

# 基于降雨率的 GMF + RAIN 模型构建及在 台风风场反演中的应用\*

张 亮 黄思训<sup>†</sup> 钟 剑 杜华栋

(解放军理工大学气象学院, 南京 211101)

(2010 年 4 月 7 日收到; 2010 年 5 月 5 日收到修改稿)

首先选取 2006 年 QuikSCAT 散射计扫描的 3 次台风个例(“珊珊”、“摩羯”及“象神”), 分析其获取的台风区域雷达后向散射截面值( $\sigma^0$ ) 在降雨影响下的分布特征. 然后依据大气辐射传输理论, 考虑降雨对雷达后向散射截面值的影响, 引进两个不同形式的降雨辐射传输模型(简称为 SY 和 AMSR 模型), 并将这两个降雨辐射传输模型分别与 NSCAT2 模型函数相结合, 构建了适合降雨情况的地球物理模型函数(简称为 GMF + RAIN). 最后, 在 GMF + RAIN 模型的基础上, 采用二维变分结合多解方案模糊去除方法(简称为 2DVAR + MSS), 对强度差异明显的两次台风个例“摩羯”和“象神”进行风场反演. 反演结果分析表明: 考虑降雨影响, 采用 GMF + RAIN 结合 2DVAR + MSS 的风场反演新方法, 使台风风场反演效果得到了有效提高, 进一步验证了基于降雨率构建的 GMF + RAIN 的有效性, 也为散射计资料在台风研究中的应用提供有效的实用价值.

**关键词:** 散射计, 台风风场, 降雨率, 辐射传输模型

**PACC:** 9260Q, 9265D

## 1. 引 言

热带气旋是一种生成在热带洋面上, 活动于热带和副热带洋面、岛屿及陆地的气旋性低压环流, 它往往会给人类生命财产带来重大损失. 热带气旋路径和强度预报的准确度, 在很大程度上取决于预报模式对海气初始状态描述的准确性<sup>[1,2]</sup>. 过去限制热带气旋预报发展的一个主要原因在于对驱动海气之间热量和水汽交换的关键因素——海面风场无法直接获取<sup>[3]</sup>. 星载微波散射计的出现为大面积获取海面风场提供了一种新的手段, 它通过测量海面雷达后向散射系数间接获取海面风场, 并具有大范围、持续工作的特点, 可以实现全天候观测且不受云的影响. 星载微波散射计对极端天气系统的监测具有其他传感器所不可比拟的优势, 已成为目前获取海面风场最主要的星载探测传感器. 星载微波散射计的观测资料可以应用于对热带气旋的追踪和监测, 因此, 加强对星载微波散射计资料海面风场反演的研究具有很强的实用价值.

搭载在 QuikSCAT 卫星上的 SeaWinds 散射计, 通常被称为 QuikSCAT 散射计, 其工作频率为 Ku 波段(13.402 GHz), 采用内外两个波束的圆锥扫描方式, 其中内波束采用水平极化方式, 入射角为  $46^\circ$ , 外波束采用垂直极化方式, 入射角为  $54^\circ$  (见图 1)<sup>[4]</sup>. 随着卫星的运行, 散射计天线将前向和后向两次扫描同一风矢量单元(WVC), 且前向和后向扫描方位角之差介于  $0^\circ$ — $180^\circ$  之间. 每个 WVC 最多可观测到来自外波束前视、内波束前视、内波束后视和外波束后视四个不同方位角的雷达后向散射截面值  $\sigma^0$ ,  $\sigma^0$  的观测数量取决于 WVC 在刈幅区域内的位置. QuikSCAT 从 1999 年 8 月开始提供全球的海面风场数据, 当风速小于 20 m/s 时, 风场反演结果误差很小. 目前, 散射计风场资料在美国国家环境预报中心(NCEP)及欧洲中期天气预报中心(ECMWF)等数值预报模式同化系统中得到业务化应用, 并显示出积极效应. 研究表明<sup>[5,6]</sup>, 对于观测资料稀少的南半球, 同化散射计风场资料对数值预报模式具有明显的正效应, 而在北半球上亦改进了分析场, 特别是气旋的强度和位置.

\* 国家自然科学基金(批准号:40775023)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: huangsxp@yahoo.com.cn



37796 及 37897 轨道, QuikSCAT 的近实时海面雷达后向散射截面值资料由美国海洋和大气管理局 (NOAA) 所属的环境卫星资料信息局 (NESDIS) 制作并分发. SSM/I 数据由遥感系统 (RSS) 制作并分发, 本文选择的是其中的 F13 观测获得的逐日降雨率数据, 台风的报文资料来自日本气象厅 (JMA). 散射计资料所对应的台风最大风速、中心位置及 QuikSCAT 观测时间具体见表 1.

表 1 3 次 QuikSCAT 台风观测对应 QuikSCAT 轨道数、台风的中心最大风速、台风中心位置及 QuikSCAT 观测时间

| QuikSCAT 轨道 | 最大风速 $m \cdot s^{-1}$ | 报文台风中心            | QuikSCAT 观测时间 (UTC) |
|-------------|-----------------------|-------------------|---------------------|
| 37654       | 45                    | (19.3°N, 132.4°E) | 11/9/2006, 21:07    |
| 37796       | 55                    | (22.9°N, 144.4°E) | 21/9/2006, 20:09    |
| 37897       | 32                    | (15.5°N, 116.5°E) | 28/9/2006, 22:06    |

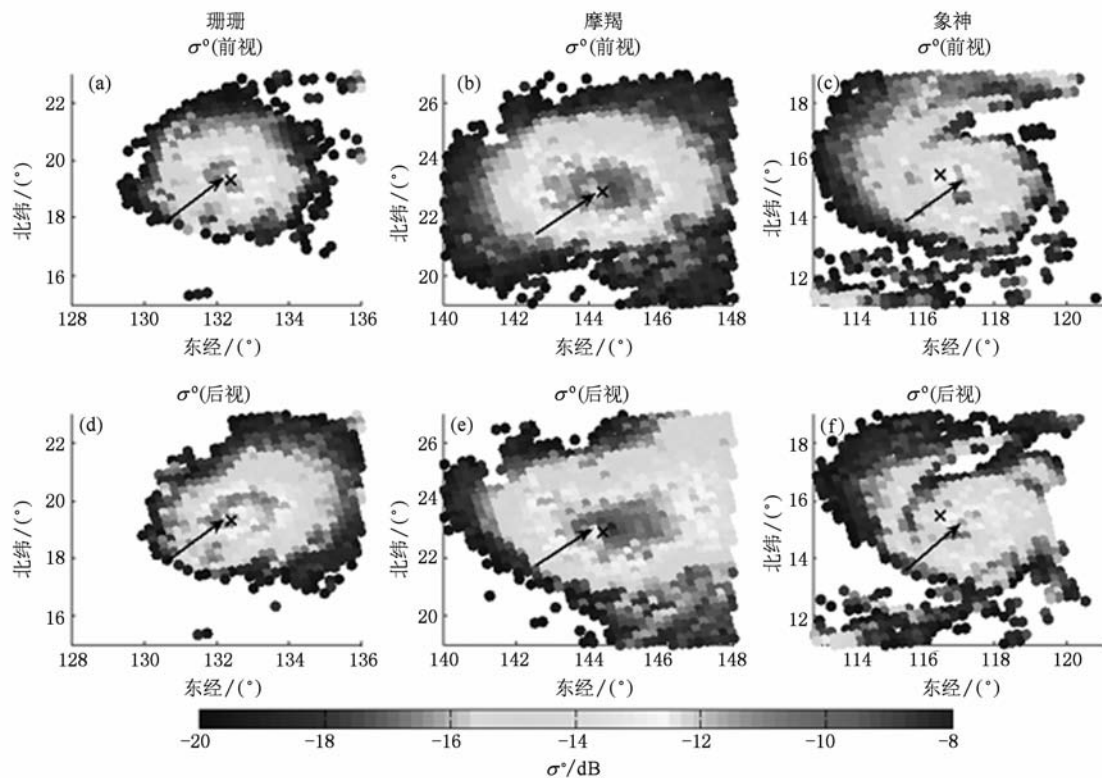
### 3. QuikSCAT $\sigma^{\circ}$ 观测值分析

首先对 3 次台风的  $\sigma^{\circ}$  观测值进行分析, 以便讨论降雨对  $\sigma^{\circ}$  观测的影响.

