

一个异常的台风海面风、浪结构的遥感分析*

齐义泉 施平 毛庆文

(中国科学院南海海洋研究所 广州 510301)

摘要 Geosat 卫星高度计可广泛应用于如锋面, 海面风、浪和高度等多方面的研究, 但利用高度计资料分析台风的海面风、浪断面结构, 因受卫星轨道、台风路径和高度计风速算法等多方面的制约, 过去一直研究较少。该文以 Geosat 高度计 1987 年 8 月 11 日一上升轨道的风、浪资料为基础, 研究分析了 8708 号台风影响下的海面风速和海浪断面分布特征。结果显示, 利用高度计可以获取常规方法难以获取的台风断面监测资料, 充分利用这一信息源于台风的海面风、浪结构特征的研究有利于台风灾害的防御以及这一天气过程情况海气相互作用的研究。

关键词 卫星高度计, 台风, 海面风速, 有效波高

1 前言

台风等热带气旋是经常发生在西太平洋和中国南海海域的一种灾害性的天气过程, 在其影响下形成的海面风场、浪场具有极大的破坏力, 特别是台风形成的波浪常常对海上交通、渔业生产、海洋及海岸开发等国民经济造成巨大损失; 进行台风影响下海面风、浪结构的研究有利于台风灾害的防御, 同时, 台风等热带气旋影响下海面将发生强烈的海气相互作用, 海面风速和海浪的分布和变化反映了海面能量传播和迁移的特征, 因此研究台风等热带气旋过程影响下的海面风、浪结构不仅对防灾减灾、海洋利用和开发等具有现实意义, 而且对中小尺度的海气相互作用的研究具有一定的推动作用。然而用传统的方法很难获取台风的风场和浪场资料, 即使海上浮标系统也只能获取有限的定点资料, 难以反映台风的海面详细动力分布特征。该文经分析 Geosat 卫星高度计的时空轨道特征和台风历史资料, 获得了一个高度计对台风海面径向断面的风、浪监测资料, 经对这一高度计风、浪信息的处理, 获得了台风的海面径向风、浪分布, 并与过去一般概念的台风结构作了对比分析, 得到了有重要应用价值的结论。

2 一个台风断面监测资料的获得及台风断面风、浪资料的预处理

2.1 一个台风断面监测资料的获得

Geosat 卫星是美国海军发射的测地卫星, 其高度计能给出海面风速和海浪的有效波高值, 沿卫星轨道方向具有高分辨率(约 6km)的特点。Geosat 卫星每天不停地围绕地球经极地南北往复运行, 其重复周期 17.05 天, 图 1 给出了 Geosat 卫星一个重复周期在西太平洋海域的轨道分布。就一般情况, Geosat 卫星穿过气旋中心的机会较小, 但如果有这种巧合, 无疑是研究气旋风、浪径向结构的珍贵资料。郭佩芳等经分析获得了 Geosat 高度计观测温带气旋断面风、浪结构的准同步资料, 发现了温带气旋浪具有中空结构特征^[1]。受这一启发, 笔者分析了 Geosat 运行期间的所有台风资料, 发现 1987 年 8 月 9 日在西太平洋海域 9.5°N, 132.3°E 处生成一热带低压, 之后逐渐发展成为 8708 号台风^[1](国际编号为 8709, 名称为 Betty), 这一台风自发生地近于沿纬圈方向向西移动, 于 1987 年 8 月 11 日 11 时左右(GMT)其中心大致位于 12.3°N, 127.8°E, 而此时, Geosat 卫星正处于该海域的上空, 自南向北运行(Geosat 卫星的上升轨道), 轨道近似穿过由插值获得的台风中心(相差约 40km), 在几分钟之内完

