

热带西太平洋海—气热量通量研究

II. 热带气旋状况下海—气热量交换的特征

吴迪生*

(国家海洋局广州海洋预报台, 广州 510300)

摘 要 本文根据 TOGA 研究计划第 1, 2, 3, 8 个航次考察结果, 计算了热带西太平洋海—气热量交换值。研究结果表明: 在热带气旋环流内海—气界面热量交换非常强烈, 在双台风环流内 Q_k 出现负值, 在台风环流内 Q_e 也出现减弱现象。1986/1987 年 El Niño 事件发生后, 热带中太平洋水温异常增暖, 热带西太平洋西部洋域表层水也在增暖, 但是, 热带西太平洋洋域海—气界面间热量交换反而减弱。西风爆发首先出现在中太平洋热带洋域, 然后逐渐往西扩展。

关键词 西太平洋 热带气旋 热量交换

1 引言

海洋的巨大热惯性, 对形成地球上的天气过程和维持全球气候及其变化起着重要作用, 海水温度的变化可造成全球性气候异常。对海—气界面热量交换的研究, 不少作者已经进行了大量的工作^[1~18]。但因早期对太平洋的实测资料较少, 因而计算结果有一定的局限性。特别是在热带气旋状况下海—气热量交换的研究更少。本文采用 TOGA 研究计划第 1, 2, 3, 8 个航次连续实测的水文气象资料 (图 1), 分析了热带西太平洋热带气旋状况下海—气热量交换的特征, 同时还分析了 El Niño 事件发生前后热带太平洋海面风场及暖池结构的变化特征。

迄今人们已采用了多种方法估算海—气的热量交换, 但均不甚令人满意, 以下所引用的计算公式虽然有不足之处, 但本文认为它仍是目前较为实用的计算模式。本文研究海域的海—气热量交换按下列各式计算:

$$Q_L = Q_s - (Q_e + Q_v + Q_k), \quad (1)$$

式中, Q_L : 总热量交换量^[22], Q_s : 太阳总辐射^[22], Q_e : 海面有效回辐射^[20], Q_v : 潜热通量^[22], Q_k 显热通量^[22]。通常以 Q_e , Q_v , Q_k 表示海洋对大气的加热或冷却, 反映了海—气界面间的热交换, 因此本文主要对这三项进行讨论。

$$Q_e = S\sigma Q_w^4 (0.39 - 0.058\sqrt{e_a})(1 - kC^2) + 4S\sigma Q_w^3 (T_w - T_a), \quad (2)$$

$$Q_v = \rho_a C_e L(q_w - q_a)|\vec{V}|, \quad (3)$$

$$Q_k = \rho_a C_e c_p (T_w - T_a)|\vec{V}|, \quad (4)$$

1994-03-27 收到, 1995-10-29 收再改稿

* 大气(边界层物理和大气化学)国家重点实验室客座研究人员

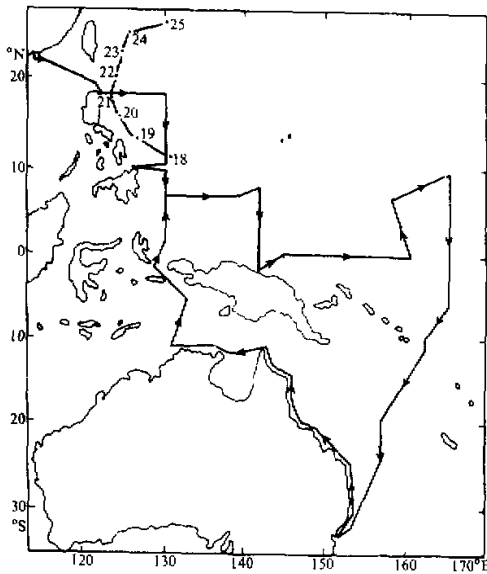


图1 TOGA 研究计划第2航次路线
及8626号台风移动路径

所注数值为日期, 该天08时(北京时间)的气压、
风速分别为: 18 (1006, 10), 19 (995, 20),
20 (975, 30), 21 (940, 45) 22 (960, 35),
23 (980, 30), 24 (998, 20), 25 (1004, 10)

