

中国近海及其邻近海域海气热通量的模式计算

周明煜 钱粉兰

(国家海洋环境预报中心, 北京 100081)

摘要 应用美国宇航局 Goddard 地球观测系统四维资料同化系统计算和分析了近海海域感热通量和潜热通量的季节性变化规律和地理分布特征. 结果表明, 近海各季感热通量冬、秋季较大, 春、夏季较小. 其地理分布特点是冬季感热通量的分布随纬度变化十分明显, 纬度越高感热通量越大, 且等值线分布密集. 在台湾以东、日本以南海域, 感热通量等值线呈西南-东北走向. 在南海海域, 感热通量比周围海域略低, 感热通量等值线在该海域呈一低值倒槽分布; 潜热通量冬、秋季在台湾东北部、日本南部和东南部海域形成最大值区, 等值线呈西南东北走向. 春、夏季在黄海海域存在潜热通量的极小值区, 同时春季在日本南部海域存在潜热通量的极大值区或最大值区. 因为台湾以东、日本以南海域正好是黑潮流经的区域, 所以此海域的热通量与黑潮有密切关系.

关键词 GEOS DAS 系统 中国近海 感热通量 潜热通量

1 引言

一般说来, 通量的观测和计算通常采用直接观测法、梯度法和整体输送法. 直接观测法是根据通量的定义直接测量气象要素的湍流脉动量, 计算其二阶矩而得出; 梯度法需要对气象要素的垂直梯度作准确的测量; 整体输送法是用常规气象资料进行计算. 由于海上观测受到时间和条件等因素的限制, 因此, 用上述 3 种方法计算得到的结果只能获得调查船所走航线有限海域的通量值, 而无法得到大面积海域的通量值. 近年来开始采用模式方法结合遥感观测计算通量, 弥补了上述方法的不足, 此方法能够同时获得大范围海域的通量分布, 此外还可以得到同一海域不同时间的通量分布. 本文的研究目的是用模式方法计算大陆近海热通量的地理分布和季节性变化特征. 本文所指的中国近海及其邻近海域是指中国大陆以东至 160°E 、以南至 10°N .

美国宇航局 Goddard 大气实验室 (GLA) 发展了地球观测系统 (GEOS) 四维资料同化系

本文于1997-03-24收到, 修改稿于1997-11-19收到.

* 国家自然科学基金 (编号: 49736200) 和国家海洋局青年科学基金资助项目 (编号: 96201).

第一作者简介: 周明煜, 男, 64岁, 研究员, 现从事海洋大气边界层、海气相互作用和气溶胶方面的研究.

统 (DAS), 该系统由 3 个子系统 [即分析系统, $2^\circ \times 2.5^\circ$ 纬度和经度大气环流模式 (GCM) 和边界条件] 组成. 该系统提出了一个用于卫星资料反演系统的一级假想场, 被反演的卫星资料和常规资料同时用于一级假想场去进行分析. 在每 6 h 反演周期内, 开始用于 6 h 的预报场, 通过 GLA GCM 产生预报场, 预报场包括地球物理变量如温度、湿度和风速, 包括诊断场, 如云、降水、辐射通量、感热通量和潜热通量等.

2 应用模式计算感热通量和潜热通量的方法

Helfand^[1]等论述了在 GLA GCM 中对行星边界层和湍流的模拟. Goddard 大气实验室 (GLA) 发展的一个新的 20 层方案能较好地解决行星边界层垂直结构和边界层动力学问题. 因为它提高了近地面层的垂直分辨率, 参数化了该区域的动量、热量和水汽通量的次网格尺度. 参数化包括莫宁-奥布霍夫相似性方案, 预告了在“扩展的边界层”内的垂直廓线. 参数化方法确定陆地及海洋的表面粗糙度, 确定粘性附层内标量的梯度以及在该薄层下面的粗糙要素, 并用 2.5 层、二阶距湍流封闭模式预告在行星边界层内的湍流通量. 即由卫星观测资料获得温、湿、风的平均量, 再推算出通量值.