*国家自然科学基金和广东省自然科学基金资助项目。

1) 按当时的国内标准其强度为强台风, 但按国际标准其强度应为台风。

收稿日期: 1997年元月13日; 收到修改稿日期: 1997年3月31日

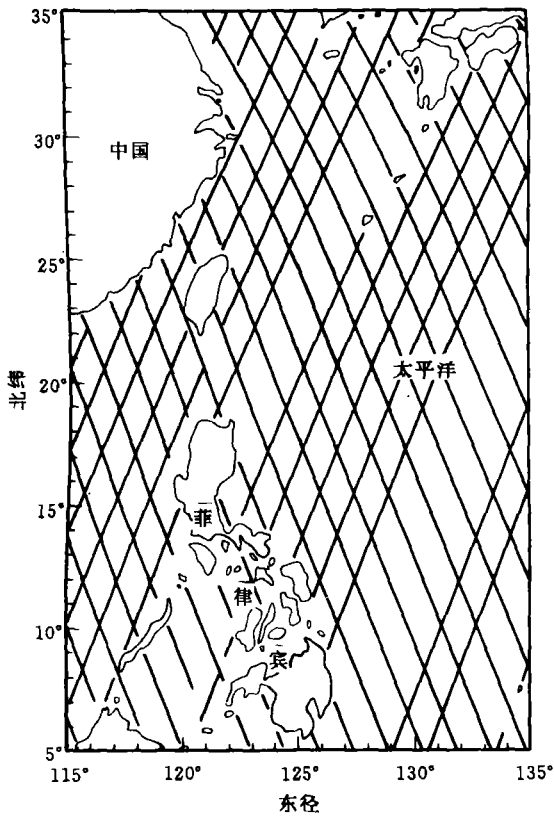


图 1 Geosat 卫星在西太平洋的轨道分布

Fig.1 Distribution of Geosat surface tracks over Western Pacific Ocean

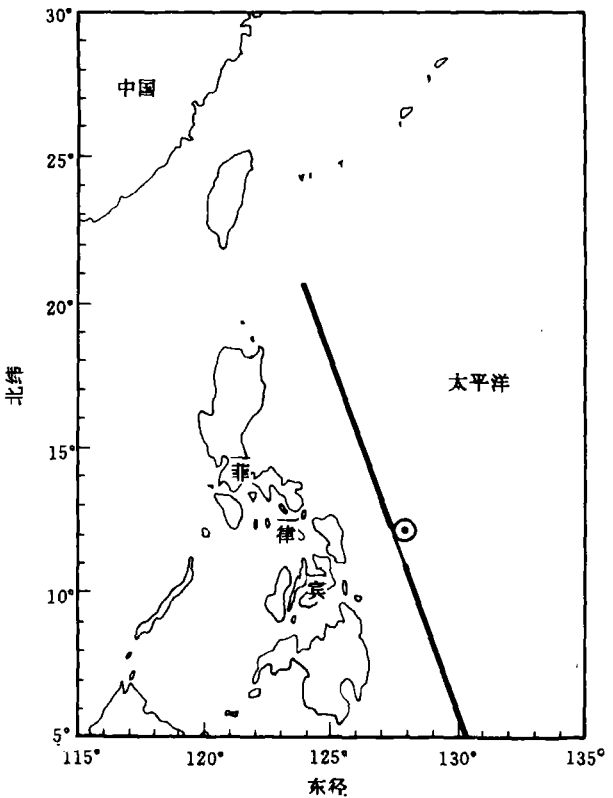


图 2 Geosat 卫星高度计 1987 年 8 月 11 日 11 时在西太平洋海域的一上升轨道的地面分布(图中粗实线)和台风中心(图中“⊙”号)位置示意图

Fig.2 An ascending Geosat satellite orbit (solid line) and the typhoon center position (signal “⊙”) over Western Pacific Ocean at 11 o'clock, August 11, 1987(GMT)

成对这一台风影响下的海面状况的监测, 形成一准同步的台风影响下的海面风速和波高断面监测资料。而这一准同步台风断面风、浪信息的获得为研究分析台风影响下的海面风速和波高分布特征提供了可贵的第一手资料。