式中 S 为海面长波辐射与完全黑体辐射之比(本文取0.95)^[20]; σ 为Stefan-Boltzmann常数; Q_w 为表层海水的绝对温度; e_a 为空气的水汽压(hPa); k 为云遮系数(取 $k=0.50$)^[20]; C 为总云量(按10成来分); T_w 和 T_a 分别为海面水温 and 气温($^{\circ}\text{C}$); ρ_a 为空气密度(取 1.17 kg m^{-3}); L 为水汽潜热, 本文取 $4.1868(597-0.6T_w)\text{ J g}^{-1}$ ^[20]; C_e 为水汽交换系数, C_e 的取值是一个十分重要而又比较复杂的问题。由于测量仪器和方法不统一, 测量误差较大, 至今仍未得到一个公认的量值, 本文采用Bunker的计算结果^[19]。 q_w 为海面在表层水温下的饱和比湿; q_a 为空气的比湿; $|\vec{v}|$ 为全风速(m s^{-1}); $c_p = 1006.08804\text{ J kg}^{-1}\text{ K}^{-1}$; (2)~(4)式计算结果的单位原为 $\text{J m}^{-2}\text{ s}^{-1}$; 现将各热量的单位统一表示为 W m^{-2} , 日总量的单位均转化为 $\text{MJ m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ 。

2 海-气热量交换特征

2.1 海-气热量交换逐时变化特征

考察期间所获热带气旋过程中逐时水文气象资料用上述方法计算出海-气界面间潜热 Q_e , 显热通量 Q_k , 海面有效回辐射 Q_r , 并将部分计算结果绘成图2, 表明: 1986年11月17日06时(世界时, 以下同)至1986年12月27日03时, 考察船经历了二次台风系统过程。第一次是11月18日12时至11月22日12时, 显著特点是 Q_e , Q_k 值突然跃升, 尤其是 Q_e 跃升最为显著, 由18日12时的 76.28 W m^{-2} 上升至20日06时的 552.23 W m^{-2} , 这是因考察船位于台风右前象限的8级大风范围内, 20日06时, 1986年26号台风中心位于 16.0°N , 124.4°E , 中心气压965 hPa, 近中心风速 35 m s^{-1} , 考察船的位置是($126^{\circ}26'\text{E}$, $18^{\circ}22'\text{N}$), 考察船离台风中心约300 km左右, 风速由 7.0 m s^{-1} 增至 19.8 m s^{-1} , 水温由 26.3°C 增至 28.4°C , 气温由 26.2°C 增至 26.5°C , 相对湿度由90%下降至88%, 风速明显加大, 水温比气温高 2.1°C , 波高达4.6 m, 造成空气层结不稳定和强烈的垂直运动, 将低层的热量和水汽向上输送, 促进了海-气界

