

海洋气象观测系统在热带气旋 资料同化中的应用

万齐林^{1,2}, 何金海¹

(1. 南京信息工程大学, 南京 210044;

2. 中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广州 510080)

[摘要] 在分析南海海洋气象观测现状和发展规划的基础上,发现有必要发展合适的资料同化技术,提高资料利用效率,才能克服海洋气象资料相对缺乏来提升数值预报水平。利用多尺度/分块逐批资料同化技术,进行热带气旋资料同化试验。结果表明:多尺度/分块逐批资料同化技术能够适应具有多尺度特征的热带气旋资料同化,较好地满足热带气旋资料同化对流依赖背景误差协方差同化技术的要求,能够较合理高效地利用海洋气象观测资料。基于多尺度/分块逐批资料同化技术,加强海洋气象观测系统的应用,是形成高质量热带气旋初值环流的一种有效途径。

[关键词] 海洋气象观测;资料利用效率;多尺度/分块逐批资料同化;热带气旋初值环流

[中图分类号] P467;P732 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2012)10-0033-10

1 前言

热带气旋(TC)是发生在热带或副热带洋面上的低压涡旋,按国家标准(GB/T 19201—2006)划分为6个强度等级,包括超强台风(Super TY)、强台风(STY)、台风(TY)、强热带风暴(STS)、热带风暴(TS)、热带低压(TD)。在公众服务和口语中,有时把热带风暴、强热带风暴、台风、强台风和超强台风统称为“台风”。台风是一种破坏力很强的灾害性天气系统,深受政府、公众和各类机构的关注。

2011年第9号台风“梅花”,于7月28日14时在西北太平洋洋面上生成,8日18时30分左右在朝鲜西北沿海登陆。在这11天内,“梅花”与人类“捉起了迷藏”,登陆地点从最初预测的浙江到江苏一带沿海,不断变更到山东半岛、辽东半岛,最终在朝鲜西海岸登陆。“梅花”数天之内几次变身,从强台风到超强台风,又减弱为强台风,又再次增强,反复变化多次,移动路径飘忽不定。但是,为了防御这个可能是近十几年来最严重的台风,相关地区和部

门纷纷拉响了警报:浙闽沪转移61万余人,山东转移36万余人,辽宁转移近13万人,随着中央气象台对“梅花”编号的解除,人们才发现,“梅花”是一个惊动我国东部海岸地区的“玩笑”。

无独有偶,2011年在美国,飓风(大西洋地区对台风的称谓)“艾琳”对人们的影响不亚于“梅花”。“艾琳”引起美国东部沿海十个州先后宣布进入紧急状态,并下令将约230万居民进行紧急疏散,这是美国历史上第一次因自然灾害进行如此大规模的疏散行动。纽约市还在历史上第一次因为应对自然灾害而宣布地铁停运。尽管美国对“艾琳”应对充分,将损失减少到最低。但是,由于“艾琳”预报强度、路径同实况存在偏差,“艾琳”的实际影响远没有预测的严重,导致美国社会产生对政府过度防御的质疑。不过,正如纽约市长布隆伯格解释说,对飓风这类可进行预测的自然灾害,预防总是比疏忽好,尽管预测有时不够准确。

事实确实如此,人们对台风活动的掌控还远远不足,台风预报在国际上是公认的难题。多位美国

[收稿日期] 2012-06-20

[基金项目] 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006016);广东省自然科学基金创新团队项目(8351030101000002)

[作者简介] 万齐林(1965—),男,湖北鄂州市人,研究员,主要从事数值天气预报工作;E-mail:qlwan@gmcc.gov.cn

气象学家面临记者质疑时说,监控飓风的动向是一项非常复杂的科学活动,由于决定飓风变化的因素太多,需要大量数据和合理模型作支撑,目前还没有国家能保证预测的准确度,甚至在预测飓风的路径上也无法做到完全精确。究其原因,主要是所获得的海洋气象观测资料较少,台风又主要在海上活动,以至于缺乏对台风变化的认识,特别是预测台风活动必要的观测信息不充足或观测信息利用效率不高,制约了台风预报能力的提升。当前的天气预报非常依赖于数值天气预报,而热带气旋数值预报又很大程度上取决于其模式的初值,热带气旋初值环流的好坏对其路径、强度和风雨预报技巧水平有重要影响。资料同化是合理形成热带气旋初值环流的必要手段,提高资料同化能力、增强资料利用效率,从而改善热带气旋初值环流,是当前提高热带气旋预报水平的重要途径。

目前,国际上用得较多的资料同化方法有变分方法和集合卡尔曼滤波方法,由于变分方法和集合卡尔曼滤波方法的互补性,变分-集合卡尔曼滤波混合方法成为国际上另一个新的发展趋势。变分同化方法、集合卡尔曼滤波方法、变分-集合卡尔曼滤波混合同化方法也是当前获取热带气旋初值环流的主要方法。a. 变分同化方法^[1~6]:构建分析场与观测及背景场之间偏差的目标函数,通过求解该目标函数的极小化问题,得到最优分析值。20世纪90年代开始,变分同化方法在少数国家实现了业务化,并逐步成为当前国内外资料同化方法发展的主流。b. 集合卡尔曼滤波同化方法^[7~13]:利用集合预报成员进行统计得到背景误差协方差后再进行最优分析,从而实现了背景误差协方差的更新。近十年来,这种方法显示了其强大的活力。c. 集合-变分混合同化方法^[14~19]:它是资料同化部分采用变分同化,背景误差协方差用集合预报估计,这样,背景误差协方差既包含大气流型的信息,又能在较少集合成员条件下进行。目前这种方法的使用越来越多。通过分析可以发现,这3种方法各有不足之处:三维变分同化方法一般假设背景误差协方差不随时间变化(气候态),在空间上是一个预先给定的高度模型化的、各向同性的误差结构;四维变分同化方法计算量大,需要多次积分切线性和伴随模式,实现难度也较大,其背景误差也只是隐式地发展而不能保证合理地发展;对于集合卡尔曼滤波同化方法,若集合成员不是足够多、集合预报成员对热带气旋的预

