

海面风场融合技术综述

柳婧, 宋晓姜, 王彰贵

(国家海洋环境预报中心, 北京 100081)

摘 要: 从理论基础和研究进展两方面简要地介绍了制作海面风场数据集的几种多源资料融合方法, 并从融合效果、可操作性等方面分析了各方法的优缺点, 同时还介绍了目前国内外常用的风场融合资料产品。最后对当前与未来海面风场融合技术的发展作了简要总结和展望。

关键词: 海面风场; 资料融合; 综述

中图分类号: P732.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2018)03-0081-07

1 引言

中国是世界上受海洋灾害影响最严重的地区之一。海洋灾害与风场密切相关, 其中, 台风引起的风暴潮灾害造成的损失最为严重^[1], 其次为台风、寒潮相伴生的海浪灾害, 这两类海洋气象灾害造成的经济损失达总灾害损失的80%以上^[2]。

常规观测和非常规观测是目前观测海面风场的两类主要方法。其中, 常规观测主要是通过浮标、船舶、沿岸及岛屿自动气象站等传统手段获取观测资料^[3]。由于海洋环境恶劣, 仪器耗费高等原因, 我国近海观测网多设置于沿海一带且数量有限, 分布稀疏, 无法获得大面积同步、长时间序列的观测资料, 缺乏对海面风场整体性、系统性的认知^[4]。20世纪以来, 随着地球轨道卫星及遥感技术的快速发展, 卫星遥感、雷达探测等非常规观测资料日益增多, 为海面风场的全球观测提供了一种行之有效的技术手段。目前可以观测海面风的卫星传感器有微波辐射计、微波高度计和微波散射计, 其中散射计和辐射计具有全天候、全天时、高覆盖度的优点^[5], 而高度计则沿轨分辨率高、误差小。与传统观测手段相比, 卫星遥感具有大面积、准同步和全天候的观测能力。但卫星资料由于其采样特点, 会产生数据空白区, 无法提供时间、空间上连续的海面

风场数据。

由于上述观测资料都有各自的特点和误差特征, 并且多源数据之间时空分辨率不统一, 海面风场融合应运而生。在中国近海区域内, 通过融合方法把多源数据结合起来, 形成覆盖近海区域的高分辨率的时间空间连续的风场数据集, 这将对近海区域研究以及海洋预报都有着重要的意义。目前, 大气和海洋科学中常用的融合方法在海温融合中已成功应用^[6-8]。然而, 由于风场变化比海温变化更加迅速, 并且风作为矢量, 其融合过程也比海温融合考虑的问题要更多、更复杂, 对海面风场融合的理论研究和业务应用相对较少。因此本文针对目前海面风场融合中常用的几种方法进行介绍, 简要阐述其优缺点以及在实际研究中的应用, 并且展望了未来海面风场融合技术的发展。

2 海面风场融合的基本方法

目前国内外用于数据融合的算法比较多, 发展也较为成熟, 主要有反距离加权法、克里金插值法、最优插值法、卡尔曼滤波法、变分同化法、贝叶斯估计法、模糊逻辑法等。由于海面风场时空变化大, 数据冗杂, 因此对计算机的存储和计算能力要求较高。目前, 国内外常用于风场数据融合的方法主要

收稿日期: 2017-11-03; 修回日期: 2018-02-06。

基金项目: 国家重点研究计划(2016YFC1402703)。

作者简介: 柳婧(1993-), 女, 硕士在读, 主要从事资料融合研究。E-mail: 1713146692@qq.com

有逐步订正法、时空加权分析法、最优插值法以及变分同化法^[9-12]。下文将对上述4种方法进行介绍。

2.1 逐步订正法(SCM)

逐步订正法作为最早应用于数值天气预报业务的客观分析方法,是由瑞典科学家 Bergthorsson 等^[13]以及美国 NWS 的 Cressman^[14]所发展的。其基本原理是分析场由分析增量与初估背景场相加得到^[15]。每一个分析格点上的分析增量是其影响半径范围内各个测站上观测值与初估值的偏差,即观测增量的加权平均,一般观测权重与观测位置和格点之间距离成反比。不断缩小影响半径,逐次订正,直到分析场逼近实际资料为止。该方法的表达式可写为:

$$x^a(j) = x^b(j) + \Delta x(i, j) \quad (1)$$

$$\Delta x(i, j) = \frac{\sum_1^n w(i, j) [y(i) - X^b(i)]}{\sum_1^n w(i, j)} \quad (2)$$