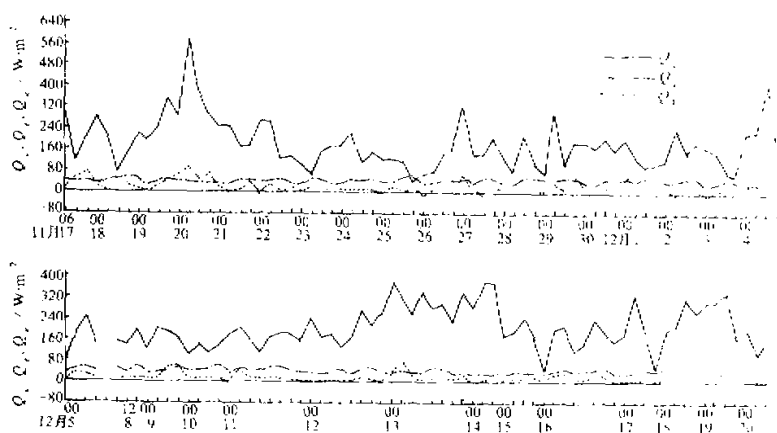


图2 海-气界面热量平衡逐时变化曲线

面的蒸发和热量交换。22日12时以后, Q_e , Q_k 值逐渐减小, 23日06时 Q_e 值仅有 74.89 W m^{-2} , 因为考察船已远离台风中心约 900 km 左右, 仅受偏东气流影响, 风速为 2.1 m s^{-1} , 相对湿度为 93%, 水温 28.3°C , 气温 27.8°C , 水温比气温仅高 0.5°C , 波高 1.5 m。所以, 当气温较高, 水温与气温之差值较小, 相对湿度较大, 风速较弱时, 海-气界面的蒸气和热量交换反而减弱。第二次热带气旋过程是 12 月 12 日 12 时至 16 日 00 时, 考察船位于 $(165^\circ\text{E}, 2^\circ\text{S})$ 的双子台风之间, Q_e 值也有明显的增加, 但 Q_k 值变化不明显, 有时还出现负值, 如 12 月 14 日 06 时, 现场气压为 1002.5 hPa, 风速 12 m s^{-1} , 水温 29.2°C , 气温 29.4°C , 相对湿度 77%, 波高 3 m, 气温比水温高 0.2°C , Q_k 值为 -4.17 W m^{-2} , Q_e 值为 312.2 W m^{-2} 。第二个航次 Q_e 的平均值为 41.64 W m^{-2} , 在台风系统内 Q_e 的平均值为 37.04 W m^{-2} (本文计算台风系统内的结果是风力 6~8 级之间的范围, 不是台风中心的结果), 在双子台风系统内 Q_e 的平均值为 33.32 W m^{-2} , 出现在台风系统内 Q_e 值反而减小的现象, 可能在台风系统内由于云量增加、气温升高引起 Q_e 值的减小, Q_e 值与风速的大小无关。分析表明: (1) 在双子台风系统内及在赤道附近 Q_e , Q_k 值的逐时变化趋势不一致, 出现这种情况的原因可能是在赤道附近气温高于水温, 海水大量吸热, Q_k 出现负值。但是, 当水温高于气温, 水-气温差值较大及在台风系统内 Q_e , Q_k 值的逐时变化趋势极为一致, 这种趋势与南海中部所得的结果相类似^[28]; (2) 在台风系统内 Q_e 值有减小的趋势, 因为海面有效回辐射与温度和云量有关, 与风速的大小无关; (3) Q_e 值比 Q_k , Q_g 值大, 这说明海-气间的热量交换主要是潜热, 同时三种热交换量值的和均为正值, 表明该时段内本海区为热源, 即海洋把热量传给大气, 并主要以潜热的方式把热量传输给大气; (4) 海-气间的热交换量比南海中部及中太平洋热带洋域所得的结果大^[23, 28], 可能是因为考察的时间、海区和天气系统不同, 而且该时段内有二次台风系统过程, 风力较大, 因而海洋给大气的热量较多, 大气传给海洋的动量也较大。

