

## 海表盐度资料同化研究进展

秦思思<sup>1,2</sup>, 王辉<sup>1</sup>, 朱江<sup>2,3</sup>, 万莉颖<sup>1</sup>, 邢建勇<sup>1</sup>, 张宇<sup>1</sup>

(1. 国家海洋环境预报中心 国家海洋局海洋灾害预报技术研究重点实验室, 北京 100081; 2. 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心, 北京 100029; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 对海表盐度资料同化的研究进展进行了较为全面的回顾, 分别对不同时期的海表盐度资料质量和同化方法进行对比分析, 并对未来海表盐度资料同化的研究重点和发展趋势给予展望。

**关键词:** 海表盐度; 资料同化; 盐度观测卫星

**中图分类号:** P731.12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2019)04-0076-07

### 1 引言

海表盐度是描述海洋物理性质的关键变量之一, 海洋中的许多现象和过程都与其分布和变化息息相关。海表盐度不仅在全球水循环和大洋环流中扮演着重要角色, 而且也是全球气候变化的重要指标<sup>[1-3]</sup>。海表盐度的时空变化不仅能够反映降水、蒸发、径流及冰雪融化的变化特征, 还能体现气候的变化过程, 因此它既是表征上层海洋水文变化的有效指标<sup>[4]</sup>, 也是反映气候变率的重要海洋参量<sup>[5]</sup>。已有研究表明, 海表盐度在 ENSO (El Niño–Southern Oscillation, 厄尔尼诺–南方涛动) 事件的形成与消亡过程中起着重要作用<sup>[6-7]</sup>, 在海洋预报系统中引入同化海表盐度可突破 ENSO 的春季障碍, 提高对 ENSO 事件的预报能力<sup>[8-9]</sup>。因此, 将海表盐度资料同化引入业务化海洋预报系统中, 对于海洋预报能力的提升具有重要的现实意义。

资料同化, 作为将观测数据与模式动力学以最优方式结合, 为数值模式提供更真实的初始状态估计, 从而提高模式模拟与预报水平的方法, 已被广泛认可并应用于海洋模拟与业务化预报中<sup>[10-11]</sup>。与海表温度、海面高度等海洋水文要素不同, 在过去很长一段时间内, 海表盐度的现场观测资料稀少, 且空间分辨率较低<sup>[12-13]</sup>, 不能满足全球海洋资料同

化对观测数据的要求, 海表盐度资料同化的研究进展缓慢。近年来, 随着海表盐度遥感与反演技术的发展, 卫星观测的海表盐度数据迅速增多, 其空间分辨率也明显提高, 这显著弥补了现场观测数据在时空分辨率上的不足, 为全球海表盐度资料同化研究的开展提供了必要的条件。

由于海表盐度的资料同化受同化方法和观测数据的影响较大, 本文将首先简要介绍资料同化方法及海表盐度观测的发展历程, 并依据海表盐度观测的发展历程, 将海表盐度资料同化研究划分为海表盐度现场观测资料同化、模拟卫星海表盐度资料同化和真实卫星海表盐度资料同化 3 个阶段。通过依次回顾各个阶段的相关研究, 对海表盐度资料同化的发展过程进行回顾与展望, 为海表盐度资料同化的业务化应用提供方法与理论依据。

### 2 资料同化方法

资料同化能够根据一定的优化标准和方法, 将不同时空、采用不同观测手段获得的观测资料与数学模型结合, 纳入统一的分析与预报系统中, 建立模型与资料相互协调的优化关系, 使计算分析结果的误差最小, 使模式状态越来越接近于真实的大气和海洋过程。早期的资料同化方法, 也称客观分析

收稿日期: 2018-12-10; 修回日期: 2019-01-28。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC1401704); 国家自然科学基金青年科学基金(415060311009592)。

作者简介: 秦思思(1990-), 女, 助理研究员, 博士后, 主要从事海洋资料同化和预报理论与方法研究。E-mail: qinsi.happyfamily@163.com

法,主要包括局地多项式插值法、逐步订正法、松弛逼近法或称牛顿松弛法等,多为经验分析方法。现代资料同化方法则是建立在控制理论或估计理论上的、可以进行多元同化的资料同化方法。