式中: $x^a(j)$ 为格点 j 的分析值, $x^b(j)$ 为格点 j 的初估值。 $x^b(i)$ 为插值到观测点 i 上的初估场信息, $y(i)$ 为对应的观测值; $w(i, j)$ 为权重函数,通常由经验得到。逐步订正法中常用的经验权重函数主要有两种^[12]: 一种是由 Cressman 定义的权重 $w(i, j) = \max\left(0, \frac{R^2 - r^2}{R^2 + r^2}\right)$, 另一种是由 Barnes 定义的权重 $w(i, j) = \max\left(0, e^{-\frac{4r^2}{R^2}}\right)$, 其中 r 为观测点 i 与格点 j 之间的距离, R 为给定的影响半径(常数)。目前,国际上通常采用 Cressman 定义的权重函数。

逐步订正法将观测值逐次循环订正到背景场,而背景场的引入为资料空白处提供了估值,解决了多项式拟合中的不连续问题。且预先经验设定的权重函数使得客观分析方法具有可操作性^[16]。因此,尽管逐步订正法是一种经验方法,但是它方法简单,计算量也相对较小,常被用于融合海面风场资料。凌征等^[17]采用 Cressman 插值方法将遥感风场资料和沿岸气象站风场资料有机结合起来,获得了我国近海时空分辨率较高的风场。高健等^[18]利用 Cressman 算法分别对辽宁、山东、江苏和浙江4省近海区域内的 QuikSCAT 测风数据与地面气象测风数

据, WindSAT 测风数据与地面气象站测风数据进行插值融合。

但是,逐步订正法是单点分析方法,观测的随机误差可能在分析中产生非物理特性,也缺乏实际系统中所应包含的基本属性,如区域间的平滑^[16]。且逐步订正法仅使用当前的观测数据,时间上的记忆性差,其权重函数由经验估计获得,仅依赖测站到格点的距离。因此,在实际海面风场融合中,对于观测资料稀疏的地区仍有较大的缺陷。

2.2 时空加权分析法

克里金插值法(Kriging 插值法)又称空间自协方差最佳插值法,它是以南非科学家 D.G.Krige 的名字命名的一种在有限区域内对区域化空间变量进行最优无偏估计的插值方法^[18]。由于传统的 Kriging 插值法在融合过程中只考虑了数据之间的空间相关性,而没有考虑不同数据在时间维上的变化,因此在气象资料融合中应用不多。在 Kriging 插值法的基础上,借鉴了 Cressman 插值法的优点,得到了一种新的融合算法——时空加权分析法。时空加权分析法是一种综合考虑时间和空间插值的插值方法。其插值公式如下:

$$u_n = \frac{\sum_{k=1}^N w_k u_k}{\sum_{k=1}^N w_k} \quad (3)$$

$$w_k = \frac{2 - \left[\frac{(x_k - x_0)^2 + (y_k - y_0)^2}{R^2} + \frac{(t_k - t_0)^2}{T^2} \right]}{2 + \left[\frac{(x_k - x_0)^2 + (y_k - y_0)^2}{R^2} + \frac{(t_k - t_0)^2}{T^2} \right]} \quad (4)$$

式中: u_n 是插值后的估计值,是由时空影响半径范围内 N 个观测值的线性组合估计得出。下标 k 表示观测数据点, u_k 为在 k 点的观测值, w_k 为观测点 k 的权重,是由数据点到网格插值格点在时间和空间上的标准化距离决定的。 (x_k, y_k, t_k) 为观测点 k 的时空坐标,下标 0 则表示插值格点, (x_0, y_0, t_0) 为格点 0 的时空坐标。 R 为距离影响半径, T 为时间影响半径, N 为时间和空间数据窗口内的观测数据点个数。在时空加权插值过程中,我们要注意到空间影响半径 R 和时间影响半径 T 的选择,以防止时