图 2 给出了 Geosat 卫星 1987 年 8 月 11 日穿过西太平洋海域时的地面轨道分布, 以及此时台风中心的位置(由线性插值得到)。据台风年鉴^[2]记载, 此时台风强度很大, 台风中心气压 887hPa, 中心最大风速达 65m/s, 并呈继续发展趋势, 并且台风中心以 5.4m/s(插值获得)的速度沿纬度线向西移动。

2.2 台风断面风、浪资料的预处理

Geosat 卫星高度计是一单频雷达, 其工作频率为 13.5GHz。它利用测高过程中回波信号的功率大小和形态可分别获取海面标量风速和有效波高的信息。Geosat 高度计海面风速是由雷达后向

散射系数按经验公式算得, 目前常用的算法有平滑 Brown、CW 及 WC3 种算法^[3,4]。但这 3 种算法只适用于低风速海况(约 20m/s 以下), 对高风速海况, Young 利用台风资料, 结合台风预报模式, 给出了适合于 20—40m/s 的风速反演算法^[5], 这一研究成果基本解决了台风等高风速海况下的高度计风速信息提取的问题(但有待验证)。该文结合采用 CW 算法和 Young 算法, 而对两种风速信息提取模式中存在的间断范围, 即对后向散射系数介于 7.0—8.0dB 的值, 采用线性插值予以处理, 从而保证了反演风速资料的连续性, 并且这一处理方法符合风速与后向散射系数的基本关系。关于风速算法的细节可参见文献 [3—5] 等。Geosat 高度计的波高值是由高度计上的逻辑电路按一给定算法自动完成。Geosat 高度计与海上浮标资料相比^[6], 海面风速的均方根偏差为 1.7m/s, 平均差为 0.36m/s, 有效波高的均方根偏差为 0.49m, 平均差为 0.36m。考虑到对比的资料之间的可比性

及时空一致性的差异, 可以认为, 高度计观测值达到了与浮标观测值等价的精度。

3 台风影响下海面风、浪准同步断面资料的分析

根据前人的研究, 热带气旋的风力、气压、温度、湿度以及云和降水等多方面具有复杂的三维空间结构。而对具有三维空间结构特点的风力分布, 对应于海面上将产生相应的海面风速的二维平面分布, 以及伴随的海浪波高的二维平面分布特征等。由于获得台风影响下的海面风、浪资料困难, 有关台风海况时的实测风、浪资料较少, 特别是大面的同步风、浪资料更少, 因此, 现有的研究一般自天气图所得到的气压场出发, 在梯度风基础上作适当修正获取大范围风场资料; 而对台风浪一般采用少量实测资料结合数模分析获取台风浪场分布, 但现有的模式对台风浪模拟误差仍然较大。该文试图利用卫星实测的风速和波高值, 提示台风影响下的海面风速和波高特征, 以利于台风的海面风、浪结构研究。

3.1 台风影响下海面风速的径向分布

每个台风形成的海面风速分布因环境条件不同而异, 即使同一台风的的不同发展阶段也不相同。杨平章等经分析南海多年的台风资料, 采用经验正交分析方法获得了南海夏季和非夏季时期的台风风场特点^[7]。国外 Shea 等学者在梯度风的风压关系基础上研究了合成台风风场特点^[8-10]。由探空等实测资料获得的风速相对台风中心的径向分布各有特点, 但它们都有一个共同的特征, 在成熟台风的最大风速半径 R_m (一般为 40km) 以内, 其切向风速沿半径 r 的变化接近于固体旋转关系, 即可用下式表示:

$$V = V(R_m) \frac{r}{R_m} \quad (0 \leq r \leq R_m) \quad (1)$$

而在最大风速半径以外的切向风速分布, 可用包含径向距离的如下经验公式描述, 即

$$V(r) = V(R_m) \left(\frac{R_m}{r} \right)^x \quad (R_m \leq r \leq R_0) \quad (2)$$