2.2 海-气热量交换日总量及逐日变化特征的比较

把每天 8 次定时观测的海面有效辐射求其平均, 代表海面有效辐射的日总量, 同理可得潜热和显热, 把所计算结果绘成图 3a, 表明, 在台风系统中 Q_v , Q_k 值有一个显著的突变, 11 月 18 日调查海区还远离台风中心约 1300 km 左右, 平均风速 11.2 m s^{-1} , 水温 26.3°C , 气温 25.0°C , Q_v , Q_k 值分别为 $15.0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $1.12 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 。11 月 20 日考察船已离台风中心的距离约 300 km 左右, 平均风速 15.6 m s^{-1} , 水温 28.1°C , 气温 26.3°C , Q_v , Q_k 值分别为 $32.2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $5.70 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, Q_v 与 Q_k 的变化趋势极为一致。11 月 25 日考察船已完全离开台风系统, 位于 $(130^\circ\text{E}, 7^\circ\text{N})$ 附近, 平均风速 4.2 m s^{-1} , 水温 28.8°C , 气温 28.0°C , Q_v 出现极小值, 为 $8.64 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, Q_k 也出现较小值, 为 $0.56 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 。12 月 14 日考察船位于双子台风系统中 $(164^\circ\text{E}, 5^\circ\text{S})$, 平均风速 12.5 m s^{-1} , 水温 29.2°C , 气温 28.8°C , Q_v 出现较大值 $27.60 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 但 Q_k 则出现较小值 $0.71 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 表明在赤道双子台风系统内 Q_v 与 Q_k 的变化趋势不一致, 这是因为气温高于水温, 海水大量吸热的原因。比较图 3a, b 可以发现, 在赤道上水温虽然较高, 但海-气界面热量交换反而减弱, 这一重要现象说明海洋对大气加热场的变化与海表面温度的变化并不一致, 看来海洋对大气加热场发生变化不仅是海表面温度的变化, 可能还有其他因子起着更为重要的作用。分析表明: (1) Q_v , Q_k 的交换量值与风速、水气温差及云量 (尤其是 Cb, Cu 云量) 呈正相变化, Q_v 的通量值与相对湿度呈反相变化, Q_e 的通量值与云量呈反相变化。(2) 热带西太平洋对大气的加热场中, 主要的贡献来自 Q_v 和 Q_e 这两个大项, 这两项的变化基本决定了西太平洋热带海域对大气加热场的变化特征。但在台风环流内 Q_k 的量值比 Q_e 还要大。因此, 可以说西太平洋热带海域对大气提供加热及其变化不仅取决于海-气温差的大小, 而且受海面上风场强度、海洋上空云的情况及空气中水汽含量等这些来自大气环流因子的影响比海-气温差变化的影响更为重要, 前者的变化对加热场的变化似乎起支配作用。

3 通量与大型海-气环流的关系

在表 1 中可以看到: 1986/1987 年 El Niño 事件发生前, 热带西太平洋洋域海-气界面之间的热量交换明显增强, 这是因为第 1 航次期间, 赤道以北西太平洋热带海域上东北信风较强, 洋面风速较大, 同时受东亚大陆干冷冬季风不断南下的影响, 海-气界面间的温度、湿度梯度较大, 故由 (2) ~ (4) 式计算得到较大的感热、潜热、海面有效回辐射通量。第 2, 3 航次是 El Niño 事件发生后的实测结果, 第 8 航次是 1990 年一次弱的 El Niño 事件发生后的实测结果, 表明: 热带西太平洋洋域虽然表层水温是在增暖, 但海-气界面间的热量交换反而减弱, 在热带西太平洋 SST 强增暖区的洋面上, 是感热、潜热通量的低值区, 海洋中的大量热量并没有被释放到大气中去。为什么在 El Niño 年增暖强烈的热带西太平洋海-气界面间的热量交换反而减弱呢? 从目前的实测结果分析后认为: El Niño 事件发生时, 热带西太平洋的平均风速比常年减弱, 东北信风逐渐减弱、消失, 出现西风, 海-气温差变小, 造成海-气界面热量交换减弱。这一问题还有待作更多的现场实测。