报过于离散或涡旋中心位置存在系统性偏离,估计出的背景误差协方差并不准确,既可能产生虚假相关而导致观测资料不能被同化,也可能因矩阵不满足秩而导致最优化失败;变分-集合卡尔曼滤波混合同化方法在一定程度上弥补了前面二者的不足,但是没有根本上消除它们的不足。对热带气旋这样一个强涡旋系统的资料同化,目前国内外没有较好地解决问题,正处于积极探索阶段。

所以,为了同化海洋气象观测资料而获得优质的热带气旋初值环流,进而改善热带气旋分析、研究和预报,必须进一步探索适合热带气旋环流基本特征的资料同化技术。本文尝试利用“多尺度/分块逐批资料同化技术”^[20],融合海洋气象观测形成热带气旋初值环流。

2 海洋气象观测的特点

正如 CBLAST (coupled boundary layer air-sea transfer, 耦合边界层海气交换)-Hurricane 等科学试验的分析表明:海气相互作用对热带气旋路径和强度有显著影响^[21,22]。所以,获取热带气旋边界层结构及相应海气相互作用的信息,对改善热带气旋分析和预报有重要作用。正因为如此,国内外非常重视海洋气象的观测,中国气象局正在逐步建立包括海洋气象观测平台、岸基海洋气象观测站、海岛海洋气象观测站、浮标气象观测站、船舶气象观测站、海上石油平台气象观测站等,并同气象卫星观测等组成海洋气象信息监测业务观测网。

华南区域各省气象部门也一直以南海海洋气象业务发展为重点,为此,制订了《南海海洋气象业务发展专项规划(2010—2020年)》。该规划将推进南海海洋气象观测系统建设(见图1)。南海海洋气象观测系统以海洋气象综合观测基地为核心,建设地基气象观测站网及卫星遥感、飞机探测相互补充的南海海域立体气象监测站网,形成一个综合监测网(“882”工程)。建设内容包括:在南海沿岸及岛屿建设八个海洋气象综合观测基地;完善8个地基气象观测站网,即区域气象自动站网、海上浮标观测站网、新一代天气雷达站网、GPS/MET水汽观测站网、风廓线雷达站网、高频地波雷达站网、雷电监测站网、大气成分观测站网;建立两个监测系统,即卫星遥感、飞机探测系统组成的南海海洋气象综合监测网。对于观测资料的同化应用而言,海洋气象观测的主要特点如表1所示:海面气象要素和海温的观

测点相对较多,其他观测在空间上非常稀少;卫星观测的范围分布较广,但分辨率不高,观测信息在垂直方向分离较困难,也可能存在系统性偏差。所以,在未来一段时期,尽管海洋气象观测越来越丰富,将逐步满足海洋气象的监测需求,但是,对于数值天气预报的资料同化分析来说,依旧缺乏四维的全气象要素的观测,特别是全气象要素立体观测的分辨率远远达不到精准数值预报的需求,这主要是由于海上气象观测的高难度造成的。

从海洋气象观测的特点来看,要进一步适应热带气旋精准分析和预报的要求,必须克服海洋气象观测在立体观测方面的不足,这要求发展合适的资料同化技术,提高海洋气象观测的利用效率。合理



注:源自《南海海洋气象业务发展专项规划》

图1 海洋气象观测系统示意图

Fig. 1 The diagram of marine meteorological observation system

表1 海洋气象观测特点(针对资料同化)

Table 1 The character of marine meteorological observation, applying to data assimilation

信息类型	主要观测仪器	观测要素	备注
海面气象要素	海岛自动站、浮标自动站、 石油平台自动站、船舶观测	风、温、湿、气压	观测点较多
海洋大气边界层	海洋气象观测平台、 低对流层风廓线仪、系留气球探空	风、温、湿、气压	空间稀少
海气界面通量	梯度观测塔、涡动相关系统、 湍流探测仪	动量通量、潜热、感热、辐射	空间稀少
气象要素垂直廓线	气象探空仪、风廓线仪、 微波辐射计、多普勒天气雷达	风、温、湿、气压	空间稀少
海表及浅层海洋要素	浮标自动站、石油平台自动站、 船舶观测、测波雷达	海温、海浪、海流	海温观测点较多
卫星遥感	气象卫星、海洋环境卫星、 GPS/MET水汽观测站	云、大气辐射、海表辐射、可降水量	覆盖范围广

高效地利用海洋气象观测资料是当前及未来一段时期的关键性工作。

3 观测资料同化方案

当前,资料同化技术的进步和发展依赖于对背景场和观测场不确定信息的描述上,这样的不确定性正是由背景误差协方差和观测误差协方差所决定的,也是决定分析质量的关键。对于任何同化方法,背景误差协方差对同化结果都有着举足轻重的影响,它决定了观测对背景场的修正尺度和结构,即控制了观测信息在分析空间的传播,还会通过变量间的约束关系让观测信息传播到其他变量。从三维变