图 2(a)–(f) 显示了 QuikSCAT 散射计轨道内外侧波束前后向的  $\sigma^{\circ}$  观测值分布, 图 2(m)–(o) 显示了 SSM/I 观测的台风区域降雨率分布. 图中显

示台风区域大部分地区对应 SSM/I 降雨率小于 10–15 mm/h. 必须注意到, SSM/I 与 QuikSCAT 在观测时间上存在差异, 这可能会导致实际降雨率分布与图 2(m)–(o) 所描绘的降雨率分布有差异. 为了验证图 2(m)–(o) SSM/I 降雨率的有效性, 引入 QuikSCAT 同步测量的亮温值 (图 2(p)–(r)), SSM/I 降雨率分布应与 QuikSCAT 亮温分布相对应. 图中 3 次个例的 QuikSCAT 亮温虽然缺测较多, 但两者的分布是相符的, 从中可清晰地看到 QuikSCAT 亮温大值区明显与 SSM/I 降雨率大值区相对应, 说明本文所采用的 SSM/I 降雨率数据可用. 图 2(a)–(r) 显示, 受强降雨率 (降雨率 > 12 mm/h) 影响的  $\sigma^{\circ}$  高值区域, 其  $\sigma^{\circ}$  观测值相对于其周围区域的  $\sigma^{\circ}$  观测值小, 这进一步说明了降雨对  $\sigma^{\circ}$  的削弱作用.

图 2(a)–(r) 显示了  $\sigma^{\circ}$  观测值的分布与台风中心位置的关系. 由于台风风场结构具有气旋式涡旋特征, 在风眼区域风弱、云少, 围绕风眼一般有环状最大风速区, 伴随着高风速和强降水, 因雷达后向散射截面值与风速成正比, 由此可从台风眼区域的  $\sigma^{\circ}$  分布确定台风中心<sup>[8]</sup>. 在图 2(a)–(f) 中, 箭头所指表示在台风眼区搜索  $\sigma^{\circ}$  极小值所确定的台风中心位置, X 所指表示由日本气象厅 (JMA) 发布的台风报文在该时次的台风中心位置. 可见两者差别



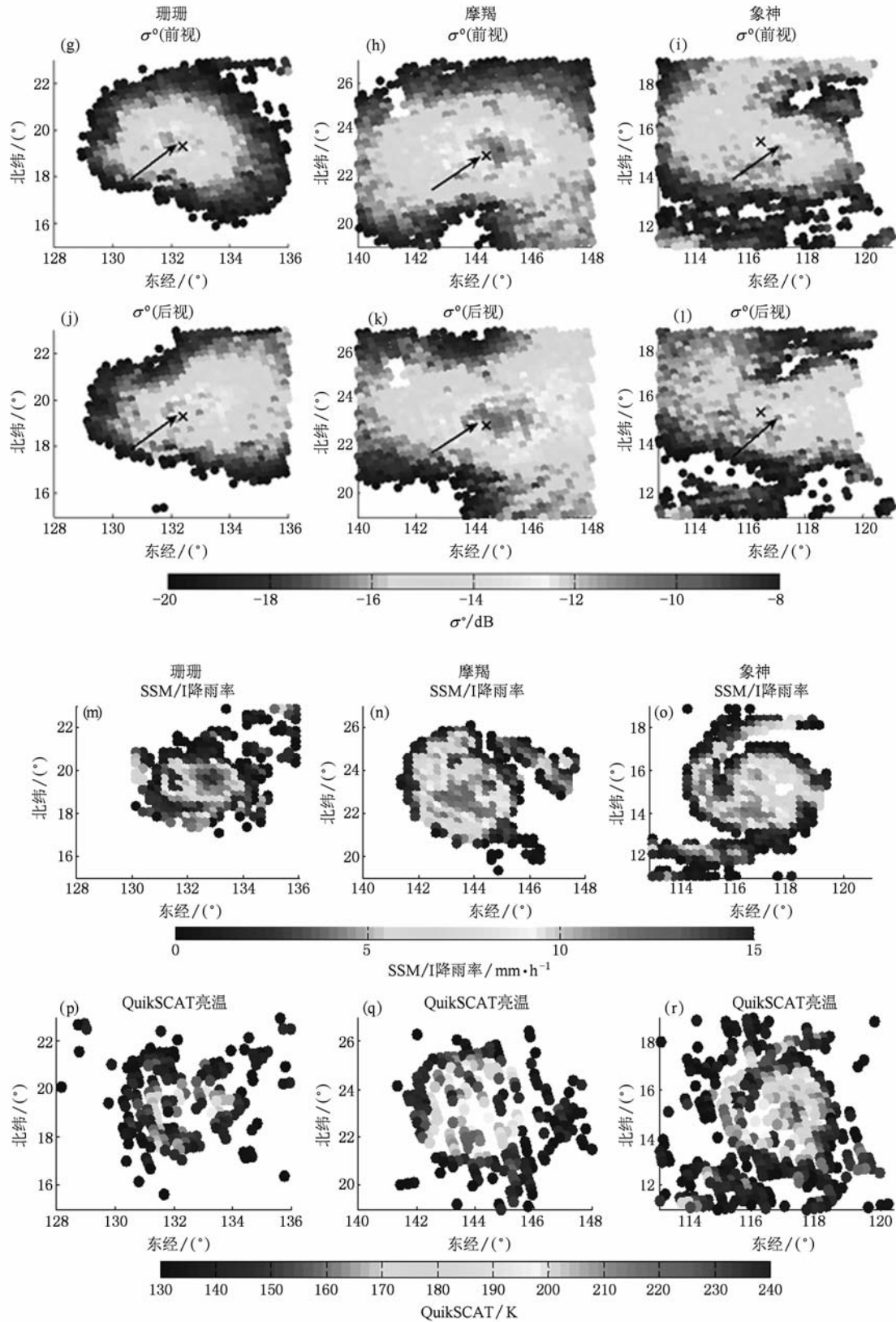


图2  $\sigma^0$  观测分布图 (a)–(f) 3 次台风 QuikSCAT 观测时次内侧波束  $\sigma^0$  分布图, 其中 (a)–(c) 表示前向观测  $\sigma^0$ , (d)–(f) 表示后向观测  $\sigma^0$ ; (g)–(l) 外侧波束  $\sigma^0$  分布图; (g)–(i) 为前向观测, (j)–(l) 为后向观测; (m)–(r) SSM/I 降雨率分布 ((m)–(o)) 及 QuikSCAT 亮温观测值分布 ((p)–(r))

小,达到了较好的一致性,尤其是对于发展成熟,涡旋结构特征明显的“摩羯”台风. 结果再次验证了利

用  $\sigma^\circ$  观测值分布确定台风中心的有效性和可行性.