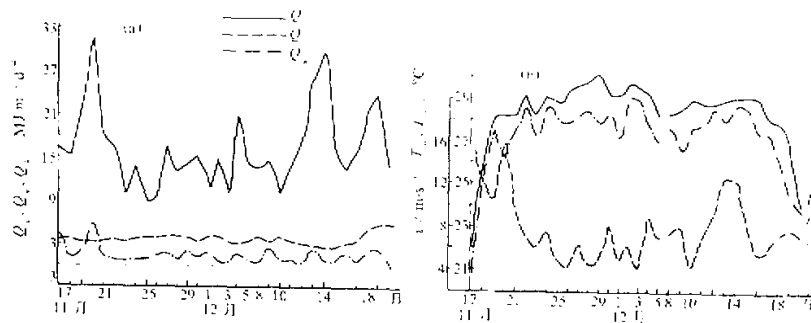


图3 (a) 海-气界面热量交换日总量逐日变化; (b) 水温、气温、风速日平均值

表1 各种通量、各种要素, 各个航次的平均值

	$\bar{Q}_e / [\text{W m}^{-2}]$	$\bar{Q}_s / [\text{W m}^{-2}]$	$\bar{Q}_{\Sigma} / [\text{W m}^{-2}]$	$\bar{V} / [\text{m s}^{-1}]$	$\bar{T}_a / ^{\circ}\text{C}$	$\bar{T}_s / ^{\circ}\text{C}$
第1航次	47.52	256.44	22.81	8.8	27.1	25.9
第2航次	41.64	188.47	16.76	8.0	28.5	27.4
第3航次	44.36	160.64	8.33	6.5	29.1	28.3
第8航次	46.34	143.09	11.95	4.7	29.5	28.2
4个航次平均值	45.14	191.43	15.08	7.1	28.4	27.4

从3个航次考察航线上的实测风表明(图4),第1航次热带西、中太平洋的信风均比其多年平均状况为强,位于 170°W , $20^{\circ}\text{N} \sim 5^{\circ}\text{S}$ 洋域均为强信风,最大风速为 $9 \sim 11 \text{ m s}^{-1}$; 由于信风较强,水气温差较大,造成空气层结不稳定和强烈的垂直运动,在表1中清楚地表明,热带西太平洋海-气界面热量交换非常强烈。第2航次热带西太平洋西部洋域仍然是较强的信风。但是,在中太平洋 165°E 附近的热带洋域则出现强劲的西风,随着西风的爆发,西太平洋的暖水逐渐东移,导致热带太平洋的热力和动力状况异常变化^[31~33]。第3航次(图4c)表明,在 165°E 附近的热带洋域西风已减弱,但在 141°E 附近的热带西太平洋西风却很强,西风的爆发导致暖池水向东扩展,并使东部的热带太平洋上层水增暖,起着不可缺少的动力作用。三个航次的实测海面风场表明:似乎是热带太平洋西风的爆发,导致1986/1987年El Niño事件的发生,是至关重要的,由于热带西太平洋信风的加强至减弱、消失并出现西风爆发是一个渐变过程,所以,El Niño事件发生时,热带西太平洋的平均风速是减弱的。

4 结束语

- (1) 台风环流内海-气界面间的热量交换非常强烈,显热通量的变化与潜热通量变化趋势比较一致。
- (2) 在台风环流内,海面有效回辐射减弱,在双子台风内显热通量也是在减弱。
- (3) El Niño事件发生后,热带西太平洋的平均风速减小,海-气界面间的热量