空窗口过大而导致混合风场过度平滑,从而失去一些中小尺度信息^[19]。

时空加权分析法能在空间信息缺失时使用时间信息替换,在时间信息缺失时使用空间信息替换,充分利用卫星观测数据^[20]。同时,该方法中既包含了Kriging法对空间数据的插值精度,又继承了Cressman法考虑时间变化的优点,综合考虑了数据之间空间维与时间维上的变异性。由于时空加权分析法公式比较简单,最适合结点散乱、非网格点的卫星风场数据融合,因此国内外有许多学者采用该方法对海面风场进行研究。在使用时空加权分析算法对海面矢量风进行融合处理时,一般对风速数据进行标量融合,而对风向数据进行矢量融合,同时引入自适应滑动窗口来计算时间/空间半径内的有效观测点,从而提高风场融合的计算效率。Zhang等^[21-22]利用时空加权插值法对1987—2006年的SSM/I、TMI、QuikSCAT、AMSRE等多颗卫星资料获取的SSWS数据进行融合,产生了12 h、每天、每月的 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 网格化的高分辨率全球海表面风速图。而Zou等^[23]则是利用时空加权分析法分别将来自散射计的风向资料和来自辐射计及散射计的风速资料进行融合,形成了时空分辨率为25 km, 6 h的全球海表面风矢量场,并利用NDBC浮标资料进行验证。刘宇昕等^[20, 24]则利用时空加权分析法对NCEP再分析数据和卫星散射计数据进行插值,构建了6 h、 0.25° 时空分辨率的全球海表面混合风场,并用浮标观测资料进行检验,得到了构建的混合风场与观测数据比较一致的结果。齐亚琳等^[25]利用时空插值法对HY-2卫星获取的海面风场数据结合NCEP再分析数据进行了风场融合,多源风场融合后的海面风场不仅弥补了高分辨率的HY-2卫星遥感数据不能全覆盖的不足,同时提高了NCEP数据的空间分辨率,可为两种数据更好地使用。许遐祯等^[26]对QuikSCAT风速数据与地面气象站站点的实测数据采用Kriging法、Cressman法和时空加权插值法逐一进行融合,得到 $0.01^{\circ} \times 0.01^{\circ}$ 分辨率的数据集,并利用独立站点数据进行结果检验,发现时空加权插值法与地面实测数据最为接近,精度最好。时空加权分析法虽然公式简单,对于时空分辨率较低的观测值,分析场容易被平滑,融合效果与观测点疏密及观测频率密切相关。

2.3 最优插值法(OI)

Gandin通过引入统计方法,提出基于统计估计理论的最优插值法^[27]。最优插值法是利用最小方差估计把带有误差的观测资料有机地融合到预报模式所得到的背景场,从而得到对模式初值的最优估计。在最优插值中,每一个空间网格点上的分析值是由网格点的初估值加上订正值所确定的,其订正值由一定范围内 N 个格点上已知的观测值与模式初估值的偏差加权得到,一般分析公式为:

$$x^a = x^b + w[y_o - H(x^b)] \quad (5)$$

式中: x^a 为格点分析值, x^b 为格点初估值, y_o 为观测向量, H 为观测算子,它将格点上的模式初估值通过空间插值和物理变换到观测空间,便于与观测向量相比较。在背景场和观测值都无偏和无相关,观测误差与背景误差无关的假设下,可得到最优权重矩阵 w 的表达式为:

$$W = BH^T(R + HBH^T)^{-1} \quad (6)$$

式中: B 为背景方差协方差矩阵, R 为观测误差协方差矩阵。

与逐步订正法相比,尽管最优插值也是用测站上的观测增量插值到格点上得到分析值^[28],但是其权重函数是通过使分析方差最小化来决定的。因此,最优插值法的最大改进就是在选取权重时不仅考虑了各种观测误差的自相关关系,还考虑了不同观测间的相关关系,这样权重函数包含了不同观测间误差的相互影响,不再仅仅是距离的单变量关系^[29],避免了权重选取的任意性。最优插值法的关键在于如何求权重矩阵,如果可以合理估计背景误差协方差矩阵,最优插值法就可以很简单的实施^[30]。总的来说,由于其计算量少,融合的“性价比”高^[31],业务上也经常采用最优插值法。在对海表面矢量风进行融合时,与时空加权分析法一样,最优插值法也是对风速进行标量融合,而风向则是利用径向风和纬向风分别融合得到。Rutherford等^[32]在对高度场、温度场和风场的三维结构不完全考虑的情况下,用最优插值法对三者分别进行了水平和垂直方向上的插值。Lorenc^[33]则用矩阵的形式提出了位势高度场、风场和厚度场中的多变量三维最优插值方案。Ducet等^[34]将TOPEX/Poseidon和ERS-1、ERS-2卫星高度计的数据用最优插值法进行融合,制作出