图 3(a) — (h) 描绘了 QuikSCAT 第 37654 轨道

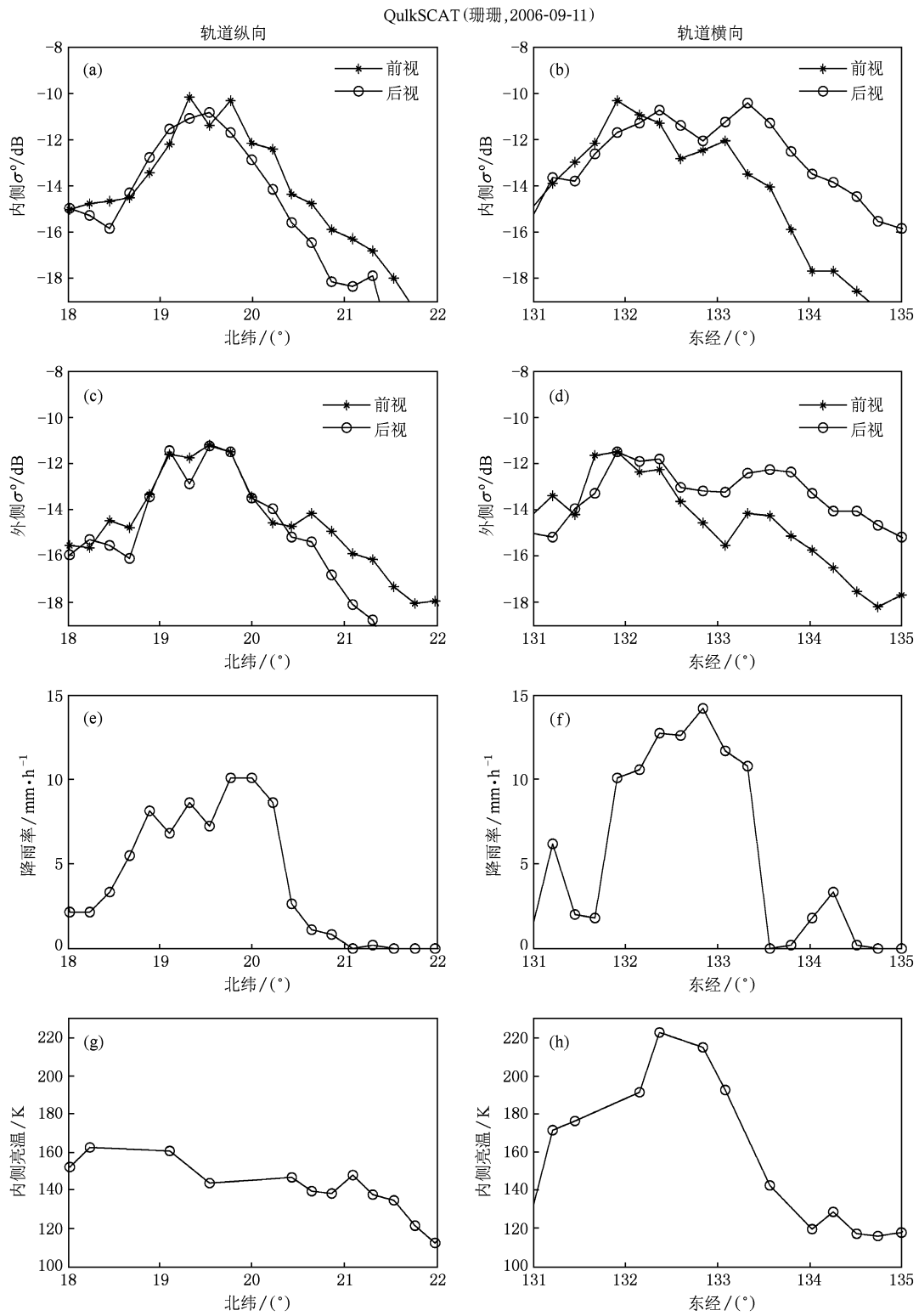


图 3 “珊瑚”台风沿轨道及垂直轨道方向以台风眼为中心观测  $\sigma^\circ$  的分布 (左边表示沿着轨道方向, 右边表示垂直轨道方向, (a), (b) 表示内波束观测; (c), (d) 表示外波束观测; (e), (f) 表示对应的 SSM/I 降雨率分布; (g), (h) 表示对应的 QuikSCAT 亮温分布)

“珊珊”台风沿轨道方向和垂直轨道方向观测  $\sigma^\circ$  分布、SSM/I 在同一路径上的降雨率分布以及 QuikSCAT 同步获取的亮温分布. 由图 3 可知, 沿着轨道方向降雨率大部分小于 10 mm/h, 在台风眼南侧, 前后向观测  $\sigma^\circ$  差异很小, 而在台风眼北侧, 前后向观测  $\sigma^\circ$  相差达到 0.5—3 dB, 并且离台风眼越远, 前后向观测  $\sigma^\circ$  差异越大. 对于距离台风眼 200 km 的风矢量单元, 内波束(水平极化)上两者差异达到 3 dB, 而外波束(垂直极化)上两者差异达到 2 dB. 垂直轨道方向也存在类似现象, 在台风眼中心以西前后向观测  $\sigma^\circ$  相差很小, 而在台风眼中心以东, 前后向观测  $\sigma^\circ$  随着距离台风眼中心距离增大而增大. 对于某一指定风矢量单元, 固定某一天线的前后向  $\sigma^\circ$  观测值之间存在非常大的差异, 这不可能是完全由降雨的削弱及增强作用造成的. 这在一定程度上表明了风向对  $\sigma^\circ$  的依赖性随着风速的增加(离台风眼越近)而减小, 但是在风速为 40—50 m/s (台风眼附近)时仍然具有 0.5—1 dB 的差异.

## 4. 基于降雨率的 GMF 改进

### 4.1. 改进的理论基础

目前业务化使用的 GMF 只在无雨情况下适用, 对于常常伴有大量降雨的台风天气系统, 其反演的风速误差在部分风矢量单元上甚至超过 50%<sup>[8]</sup>, 因此, 在风场反演中考虑降雨的影响显得尤为重要. 为了从定量的角度刻画降雨对观测  $\sigma^\circ$  的影响, 本文尝试在大气辐射传输理论的基础上, 建立降雨对观测  $\sigma^\circ$  影响的辐射传输模型, 进而构造降雨情况下的 GMF(称为 GMF + RAIN), 具体表达式如下<sup>[9]</sup>:

$$\sigma_{\text{obs}}^\circ = \sigma_{\text{wind}}^\circ \alpha_{\text{att}} + \sigma_{\text{eff}}, \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{eff}} = \sigma_{\text{ors}}^\circ + \alpha_{\text{att}} \sigma_{\text{ors}}^\circ, \quad (2)$$

其中,  $\sigma_{\text{obs}}^\circ$  表示 QuikSCAT 雷达后向散射截面观测值,  $\sigma_{\text{wind}}^\circ$  表示由风矢量产生的雷达后向散射截面值(它通过无雨 GMF 计算得到),  $\sigma_{\text{eff}}$  表示降雨对雷达后向散射截面的总增强效应,  $\alpha_{\text{att}}$  表示雨滴在大气中对雷达回波信号的削弱使得观测  $\sigma^\circ$  减弱,  $\sigma_{\text{ors}}^\circ$  和  $\sigma_{\text{ors}}^\circ$  分别表示雨滴在大气中对回波信号的体散射及溅落到水面时对雷达回波信号的表面散射所导致的观测  $\sigma^\circ$  增强.