2.1 莫宁-奥布霍夫相似性函数

近地面层 (GCM 模式中的最低诊断层) 在 GLA GCM 的 20 层结构中, 仅是 5 hPa (相当于 45 m) 深的一层, 在 GLA 模式中, 莫宁-奥布霍夫相似性函数已经选取为实际上代表着扩展了的近地面层直至 150 m 深. 对不稳定层结的近地面层 KEYPS 函数可表示为

$$\text{对动量而言} \quad \Phi_m^1 - r\zeta\Phi_m^3 = 1, \quad (1)$$

$$\text{对标量为} \quad \Phi_h^2 - r\zeta\Phi_h^3 = 1, \quad (2)$$

式中, r 是一个经验性的任意常数, 由具体观测资料拟合得出, 本文采用 Panofsky^[2]的结果取 $r=18$; $\zeta=z/L$, L 是奥布霍夫长度; Φ_m 和 Φ_h 分别是动量和热量的层结订正函数, 在稳定层结条件下, 由 Clark^[3]根据 Wangara 资料得到

$$\Phi_h = \frac{1 + 5\zeta_1}{1 + 0.0079\zeta_1(1 + 5\zeta_1)}, \quad \zeta_1 = \min(\zeta, 1), \quad (3)$$

$$\Phi_m = \frac{1 + 5\zeta_1}{1 + 0.0079\zeta_1(1 + 5\zeta_1)}. \quad (4)$$

2.2 确定粗糙度

在海面上粗糙度是表面应力速度 U_s 的函数, 计算 z_0 和 U_s 之间的函数关系是由 Large 和 Pond^[1]适用于中到大风速的公式和 Kondo^[5]适用于小风速的倒数关系

$$z_0 = C/u_s, \quad (5)$$

之间进行内插而得出, 在冰面上 z_0 取一个固定值 0.1 mm.

2.3 粘性附层

在地表面和粗糙要素顶部之间的片流层, 温度和湿度梯度很大, Yaglom 和 Kader^[6]给出标量 S 的无因次量在片流层内的表达式为

$$\frac{\Delta S}{S_s} = 0.55 \left(\frac{U_s z_0}{\nu} \right)^{1/2} (P_r^{2/3} - 0.2), \quad (6)$$

式中, ν 是空气的粘性系数; P_r 是普郎特常数, 在确定热量和水汽的通量廓线关系时式 (6) 可

加到 $\int \frac{\Phi_a}{xz} dz$ 的积分之中，由此确定热量和水汽的通量廓线关系。

2.4 湍流封闭方法

Helfand 等^[1]用2.5层、二阶距湍流封闭方法预告了近地面层的湍流通量，它是基于 Yamada^[7]提出的统计上可靠的2.5层方案。此方案预告了作为诊断变量的湍流动能（TKE）和其他的湍流二阶矩（包括垂直通量）。

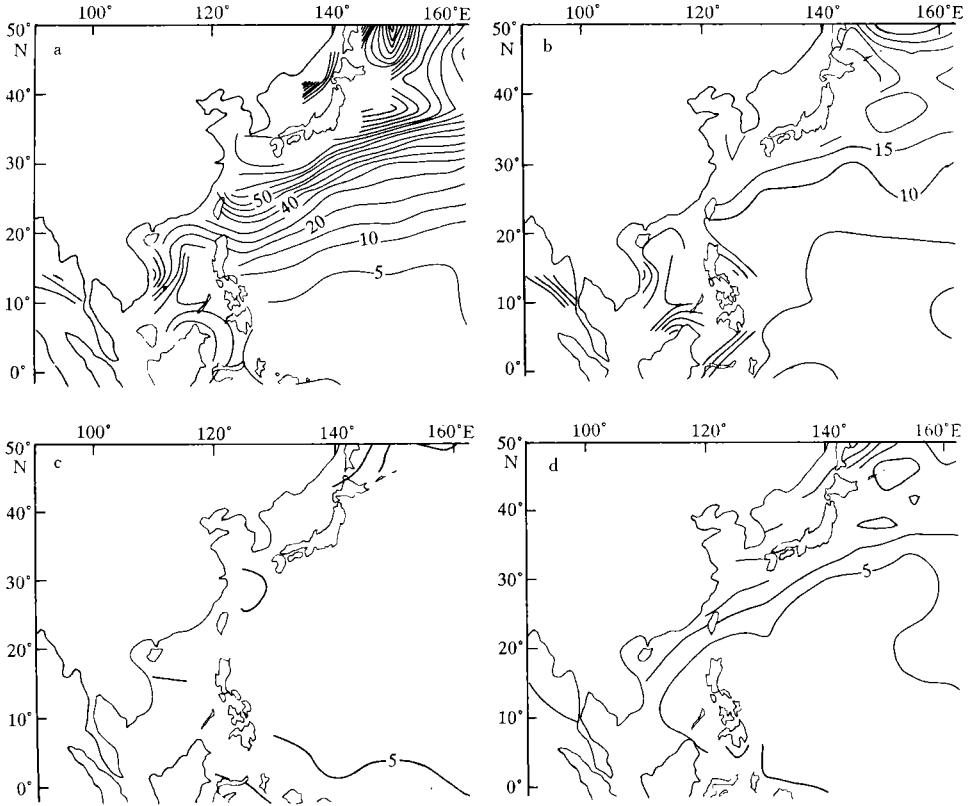


图1 1987年各季感热通量分布 (W/m^2)