了全球高分辨率($0.25^\circ \times 0.25^\circ$)的海平面异常融合产品。国内,马艳辉^[35]对检验后的 ASCAT 散射计沿轨数据利用最优插值法进行网格化,得到每天的网格化海面风场数据。Yan 等^[36]则通过最优插值法将来自多个散射计和辐射计的卫星风场与 NCEP/NCAR 的再分析资料进行融合,建立了从 2000—2015 年的 0.25° 网格、6 h 的全球海面矢量风数据集。最优插值法虽然融合“性价比”高,但它也存在一些不可忽视的缺陷^[37]:首先,最优插值法假设了背景误差协方差矩阵 B 为静态;其次为了合理估计背景误差协方差 B ,需要求解一个 $P \times P$ 阶矩阵的逆矩阵(P 为观测个数);此外,观测变量与分析变量之间必须满足线性关系,这样的限制条件直接影响了最优插值法对大量新型遥感观测资料的直接同化应用能力。

2.4 变分同化法

随着卫星遥感技术的快速发展,为了更好地利用这类新型观测资料,20 世纪 80 年代中期,变分同化方法逐渐发展。变分同化法以数值模式为动力学限制,将资料融合简化为对表征分析场和观测场及背景场之间偏差的目标函数的极值求解问题^[38]。若将目标函数定义在三维空间(不包括时间维)上,则为三维变分方法,若定义在四维空间,则对应四维变分方法^[39]。由于四维变分方法需要求解预报方程的伴随方程,计算量较大,目前在资料融合的业务化应用中相对较少。

三维变分(3DVAR)的理论基础是统计中的最大似然估计,它主要是通过分析变量与背景场及观测场之间的距离最小化来得到最优分析场^[40]。其距离的代价函数可以表示为:

$$J(x) = J_b + J_o = \frac{1}{2}(x - x^b)^T B^{-1}(x - x^b) + \frac{1}{2}[y_o - H(x)]^T O^{-1}[y_o - H(x)] \quad (7)$$

式中: x 为分析变量, x^b 为背景场向量, B 为背景误差协方差矩阵, y_o 为观测向量, H 为观测算子, O 为观测误差协方差矩阵。三维变分就是求解上式取得最小值时的分析状态的迭代解。由于直接求解(7)式计算量大,通常利用目标函数的梯度信息进行求解,其梯度可以表示为:

$$\nabla J(x) = B^{-1}(x - x^b) - H^T O^{-1}(y_o - H(x)); \quad (8)$$

所求的分析变量即为满足梯度为 0 的 x 。3DVAR 的解实际上是通过共轭梯度法或有限内存的拟牛顿迭代算法求解的^[9]。

相较于上述 3 种融合方法,三维变分方法的优点主要在于:不仅可以摆脱观测场与背景场之间存在线性关系的限制,能够同化不同来源的观测资料,而且其进行三维全局优化,避免了不同资料在选择区边界上出现跳跃,还避免了直接计算增益矩阵,只需要计算切线算子和伴随算子^[41]。此外,3DVAR 还可以引入如平衡项或平滑项等的额外弱约束条件。因此,三维变分法由于其经济可行以及统计可靠等特点,目前在海面风场资料融合应用方面最为广泛。在利用变分方法对海面风矢量场进行融合时,目标函数除了考虑观测场约束和背景场约束之外,还要考虑风分量的拉普拉斯算子、涡度和散度的守恒等先验平滑约束以及动态约束。国外学者 Chao 等^[42]采用变分方法将加州中部海岸测得的 QuikSCAT 散射计风场数据与区域海气耦合预报模式(COAMPS)输出的海面矢量风场进行融合,将融合数据与独立的浮标观测数据进行精度检验,发现融合后的数据能揭示小尺度的细微结构,并且具有更高的相关性和更小的均方根误差。Altas 等^[43]以欧洲中心中期预报产品(ECMWF)为背景场,利用变分分析法融合所有来自 RSS 的风场资料和可用的传统观测资料,形成一个连续的 25km 分辨率的全球海表面风矢量数据集,即早期的交叉校验多平台合成数据集(CCMP 风场融合产品)。CCMP 风场融合产品延续了原来的变分融合方法,仅添加新的可用传感器以及更高分辨率的背景模型风场,形成了从 1987 年 7 月—2016 年 5 月的 25 km 分辨率,6 h 时间间隔的海洋表面矢量风场序列,是业务上最常用的 Level-3 海洋矢量风分析产品。与 CCMP 风场产品相似,OAFlux 项目(Objectively analyzed airs-sea Fluxes)开发的 0.25° 网格分辨率的日全球海面矢量风数据集,也是通过变分分析方法融合 12 个卫星传感器的风场资料,从而获得海面风的最优估计^[44]。其与 CCMP 风场产品的基本不同之处在于用于融合的卫星传感器的不同以及时间分辨率的不同。国内,项杰等^[45]则针对南海海域,利用变分同化方法,将 QuikSCAT 散射计风场资料融合到区域高分辨率数值模式中,并利用独立的观测数据对融合

效果进行了检验,得到了融合的最优分析风场。姜祝辉等^[46-47]利用变分方法实现高度计和辐射计风速的融合,并选取 Jason-1 高度计风速资料和其时空匹配的微波成像仪辐射计风速资料开展了实例试验,结果表明融合后的风场更加接近于浮标观测结果,证实了变分融合方法的有效性。李艳兵等^[48]通过变分方法将 RSS 多星融合风场产品同 NCEP 再分析资料及实测资料进行融合,获得了初步的海面风场融合产品。

三维变分方法的缺陷在于其假定了时空均匀且各向同性,观测资料与分析变量在时间窗口内是静止的^[49],后一时刻的资料无法用于订正前一刻的结果,因此 3DVAR 的解在时间上是不连续的。

3 总结与展望

本文从海面风场融合方法的角度简述了各个方法的理论基础和研究进展,上述介绍的4种方法从早期的客观分析法如逐步订正法、时空插值法,到基于统计估计理论的最优插值法和基于最优控制理论的变分同化法,都能够较好地解决大尺度海面风场融合问题。在业务化应用过程中,海面风场融合方法的选择主要取决于观测资料的相对质量以及可用的计算资源。虽然近年来多源数据融合技术获得了长足的进步,但由于我国对海面风场融合的研究起步较晚,目前风场融合的主流方法还局限于 OI 和 3Dvar。在具体的融合过程中,也存在以下几个方面的问题:(1)海流对海面风场的影响^[44]:由于卫星反演的风代表相对运动的海洋表面的风,当海流与风向相同时,卫星风速会比实际风速偏低,而当海表面流与风向相反时,卫星的风速则会偏高;(2)融合资料的筛选:不同卫星风场的兼容性也是融合过程中需要考虑的问题^[36]。不管是散射计还是辐射计,其风场的反演都与风力强迫产生的海面小尺度波浪的振幅有关,这些波浪构成了海表面粗糙度,从而导致卫星风场在低风速时出现风向模糊,在高风速时出现低估现象。此外,强降水也会影响卫星资料的反演,产生异常值。因此,对海面风场资料融合过程中的具体处理方法还需进一步研究和改进。相信随着对风场融合方法的深入研究和计算机硬件资源的大幅度改善,4DVAR 和卡

尔曼滤波等方法会逐渐成为国内外海洋资料融合的主要方法^[49]。

参考文献:

- [1] 张振克, 丁海燕. 近十年来中国大陆沿海地区重大海洋灾害分析[J]. 海洋地质动态, 2004, 20(7): 25-27.
- [2] 杨华庭. 近十年来的海洋灾害与减灾[J]. 海洋预报, 2002, 19(1): 2-8.
- [3] 邓婉月, 项杰, 杜华栋. 南海海面风场融合研究[C]//第32届中国气象学会年会 S18 气象卫星遥感新资料—新方法—新应用. 北京: 中国气象学会, 2015.
- [4] 刘付前, 骆永军, 王超. 应用卫星散射计资料研究中国海海面风场时空特征[J]. 环境保护与循环经济, 2009, 29(10): 37-38, 44.
- [5] 蒋兴伟, 宋清涛. 海洋卫星微波遥感技术发展现状与展望[J]. 科技导报, 2010, 28(3): 105-111.
- [6] Reynolds R W, Smith T M, Liu C Y, et al. Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature[J]. Journal of Climate, 2007, 20(22): 5473-5496.
- [7] de Pondeca M S F V, Manikin G S, Dimego G, et al. The real-time mesoscale analysis at NOAA's national centers for environmental prediction: current status and development[J]. Weather and Forecasting, 2011, 26(5): 593-612.
- [8] 韩梅, 魏亮. 最优插值法在海温数据同化中的应用研究[J]. 海洋技术, 2008, 27(4): 90-92.
- [9] Kalnay E. Atmospheric modeling, data assimilation and predictability[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003: 115-118.
- [10] Evensen G. Data assimilation—the ensemble Kalman filter[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009: 27-37.
- [11] 乔方利, Zhang S Q. 现代海洋/大气资料同化方法的统一性及其应用进展[J]. 海洋科学进展, 2002, 20(4): 79-93.
- [12] 邹晓蕾. 资料同化理论和应用(上)[M]. 北京: 气象出版社, 2009: 14-17.
- [13] Bergthórsson P, Döös B R. Numerical weather map analysis[J]. Tellus, 1955, 7(3): 329-340.
- [14] Cressman G P. An operational objective analysis system[J]. Monthly Weather Review, 1959, 87(10): 367-374.
- [15] Bouttier F, Courtier P. Data assimilation concepts and methods March 1999[C]//ECMWF Meteorological Training Course Lecture Series. Bracknell: ECMWF, 2002: 1-59.
- [16] Gilchrist B, Cressman G P. An experiment in objective analysis[J]. Tellus, 1954, 6(4): 309-318.
- [17] 凌征, 王桂华, 陈大可, 等. 中国近海风场融合[C]//国家海洋信息. 中国“数字海洋”论坛论文集. 北京: 国家海洋信息中心, 2006: 90-94.
- [18] 高健. 多源测风资料融合技术研究[D]. 杭州: 杭州师范大学, 2015.
- [19] Zeng L X, Levy G. Space and time aliasing structure in monthly mean polar-orbiting satellite data[J]. Journal of Geophysical