针对降雨对  $\sigma^\circ$  的影响, 普遍认为  $\alpha_{\text{att}}$  和  $\sigma_{\text{eff}}$  均

为降雨率和降雨高度的函数, 但具体函数形式有所不同<sup>[13,14]</sup>, 对于降雨强度的度量, 主要有表面降雨率(单位为 mm/h)和积分降雨率(单位为 km·mm/h)两种度量单位, 本节引入两个不同的降雨辐射传输模型(SY 和 AMSR 模型)就是分别通过表面降雨率和积分降雨率来刻画降雨对雷达后向散射截面值的影响.

#### 4.1.1. SY 模型

Stiles 等<sup>[13]</sup> 利用 QuikSCAT 雷达后向散射截面值数据、NCEP 模式预报风场及 SSM/I 降雨率资料统计得到的辐射传输模型, 本文简称为 SY 模型. 该模型中  $\alpha_{\text{att}}$  和  $\sigma_{\text{eff}}$  仅为降雨率及降雨高度的函数, 具体表达式为<sup>[13]</sup>

$$\sigma_{\text{eff}} = f(RH)^g, \quad (3)$$

$$\alpha_{\text{att}} = \exp[-p(RH)^q], \quad (4)$$

其中,  $H$  的单位为 km,  $f, g, p, q$  为模型系数, 见表 2.

表 2 SY 模型的模型系数

|      | $f$    | $g$  | $p$   | $q$  |
|------|--------|------|-------|------|
| 内侧波束 | 0.0032 | 0.64 | 0.096 | 0.54 |
| 外侧波束 | 0.0029 | 0.54 | 0.13  | 0.55 |

#### 4.1.2. AMSR 模型

Nielsen<sup>[14]</sup> 利用高级微波扫描辐射计(AMSR)降雨率及 QuikSCAT 后向散射截面统计分析建立了积分降雨率与  $\alpha_{\text{att}}$  和  $\sigma_{\text{eff}}$  之间的经验表达式, 此模型称为 AMSR 模型. 该模型的最大特点在于所采用的观测  $\sigma^\circ$  值与降雨率之间并不存在时空匹配误差, 因为散射计与 AMSR 搭载在同一卫星上. 所谓积分降雨率, 是指降雨层各层降雨率  $R_i$  (mm/h) 之和, 积分降雨率和降雨率之间的关系式为<sup>[14]</sup>:

$$R_{\text{ir}} = 10 \lg \left( \int_H R_i dz \right), \quad (5)$$

其中  $H$  表示降雨层厚度, 单位为 km,  $R_{\text{ir}}$  单位为 dB.

$\alpha_{\text{att}}$  和  $\sigma_{\text{eff}}$  定义为  $R_i$  的二次函数, 分别表示为

$$\alpha_{\text{att}} = 10^{-10 f_{\text{att}}(R_{\text{ir}})/10}, \quad (6)$$

$$\sigma_{\text{eff}} = 10^{f_{\text{eff}}(R_{\text{ir}})/10}, \quad (7)$$

其中,

$$f_{\text{att}}(R_{\text{ir}}) = \sum_{n=0}^2 C_{\text{att}}(n) R_{\text{ir}}^n, \quad (8)$$

$$f_{\text{eff}}(R_{\text{ir}}) = \sum_{n=0}^2 C_{\text{eff}}(n) R_{\text{ir}}^n. \quad (9)$$

(8) 和 (9) 式中模型系数见表 3.

表 3 AMSR 模型函数的系数

|      | $C_{att}(0)$ | $C_{att}(1)$ | $C_{att}(2)$ | $C_{eff}(0)$ | $C_{eff}(1)$ | $C_{eff}(2)$ |
|------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 内侧波束 | -5.2410      | 0.4076       | 0.0167       | -24.6335     | 0.4108       | 0.0160       |
| 外侧波束 | -4.6036      | 0.4432       | 0.0171       | -24.5579     | 0.2802       | 0.0115       |

#### 4.1.3. SY 和 AMSR 模型特性分析

当降雨层厚度为 3 km 时, SY 和 AMSR 模型中  $\sigma_{eff}$  和  $\alpha_{att}$  随降雨率的变化特征见图 4.

#### 4.2. 改进的模型对比分析

为进一步定量分析降雨对观测  $\sigma^\circ$  的影响, 本节将两个降雨辐射传输模型与 NSCAT2 相结合构造适合降雨情况下的 GMF + RAIN, 讨论分析在降雨层厚度为 3 km 时, 不同降雨率 (0—20 mm/h, 间隔为 5 mm/h)、不同极化方式 (垂直极化和水平极化) 和不同相对方位角 ( $0^\circ$  和  $90^\circ$ ) 下观测  $\sigma^\circ$  随风速的变化, 结果见图 5.

由图 5 可知, 降雨的一个重要作用是改变  $\sigma^\circ$  值的大小, 对于所有 GMF + RAIN, 不论是内波束或外波束、顺风或横风, 降雨均使中低风速观测  $\sigma^\circ$  (对应 0 mm/h 曲线) 值偏大, 使高风速观测  $\sigma^\circ$  值偏小, 这也是强台风中心最大反演风速值远小于台风年鉴资料最大风速值的主要原因. 降雨的另一个重要作用是减弱风向对观测  $\sigma^\circ$  的敏感性, 对于低风速 (风

速  $< 5$  m/s) 情况, 无雨时, 顺风和横风的观测  $\sigma^\circ$  之差可达到 4.3 dB; 当降雨率为 10 mm/h 时, 降雨的影响使得顺风与横风情况下观测  $\sigma^\circ$  之差小于 1 dB; 而随着降雨率增加, 顺风与横风差异更小, 可见降雨使风向对  $\sigma^\circ$  的敏感性降低. 这是因为降雨削弱项  $\alpha_{att}$  及体散射和海表散射增强项  $\sigma_{eff}$  的经验统计公式均假定与风向无关. 随着风速增加, 风矢量所产生的观测  $\sigma^\circ$  逐渐占主导作用, 降雨对观测  $\sigma^\circ$  的影响不断减小, 从而使风向对  $\sigma^\circ$  的敏感性增强. 当内外波束在风速分别增加到 30 和 20 m/s 时, 10 mm/h 降雨率的观测  $\sigma^\circ$  基本等于无雨情况的  $\sigma^\circ$  值, 此时降雨对观测  $\sigma^\circ$  的影响远小于风矢量对观测  $\sigma^\circ$  的影响.

当某一海域存在降雨时, 降雨及风矢量都将影响观测  $\sigma^\circ$  值, 两者具体谁占主导作用取决于风速大小和降雨率强度. 通过具体的数值计算, 经分析可知: 在降雨层厚度小于 3 km 及降雨率为 10 mm/h 时, 风矢量所产生的后向散射截面  $\alpha_{att}\sigma_{wind}$  在风速大于 30 m/s 时占主导作用; 当降雨率增加到 15 mm/h 时,  $\sigma_{eff}$  和  $\alpha_{att}\sigma_{wind}$  两项作用基本相当.

