b)上述对流云和晴空地区的OLR分别为 $240 W \cdot m^{-2}$ 和 $300 W \cdot m^{-2}$,差值仅为 $60 W \cdot m^{-2}$ 以下。在NCEP再分析图中(图2c),这种差值可达 $90 W \cdot m^{-2}$ 以上。NEW方案在晴空和对流云地区产生OLR的强烈反差是对OPE方案的重要改进。OPE没有产生这些特征,当与NCEP再分析比较时,倾向于低估晴空地区的高值和高估对流云地区的低值的平滑特征。因此NEW方案的结果更接近于NCEP中再分析资料,也更接近于实际。

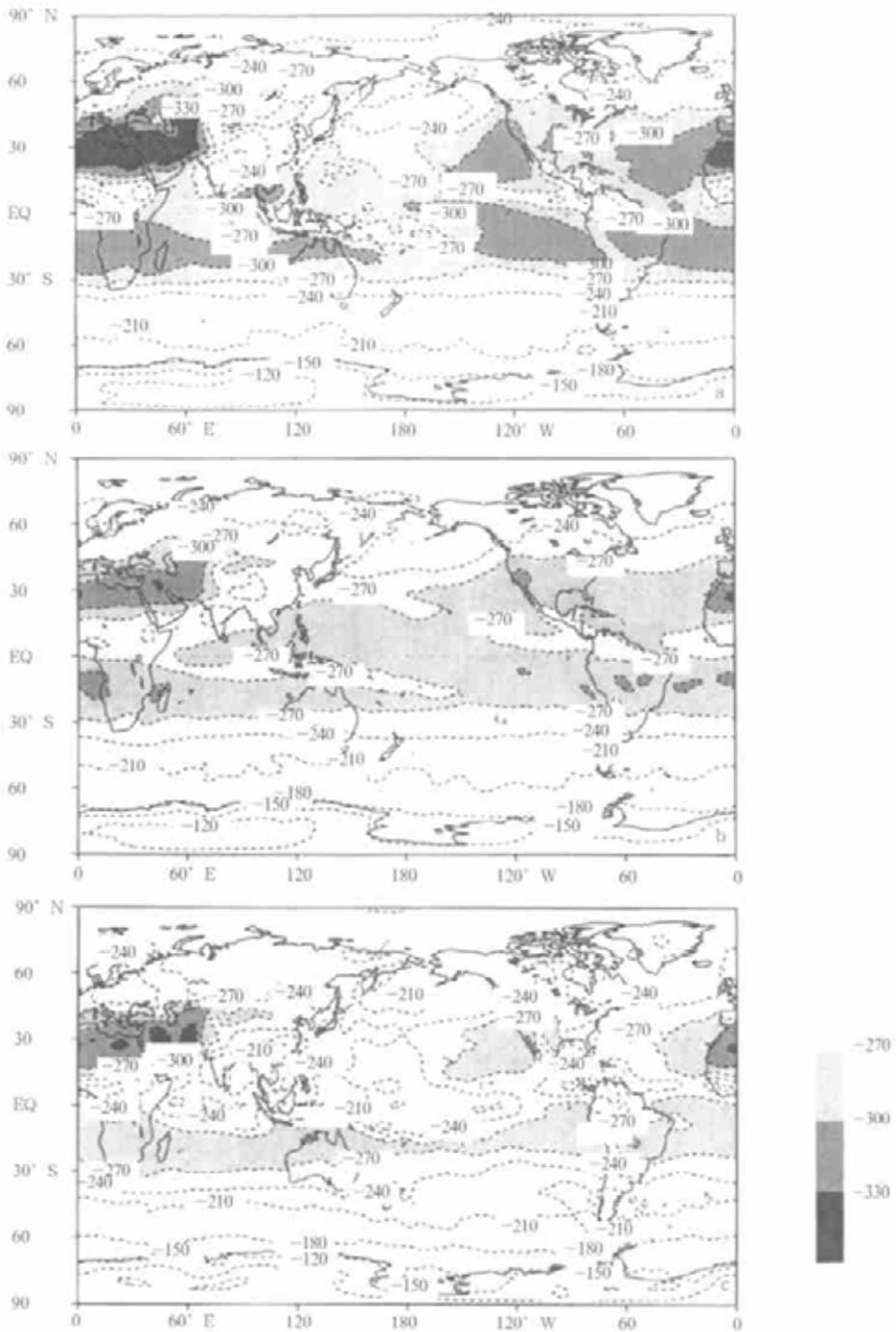


图 2 1997 年 7 月 T63 模式两种辐射方案预报和 NCEP 再分析的月平均大气顶的向外长波辐射,(a)为 NEW (b)为 OPE (c)为 NCEP 再分析(等值线的间隔为 $30 W \cdot m^{-2}$)