分的高度模型化的背景误差协方差到四维变分的背景误差协方差在同化时间窗中随天气形势隐式的发展,以及集合卡尔曼滤波方法的背景误差协方差由其集合预报成员的离散度进行估计,对背景误差协方差的恰当描述越来越受到重视,而且,得到符合实际的背景误差协方差的恰当估计已经成为提高资料同化技术的关键。热带气旋具有明显的多尺度特征,其资料同化的背景误差协方差具有强的流依赖特征,热带气旋资料同化技术的选择有必要适应这些特征,才能提高资料利用效率而克服海上资料稀少的不足。然而,目前的资料同化技术都不能很好地适应热带气旋的这些特征,必须探索更合适的资

料同化技术,其资料同化的背景误差协方差的估计也是难点。

热带气旋具有强自组织性,在空间相关性上,明显存在背景环流的较大尺度相关和热带气旋自身环流的相关,两个环流相关也存在明显区别的特征。并且,热带气旋自身环流甚至不会与其背景环流存在明显相关,也就是说,针对热带气旋自身环流的观测信息不会显著地传播到涡旋系统之外的背景区域。所以,如果将两个尺度的观测信息传播进行分离,既有利于针对性地考虑各自不同的背景误差协方差流依赖特征和观测信息传播,也有利于按尺度而分的分组资料同化技术的实现。

万齐林研究建立了一个适合热带气旋环流的多尺度/分块逐批资料同化技术^[20],并研究相应的背景误差协方差构造方案和重要观测要素的观测算子,高效地将台风警报、海洋气象观测、卫星观测等在时、空上零散分布的、间接的观测资料融合成为符合物理规律和代表热带气旋结构的同化数据,用于改善热带气旋分析、研究和预报。该资料同化方法的简介如下。

将观测分成两部分,第1组观测反映大尺度环流,第2组观测反映热带气旋自身环流。第1组观测的信息能够传播到热带气旋涡旋环流所在的区域,会影响到热带气旋涡旋的背景环流,第2组观测的信息非常局域化,主要在热带气旋涡旋环流所在区域传播,只是影响到热带气旋的自身环流,对其大尺度背景环流的影响不明显。不失一般性,将观测的信息传播分为两个尺度,相应地,观测信息传播矩阵 $A = BH^T$ (B 为背景误差协方差, H 为观测算子) 可以表示为

$$A = \bar{A} + \tilde{A} \quad (1)$$

式(1)中, \bar{A} 代表大尺度的观测信息传播,对应于热带气旋涡旋的环境场和第1组观测; \tilde{A} 代表小尺度的观测信息传播,对应于热带气旋的自身环流和第2组观测。

按照多尺度/分块逐批资料同化方法,具体同化过程如下。

1) 同化第1组资料,按照 \bar{A} 给定的观测信息传播,计算该组资料同化的增益为

$$\Delta x_1 = \bar{A}(H_1\bar{A} + R_1)^{-1}d_1 \quad (2)$$

式(2)中, H_1 是第1组资料的观测算子, R_1 是第1组资料的观测误差协方差, d_1 是第1组观测的新息向量(观测与背景反演观测的偏差)。

2) 对第2组观测的信息传播矩阵进行修订,观测信息传播矩阵的修订公式为

$$\tilde{A}' = \tilde{A} - \bar{A}(R_1 + H_1\bar{A})^{-1}(H_2\bar{A})^T \quad (3)$$

3) 同化第2组资料,计算该组资料同化的增益为

$$\Delta x_2 = \tilde{A}'(H_2\tilde{A}' + R_2)^{-1}d_2 \quad (4)$$

式(4)中, H_2 是第2组资料的观测算子, R_2 是第2组资料的观测误差协方差, d_2 是第2组观测的新息向量(第2组观测与同化第1组资料分析场反演观测的偏差)。

4) 总的同化增量为

$$\Delta x = \Delta x_1 + \Delta x_2 \quad (5)$$

在热带气旋资料同化的实际过程中: 第一步可以先在整个模式区域同化热带气旋自身环流范围之外的观测,这一步可利用常见的资料同化技术进行,余下少量的热带气旋范围内的资料;第二步可以在相对小的热带气旋环流区,同化剩余的较少观测,此时信息传播矩阵 A 和观测误差协方差矩阵 R 相对小,可以采取直接计算或顺序法的方式进行,并且,可用接近热带气旋实际流型(typhoon-dependent)的背景误差协方差,而不必用均匀、各向同性模型来模拟实际背景误差协方差。

正如前面所述,合理估计背景误差协方差是热带气旋资料同化的关键问题。但是,人们不知道大气的真实状态,背景误差实际上是无法确切计算的。在业务资料同化方案中,无一例外地采用数值模式的先验预报结果作为背景场,这就要求背景误差协方差的估计能反映数值预报模式短期预报误差协方差的结构,一般的做法是近似估计或模拟背景误差的平均统计特征,包括方差、自相关和动力平衡性质。常用3类方法来确定背景误差协方差:a. 新息向量方法(Hollingsworth and Lönnberg, 1986)^[23],从包含背景误差和观测误差的新息向量的空间协方差中,通过观测误差空间不相关的假设分离背景误差和观测误差,在观测与背景误差都是均匀无偏的基本假定下进行背景误差与观测误差的统计特性的估计,其优点是可以直接估计背景与观测误差的方差与背景误差的空间相关性,但一般只能在观测资料相对密集的地区实施;b. 背景误差协方差法(NMC法)^[24],假定背景误差的空间相关近似于同一时刻不同时效预报之差(例如同一个时刻的48 h预报减去24 h预报或24 h预报减去12 h预报)的相关,于是可以直接计算误差统计;c. 分析集合方法^[25],是近