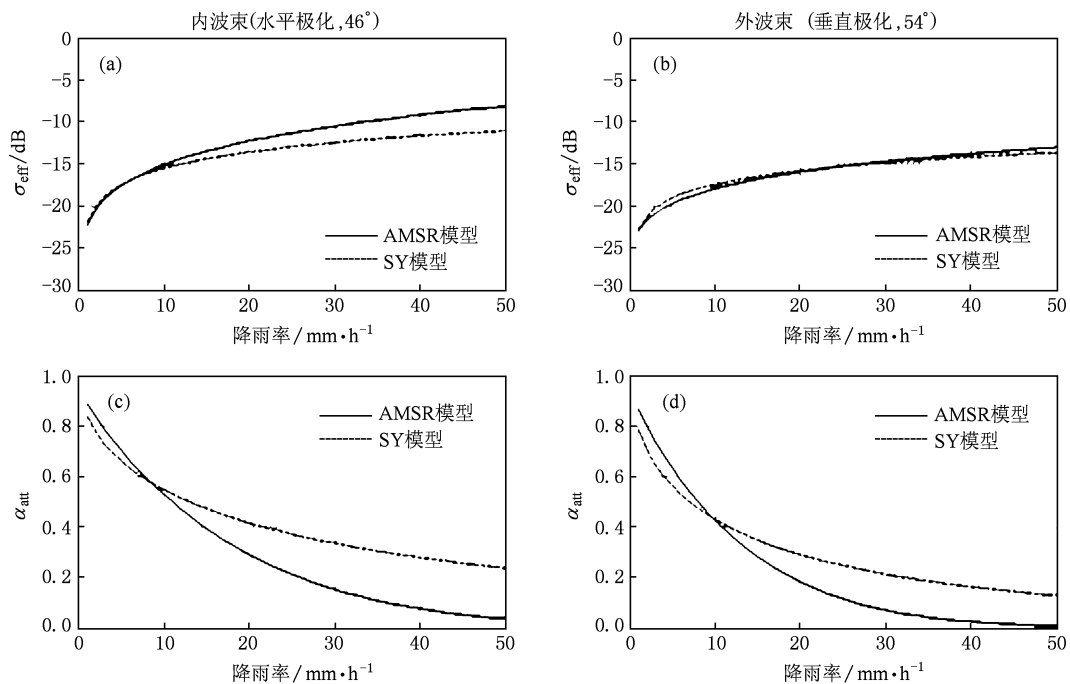


图 4 SY 和 AMSR 模型降雨增强项  $\sigma_{eff}$  与削弱项  $\alpha_{att}$  随降雨率变化图 (a), (c) 为内侧波束, (b), (d) 为外侧波束

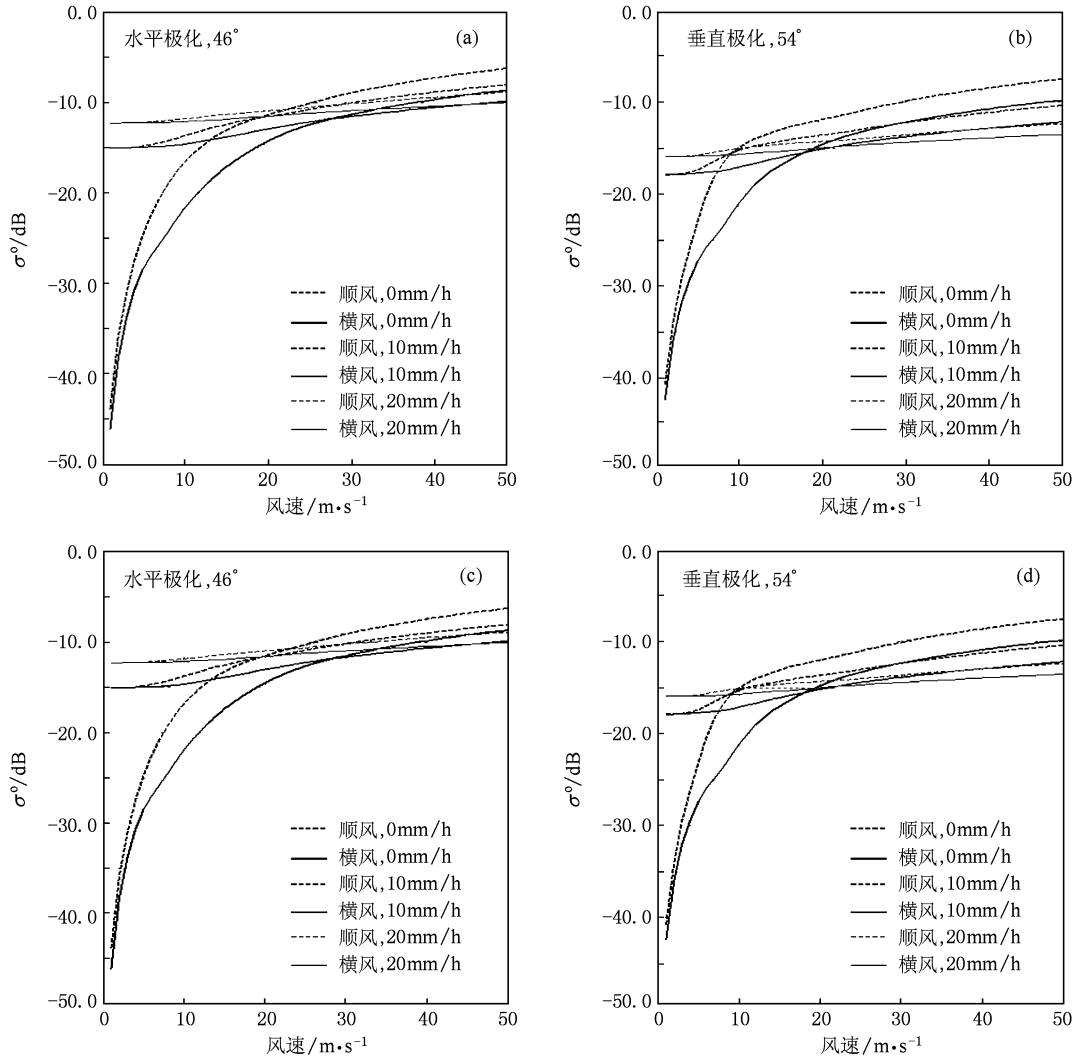


图5 QuikSCAT 降雨模型订正后内外波束  $\sigma^0$  随风速变化图 (a),(b)表示 SY 降雨模型,(a)水平极化,  $46^\circ$ , (b)垂直极化,  $54^\circ$ ; (c),(d)表示 AMSR 降雨模型,(c)水平极化,  $46^\circ$ , (d)垂直极化,  $54^\circ$

### 5. 多解方案(MSS)和二维变分法(2DVAR)

#### 5.1. 多解方案(MSS)

在微波散射计资料反演海面风场过程中,通常采用最大似然估计法(MLE)进行求解,MLE的代价函数可表示为

$$J_2(w, \theta) = -J_1(w, \theta) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[ \frac{(\sigma_{mi}^o - \sigma_{si}^o)^2}{C(\sigma_{si}^o)} + \ln(C(\sigma_{si}^o)) \right], \quad (10)$$

其中,  $N$  表示后向散射系数的测量次数,  $\sigma_{mi}^o$  为散射计测量得到的后向散射系数值,  $\sigma_{si}^o$  表示针对不同的风速和风向,通过 GMF 得到的后向散射系数的模拟

值,  $w$  表示风速矢量的模,  $\theta$  表示风向,  $C(\sigma_{si}^o) = \alpha(\sigma_{si}^o)^2 + \beta(\sigma_{si}^o) + \gamma$  表示测量方差,系数  $\alpha, \beta, \gamma$  与天线极化方式和风矢量单元(WVC)相关. 针对 QuikSCAT 散射计的风场反演,通常将风向从  $0^\circ$  到  $360^\circ$  每隔  $2.5^\circ$  进行分割,对每个风向  $\theta$ ,通过对代价函数  $J_2(w, \theta)$  求极小值计算得到与之相对应的风矢量模  $w$ . 对每一个 WVC,可得到 144 个风矢量解及与之对应的 144 个  $J_2$  值. 标准方案通常从这 144 个解中挑选 2—4 个局部  $J_2$  极小值对应的风矢量解进行模糊去除,进而得到唯一的风矢量解. 由于 QuikSCAT 散射计自身的特性,尤其在星下点刈幅区域,前后两次扫描天线方位角之差接近  $180^\circ$ ,造成  $J_2$  极小值差异性不明显,从而使得真实解不包含在所选取的 2—4 个模糊解中,进而不能得到“真实”

风矢量解. MSS 就是将得到的 144 个风矢量解全部用于风向的模糊去除,可以保证将全部的反演质量信息传递给模糊去除过程,从而进一步提高 QuikSCAT 散射计,特别是星下点刈幅区域内的模糊去除效果.