- Research: Atmospheres, 1995, 100(D3): 5133-5142.
- [20] 刘宇昕, 张毅, 王兆徽, 等. 基于 ASCAT 微波散射计风场与 NCEP 再分析风场的全球海洋表面混合风场[J]. 海洋预报, 2014, 31(3): 10-18.
- [21] Zhang H M, Reynolds R W, Smith T M. Adequacy of the in situ observing system in the satellite era for climate SST[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2006, 23(1): 107-120.
- [22] Zhang H M, Reynolds R W, Bates J J. Blended and gridded high resolution global sea surface wind speed and climatology from multiple satellites: 1987-present[C]//Proceedings of the 14th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography. Atlant: American Meteorological Society, 2006: 2-23.
- [23] Zou J H, Lin M S, Zou B, et al. Fusion of sea surface wind vector data acquired by multi-source active and passive sensors in China sea[J]. International Journal of Remote Sensing, 2017, 3(23): 6477-6491.
- [24] 刘宇昕. 星载微波散射计数据和数值模式产品海面风场混合分析研究[D]. 北京: 国家海洋环境预报中心, 2013.
- [25] 齐亚琳, 林明森. 数据融合技术在海洋二号卫星数据中的应用[J]. 航天器工程, 2012, 21(3): 117-123.
- [26] 许遐祯, 高健, 张康宇, 等. 基于多源数据的中国近海风场融合方法研究[J]. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2016, 15(3): 325-330.
- [27] Gandin L S. Objective analysis of meteorological fields[M]. Washington, DC: Israel Program for Scientific Translations, 1965.
- [28] 张爱忠, 齐琳琳, 纪飞, 等. 资料同化方法研究进展[J]. 气象科技, 2005, 33(5): 385-389, 393.
- [29] 潘旸, 沈艳, 宇婧婧, 等. 基于最优插值方法分析的中国区域地面观测与卫星反演逐时降水融合试验[J]. 气象学报, 2012, 70(6): 1381-1389.
- [30] 官元红, 周广庆, 陆维松, 等. 资料同化方法的理论发展及应用综述[J]. 气象与减灾研究, 2007, 30(4): 1-8.
- [31] 杨晓霞, 沈桐立, 徐文金, 等. 最优插值客观分析方法[J]. 南京气象学院学报, 1991, 14(4): 566-574.
- [32] Rutherford I D. An operational three-dimensional multivariate statistical objective analysis scheme[C]//Proceedings of JOC Study Group Conference on Four-Dimensional Data Assimilation. Paris: WMO/JCSU, 1976: 98-111.
- [33] Lorenc A C. A global three-dimensional multivariate statistical interpolation scheme[J]. Monthly Weather Review, 1981, 109(4): 701-721.
- [34] Ducet N, Le Traon P Y, Reverdin G. Global high resolution mapping of ocean circulation from TOPEX/Poseidon and ERS-1 and -2[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2000, 105(C8): 19477-19498.
- [35] 马艳辉. 基于散射计数据的南极周边海域海面风场特征研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [36] Yan Q S, Zhang J, Meng J M, et al. Use of an optimum interpolation method to construct a high-resolution global ocean surface vector wind dataset from active scatterometers and passive radiometers[J]. International Journal of Remote Sensing, 2017, 38(20): 5569-5591.
- [37] 王跃山. 客观分析和四维同化——站在新世纪的回望(II)客观分析的主要方法(1)[J]. 气象科技, 2001(1): 1-9.
- [38] 林行, 高山红, 黄容. 大气数据同化方法的研究与应用进展[J]. 山东气象, 2004, 24(4): 16-18.
- [39] Lorenc A C. Analysis methods for numerical weather prediction[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1986, 112(474): 1177-1194.
- [40] 李宏, 徐建平. 资料同化技术的发展及其在海洋科学中的应用[J]. 海洋通报, 2011, 30(4): 463-472.
- [41] 吴新荣, 王喜冬, 李威, 等. 海洋数据同化与数据融合技术应用综述[J]. 海洋技术学报, 2015, 34(3): 97-103.
- [42] Chao Y, Li Z J, Kindle J C, et al. A high-resolution surface vector wind product for coastal oceans: blending satellite scatterometer measurements with regional mesoscale atmospheric model simulations[J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(1): 13-1-13-4.
- [43] Atlas R, Hoffman R N, Ardizzone J, et al. A cross-calibrated, multiplatform ocean surface wind velocity product for meteorological and oceanographic applications[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2011, 92(2): 157-174.
- [44] Yu L S, Jin X Z. Buoy perspective of a high-resolution global ocean vector wind analysis constructed from passive radiometers and active scatterometers (1987-present) [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2012, 117(C11): C11013.
- [45] 项杰, 王慧鹏, 王春明, 等. 南海海面风场变分融合的初步研究[J]. 热带气象学报, 2015, 31(2): 153-160.
- [46] 姜祝辉, 黄思训, 杜华栋, 等. 利用变分结合正则化方法对高度计风速资料调整海面风场的研究[J]. 物理学报, 2010, 59(12): 8968-8977.
- [47] 姜祝辉, 游小宝, 肖义国. 高度计风速与辐射计风速的变分融合研究[J]. 物理学报, 2013, 62(12): 129202.
- [48] 李艳兵. 立体观测指定云高与利用卫星资料计算海上风场[D]. 南京, 解放军理工大学, 2006. [49] 熊春晖, 张立凤, 关吉平, 等. 集合—变分数据同化方法的发展与应用[J]. 地球科学进展, 2013, 28(6): 648-656.
- [49] Daley R. Atmospheric data analysis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1991.

Review of fusion technology of sea surface wind

LIU Jing, SONG Xiao-jiang, WANG Zhang-gui

(National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081 China)

Abstract: This paper briefly introduces several methods of multi-source fusion of sea surface wind from both the theoretical basis and research progress. The advantages and disadvantages of each method from the aspects of fusion effects and operability were analyzed. It also introduces domestic and foreign commonly used wind field fusion data products at present. Finally, a brief summary and outlook for the current and future development of the sea surface wind field fusion technology was made.

Key words: sea surface wind; data fusion; review