a. 1月 b. 4月 c. 7月 d. 10月

Mellor 和 Yamada^[8]给出的分层模式中最完全的是4层模式，该方案包括10个诊断方程（考虑水气脉动则有15个方程），在GCM模式中这是比较繁杂和耗时的，为此考虑对4层模式简化。首先是用边界层近似简化模式，忽略风、温度的水平梯度，忽略湍流通量的辐散，由连续性方程和流体力学假定，忽略垂直风速的垂直梯度，同样也忽略垂直动量通量的辐散。简化后，得出了用于GCM模式中的2.5层、二阶距湍流封闭模式^[9]。

3 结果分析

根据模式结果，我们得到了1986~1989年春、夏、秋、冬各季近海的热通量的地理分布特征（用1、4、7、10月份的平均值分别代表冬、春、夏、秋各季的数值）。

3.1 感热通量的分布特征

由模式结果得到的近海各季感热通量的分布规律是,感热通量冬季最大,为 $50\sim 80\text{ W/m}^2$.夏季几乎为零,冬季感热通量的分布随纬度变化十分明显,纬度越高感热通量越大,且等值线分布密集.在台湾以东、日本以南海域,感热通量等值线呈西南-东北走向,这与黑潮走向有一定关系,黑潮流经区域感热通量较大.在南海海域,感热通量比周围海域略低,感热通量等值线在该海域呈一低值倒槽分布.春、秋两季的感热通量数值比冬季低得多而且随纬度变化较小,春季为 $5\sim 15\text{ W/m}^2$,秋季为 $5\sim 25\text{ W/m}^2$.秋季在台湾以东、日本以南海域,感热通量等值线基本上还是呈西南-东北走向(如图1所示,本文仅给出1987年的分布图,其他年份与1987年相似).

1986~1989年,近海海域春、夏、秋3季的感热通量随年度变化很小,冬季的感热通量变化较其他季节明显.表1列出了黑潮附近海域($26^\circ\sim 32^\circ\text{N}$, $124^\circ\sim 140^\circ\text{E}$)1986~1989年冬季的感热通量值.

表1 1986~1989年冬季黑潮附近海域($26^\circ\sim 32^\circ\text{N}$, $124^\circ\sim 140^\circ\text{E}$)的感热通量(W/m^2)

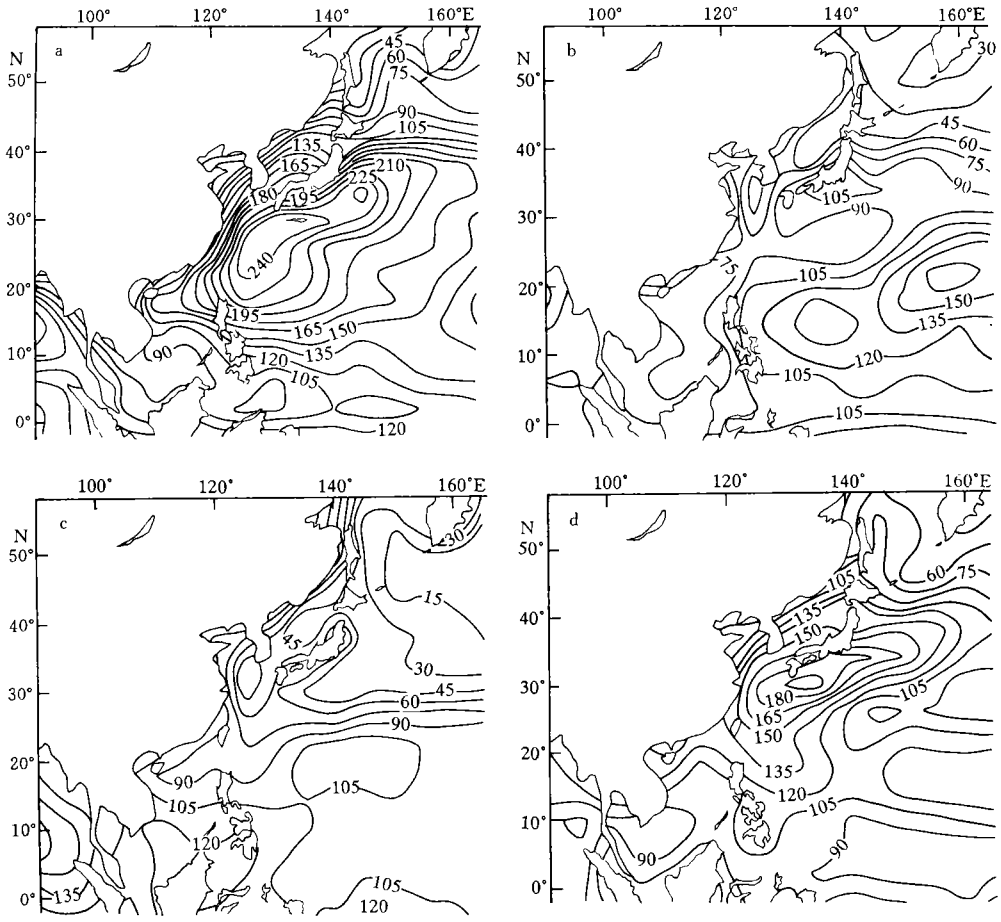
日期	1986年1月	1987年1月	1988年1月	1989年1月
感热通量(W/m^2)	70~80	55~70	50~60	50~60