(4) 湍流热通量

NE W 增加了地表有效辐射能量 (长波和短波辐射变化的净效应) 和对流层总的冷

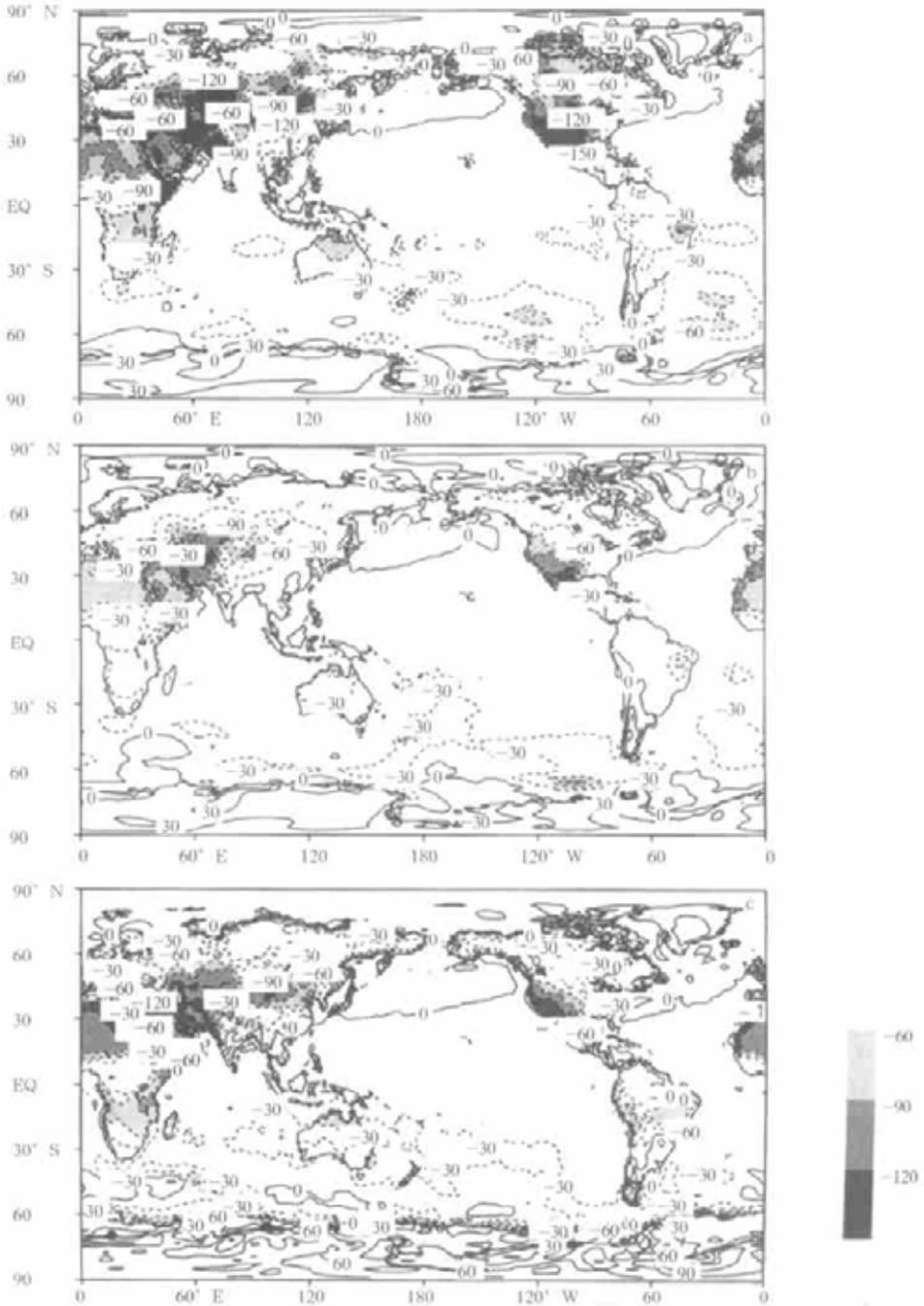


图 3 1997 年 7 月 T63 模式两种辐射方案预报和 NCEP 再分析的月平均感热通量 (a) 为 NE W (b) 为 OPE (c) 为 NCEP 再分析(等值线的间隔为 $30 W \cdot m^{-2}$)