## 5.2. 二维变分法 (2DVAR)

变分同化方法在大气科学及各个学科领域中已得到广泛的应用研究<sup>[15-18]</sup>,它利用一切有价值的信息,对大气与海洋的状态进行精确的描述.该方法可应用于风向的模糊去除,通过利用近表面风场的先验信息,可克服解的不适定性,即消除风向的不唯一性,从而找到最具可能的近表面风场.

由 Bayes 理论可知,某一模糊风矢量解为真实解的概率为

$$P(x \cap v_o^i) \propto P(v_o^i | x)P(x | x_b), \quad (11)$$

其中  $x$  为控制变量,  $x_b$  为背景场信息,  $v_o^i$  为散射计反演的风矢量解,  $P(x \cap v_o^i)$  为近表面真实风场  $x$  与观测场  $v_o^i$  的联合概率,  $P(v_o^i | x)$  表示在给定状态  $x$  下观测到  $v_o^i$  的条件概率,  $P(x | x_b)$  表示在给定背景场  $x_b$  前提下,得到近表面风场  $x$  的条件概率.

在此情况下,求最大概率问题等价于

$$J(x) = -2\ln P(v_o^i | x) - 2\ln P(x | x_b) \\ \triangleq J_o^{\text{scat}}(v_o^i, x) + J_b(x) = \min!. \quad (12)$$

为了便于计算,引入增量

$$\delta x = (x - x_b) = \begin{pmatrix} u' \\ v' \end{pmatrix}, \quad (13)$$

$u', v'$  分别为  $u, v$  分量的增量,从而代价函数可转化为

$$J(x) = J_o^{\text{scat}}(v_o^i, \delta x) + J_b(\delta x). \quad (14)$$

最优极小值解可通过梯度方程求解得到:

$$\nabla J(\delta x) = 0. \quad (15)$$

该方法通过在目标函数中引入背景场信息,利用风场结构去订正误差,将产生在气象上更加相容的近表面分析风场<sup>[19]</sup>.

## 6. 台风风场反演

### 6.1. 反演流程图

利用本文第 4 节改进的 GMF + RAIN,设计了台风风场反演流程图,如图 6 所示.

第一步:采用加权平均法,将 SSM/I 降雨率数

据  $R$  与雷达获取的后向散射截面值  $\sigma^\circ$  进行匹配:

$$R_{i,j} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N R_k, \quad (16)$$

式中  $R_{i,j}$  表示在  $(i,j)$  处 WVC 的 SSM/I 降雨率,选取距离  $(i,j)$  为 0.5 倍 WVC 格距的区域,  $R_k$  表示该区域内第  $k$  个 SSM/I 降雨率值,  $N$  表示该区域内所获取的 SSM/I 降雨率值的总数.

第二步:利用辐射传输模型考虑降雨对  $\sigma^\circ$  的影响,其中降雨层厚度统一近似取 3 km,实现对  $\sigma^\circ$  的订正.

第三步:对 GMF + RAIN 利用 MLE 进行求解,得到模糊风矢量解.

第四步:利用 2DVAR + MSS 方案实施风场的模糊去除,得到最终的台风风场反演结果.

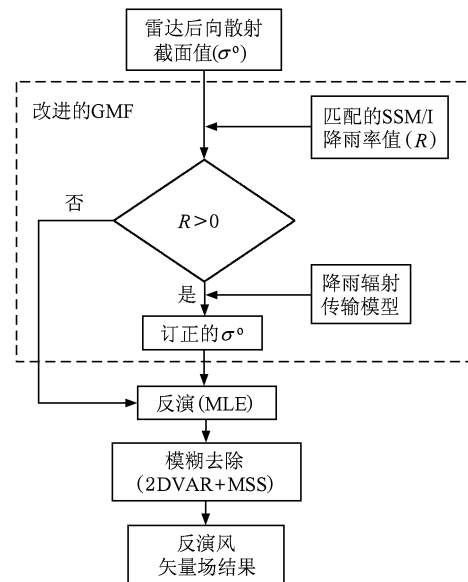


图 6 台风风场反演流程图

### 6.2. 实例分析

本节选取“摩羯”和“象神”两次台风个例进行分析,之所以选择这两次台风,是因为“摩羯”和“象神”台风分别对应强弱台风个例,且“象神”台风最大风速接近本文第 4 节中降雨使观测  $\sigma^\circ$  增大或减小的临界风速值(30 m/s).

考虑到 SSM/I 在降雨率达到 10—15 mm/h 以上时,测量趋于饱和和使测量精度有所降低,本文所选 3 次台风个例降雨率均低于 15 mm/h(见图 2(m)—(o)). 图 7((a)—(d)和(e)—(h))分别描绘了利用 QuikSCAT 资料反演“摩羯”和“象神”台风的风场分布,风场反演结果见表 4.