这里 R_0 为台风影响到的最大范围, 一般可取 1000km; 指数 x 则依不同的台风在 0.5—0.7 之间变化^[11]。从数学实质上讲, 公式 (1) 代表着风速与距离 r 成正比, 公式 (2) 代表着风速与距离成反比, 并且上两式均含有已知的最大风速及其半径两参

数。该文不关心最大风速半径和最大风速, 而仅分析相对台风中心的距离 r 及其风速 V 之间的关系, 将风速相对距离的分布统一表示成幂函数的关系。经验算结果也显示, 用幂函数可较好地拟合 Geosat 高度计数据的实际分布。为此假定:

$$V = ar^b \quad (3)$$

用最小二乘法拟合出最佳适配曲线。系数 a , b 的确定, 可参见有关的数值计算书籍。对台风外围, b 为负值, 对内区 b 为正值。经对台风前、后观测的风速值分别分析, 得出 4 个最佳拟合曲线, 其公式分别表示如下:

(1) 对台风右方, 内区 (距台风中心 71.881km 以内)

$$V = 2.2073r^{0.648233} \quad (4)$$

(2) 对台风右方, 外区 (距台风中心 71.881—700km 范围)

$$V = 1839.92r^{-0.935206} \quad (5)$$

(3) 对台风左方, 内区 (距台风中心 173.027km 以内)

$$V = 9.05139r^{0.278308} \quad (6)$$

(4) 对台风左方, 外区 (距台风中心 173.027—700km 范围)

$$V = 995.852r^{-0.752015} \quad (7)$$

Geosat 资料相对上述拟合公式 (4) — (7) 式的最大绝对误差 (及其相应的距离) 分别为 1.72m/s (71.881km), 4.19m/s (77.722km), 0.80m/s (41.319km), 17.29m/s (173.027km), 绝对平均误差分别为 1.00m/s、0.85m/s、0.40m/s、0.88m/s。

从拟合结果看, 内区与旋转关系相差较大; 外区, 特别是右方外区与文献 [11] 中所说的公式 (2) 中 x 取 0.5—0.7 差别也较大。

图 3 绘出了 Geosat 卫星高度计的实测风速值 (\times) 和上述 4 支曲线。

有关 Geosat 卫星高度计风速数据样本的统计特征数如表 1 所示。

表1 Geosat卫星高度计风速资料的统计特征值

Table 1 Statistics of Geosat wind speeds

分 类	r, V 相 关系数	r 平均值 (km)	V 平均值 (m/s)	r 标准差 (km)	V 标准差 (m/s)	样本数 (个)
右方, 内区	0.9641	50.00	27.79	9.69	3.74	8
右方, 外区	-0.8335	382.56	9.77	184.51	6.78	97
左方, 内区	0.9928	70.52	28.47	51.33	4.80	6
左方, 外区	-0.7882	434.31	11.53	153.63	4.54	80

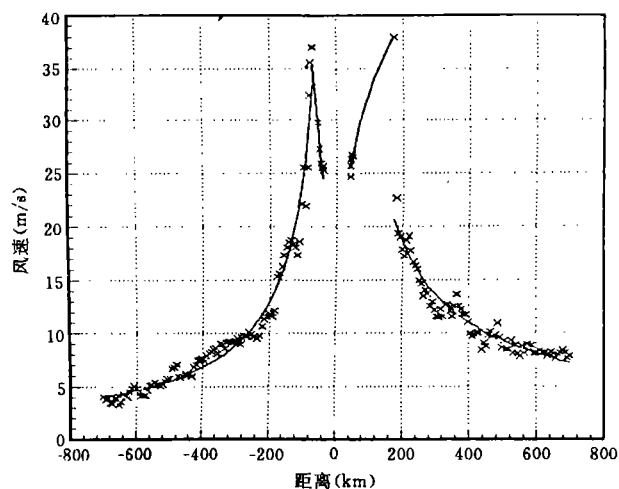


图 3 Geosat 卫星高度计风速相对径向距离的分布
距离负值对应台风右方；距离正值对应台风左方
(x)号为 Geosat 高度计实测风速值；曲线为拟合值

Fig.3 The wind speed profile through the center of the tropical cyclone along Geosat surface track