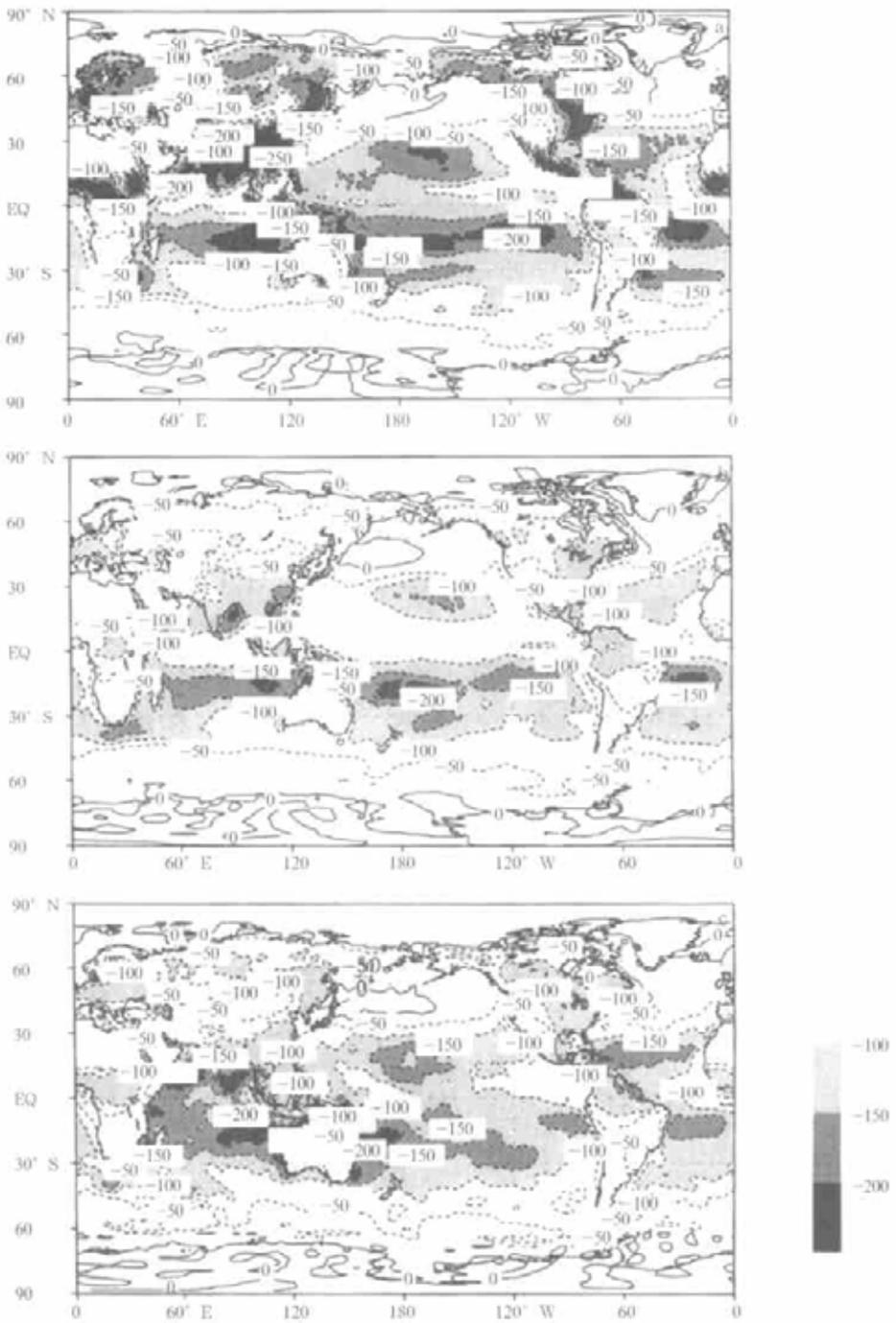


图 4 1997 年 7 月 T63 模式两种辐射方案预报和 NCEP 再分析的月平均潜热通量, (a) 为 NEW (b) 为 OPE (c) 为 NCEP 再分析(等值线的间隔为 $50 W \cdot m^{-2}$)

却,产生了较大的湍流通量,改善了地表的能量和水汽平衡,导致陆面感热通量(SH)和副热带洋面潜热通量(LH)的增加。图3、4分别为1997年7月T63模式两种辐射方案预报和NCEP再分析的月平均感热通量和潜热通量。从图3a、b和图4a、b中可以看到,最大SH在北非、阿拉伯和北美西南部地区,中心值从OPE的 $-90 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 增加到NEW的 $-120 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。热带、副热带洋面及强对流区域的LH也明显增强,最大LH从OPE的 $-150 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 增加到NEW的 $-250 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

与NCEP再分析(图3c、图4c)比较,NCEP再分析的最大SH在北非、阿拉伯和北美西南部的强度和范围都比OPE大,比NEW略小。最大LH在热带、副热带以及强对流区域也在两者之间。相对而言,NEW的结果与NCEP再分析的SH、LH比较接近。

(5) 地表和2 m高度处的温度