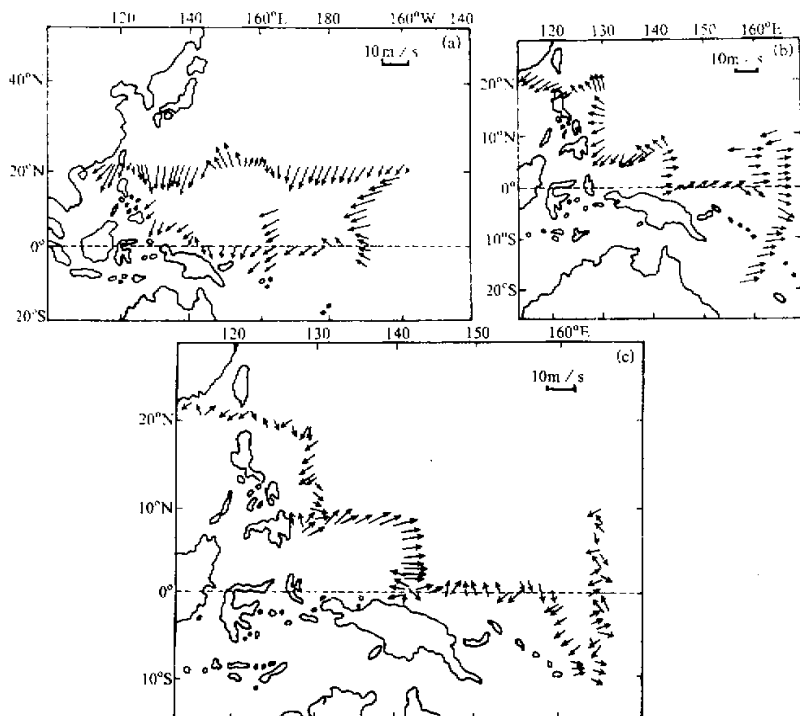


图4 TOGA 研究计划第1, 2, 3航次的实测海面风
箭头指风去向 (a) 第1航次 (1985-12-12~1986-02-08),
(b) 第2航次 (1986-11-17~1986-12-20), (c) 第3航次 (1987-09-20~1987-10-19)

交换减弱。

(4) 1986/1987年 El Niño 事件发生后, 热带中太平洋的表层水温异常增暖, 西太平洋西部热带洋域的表层水也在增暖。

(5) 热带西太平洋海-气界面热量交换的变化与海表温度的变化并不一致。

参 考 文 献

- 1 TOGA COARE International Project Office University Corporation for Atmospheric Research, 1993, Tropical Ocean-Global Atmosphere Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment Intensive Observing Period Operations Summary, 1.1.2~6.15.2, Boulder.
- 2 Hou Wenfeng, 1993, *Air-Sea Interaction in the Tropical Western Pacific Ocean Oceanographic Atlas*. Beijing: China Ocean Press, 1~323.
- 3 Budyko, M.I., 1974, *Climate and Life*, Academic Press, 57~62.
- 4 Wyrtki, K., 1965, The average annual heat balance of the North Pacific Ocean and its relation to ocean circulation, *J. Geophys. Res.*, **70**, 4547~4559.
- 5 Bunker, A.F. and L.V. Worthington, 1976, Energy exchange charts of the North Atlantic Ocean, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **57**, 670~678.