现代资料同化方法主要分为两类:变分方法和滤波方法。其中变分方法是以数值算法求解分析场、观测场及背景场之间偏差的目标函数的最小化来优化模式初始状态<sup>[10]</sup>。依据目标函数定义在三维或四维空间上,变分法又可分为三维变分(3Dvar)和四维变分(4Dvar)。滤波方法则基于估计理论,通过获得观测条件下分析场的最大可能状态来实现模式初始状态的最优化<sup>[10]</sup>。在非线性海洋系统中常用的滤波方法为卡尔曼滤波方法(Kalman Filter)的扩展方法,如EnKF(Ensemble Kalman Filter)、EROKF(Ensemble Reduced Order Kalman Filter)、SEEK(Singular Evolutive Extended Kalman filter)等。此外,粒子滤波法(Particle Filter)由于不受模型线性和误差高斯分布假设的约束,也逐渐受到人们的关注<sup>[14]</sup>。

### 3 海表盐度观测

海表盐度观测大致分为海表盐度现场观测和卫星海表盐度观测两类。其中,海表盐度现场测定,就方法而言,又分为化学方法和物理方法两大类。化学方法简称为硝酸银滴定法,此法由丹麦海洋学家 Knudsen 等人于 1901 年提出。物理方法可分为比重法、折射法和电导法。其中比重法和折射法由于误差较大、准确度不高、操作复杂、不利于仪器配套等问题已逐渐被电导测量法所替代。

海表盐度的现场观测主要通过浮标、滑翔机和走航观测中携带的盐度传感器进行。最早的现场观测可追溯到 1872—1876 年的“挑战者”号环球科学考察。在 20 世纪 30 年代以前,海表盐度观测主要集中在北大西洋和西北太平洋沿岸,20 世纪 70 年代中期以后,随着各类海洋调查专项研究的启动,在热带太平洋逐渐开展了一些固定测线的观测工作。自 20 世纪 90 年代以来,随着 WOCE(World Ocean Circulation Experiment,世界大洋环流实验)、TOGA(Tropical Ocean Global Atmosphere,热带海洋与全球大气计划)、CLIVAR(CLimate VARiability

and predictability,国际气候变化与可预测性研究计划)和 GODAE(Global Ocean Data Assimilation Experiment,全球海洋同化实验)等国际合作计划的相继实施,以及 Argo 实时海洋观测网和全球海洋浮标阵列的建立,海表盐度观测开始由近岸向深海大洋扩展,观测数据也随之不断增多。尽管海表盐度的现场观测逐年增多,但在卫星盐度遥感技术发展之前,全球仍有约 25% 的海域从未进行过盐度观测,有约 73% 的海域盐度观测次数少于 10 次<sup>[15]</sup>。

卫星盐度遥感技术的基本原理为微波辐射计 L 波段(1.4 GHz)的亮温对海表盐度变化的敏感性<sup>[16]</sup>。基于这一原理,欧洲航天局联合法国国家太空研究中心和西班牙技术与工业发展中心于 1999 年率先提出了 SMOS(Soil Moisture and Ocean Salinity,土壤湿度与海洋盐度)地球探测任务,并于 2009 年 11 月 2 日率先发射了 SMOS 卫星,且运行至今。该卫星采用太阳同步轨道,平均高度为 755 km,倾斜角度为 98.44°。SMOS 卫星载有综合孔径微波成像仪,可对同一海面进行多角度观测成像,并通过获得的大量亮温数据来订正风所引起的海面粗糙度对盐度反演的影响,从而提高盐度的反演精度<sup>[17-18]</sup>。美国国家航空航天局联合阿根廷国家空间委员会于 2004 年提出了 Aquarius(宝瓶座)任务,并于 2011 年 6 月 10 日发射了 Aquarius(宝瓶座)卫星。该卫星采用太阳同步轨道,平均高度为 657 km,倾斜角度为 98°<sup>[19-20]</sup>,每 7 d 完成一次覆盖全球的观测任务。遗憾的是, Aquarius 卫星于 2015 年 6 月 8 日因电力和姿态控制系统出现故障而停止工作。为了继续这方面的观测,美国国家航空航天局于 2015 年 1 月 31 日发射了 SMAP(Soil Moisture Active Passive,土壤湿度主动/被动观测)卫星。该卫星飞行在太阳同步晨昏轨道上,轨道高度 685 km,轨道倾角 98°<sup>[21-22]</sup>,每 3 d 即可基本获得全球覆盖数据。Aquarius 和 SMAP 卫星均载有由 1.413 GHz 波段辐射计和 1.26 GHz 波段散射计构成的集成系统。其中,辐射计和散射计皆有 3 个波段,用于接收 3 个入射角所获得的海面信息,基于主动/被动联合方式,通过散射计获得的海表粗糙度数据修正辐射计获得的海面亮温数据,从而提高反演精度<sup>[19-22]</sup>。此外,我国也将在“十三五”期间陆续发送多颗盐度观测卫星<sup>[23]</sup>。