对辐射方案变化的另一个较大响应可在垂直扩散引起的加热中发现。陆面SH的增高通过垂直扩散引起行星边界层的加热。NEW中地表和2 m处的温度比OPE明显升高,特别在SH最强的北非、阿拉伯和北美洲西南部地区,2 m高度处的最高等温线的值从OPE的300 K增加到NEW的310 K(图略)。

(6) 对流降水

对辐射方案变化最大的响应之一是NEW方案中对流活动加强,降水明显增加,这也是由于地表辐射能的增加和对流层的冷却所致。从1997年7月T63模式两种辐射方案预报的月降水量分布来看,NEW在热带、副热带地区($10^{\circ}\text{S} \sim 30^{\circ}\text{N}$),特别在非洲中部、印度半岛、中印半岛、中国南部、菲律宾以东的西太平洋暖池以及中美洲地区的降水明显增加,原先在西太平洋暖池分裂的降水带($\geq 300 \text{ mm}$),合并在一起了。欧亚和北美大陆的高纬度地区降水也加强了。

图5为1997年7月T63模式两种辐射方案预报与NCEP再分析降水的差,以及NCEP再分析的月降水量。由图可见,两种辐射方案降水场的误差分布没有出现明显的位相移动,但NEW方案正误差($> 100 \text{ mm}$)比OPE增强,而负误差($< -100 \text{ mm}$)比OPE减弱,表明NEW方案产生了较强的降水。值得注意的是,NEW方案在中印半岛、中国南部沿海和西太平洋暖池地带的负偏差比OPE明显减弱,相对而言,NEW的结果在这一带与NCEP更为接近。

NEW方案对流活动的增加会输送更多的水汽到热带较高层次,使NEW在300 hPa以上相对湿度大于80%的地区更加扩展。增加的相对湿度会产生更多的高层云量,而这些高云和辐射的相互作用,会使模式层更加不稳定。