3.2 潜热通量的分布特征

图2至图5分别代表1986、1987、1988、1989年近海各季潜热通量的分布,由图可看出,潜热通量也是冬季最大,秋季次之,但季节之间的变化幅度远小于感热通量.冬季,潜热通量的梯度较大,等值线呈西南-东北走向,并且在台湾东北部、日本南部和东南部海域形成两个最大值区,最大值分别为 255 W/m^2 和 240 W/m^2 ,差不多是同一海域感热通量最大值的3倍.春季,在日本南部海域和 $10^\circ\sim 20^\circ\text{N}$ 、 160°E 附近海域存在潜热通量的极大值区,极大值为 $105\sim 135\text{ W/m}^2$,在黄海海域存在潜热通量的极小值区,极小值为 $60\sim 75\text{ W/m}^2$.夏季,也在黄海海域存在潜热通量的极小值区,极小值为 $30\sim 45\text{ W/m}^2$,在 $20^\circ\sim 30^\circ\text{N}$ 、 $140^\circ\sim 160^\circ\text{E}$ 海域,等值线呈东西向分布,且随纬度的升高潜热通量减小很快,春、夏季的潜热通量差不多是感热通量的7倍左右.秋季,在东海及日本西南部海域等值线呈西南-东北走向,同时在台湾东北部、日本西南部海域形成一个最大值区,最大值为 210 W/m^2 ,而秋季此海域感热通量最大值仅为 25 W/m^2 .下面再分析一下1986~1989年各季潜热通量随年度的变化.

冬季:各年都在日本南部海域形成潜热通量的最大值区,并在日本西南和东南部海域形成两个极大值中心.1986年,极大值中心的数值分别为 255 W/m^2 和 240 W/m^2 ;1987年,极大值中心的数值分别为 245 W/m^2 和 225 W/m^2 ;1988年的数值为 225 W/m^2 和 210 W/m^2 ;1989年的数值均为 195 W/m^2 .另外,1988年和1989年,在 $10^\circ\sim 20^\circ\text{N}$ 、 $140^\circ\sim 160^\circ\text{E}$ 海域还存在另一个极大值区,极大值为 165 W/m^2 .

春季:在黄海海域存在潜热通量的极小值区,除1988年的极小值为 75 W/m^2 外,其他3年的极小值均为 60 W/m^2 .1986年,在日本南部海域形成的极大值区,其极大值是 105 W/m^2 ,在 20°N 、 160°E 附近海域存在最大值区且等值线比较密集,最大值为 165 W/m^2 ,另外在 15°N 、 136°E 附近海域也有一个极大值区,极大值为 135 W/m^2 ;1987年,在日本南部海域潜热通量