年发展的一种新的方法,它利用集合预报成员间的离散度来模拟背景误差和进行误差结构的统计。

背景误差协方差通常可以分解为相关系数和误差方差的乘积。那么,一个随流型演变的背景误差协方差也就意味着相关系数和误差方差都是随流型演变的。由于热带气旋是一个移动性的强涡旋系统,观测信息传播的流依赖特征非常突出,以上3种背景误差协方差的估计方法不是非常合适。在第1种和第2种方法中,利用较长时间序列的资料,热带气旋这样的移动性天气尺度系统的流依赖特征不能被估计;在第3种方法中,热带气旋位置预报的离散度或系统性偏差会影响背景误差协方差估计。所以,有必要针对热带气旋的基本特性,设计一个适合的背景误差协方差估计方案。

对于热带气旋,建议采用如下背景误差协方差估计方法:a. 将热带气旋涡旋环流从统计样本的要素场中分离开来;b. 利用已经剔除热带气旋涡旋环流的样本,计算热带气旋大尺度环境的背景误差协方差;c. 计算热带气旋涡旋环流的背景误差协方差,建议两种统计样本生成方案:对所分离出的涡旋环流进行必要的处理,如热带气旋重定位和偏差扰动,得到热带气旋涡旋环流的样本;利用热带气旋模型,经过

参数随机扰动得到热带气旋涡旋环流的样本。

图2是海洋气象观测系统同化应用的流程图。工作流程的主要步骤如下:a. 对各类海洋气象观测进行收集和质量控制;b. 对各类仪器观测的海洋气象资料,按照质量评估等级,进行资料筛选,将位置接近的相同资料中低质量等级的仪器观测剔除;c. 将各种仪器观测的资料按照同化技术的要求进行分类整理,如归纳成为海面观测、大气要素廓线观测、降水观测、辐射观测等几类;d. 利用海面常规观测,对卫星观测进行必要的校正;e. 读取台风警报中的热带气旋中心位置、中心气压和最大风速半径等信息(由卫星观测、雷达观测、地面观测等综合确定),利用这些热带气旋警报信息及其设定范围内的随机扰动、热带气旋初估环流进行热带气旋模型的构造,形成热带气旋环流的扰动样本集,用于计算热带气旋背景误差协方差;f. 将上一次热带气旋数值预报场作为资料同化的初估场,利用热带气旋警报信息,对热带气旋初估场进行热带气旋环流重定位,形成热带气旋资料同化的背景场;g. 利用上述预处理得到的海洋气象观测、热带气旋环流的扰动样本集和资料同化背景场,进行资料同化,将这些资料融合成热带气旋分析场,并作为模式初值完成预报。

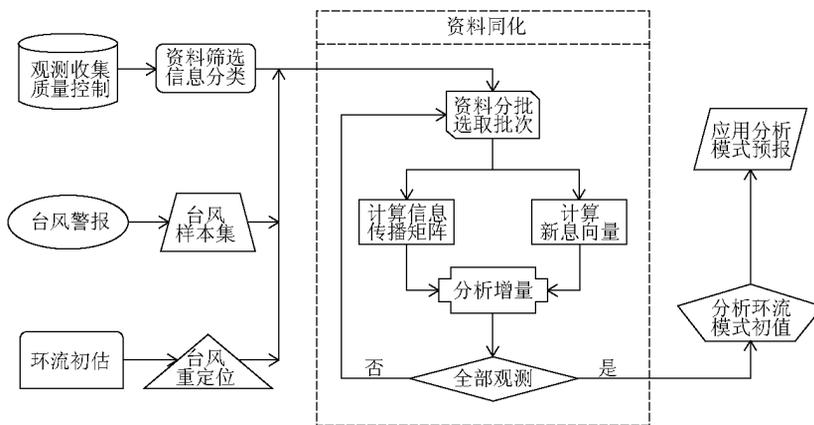


图2 海洋气象观测应用的流程图

Fig. 2 The application flowchart of marine meteorological observation

表1中所列各类仪器观测的大气要素多能被有效地同化利用,如海岛和船舶等自动气象站观测、海洋气象观测平台和气象探空观测、风廓线仪观测、微波辐射计温湿观测、天气雷达和气象卫星观测等。在海面之上的这些海洋气象观测中,除了部分卫星观测包含了大气温度、湿度的三维信息、少数几层云

迹风和大气整层可降水量信息之外,其他的主要是海面观测信息。鉴于数值天气预报需要立体观测信息,在数值天气预报中卫星观测一直具有举足轻重的作用。但是,对于热带气旋精细预报而言,仅有卫星观测是非常不够的。气象卫星的三维温度、湿度等观测除了精度不足之外,更缺乏反映热带大气非

平衡发展的要素观测,所以,增添海面气象综合观测,对卫星观测作不可缺少的补充,越来越受到重视。随着资料同化技术的进步,特别是流依赖背景误差协方差的资料同化技术的实现,海面气象观测信息可以向高层传播,海面气象观测信息的作用就越来越大。提升海洋气象综合观测逐步成为改善热带气旋、强对流等海上灾害性天气预报能力的重要手段。

4 观测系统模拟试验

在海洋气象观测系统中,气象探空、气象卫星等观测在资料同化和数值预报中的有效作用已经被多次证实。根据海洋气象观测系统在近海面大气综合观测的最近进展,以及最新发展使用的资料同化技术,近海面的大气要素观测对改善资料同化的作用更应该受到重点关注,特别是需要检验观测信息通过流依赖背景误差协方差合理构造和应用所产生的传播,如海面气象要素的观测信息向高层各气象要素的传播。在观测资料同化中,如果各类观测信息能够在三维空间内恰当传播,观测信息的应用效率被极大发挥,同化效果必将有较大的改善,从而达到同化技术的发展带动海洋气象观测的应用和发展,进而改善资料同化质量和预报水平,反过来,又促进