(7) 平流层温度

新方案最清楚的作用是订正了平流层暖的温度偏差,这主要是因为NEW在平流层减小了OPE高估的短波加热引起的(见图1a)。全球平均温度在10 hPa从243 K下降到227 K,在30 hPa从221 K降至216 K(1998年12月15日7天预报值)。图6为1997年7月T63模式两种辐射方案预报与NCEP再分析的100 hPa月平均温度的差以及NCEP再分析的月平均温度。

由图可见,两种辐射方案预报的月平均温度均比NCEP再分析偏高,表明T63模拟的结果和NCEP再分析在平流层有较大的差异,但NEW方案的改进仍然是明显的,NEW在热

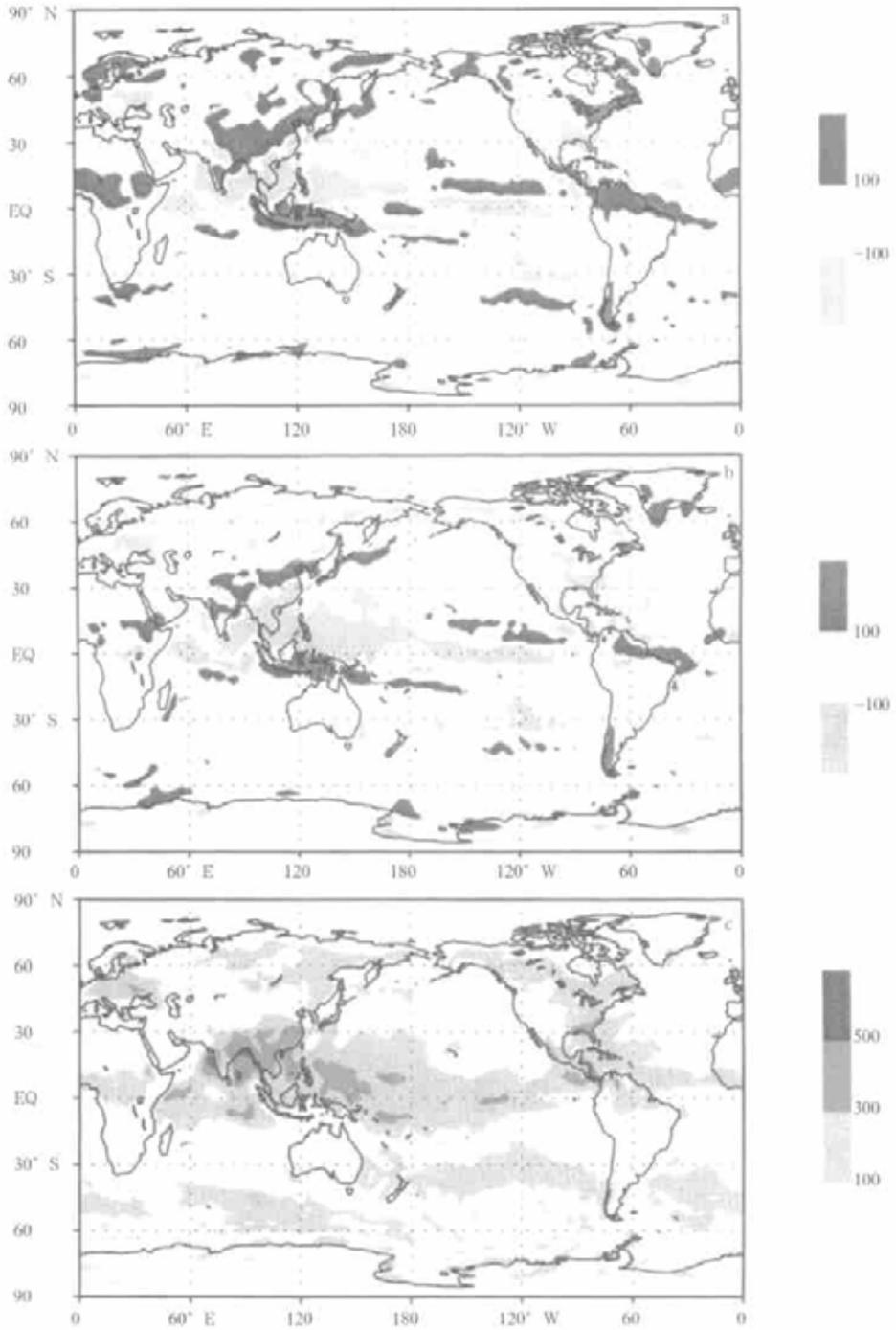


图 5 1997 年 7 月 T63 模式两种辐射方案预报与 NCEP 再分析降水的差以及 NCEP 再分析的月降水量, (a) 为 NEW - NCEP (b) 为 OPE - NCEP (c) 为 NCEP 再分析