图 2 1986年各季潜热通量分布 (W/m^2)

a. 1月 b. 4月 c. 7月 d. 10月

的分布规律与1986年相似，只是极大值稍大为 $120 \text{ W}/\text{m}^2$ ，在 20°N 、 160°E 附近海域等值线比较稀疏，原来在此海域的潜热通量最大值区已经移向东南远海海域；1988年，往年在日本南部海域存在的潜热通量极大值区已经南移，且数值高于其他年份，演变成近海海域潜热通量的最大值区，最大值为 $150 \text{ W}/\text{m}^2$ ，而在 10°N 、 160°E 附近海域形成一个极大值区，等值线比较稀疏，数值也低于其他年相应的值，为 $135 \text{ W}/\text{m}^2$ ；1989年，上年在日本南部海域存在的潜热通量极大值区又北移到日本南部边缘海域，且数值明显减小，回到了1987年的水平，极大值为 $120 \text{ W}/\text{m}^2$ ，而 10°N 、 160°E 附近海域，最大值区依然存在，最大值为 $135 \text{ W}/\text{m}^2$ ，等值线比1987、1988年密集，与1986年差不多。

夏季：在黄海海域，除1987年的极小值为 $30 \text{ W}/\text{m}^2$ 外，其他3年的极小值均为 $45 \text{ W}/\text{m}^2$ 。在 $20^\circ\sim 30^\circ\text{N}$ 、 $140^\circ\sim 160^\circ\text{E}$ 海域，1986年纬向分布等值线的数值变化是 $45\sim 105 \text{ W}/\text{m}^2$ ，1987年等值线的数值变化为 $45\sim 120 \text{ W}/\text{m}^2$ ，1988年则为 $45\sim 135 \text{ W}/\text{m}^2$ ，1989年为 $90\sim 165 \text{ W}/\text{m}^2$ 。