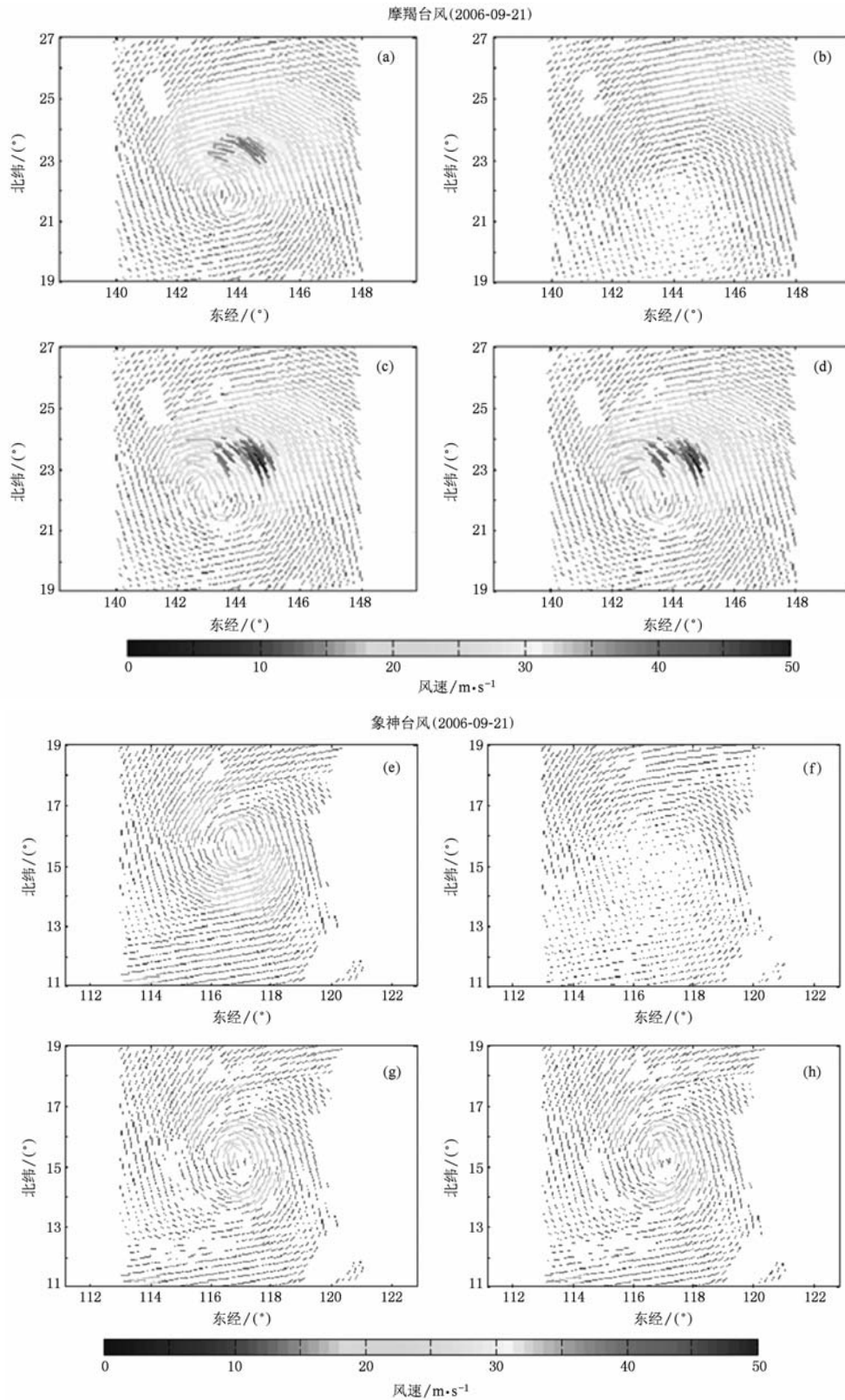


图7 台风风场反演结果 (a)–(d)QuikSCAT第37796轨道“摩羯”台风风场反演结果,(e)–(h)“象神”台风风场反演结果((a),(e)对应利用NSCAT2GMF不考虑降雨影响的风场反演结果,(b),(f)对应NCEP模式预报风场,(c),(g)对应利用NSCAT2+SY风场反演结果,(d),(h)对应利用NSCAT2+AMSR风场反演结果.(a)–(h)均采用2DVAR+MSS模糊去除方法)

表 4 风场反演结果

|             | JMA 台风报文<br>最大风速<br>$/m \cdot s^{-1}$ | NSCAT2 GMF<br>最大风速<br>$/m \cdot s^{-1}$ | NSCAT2 + SY<br>最大风速<br>$/m \cdot s^{-1}$ | NSCAT2 + AMSR<br>最大风速<br>$/m \cdot s^{-1}$ | 结论                           |
|-------------|---------------------------------------|---|--|--|------------------------------|
| 强台风<br>(摩羯) | 55                                    | 39.73                                   | 50                                       | 50   | 降雨使高速区的<br>$\sigma^\circ$ 削弱 |
| 弱台风<br>(象神) | 32                                    | 23.49                                   | 24.41                                    | 22.54                                      | 降雨使低速区的<br>$\sigma^\circ$ 增强 |

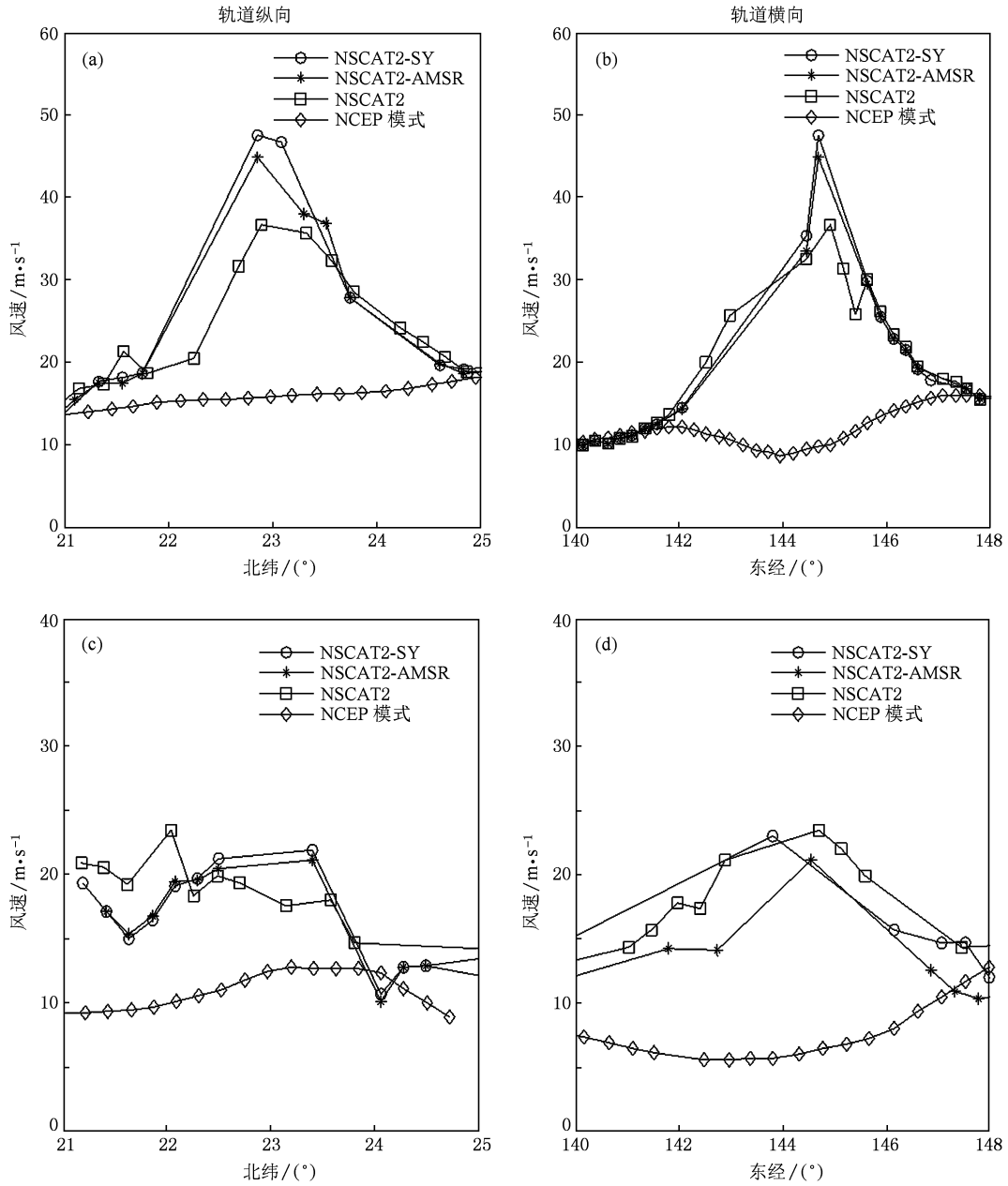


图 8 以台风眼为中心沿着和垂直轨道方向风速分布图 (a),(b)为 QuikSCAT 第 37796 轨道“摩羯”台风,(c),(d)为“象神”台风(不考虑降雨作用利用 NSCAT2 GMF 反演的风场用 NSCAT2 表示,采用 SY 降雨模型结合 NSCAT2 GMF 反演的风场用 NSCAT2 + SY,采用 AMSR 降雨模型结合 NSCAT 2GMF 反演的风场用 NSCAT2 + AMSR 表示)

对于“摩羯”台风,考虑降雨影响的反演结果更接近台风报文资料,结合图 2(n)和(q)SSM/I 降雨率和 QuikSCAT 亮温分布,可见台风眼南侧降雨率比北侧降雨率要高,但是反演的风速比台风眼北侧要低,反映了降雨对高风速区域  $\sigma^\circ$  观测值的削弱作用.对于“象神”台风,考虑降雨影响的反演风场,其最大风速与未考虑降雨影响的结果几乎一致,但是整体风场风速明显减弱,尤其是在台风眼南侧.结合图 2(o)和(r)降雨率大值区域,验证了降雨辐射传输模型的降雨对低风速区域  $\sigma^\circ$  观测值的增强作用.