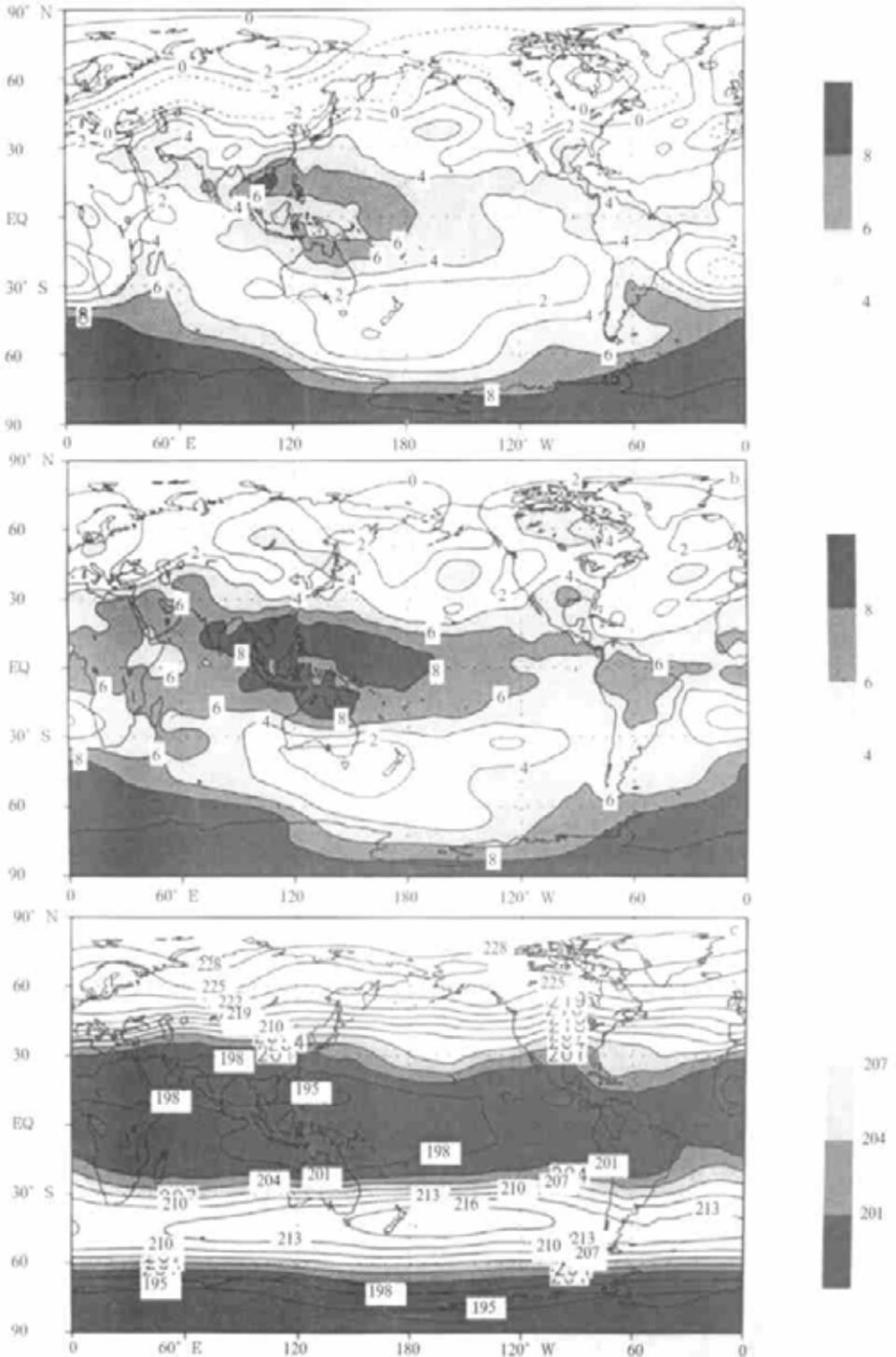


图 6 1997 年 7 月 T63 模式两种辐射方案预报与 NCEP 再分析的 100 hPa 月平均温度的差以及 NCEP 再分析的月平均温度,(a)为 NEW - NCEP (b)为 OPE - NCEP (c)为 NCEP 再分析

带、副热带地区($30^{\circ}\text{S} \sim 30^{\circ}\text{N}$)正偏差($> 4\text{ K}$)的范围和强度比 OPE 显著减弱。原先 OPE 在印度半岛、中印半岛至印度尼西亚东部洋面的大片最大偏暖区($> 8\text{ K}$),在 NEW 中已减弱为范围和强度较小的偏暖区。由此可见,和 NCEP 再分析比较,NEW 部分地、较大地订正了热带、副热带地区平流层暖的温度偏差。

(8) 业务平行试验的统计检验

在 T106 同化、预报系统中作了较长时间的业务平行试验。运行日期为 1998 年 11 月 24 日~1999 年 1 月 12 日。但用于统计检验的日期为 1998 年 12 月 2~21 日,其中还缺少了 12 月 13~15 日资料。值得指出的是在 T106 每日 4 次同化中,也应用了 NEW 方案,因此用作检验的两种辐射方案的初始分析场是不同的。

表 3 为 T106 业务平行试验中两种辐射方案的距平相关系数和均方根误差的统计检验(北半球范围 $20^{\circ} \sim 90^{\circ}\text{N}$, $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$)。由表 3 可知,对流层 250、500、850 hPa 位势高度 4~7 天的距平相关系数分别提高 2%~5%, 1%~2% 和 3%~5%, 而均方根误差分别减小 3~10, 1~3 和 1~2 gpm。另外平流层 100 hPa 温度 4~7 天距平相关系数提高 3%~8%, 均方根误差减小 0.1~0.3 K。