- 6 Hastenrath, S. and P. Lamb, 1978, Heat budget atlas of the tropical Atlantic and eastern Pacific Ocean, Univ. of Wisconsin Press, vii~viii.
- 7 Hastenrath, S. and P. Lamb, 1979, Climatic atlas of the Indian Ocean, Part I: Surface circulation and climate Part II. The oceanic heat budget, Univ. of Wisconsin Press, vii~viii.
- 8 Hastenrath, S., 1980, Heat budget of tropical ocean and atmosphere, *J. Phys. Oceanogr.*, **10**, 159~170.
- 9 Weare, B. C., P. T. Strub and M. D. Samuel, 1981, Annual mean surface heat fluxes in the tropical Pacific Ocean, *J. Phys. Oceanogr.*, **11**, 705~717.
- 10 Esbensen, S. K. and V. Kushnir, 1981, The heat budget of the global ocean, an atlas based on estimates from surface marine observations, *Climatic Research Institute*, Rep. No. 29, 45.
- 11 Liu, W. T., K. B. Katsaros and J. A. Businger, 1979, Bulk parameterization of heat and water vapor including molecular constraints at the interface, *J. Atmos. Sci.*, **36**, 1722~1735.
- 12 Reed, R. K., 1976, On estimation of net longwave radiation from the oceans, *J. Geophys. Res.*, **82**, 4915~4920.
- 13 Talley, L. D., 1984, Meridional heat transport in the Pacific Ocean, *J. Phys. Oceanogr.*, **14**, 231~241.
- 14 Slutz, R. J., S. D., Woodruff, R. L., Jenne, D. H., Joseph, P. M., Storer, J. D., Elms, S. J., Lubker, J. D., Hiscov, J. D., 1984, Comprehensive ocean-atmosphere data set, Release 1. NOAA/ERL 325 Broadway, Boulder, CO 80303, 1~22.
- 15 Levitus, Sydeny, 1986, A comparison of the annual cycle of two sea surface temperature climatologies of the world ocean, *J. Phys. Oceanogr.*, **17**, 197~214.
- 16 Fu Congbin, H. Diaz and J. Fletcher, 1986, Characteristics of the response of sea surface temperature in the central Pacific associated with warm episodes of the southern oscillation, *Mon. Wea. Rev.*, **114**, 1716~1738.
- 17 Oort, A. H. and T. H. Vonder Haar, 1976, On the observed annual cycle in the ocean-atmosphere heat balance over the Northern Hemisphere, *J. Phys. Oceanogr.*, **6**, 781~800.
- 18 Ramanadham, R., S. V. S. Somanadham and R. R. Rao, 1981, Heat budget of the north Indian Oceanic surface during monsoon dynamics, Cambridge University Press, 491~508.
- 19 Bunker, A. F., 1976, Computations of surface energy flux and annual air sea interaction cycles of the North Atlantic Ocean, *Mon. Wea. Rev.*, **104**, 112~1140.
- 20 布德科, M. N., 1960, 地表热量平衡, 北京: 科学出版社, 29~48.
- 21 H.范隆编, 许启望等译, 郭家梁等校, 1990, 大洋气候, 北京: 海洋出版社, 275~286, 386~387.
- 22 国家海洋局, 1981, 《向阳红 09》海洋调查船中太平洋西部调查报告, 北京: 海洋出版社, 12~39.
- 23 于惠苓等, 1992, 1986/1987 厄尔尼诺期间的西风强化和海气相互作用过程分析, 大气科学, **16**(4), 427~435.
- 24 隋书箴等, 1987, 热带西太平洋温度场对厄尔尼诺事件的响应, 海洋学报, **9**(2), 262~266.
- 25 朱亚芬等, 1990, 1983 年厄尔尼诺期间海气热交换分析, 海洋学报, **12**(2), 167~178.
- 26 杨大升等, 1992, 1983 El Niño 盛期洋面的热量平衡, 海洋学报, **14**(2), 35~46.
- 27 邵庆秋等, 1991, 洋面动量、感热和潜热通量计算的研究, 大气科学, **15**(3), 9~17.
- 28 张庆荣, 1980, 南海中部海洋和大气相互作用的某些特征, 中国海洋湖沼学会水文气象学会学术会议(1980)论文集, 北京: 科学出版社, 1~8.
- 29 陈特固, 1982, 西沙群岛附近海域海-气界面热量交换, 南海海洋科学集刊, 第 3 集, 北京: 科学出版社, 91~96.
- 30 全小伟等, 1991, 海洋对大气加热场的区域性年变化特征, 大气科学, **15**(6), 26~35.
- 31 王宗山等, 1991, 1990 年热带海洋状况的诊断, 海洋学报, **13**(5), 591~599.
- 32 国家海洋局科学技术司, 1993, 热带西太平洋海气相互作用综合研究, 北京: 海洋出版社, 35~112, 174~217.
- 33 王宗山, 邹晓梅等, 1990, 1986~1987 年厄尔尼诺期间赤道太平洋的物理海洋学事件, 海洋学报, **12**(2), 159~166.
- 34 吴迪生, 1992, 热带西太平洋海-气热量交换特征研究, 中国科学技术协会首届青年学术年会(理科分册)论文集, 北京: 科学出版社, 611~617.

Atmosphere–Ocean Heat Flux over Tropical Western Pacific
Part II: Atmosphere–Ocean Heat Exchange under
the Condition of Tropical Cyclones

Wu Disheng

(Guangzhou Marine Observatory, State OA, Guangzhou 510300)

Abstract Based on data collected by the TOGA cruises No.1, 2, 3, 8, the atmosphere–ocean heat exchange over the tropical western Pacific is analysed. The results show that the exchange is very strong over the area within a tropical cyclone. Negative sensible heat fluxes (Q_k) appear over the area within a twin–Typhoon. The net long–wave radiation fluxes (Q_e) become weak over the area in the Typhoon. During the 1986 / 1987 El Niño event. The increase of the sea surface temperature occurred not only over the central Pacific heat but also over the western Pacific. However the heat exchange was weak. The break–out of the westerly wind first occurred in the tropical central Pacific, then developed westward. The maximum of the latent heating over the tropical ocean was closely related to the tropical weather system.

Key words western Pacific tropical cyclone heat exchange