资料同化技术的发展。

为此,设计一个观测系统模拟试验(OSSE),主要考察观测信息在热带气旋环流背景下的传播和影响,从而说明海洋气象观测的同化应用效率,及其对改善热带气旋初值环流的重要作用。这里,以2006年7月12日—23日热带气旋为例,说明海洋气象观测在热带气旋资料同化中所能取得的效果。资料选自于日本再分析资料(20 km 水平分辨率),同化分析过程中以12日18时为分析的初估场(涡旋强度稍作削减,这样处理是为突显同化分析的作用),13日00时为分析目标场(真值)。

图3是2006年7月13日00时(世界时,下同)850 hPa 位势高度场(m)和风场(m/s),其中,图3a为初估场(12日18时);图3b为分析目标场(13日00时);图3c为初估场与目标的差值;图3d为背景场与目标的差值。需要说明的是:同化分析中的背景场是初估场经过热带气旋涡旋重定位后得到的。因为,资料同化的基本假设之一是误差无偏,如果背景场中热带气旋涡旋位置同真值中的位置不一致,误差一定是有偏的,所以,必须利用热带气旋警报数据对热带气旋涡旋环流进行重定位,不能直接用初估场作为资料同化的背景场。可以看到;由于涡旋中心位置的差异,热带气旋环流的初估场与分析目

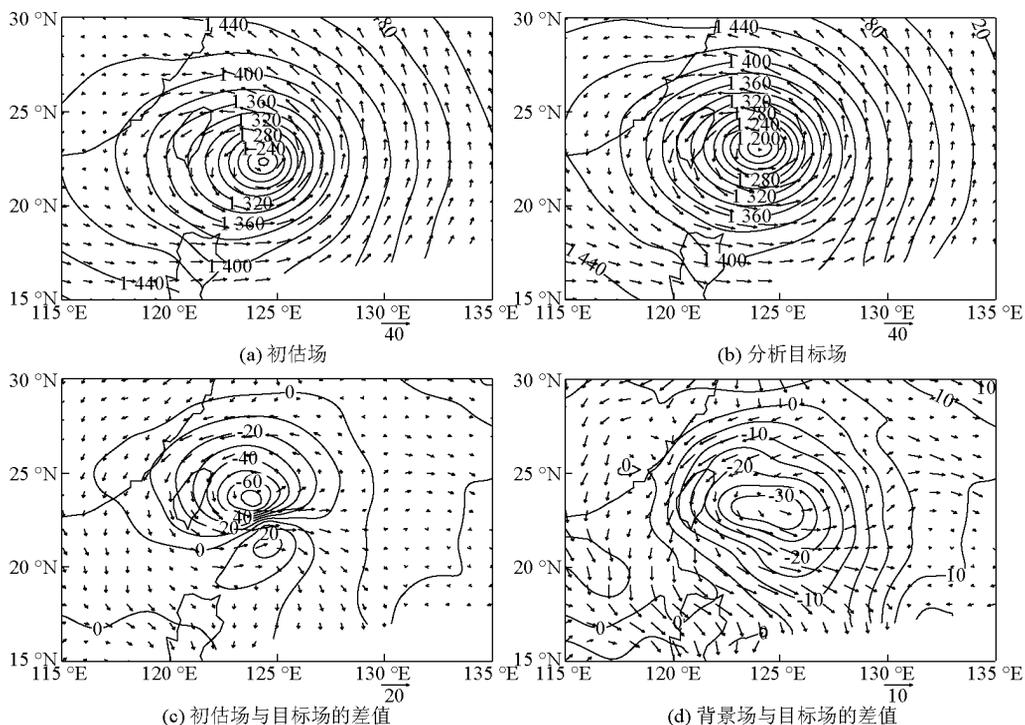


图3 850 hPa 位势高度场和风场

Fig. 3 The geopotential-height and wind on 850 hPa

标场之间存在非常大的差异(见图 3c);经过涡旋重定位所得到的资料同化背景场与目标场间的差异也非常明显(见图 3d),从偏差场的分布来看,背景场与目标场之间既有涡旋强度的差异,也有涡旋形态的不同。资料同化的目标是利用观测和背景场,得到一个接近目标场的分析场,所以,需要能够通过观测信息调整背景场的涡旋强度和空间分布形态。

海洋气象观测最主要的观测是海面附近的气象要素观测,这里以海平面气压为例,了解近海面观测的信息传播及其对高层环流的影响,进而说明观测对获取热带气旋环流的作用。在分析目标场中取涡旋中心周围的 8 个点(如表 2 所示)作为观测点。由于本文所采用的资料同化方法可以进行逐批资料同化,所以,为了清楚说明观测信息的传播和作用,将 8 个观测的海平面气压分成三批(表 2 中编号 1 和 2 的观测点为第 1 组、编号 3 和 4 的观测点为第 2 组、编号 5 和 8 的观测点为第 3 组),逐批进行同化。

表 2 观测(海平面气压)

Table 2 The observation (the pressure of sea-level)

观测点 编号	经度 /(°E)	纬度 /(°N)	hPa		
			背景值	观测值	差值
1	122	21	988.02	988.99	-0.98
2	126	21	989.75	992.26	-2.51
3	126	25	989.69	991.61	-1.92
4	122	25	987.75	989.81	-2.06
5	118	23	996.16	995.84	0.33
6	124	17	997.42	997.61	-0.20
7	130	23	1 001.21	1 001.09	0.12
8	124	29	1 000.36	1 000.03	0.32