## 4 海表盐度现场观测资料同化

因受现场观测数据的时空分布所限,这一时期的海表盐度资料同化研究较少,且主要集中在热带太平洋海区。为了改善海洋模式的模拟水平,Reynolds等<sup>[24]</sup>基于走航水桶采样与船载TSG(ThermoSalinoGraph)所获得的海表盐度数据,运用方程项( $\frac{1}{\lambda}$ )[ $S(x,t) - S_0(x,t)$ ],将观测数据同化入模式中。式中: $S$ 为模式表层盐度, $S_0$ 为观测海表盐度, $\lambda$ 为海表盐度的 $e$ 折减时间。结果表明,相对于仅同化气候态月平均海表盐度资料,海表盐度现场观测的加入能够更好地模拟ENSO期间的海洋状态。但需要说明的是,该海表盐度同化方法仅对50 m以浅水层的盐度有调整作用,对50 m以深水层的影响较小。为了了解海表盐度同化对ENSO事件预报技巧的影响,Hackert等<sup>[8]</sup>基于热带太平洋地区能够获得的浮标及走航海表盐度资料,通过OI(Optimal Interpolation,最优插值)方法构建了海表盐度月平均场,并通过EROKF(Ensemble Reduced Order Kalman Filter,降阶集合卡尔曼滤波)同化方法将重构的海表盐度场同化入海-气耦合模式中。结果显示,海表盐度现场观测资料同化可以突破ENSO的春季障碍,将第6~12个月预报的相关系数提高0.2~0.5,海表面温度的预报均方根误差降低0.3~0.6℃,显著提高模式对ENSO事件的预报能力,同时使混合层与障碍层深度的模拟效果得到改善。

## 5 模拟卫星海表盐度资料同化

随着卫星盐度遥感技术的应用与发展,全球海表盐度资料同化逐渐成为研究热点。在盐度观测卫星升空之前,为了验证卫星所获得的海表盐度资料能否满足同化要求,科学家们开展了大量的模拟卫星海表盐度同化工作。这些工作多以SMOS和Aquarius盐度卫星任务所设立的科学目标与盐度产品分级为依据,构建卫星海表盐度产品。通过将模拟的卫星盐度产品同化入海洋模式中,探讨卫星海表盐度同化对模式模拟和预报能力的影响。

基于不同的探测任务和要求,卫星所设定的科学目标不同。其中,SMOS的科学目标是:全球空间

分辨率200 km,时间分辨率10~30 d,数据精度优于0.1 psu。而Aquarius的科学目标则是:空间分辨率150 km,月均数据精度优于0.2 psu<sup>[25-26]</sup>。卫星盐度产品的分级如图1所示,其中卫星所接收到的微波辐射计L波段的亮温为0级产品(L0),由于该亮温产品受银河系辐射、人工无线电干扰和大气辐射等因素的影响,在盐度反演的第一阶段,需要对该亮温产品进行轨道等多方面的校正,以得到亮温一级产品(L1),从一级产品出发,通过不同的反演方式,结合不同的观测数据,可得到不同等级的海表盐度产品,目前已有海表盐度二级产品(L2)、三级产品(L3)和四级产品(L4)<sup>[27-28]</sup>。

为了研究卫星海表盐度同化对海洋状态模拟的影响,Durand等<sup>[29-30]</sup>将模拟的热带太平洋海表盐度数据(空间分辨率为200 km,数据精度为0.2 psu)分别通过牛顿松弛法和SEEK(Singular Evolutive Extended Kalman filter,奇异扩展卡尔曼滤波)方法同化入空间分辨率为2°、垂向31层的海洋模式中。通过对比不同同化方法和同化变量(仅同化海表盐度和协调同化海表盐度、海表温度与流场)对同化效果的影响,发现卫星海表盐度同化的确能改善模式对海水温度、盐度及流场的模拟效果,但改善的程度却与所选用的同化方法有很大关系。此外,海表盐度同化还可提高模式对混合层及障碍层厚度的模拟水平。为了研究卫星盐度产品同化对预报技巧的影响,Tranchant等<sup>[31-32]</sup>在同化海表温度与海面高度异常的基础上,分别将模拟的大西洋区Aquarius的二级产品和SMOS的二级与三级产品,通过SAM2v1(Systeme d'Assimilation Mercator Ocean 2 version 1)方法同化入空间分辨率为1/3°、垂向42层的模式中。通过对比不同卫星产品的同化效果,Tranchant等发现同化任意一颗盐度卫星产品均能提高海表盐度的预报水平。但比较而言,SMOS卫星产品的同化效果要优于Aquarius卫星产品,这与卫星数据和模式在空间分辨率上的协调性有关。此外,Brassington等<sup>[33]</sup>运用诊断分析方法,研究了卫星数据误差对预报误差的影响。结果表明:在同化系统中引入卫星海表盐度数据可以显著减小热带印度洋-太平洋地区的预报误差,但对于中高纬区域预报误差的影响则较弱。