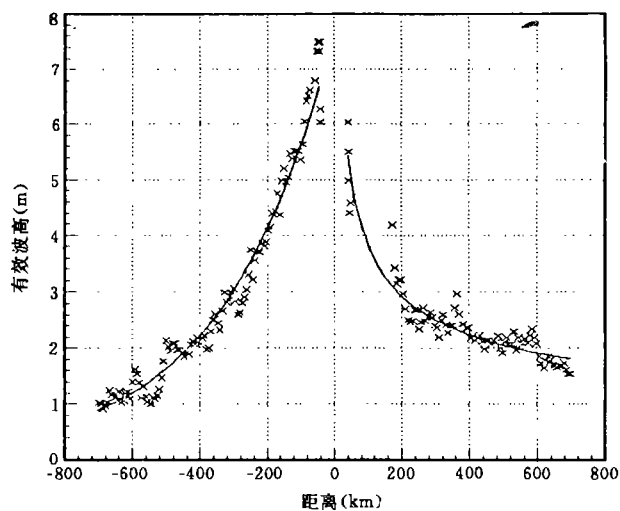


图 4 Geosat 卫星高度计波高相对径向距离的分布
距离负值对应台风右方；距离正值对应台风左方；
(x)号为 Geosat 高度计实测风速值；曲线为拟合值

Fig.4 The significant wave height profile through the typhoon center along Geosat surface track

有关 Geosat 卫星高度计波高数据样本的统计特征数如表 2。

表2 Geosat卫星高度计资料的统计特征值

Table 2 Statistics of Geosat significant wave height

分 类	r, H 相 关系数	r 平均值 (km)	H 平均值 (m)	r 标准差 (km)	H 标准差 (m)
右 方	-0.9399	359.96	3.03	197.05	1.84
左 方	-0.8240	411.36	2.45	175.05	0.81

3.2 台风影响下海面波高的径向分布

有关台风影响下海面波高的径向分布以前研究较少，该文经分析台风右方和左方的有效波高值随径向距离的分布特征发现，有效波高的分布基本与风速分布相似，即外围波高值随距台风中心的距离大小呈反比，但有效波高的分布没有明显的内区结构，这是与风速分布所不同的。

如仍然采用上述(3)式的幂函数形式对有效波高值随距离的分布进行最小二乘法拟合，发现台风的左方波高分布较适合幂函数分布，而台风的右方波高分布拟合效果并不理想，故改用指数函数形式，即

$$H = ab^r \quad (8)$$

的形式对右方波高值进行拟合效果较好，台风左、右方波高值分布的拟合结果如下：

(1) 台风右方 (41.136—700km)

$$H = 7.56171 \times 0.996948^r \quad (9)$$

(2) 台风左方 (41.136—700km)

$$H = 22.9809r^{-0.388234} \quad (10)$$

Geosat 资料相对上述拟合公式(9)，(10)式的最大绝对偏差(及其相应的距离)分别为 0.98m/s(48.64km)，1.07m/s(173.027km)，绝对平均误差分别为 0.23m/s，0.18m/s。

图 4 绘出了 Geosat 卫星高度计的实测波高值(x)和上述公式(9)，(10)的分布图。

4 遥感结果分析

4.1 风速结果分析

由图 3 及表 1 可见，在 8708 号台风的右方(即台风移动方向的右方，下同)距台风中心较小范围内($r < 71.881\text{km}$)(上述称为内区)，风速与距离成正比，二者的相关系数达 0.90 以上，而对于台风右方外围区域($r \geq 71.881\text{km}$)风速与距离成反比，二者的相关系数为-0.8335。相对于台风的左方(即台风移动方向的左方，下同)来说，在内区范围内($r \leq 173.027\text{km}$)，风速与距离成正比，相关系数为 0.99 以上，较右方内区大；在台风的外围，风速与距离成反比，相关系数为-0.7882，小于右方外区。由图 2 并结合上述公式(4—7)可见，台风右方相对于左方来说，内区的风速值随距台风中心的距离增加较快，并且外围风速随距离衰减也较快；由于在台风左方的最大风速值附近缺少观测数据，因此，左方最大台风