从表 3 还可以看到,两种辐射方案 1~3 天短期预报无显著性差别,由此可见新辐射方案主要对 4~7 天中期预报有较显著的改进。

表 3 两种辐射方案的距平相关系数(上表)和均方根误差统计(下表)

(分析为 1998 年 12 月 2~21 日)

高度 hPa	预 报 天 数 (d)							
	1	2	3	4	5	6	7	
250	NE W	0.961	0.914	0.845	0.770	0.662	0.559	0.495
	OPE	0.961	0.915	0.839	0.747	0.620	0.523	0.446
500	NE W	0.959	0.914	0.842	0.737	0.624	0.515	0.446
	OPE	0.963	0.916	0.841	0.717	0.603	0.510	0.429
850	NE W	0.930	0.857	0.786	0.703	0.589	0.491	0.405
	OPE	0.930	0.849	0.777	0.672	0.544	0.441	0.378
100	NE W	0.966	0.912	0.851	0.804	0.737	0.666	0.623
	OPE	0.967	0.914	0.839	0.774	0.692	0.608	0.544
250	NE W	26.6	47.0	65.4	85.3	107.8	126.3	137.2
	OPE	26.7	47.7	68.3	89.0	118.6	129.6	141.9
500	NE W	20.7	36.2	50.7	65.7	81.7	94.9	104.0
	OPE	20.2	36.6	51.4	67.5	84.3	95.8	104.9
850	NE W	17.6	28.6	37.6	47.2	56.3	64.6	70.7
	OPE	17.2	29.0	38.0	48.7	58.0	65.9	71.5
100	NE W	0.7	1.3	1.7	2.0	2.3	2.6	2.9
	OPE	0.7	1.3	1.7	2.1	2.4	2.9	3.2