本文利用中国气象局广州热带海洋气象研究所业务数值预报中的热带气旋模型,进行参数的随机扰动(扰动参数为热带气旋强度、尺度大小和中心位置)得到统计样本集,用于估算热带气旋涡旋环流的背景误差协方差。由于背景误差协方差矩阵是一个超大矩阵,直接计算和应用处理所占用的计算资源非常巨大,以至于当前绝大多数计算机系统难以承受,所以,在本文所利用的多尺度/分块逐批资料同化中,不是直接计算背景误差协方差,而是按照前一节介绍的技术要求计算观测的信息传播向量($R = BH^T$)。这样,所要求的计算机资源少很多,在当前计算机条件下可以实现业务计算。

图 4 是观测点 A(表 2 中编号 3)海平面气压作用于 850 hPa 位势高度和风的信息传播向量(等值单位: hPa·m),其中,图 4a 为统计样本的估计(同化第 1 组资料时使用),图 4b 为第 1 组资料同化后的修订估计(同化第 2 组资料时使用)。从图 4a 可看到:A 点的海平面气压对 850 hPa 位势高度和风的影响具有明显的流依赖特征,呈相对于热带气旋涡旋中心的环状分布,而不是以观测点 A 为中心的圆形分布,并且,低层气压的观测信息不仅对较高层位势高度有作用,而且,对较高层风场也有明显影响,这正是背景误差协方差具有流依赖特征时所表现出的优点;对比图 4a 和图 4b 可看到:信息传播向量的修订量是显著的,说明信息传播矩阵的修订是必需的,反映了第 1 组观测对第 2 组观测的影响十分明显。

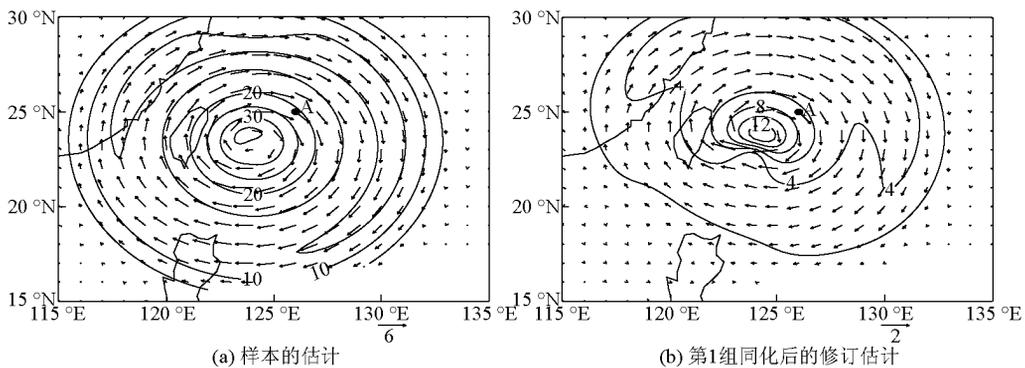


图 4 观测点 A 海平面气压对 850 hPa 高度和风的信息传播

Fig. 4 The information transfer of the sea-level pressure at point A on 850 hPa geo-height and wind

图5为观测资料同化的分析增量,等值线对应于850 hPa位势高度(m),矢量对应于850 hPa风(m/s),其中,图5a是同化第1组资料的增量,图5b是同化第2组资料的增量,图5c是同化第3组资料的增量,图5d是同化所有资料后的总增量。从图5a可看到:第1组资料同化增量呈明显的相对热带气旋涡旋中心的环形分布,鉴于第1组资料位于涡旋中心的下侧,这个环形分布的同化增量正是背景误差协方差具有流依赖特征的结果,不会因为资料偏于涡旋中心的一侧而造成虚假的显著非对称增量,仔细分析10 m等值线,在外圈有观测信息传递的非对称性,且是随着环流向下游传递的。从图5b可看到:尽管第2组观测与背景的偏差与第1组相当,但是,相对于第1组资料同化的分析增量,第2组资料同化的分析增量明显较小,只能算是一个较小的修正,说明第2组观测的同化作用大部分被第1组观测通过热带气旋环流的内部关联而取代,这从一个侧面反映出合适的资料同化技术可以提高资料的利用效率,从而可以适当减少对观测点空间密度的要求,更能适应三维空间密度小的海洋气象观测。从图5c可看到:第3组资料同化的分析增量在呈现环形分布的同时,中心附近涡旋增强,外圈涡旋

减弱,这是对热带气旋径向分布结构的调整,并且,这个调整也是具有明显的流依赖特征。从图5d可看到:同化所有资料后的增量也是呈环形分布,并且涡旋中心的位势高度增量达-40 m,接近背景场与目标场的偏差,同时,径向分布也更符合热带气旋的特征。

图6为资料同化后850 hPa的位势高度偏差(m)和水平风偏差(m/s)。将图6和图3d对比可以看到:资料同化后,850 hPa分析场的位势高度偏差是10 m,而背景场的位势高度偏差是30 m,分析偏差比背景偏差要小很多,并且,分析偏差场中不再包含热带气旋的1波涡旋环流。这表明:分析场比背景场更接近目标场,资料同化的作用明显。应该注意到:尽管背景场与分析目标场之间存在较大的偏差,只同化为数不多的海洋气象观测资料(本文同化了8个海平面气压)就能够取得非常好的效果,这表明本文所采用的同化技术具有非常高的资料利用效率。事实上,这正是采用了具有流依赖特性的背景误差协方差的结果,所以,合理估计背景误差协方差对融合稀少的海洋气象观测是非常关键的,能够应用这种具有流依赖特征的背景误差协方差的资料同化技术又是必要的。