图 8(a)—(d)描绘了以台风眼为中心,沿 QuikSCAT 第 37796 和 37897 轨道纵向和横向的风速分布.综合图 2 和 7,由于台风中高风速区域降雨率大多数小于 10 mm/h,通过第 4 节分析可知,在降雨率小于 10 mm/h 时,SY 和 AMSR 模型中的降雨增强项  $\sigma_{\text{eff}}$  相一致,而 AMSR 模型的削弱项  $\alpha_{\text{att}}$  则大于 SY 模型的削弱项  $\alpha_{\text{att}}$ ,因而 NSCAT2 + SY 反演得到的风速大于 NSCAT2 + AMSR 反演得到的风速.

## 7. 总结与讨论

本文基于降雨率的作用,构建了现有的 GMF + RAIN 模型,在此基础上,利用 2DVAR + MSS 模糊去除方法对 QuikSCAT 散射计资料实施了台风风场反演.主要结论是:

1) 验证了利用散射计的  $\sigma^\circ$  分布特征确定台风中心位置的可行性;

2) 引进降雨辐射传输模型(SY 和 AMSR 模型),与 NSCAT2 GMF 结合构建适合降雨情况的 GMF + RAIN,定量刻画了降雨对散射计雷达后向散射截面值的作用,在实际台风风场反演中验证了改进的 GMF + RAIN 的有效性;

3) 针对散射计资料的台风风场反演,在改进的 GMF + RAIN 基础上,利用 2DVAR + MSS 模糊去除方法,设计并实施了新的散射计资料台风风场处理流程,反演结果与 JMA 台风报文资料和 NCEP 模式风场对比分析,充分验证了新的处理流程的有效性和可行性,也进一步验证了 2DVAR + MSS 模糊去除方法的有效性;

4) 在研究降雨对雷达后向散射截面值的作用时,考虑了降雨率和降雨层厚度的影响,如何更细致地刻画降雨对雷达后向散射截面值的影响,在降雨辐射传输模型中引入新的降雨参数,进而改进降雨辐射传输模型,这是下一步继续研究的问题.希望本文的研究能为散射计资料在台风研究中的应用提供有效的实用价值.

感谢荷兰皇家气象学会(KNMI)为本文的研究提供了基本的散射计反演程序及 QuikSCAT 散射计近实时资料,感谢 KNMI 的 Anton Verhoef 研究员在程序运行及资料处理方面的热情帮助和讨论.

- 
- [1] Bender M A, Ross R J, Tuleya R E, Kurihara Y 1993 *Mon. Weather Rev.* **121** 2046
- [2] Zhou Y S, Ran L K 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1366 (in Chinese) [周玉淑、冉令坤 2010 物理学报 **59** 1366]
- [3] Liu W T, Hu H, Yueh S 2000 *EOS T. Am. Geophys. Un.* **81** 253
- [4] Marcos P A 2002 *Ph. D. Dissertation* (Barcelona; University of Barcelona)
- [5] Stoffelen A, Anderson D 1997 *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **123A** 491
- [6] Courtier P, Thepaut J N, Hollingsworth A 1994 *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **120** 1367
- [7] Wentz F J, Spencer R W 1998 *J. Atmos. Sci.* **55** 1613
- [8] Zou J H, Lin M S, Pan D L, Chen Z H, Yang L 2009 *J. Remote Sens.* **13** 847 (in Chinese) [邹巨洪、林明森、潘德炉、陈正华、杨 乐 2009 遥感学报 **13** 847]
- [9] Nie C, Long D G 2007 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **45** 621
- [10] Liu X C, Gao T C, Qin J, Liu L 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2156 (in Chinese) [刘西川、高太长、秦 健、刘 磊 2010 物理学报 **59** 2156]
- [11] Huang S X, Zhao X F, Sheng Z 2009 *Chin. Phys. B* **18** 5084
- [12] Zeng L, Brown R 1998 *J. Appl. Meteorol.* **37** 1412
- [13] Yueh S H, Stiles B W, Liu W T 2003 *IEEE T. Geosci. Remote* **41** 2616
- [14] Nielsen S N 2007 *M. S. Dissertation* (Brigham; Brigham Young University)
- [15] Huang S X, Cai Q F, Xiang J, Zhang M 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3022 (in Chinese) [黄思训、蔡其发、项 杰、张 铭 2007 物理学报 **56** 3022]
- [16] Cao X Q, Huang S X, Du H D 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1984 (in Chinese) [曹小群、黄思训、杜华栋 2008 物理学报 **57** 1984]
- [17] Huang S X, Wu R S 2005 *Mathematical and Physical Problems in Atmospheric Sciences* (2nd Ed.) (Beijing: Chinese Meteorology)

- logical Press) p460 (in Chinese) [黄思训、伍荣生 2005 大气科学中的数学物理基础(第二版)(北京:气象出版社)第460页]
- [18] Sheng Z, Huang S X 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1734 (in Chinese) [盛 峥、黄思训 2010 物理学报 **59** 1734]
- [19] Zhang L, Huang S X, Liu Y D, Zhong J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2889 (in Chinese) [张 亮、黄思训、刘宇迪、钟 剑 2010 物理学报 **59** 2889]

## New GMF + RAIN model based on rain rate and application in typhoon wind retrieval\*

Zhang Liang Huang Si-Xun<sup>†</sup> Zhong Jian Du Hua-Dong

(*Institute of Meteorology, University of Science and Technology of People's Liberation Army, Nanjing 211101, China*)

(Received 7 April 2010; revised manuscript received 5 May 2010)

### Abstract

This paper firstly selects three typhoon cases (SHANSHAN, YAGI, XANGSANE) which occurred in 2006, and analyzes the distribution characteristic of the normalized radar cross-section (NRCS,  $\sigma^{\circ}$ ), which were received by QuikSCAT scatterometer in the case of rain effect. Secondly, in order to account for the effects of rain to  $\sigma^{\circ}$ , we follow the theory of atmospheric radiation transfer and introduce two different types of rain radiation transfer models (called SY model and AMSR model, respectively), then combine these two models with NSCAT2 GMF to produce an improved GMF suitable for the case of rain effect (called GMF + RAIN). Lastly, based on this GMF + RAIN, we use the ambiguity removal method which integrates 2DVAR (two-dimensional variational assimilation) with MSS (multiple solution scheme) to retrieve the YAGI and XANGSANE typhoon wind fields which had different intensity. The new approach which combines GMF + RAIN with 2DVAR + MSS improves the result, which further verifies the effectiveness of GMF + RAIN. This new approach also makes the scatterometer data more effective and valuable for application in the research of typhoon.

**Keywords:** scatterometer, typhoon wind field, rain rate, radiation transfer model

**PACC:** 9260Q, 9265D

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 40775023).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: huangexp@yahoo.com.cn