风速的位置若仅以图中的一个观测到的风速确定显然有较大的误差,但仍不失为一个估计值,并且为了叙述的方便,该文仍以此风速对应的距离为内、外区的分界。台风年鉴给出了1987年8月11日0时和1987年8月12日0时(GMT)的大风圈图^[2],从图中可见,在11日0时八级风速大风圈呈椭圆形,平均半径约200km,中心基本在台风中心位置,12日0时八级风速大风圈已基本呈圆形,半径仍约200km,但中心已显著偏向台风左方,若用插值方法将会得出11日11时左右台风大风圈中心位置将发生偏后的结果,显然这一结论与上述 Geosat 高度计观测到的左方风速衰减较慢的趋势基本相一致。

4.2 有效波高结果分析

有效波高值的分布不象风速具有明显的内、外分区的分布特征,并且不论台风右方或左方,有效波高的分布与径向距离均成反比;从表2中的相关系数可见,在台风右方有效波高与距离的负相关较台风左方为大;图4显示,在台风中心的左方,在距台风中心较小范围内(约200km以内),有效波高相对距离的增加衰减较快,在距台风中心约200km以远,有效波高相对距离的增加衰减减慢;而在台风中心的右方,有效波高相对距离的增加接近于线性衰减。有效波高的这一分布反应了台风前、后区域海面能量分布的不对称性。

4.3 8708号台风风、浪结构的异常及原因初步分析

受 Geosat 卫星高度计分辨率,以及该文选用的 Geosat 资料不是精确的穿过台风中心等限制,该文有关台风内区的风、浪特征以及最大风速值不一定是真实海况的反映,但其中必定包含有实际海况的一些信息,具有一定的参考价值。

而对于台风外区, Geosat 高度计给出的观测结果意义重大。首先,它不仅提示了8708号台风的风

速和有效波高径向分布的不对称性,更重要的在于它测得的台风左、右方风速和有效波高的大小分布与过去一般的研究结果存在很大的差异。过去的台风风场和浪场概念可用示意图图5表示。一个台风风场是由气旋风和台风的向前移动速度两矢量合成得到的,这种合成的结果将形成移动方向的右方风速大于左方风速,如图5(a)所示;而这一风场影响下的风浪场也是右方大于左方,考虑到台风形成的涌浪是向前传播的,在台风移动方向的前方涌浪较大,涌浪与风浪叠加的结果形成右前方海浪最大的分布特点,如图5(b)所示。按这一风、浪场结构形式,该文的高度计断面风、浪径向分布应表现为右方大于左方的特征,而事实上却相反。

8708号台风风、浪径向分布出现异常于一般台风的原因笔者认为主要是地形的影响。该文的断面基本与菲律宾群岛平行,相距约200km,地形对气流的阻碍和对海浪的反射影响使得台风风、浪结构变成不对称的形式。至于地形影响的程度和机制,将会在以后的研究中采用数值试验予以检验和探讨。

5 结 语

该文的结果显示,利用卫星高度计可以研究台风的海面风、浪结构形式,尽管卫星高度计观测资料在台风海况时的可靠性及精度仍需更多实测资料的验证。特别在目前台风海况风、浪同步常规观测资料缺少的情况下,卫星高度计所得的断面风、浪同步观测资料有其特别的使用价值。该文给出的仅是一次台风过程中的一个准同步卫星高度计观测资料的初步分析结果,由于观测时间和地点的限制其结果具有很大的特殊性,不一定适用于其它台风过程。作为高度计观测到的这一异常风、浪结构形式,对以后台风风、浪的预报和研究具有重要的参考价值。