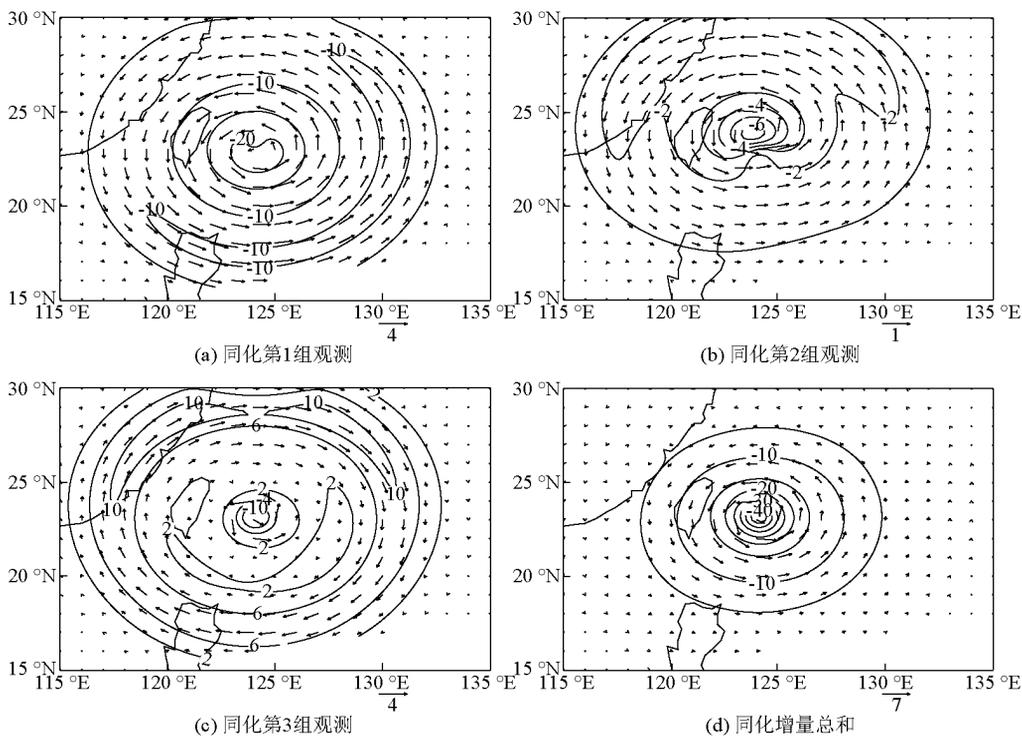


图5 资料同化的850 hPa位势高度增量(m)和风增量(m/s)

Fig. 5 The analysis increment of the geo-height (m) and wind (m/s) on 850 hPa

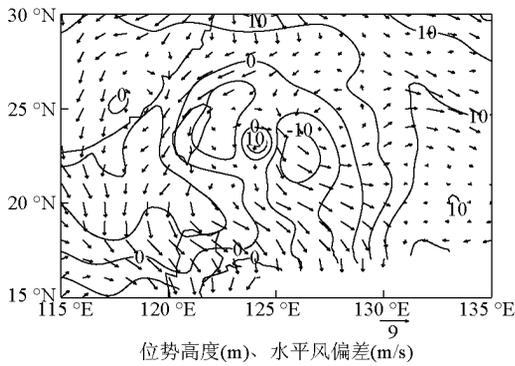


图6 资料同化后的850 hPa分析偏差
Fig.6 The analysis deviation on 850 hPa

本文所展示的 OSSE 只是给出了几个海平面观测的作用,是为了清晰地说明观测资料与资料同化技术的相互关系。尽管如此,它却能体现了海洋气象观测系统对热带气旋资料同化的作用和重要性。在海洋气象观测系统中,根据条件选择不同仪器和手段进行观测,所获得的气象要素归纳起来也就只有几类,在背景误差协方差具有流依赖特征的资料同化技术中,其观测信息也都能类似地在三维空间内恰当传播。海洋气象观测系统的各种仪器观测综合在一起,通过合理的筛选和分类,所包含的信息更丰富,可更好地提高热带气旋资料同化的分析质量和精细程度。海洋气象观测系统对热带气旋资料同化的作用还有待长期业务应用的考验和进一步提高。

5 结语

根据海洋气象观测建设现状和发展规划,海洋气象的观测与以前相比将会大大丰富,这对台风及其他海上天气的监测和预报能力的提升将起到积极作用,有利于防御海洋气象灾害。但是,由于海洋气象观测的难度和复杂性,海洋气象的观测不可能非常充足,还不足以描述海上天气系统的立体结构及其变化。数值预报需要三维/四维气象要素的观测,所以,提高海洋气象观测资料的利用效率在当前是非常重要的,只有这样才能克服海洋气象观测资料相对缺乏来提升数值预报水平。多尺度/分块逐批资料同化技术,能够应用具有流依赖特征的背景误差协方差,使得观测信息能够在热带气旋背景环流下合理传播,从而合理高效地利用海洋气象观测资料,较好地适应具有多尺度、强流依赖特征的热带气旋资料同化,是形成高质量热带气旋初值环流的一

种可行方法。换言之,由于资料同化技术的进步,海洋气象综合观测能够更合理高效地被利用而使其作用发挥得越来越大,加强海洋气象观测系统建设在现阶段对提高热带气旋预报能力更显得重要和急需。

气象灾害影响的“灾害链”特征和社会关联性特征,使气象防灾减灾牵动越来越广的社会公共事物。海洋气象观测系统的完善和资料高效利用的同化技术发展,将进一步提高热带气旋和其他海上天气的预测预报能力和灾害防御能力,从而提升“梅花”、“艾琳”这样的气象灾害及其引发的次生和衍生灾害的应对能力,有益于帮助各级政府改进公共服务和社会管理能力。