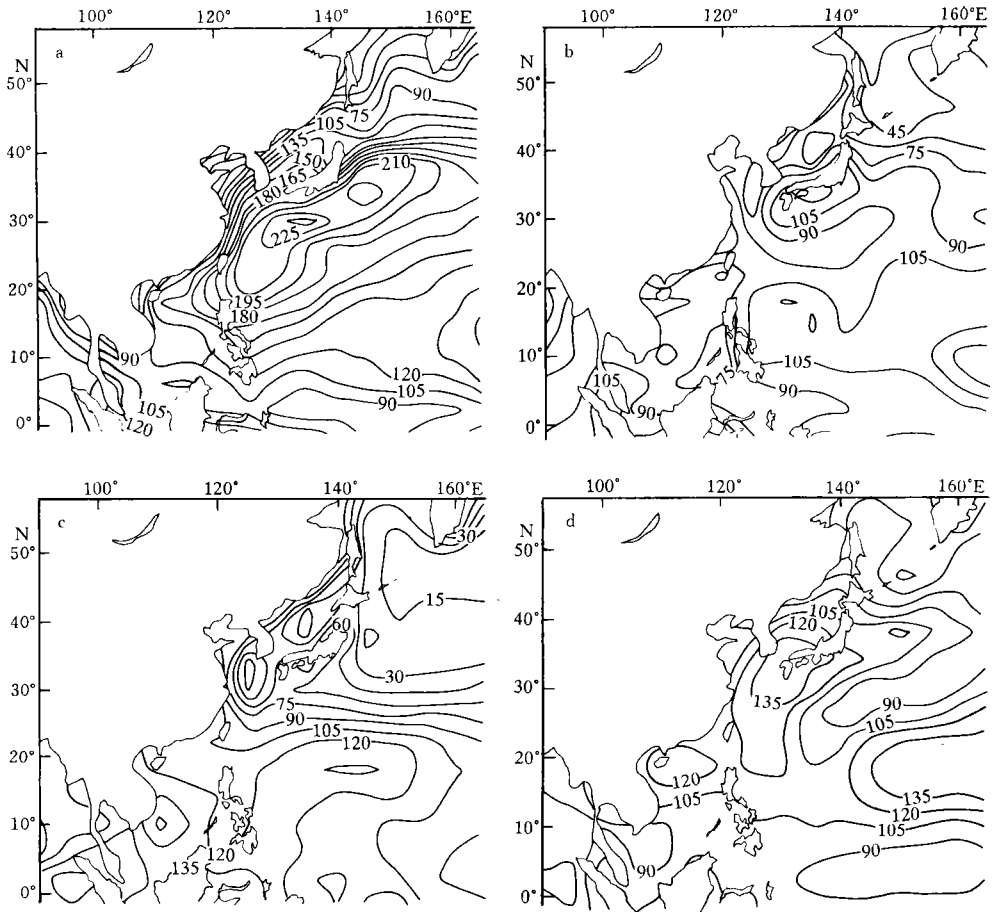


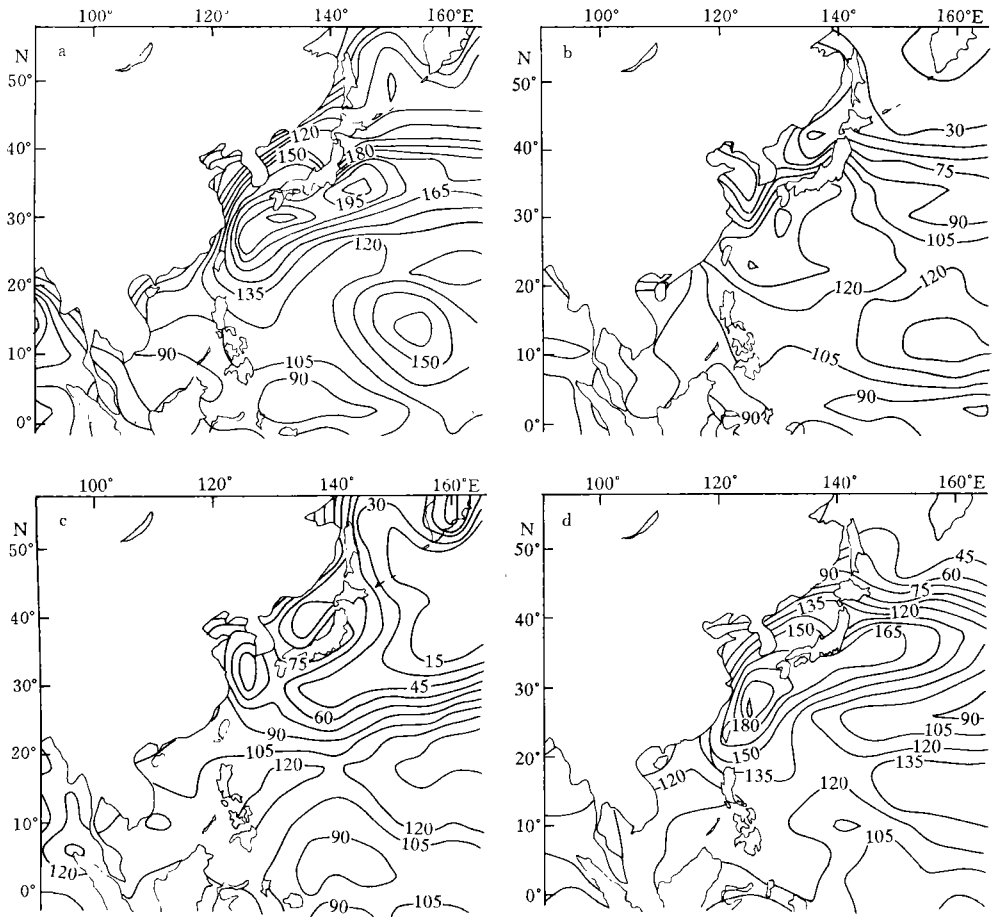
图3 1987年各季潜热通量分布 (W/m^2)

a. 1月 b. 4月 c. 7月 d. 10月

秋季：存在于日本南部海域的潜热通量最大值区，1986年的最大值为 $195 W/m^2$ ，1987年此海域的最大值是明显小于上年，数值仅为 $135 W/m^2$ ，且最大值中心向日本靠近，等值线稀疏，1988年的数值增加为 $210 W/m^2$ ，最大值中心移向日本西南、台湾东北部海域，等值线的密集程度高于1987年，1989年最大值中心仍在日本西南、台湾东北部海域，中心数值有所减小，为 $195 W/m^2$ 。

图1至图5中的数据表明近海的潜热通量远大于感热通量，因此，总的热通量的年际变化规律与潜热通量相同，即冬、秋季在台湾以东、日本以南海域形成热通量的最大值区，春季在日本南部海域存在潜热通量的极大值区。而此海域正是黑潮流经的海域，所以此海域的热通量与黑潮有密切联系。

上述近海潜热通量年际变化可能与1987年发生的事件有一定关系。1987年1月厄尔尼诺事

图4 1988年各季潜热通量分布 (W/m^2)

a. 1月 b. 4月 c. 7月 d. 10月

件暴发，10月份达到盛期，随后逐渐减弱，1988年是调整年度，前面的结果表明厄尔尼诺事件发生以后，近海各季的热通量无论数值还是分布情况均有不同程度的改变，春季尤为明显。