3 结 论

本文综述了用 T106 和 T63 模式进行对比试验的结果。试验中只对 T63 作了一个月的积分,个例太少,有待进一步作多例试验,才能充分看出 NEW 方案对气候的影响,但通过对 T106 同化预报系统较长时期(50 天)的业务平行试验,可以看出 NEW 方案时中期

预报有较显著的改进。通过以上对比试验可以看出

(1) NE W 减小了 OPE 高估的短波加热,增加了地表向下的太阳辐射。

(2) 更多的订正了 OPE 大气顶的 OLR。由于辐射和云的相互作用,这种特征在热带地区更加显著。

(3) NE W 增加了地表有效辐射能量和对流层总的冷却,产生了较大的湍流量,对流活动加强了。作为结果,模式变得更加活跃。

(4) NE W 使平流层温度偏暖得以矫正。

总之 NE W 订正了 OPE 中许多系统性误差,在 T106 业务平行试验中 4~7 天中期预报有较显著的改进。

参考文献

- 1 Morcrette J J, Fouquart Y. On systematic errors in parameterized calculation of long wave radiation transfer. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1985, **111**:691~708.
- 2 Scott N A, Chedin A. A fast line-by-line method for atmospheric absorption computations: The Automated Atmospheric Absorption Atlas. *J. Appl. Meteor.*, 1981, **20**:802~812.
- 3 Simmons A J, Burridge D M, Jarraud M, et al. The ECMWF medium-range prediction models: Development of the numerical formulations and the impact of increased resolution. *Meteor. Atmos. Phys.*, 1988, **40**:28~60.
- 4 Tiedtke M, Geleyn J F, Hollingsworth A, et al. ECMWF model: Parameterization of subgrid-scale processes. ECMWF Tech. Rep. 1979, No. **10**.
- 5 Geleyn J F, Hollingsworth A. An economical analytical method for the computation of the interaction between scattering and line absorption of radiation. *Beitr. Phys. Atmos.*, 1979, **52**:1~16.
- 6 Ritter B. The impact of an alternative treatment of infrared radiation on the performance of the ECMWF forecast model. In: G Fiocco, Ed. IRS'84: Current Problems in Atmospheric Radiation, 1984. 277~280.
- 7 Slingo A, Slingo J M. The response of a general circulation model to cloud long wave radiative forcing I: Introduction and initial experiments. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1988, **114**:1027~1062.
- 8 Morcrette J J. Impact of changes to the radiation transfer parameterization plus cloud optical properties in the ECMWF model. *Mon. Wea. Rev.*, 1990, **118**:847~872.
- 9 Morcrette J J. Radiation and cloud radiative properties in the European Center for Medium Range Weather Forecasts forecasting system. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**(D5): 9121~9132.

IMPACT OF CHANGES IN RADIATION PARAMETERIZATION ON MODEL MEDIUM RANGE AND MONTHLY FORECASTING

Shen Yuanfang

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Yi Lan Chen Yi Hu Guoquan

(National Meteorological Center, Beijing 100081)

Abstract

A comparison of two radiation parameterization schemes has been carried out in the

T106 Medium-range NWP model and the National Climate Center's climate model T63. The radiation scheme used for the control integration in the two models at present was the original ECMWF operational radiation scheme (OPE), and the new radiation scheme (NEW) was the version that became operational on May 2, 1989 in ECMWF. Results indicate that OPE overestimates the short-wave water absorptivity, which leads to too large short-wave atmospheric absorption and too small downward short-wave radiation at the surface; OPE also underestimates the long-wave radiative cooling and the outgoing long-wave radiation at the top of atmosphere (OLR). In NEW the radiative energy available at the surface and an overall cooling of the troposphere increase; large turbulent heat fluxes are generated; the convective activity is enhanced; and the precipitation clearly increases. The warm temperature bias in the stratosphere in OPE is corrected. The operational parallel statistical test indicates a more pronounced improvement to the medium-range forecast of 4 - 7 days.

Key words: Short-wave atmospheric absorption Long-wave radiative cooling Outgoing long-wave radiation Turbulent heat fluxes