参 考 文 献

- [1] 郭佩芳,王华,施平. 温带气旋浪断面结构的研究. 海洋与湖沼, 1994.
- [2] 国家气象局编. 台风年鉴. 北京: 气象出版社, 1987.
- [3] Chelton, D.B., F.J. Wentz. Further development of an improved altimeter wind speed algorithm. *J. Geophys. Res.*, 1986. **91**: 14250—14260.
- [4] Witter, D.L., D.B. Chelton. A Geosat altimeter wind speed algorithm and a method for altimeter wind speed algorithm

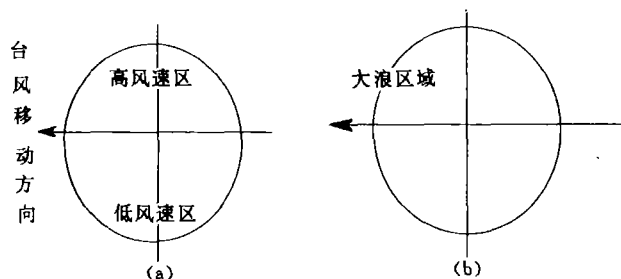


图5 一般的台风风、浪模型

Fig.5 General typhoon models of wind and wave fields

- development. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**: 8853—8860.
- [5] Young, I. R., An estimate of the Geosat altimeter wind speed algorithm at high wind speeds. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**(c11): 20275—20285.
- [6] Dobson, E., F. Monaldo, J. Goldhirsh. Validation of Geosat altimeter-derived wind speeds and significant wave heights using buoy data. *J. Geophys. Res.*, 1987, **92**: 10719—10731.
- [7] 杨平章, 黄永新, 陈会合, 王宏光, 关芬呈. 南海热带气旋大风预报. 台风及其灾害性天气业务预报方法的研究. 北京: 气象出版社, 1996.
- [8] Shea, D.J., W.M. Gray. The hurricane's inner core region, I: Symmetric and asymmetric structure. *J. Atmos. Sci.*, 1973, **30**: 1544—1564.
- [9] Holland, G. J. An analytical model of the wind and pressure profiles in hurricanes. *Mon. Weather Rev.*, 1980, **108**: 1212—1218.
- [10] Shapiro, L.J. The asymmetric boundary layer flow under a translating hurricane. *J. Atmos. Sci.*, 1983, **40**: 1984—1988.
- [11] 王志烈, 费亮. 台风预报手册. 北京: 气象出版社, 1987.

作者简介

齐义泉, 男, 1964年11月8日出生, 助理研究员, 1987年毕业于河海大学(原华东水利学院)海洋工程水文专业, 1994年获中国科学院南海海洋研究所物理海洋学硕士学位, 现为青岛海洋大学物理海洋学在职博士研究生, 近年主要从事物理海洋学和海洋遥感应用研究, 已发表论文近10篇。

Remote Sensing Study on Anomalous Structures of Sea Surface Wind and Wave in Typhoon

Qi Yiquan Shi Ping Mao Qingwen

(South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 510301)

Abstract Geosat satellite altimeter can be extensively used to study front, sea surface wind, wave and altitude etc., but it is difficult to use altimetric data to analyze the section structures of sea surface wind and wave in typhoon because of the limits of satellite orbit, typhoon track and wind speed algorithm of altimeter etc.. Based on Geosat altimetric data of wind speed and significant wave height in an ascending track on August 11, 1987, the sectional distribution characteristics of the wind and wave are analyzed under No.8708 typhoon. The result shows that the section measuring data can be obtained by altimeters whereas it is difficult to be obtained by conventional methods. Making full use of this information on the characteristics study of sea surface wind and wave structure under typhoon will benefit the prevention of typhoon calamity and the study of air-sea interaction in the synoptic process.

Key words Geosat altimeter, Typhoon, Sea surface wind, Significant wave height