3.3 与其他计算结果的比较

Zhou^[10]利用黑潮调查8个航次的常规气象资料采用整体输送法计算得到的黑潮海域感热通量和潜热通量如表2所示。表2的结果表明，黑潮海域的感热和潜热通量各季的变化规律是秋冬季较大，春夏季较小，并且潜热通量远大于感热通量，这与模式的结果是一致的。但是，由模式得到的热通量值比根据实测资料计算的热通量值小，这可能与以下原因有关：模式得到的热通量是一个月的平均值，而由实测资料计算的热通量是根据调查船在调查期间所走航线有限海域的结果进行平均得来的，两者在时间和海域范围上都不一致，因而可能导致计算结果的不相同，但是可以看出两者的量级是一致的。白德宝等^[11]利用美国气候中心提供

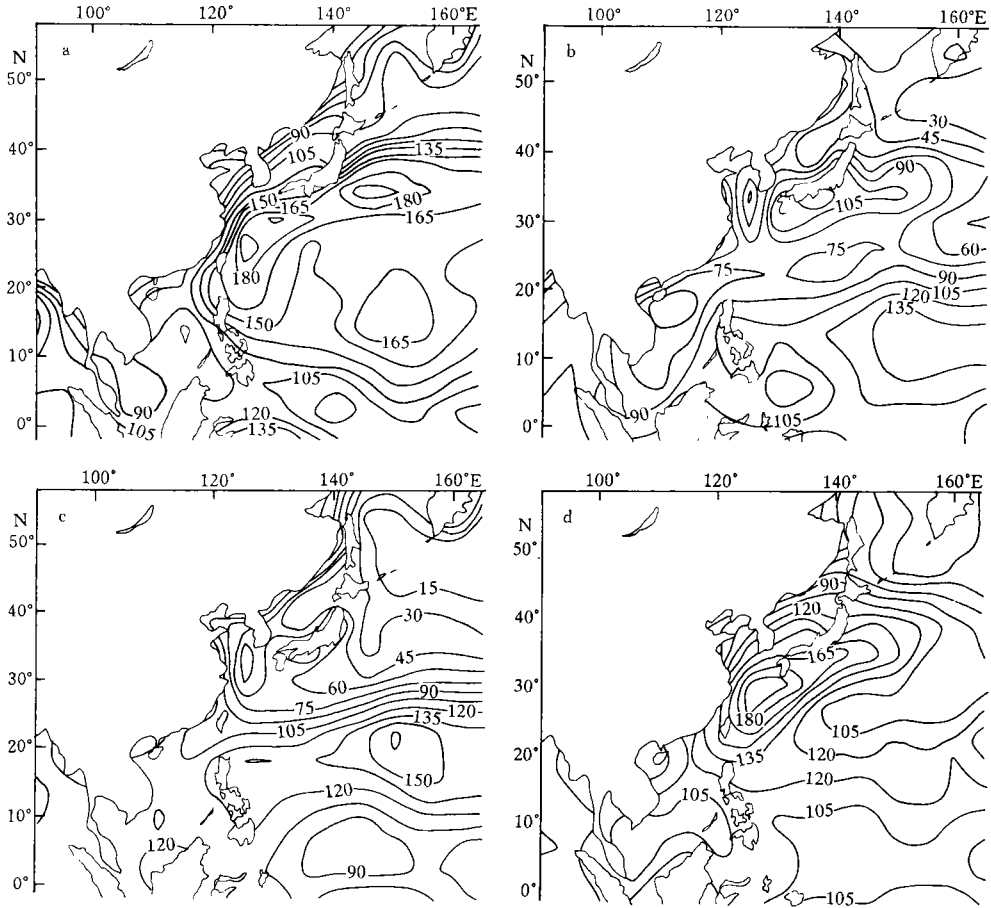


图 5 1989年各季潜热通量分布 (W/m^2)

a. 1月 b. 4月 c. 7月 d. 10月

的 COADS 资料 (1854~1979年) 和国家海洋环境预报中心提供的水文气象资料 (1980~1987年) 计算得出了西太平洋的平均热通量分布, 表 2 中数据为中国近海的热通量结果, 可看出本文的结果与白德宝等^[11]的结果很相近.