参考文献

- [1] Jones W Robert. On improving initial data for numerical forecasts of hurricane trajectories by the steering method [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1964, 3 (3): 277 - 284.
- [2] Nagle E Roland, Clare R James, Holl M Manfred, et al. Formulation and testing of a program for the objective assembly of meteorological satellite cloud observations [J]. *Monthly Weather Review*, 1967, 95(4): 171 - 187.
- [3] Danard B Maurice, Holl M Manfred, Clark R James. Fields by correlation assembly—a numerical analysis technique [J]. *Monthly Weather Review*, 1968, 96(3): 141 - 149.
- [4] Thompson D Philip. Reduction of analysis error through constraints of dynamical consistency [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1969, 8(5): 738 - 742.
- [5] Barker D, Huang Wei, Guo Yongran, et al. A three-dimensional variational data assimilation system for MM5: implementation and initial results [J]. *Mon Wea Rev*, 2004, 132: 897 - 914.
- [6] Huang Xiangyu, Xiao Qingnong, Barker D M, et al. Four-dimensional variational data assimilation for WRF: Formulation and preliminary results [J]. *Mon Wea Rev*, 2009, 137: 299 - 314.
- [7] Epstein E S. Stochastic dynamic prediction [J]. *Tellus Ser A*, 1969, 21: 739 - 759.
- [8] Houtekamer P L, Mitchell H L. Data assimilation using an ensemble Kalman filter technique [J]. *Mon Weather Rev*, 1998, 126(6): 796 - 811.
- [9] Whitaker J S, Hamill T M. Ensemble Data Assimilation without perturbed observations [J]. *Mon Weather Rev*, 2002, 130: 1913 - 1924.
- [10] Houtekamer P L, Herschel L Mitchell. A sequential ensemble Kalman filter for atmospheric data assimilation [J]. *Mon Weather Rev*, 2001, 129(1): 123 - 137.
- [11] Bishop C H, Etherton B J, Majumdar S J. Adaptive sampling with the ensemble transform Kalman filter. Part I: theoretical aspects [J]. *Monthly Weather Review*, 2001, 129: 420 - 436.
- [12] Snyder C, Zhang Fuqing. Assimilation of simulated Doppler ra-

- dar observations with an ensemble Kalman filter [J]. *Mon Weather Rev*, 2003, 131:1663–1677.
- [13] Tong Mingjing, Xue Ming. Ensemble Kalman filter assimilation of Doppler radar data with a compressible nonhydrostatic model; OSS experiments [J]. *Mon Wea Rev*, 2005, 133:1789–1807.
- [14] Hamill T M, Snyder C. A hybrid ensemble Kalman filter-3D variational analysis scheme [J]. *Mon Wea Rev*, 2000, 128:2905–2919.
- [15] Lorenc A C. The potential of the ensemble Kalman filter for NWP — a comparison with 4D-VAR [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2003, 129:3183–3203.
- [16] Wang Xuguang, Barker D, Snyder C, et al. A hybrid ETKF-3DVar data assimilation scheme for the WRF model. Part I: observing system simulation experiment [J]. *Mon Wea Rev*, 2008, 136:5116–5131.
- [17] Wang Xuguang, Barker D, Snyder C, et al. A hybrid ETKF-3DVar data assimilation scheme for the WRF model. Part II: real observation experiments [J]. *Mon Weather Rev*, 2008, 136:5132–5147.
- [18] Liu Chengsi, Xiao Qingnong, Wang Bin. An ensemble-based four-dimensional variational data assimilation scheme, Part I, Technical formulation and preliminary test [J]. *Mon Weather Rev*, 2008, 136:3363–3373.
- [19] Zhang Fuqing, Zhang Meng, James A, et al. Coupling ensemble Kalman filter with four-dimension variational data assimilation [J]. *Adv Atmos Sci*, 2009, 26(1):1–8.
- [20] 万齐林. 多尺度/分块逐批资料同化技术与热带气旋初值形成[D]. 南京:南京信息工程大学博士学位论文, 2012.
- [21] Black P G. Air-sea exchange in hurricanes: Synthesis of observations from the coupled boundary layer air-sea transfer experiment [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 2007, 88:357–384.
- [22] Edson J. The coupled boundary layers and air-sea transfer experiment in low winds [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 2007, 88:341–356.
- [23] 史荣昌. 矩阵分析[M]. 北京:理工大学出版社, 1996:257.
- [24] Lorenc A C. Iterative analysis using covariance function and filter [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1992, 118:569–591.
- [25] Boer G J. Homogenous and isotropic turbulence on the sphere [J]. *J Atmos Sci*, 1983, 40:154–163.

The application of marine meteorological observation in tropical cyclone data assimilation

Wan Qilin^{1,2}, He Jinhai¹

(1. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

2. Institute of Tropical and Marine Meteorology, CMA, Guangzhou 510080, China)

[Abstract] Based on the current situation and development plan of marine meteorological observation, it is recognized that there is a need to develop appropriate data assimilation technology for enhancing the efficiency of data utilization. Only in that way, there is a chance to overcome the lack of observation, and to improve numerical weather prediction. In this paper, the multi-scale/block batch-wise data assimilation is suggested to perform the test of tropical cyclone data assimilation. The results show: the multi-scale/block batch-wise data assimilation can be appropriate for the data assimilation of tropical cyclone multi-scale circulation, satisfy with the flow-dependent background error covariance required by tropical cyclone data assimilation, also can use effectively the marine meteorological observation. By means of the multi-scale/block batch-wise data assimilation, to amplify the utilization of marine meteorological observation, it is an effective approach to obtain high quality tropical cyclone initial circulation.

[Key words] marine meteorological observation; the efficiency of data utilization; multi-scale/block batch-wise data assimilation; tropical cyclone initial circulation