4 结论

由模式计算的近海各季热通量结果表明, 热通量冬、秋季较大, 春、夏季较小. 其地理分布特点是: 冬季感热通量的分布随纬度变化十分明显, 纬度越高感热通量越大, 且等值线分布密集. 在台湾以东、日本以南海域, 感热通量等值线呈西南-东北走向. 在南海海域, 感热通量比周围海域略低, 感热通量等值线在该海域呈一低值倒槽分布; 潜热通量冬、秋季在台湾东北部、日本东南部海域形成最大值区, 等值线呈西南-东北走向. 春、夏季在黄海海域存在潜热通量的最小值区, 此外, 春季在日本南部海域也存在潜热通量的极大值区. 因为台

表 2 本文结果与其他计算结果的比较

季节	感热通量 (W/m^2)			潜热通量 (W/m^2)		
	本文	Zhou ^[10]	白德宝等 ^[11]	本文	Zhou ^[10]	白德宝等 ^[11]
春	5~15	13~66	0	30~150	115~196	50~200
夏	0	-5~4	0	15~165	87~120	25~175
秋	5~25	54~64	13~25	45~210	263~284	100~200
冬	50~80	77~163	13~125	45~255	197~343	150~300

湾以东、日本以南海域正好是黑潮流经的区域, 所以此海域的热通量与黑潮有密切关系。

参考文献

- 1 Helfand H M, Labraga J C. Design of a nonsingular level 2.5 second-order closure model for the prediction of atmospheric turbulence. *J. of the Atmos Sciences*, 1988, **45**, 113~132
- 2 Panofsky H A. Tower micrometeorology. In: Workshop on Micrometeorology (D A Haugen ed.), Amer. Meteor. Soc., Boston, 1973, 392 pp
- 3 Clark R H. Observational studies in the atmospheric boundary layer. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1970, **96**, 91~114
- 4 Large W G, Pond S. Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds. *J. Phys. Oceanogr.*, 1981, **11**, 324~336
- 5 Kondo J. Air-sea bulk transfer coefficients in diabatic conditions. *Bound. Lay. Meteor.*, 1975, **9**, 91~112
- 6 Yaglom A M, Kader B A. Heat and mass transfer between a rough wall and turbulent fluid flow at high Reynolds and Peclet numbers. *J. Fluid Mech.*, 1974, **62**, 601~623
- 7 Yamada T. A numerical experiment on pollutant dispersion in a horizontally-homogeneous atmospheric boundary layer. *Atmos. Environ.*, 1977, **11**, 1 015~1 024
- 8 Mellor G, Yamada T. A heirarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. *J. Atmos Sci.*, 1974, **31**, 1 791~1 806
- 9 李诗明等. 50°S 以南海域的感热潜热通量的模式计算. *地球物理学报*, 1997, (1)
- 10 Zhou Mingyu, Lu Naiping. The air-sea transfer of heat and momentum in the western Pacific. In: Proceedings of the Second International Conference on East Asia and Western Pacific Meteorology and Climate (W J Kyle and C P Chang eds), World Scientific. Sept., 1992, Hong Kong, 398~407
- 11 白德宝等. 太平洋海面热平衡图集. 北京: 海洋出版社, 1990, 141~182

Model calculation of air-sea heat fluxes over ocean area near China

Zhou Mingyu,¹ Qian Fenlan¹

1. National Marine Environment Forecasting Center, State Oceanic Administration, Beijing 100081

Abstract—The sensible and latent heat fluxes over the ocean area near China were calculated and analyzed by using the Goddard Earth Observing System (GEOS)-Four-Dimensional Data Assimilation System (DAS). The calculated results showed that the sensible heat flux had its large value in winter and autumn, small value in

spring and summer over the ocean area near China. In winter, the sensible heat flux increased distinctly with latitude, and its isolines were very crowded. Over the ocean area east of Taiwan and south of Japan, the direction of isoline was from southwest to northeast. In the South China Sea, the sensible heat flux was lower than that of surrounding ocean areas, and its isoline was distributed into a type of an inverted trough. In autumn and winter, the maximum center of latent heat flux appeared over the ocean area northeast of Taiwan and south and southeast of Japan, meanwhile, the isoline was in the direction of southwest to northeast. In spring and summer, the latent heat flux had minimum value in the Huanghai Sea. At the same time, the maximum value center of latent heat flux appeared over the ocean area south of Japan in spring.

Key words GEOS DAS system, the ocean area near China, sensible heat flux, latent heat flux