综上所述,模拟卫星海表盐度资料同化阶段的



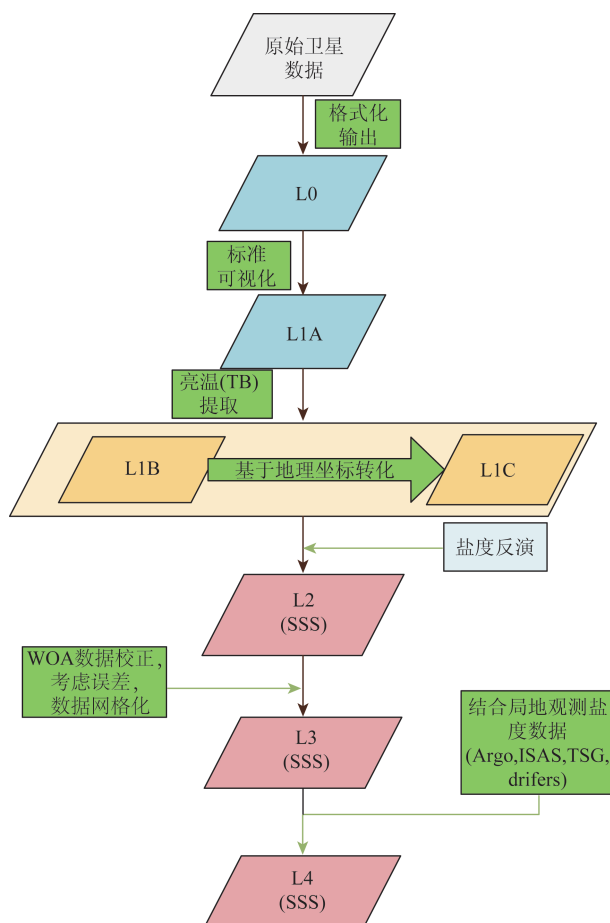


图1 海表盐度卫星产品反演流程  
(SSS: Sea Surface Salinity, TB: Brightness Temperature)

研究表明,卫星海表盐度资料同化能够提高模式对海洋环境的模拟与预报水平,但同化效果依赖于同化方法和卫星产品的选择。虽然模拟卫星海表盐度产品由真实卫星产品的科学参数构建,但是与真

实卫星海表盐度产品间仍存在差异。因此该阶段的很多研究方法值得借鉴,但其研究结论需要进一步验证。

## 6 真实卫星海表盐度资料同化

可用于观测海表盐度的卫星有:SMOS 卫星、Aquarius 卫星和 SMAP 卫星。由于 SMAP 卫星在轨时间较晚,观测数据相对较少,对其数据产品的同化研究尚未见到报道。目前已有研究多基于在轨时间较长的 SMOS 和 Aquarius 卫星产品,所用的海洋模式和同化系统参数如表 1 所示。下面分别介绍这两颗卫星海表盐度资料同化的研究进展。

### 6.1 基于 Aquarius 卫星产品的研究

Hackert 等<sup>[9]</sup>在同化次表层盐度的基础上,基于 EROKF 方法,分别将热带太平洋-印度洋海区 Aquarius 卫星三级产品和现场海表盐度观测数据同化入空间分辨率为 1°的海气耦合模式(HCM)中,研究了卫星海表盐度同化对 ENSO 事件预报效果的影响。通过对比分析不同海表盐度产品的同化效果,他们认为同化 Aquarius 数据可显著提高第 5—10 个月的预报,相较于同化现场观测盐度,卫星盐度数据同化可将预报相关系数提高 0.15,海表温度的预报均方根误差降低 0.4 °C。此外,Vernieres 等<sup>[34]</sup>使用 EnOI (Ensemble Optimal Interpolation)方法,分别将全球范围内的海表盐度现场观测资料、Aquarius 二级产品、改进均方根误差后的 Aquarius 二级产品和现场观测与 Aquarius 结合的海表盐度产品同化入空

表1 卫星海表盐度产品同化研究

作者	模式	模拟区域	空间分辨率	同化窗	卫星资料	同化方法
Hackert 等 <sup>[9]</sup>	HCM	热带太平洋 印度洋区	全球:1° 赤道区经向加密:1/3°;	7 d	Aquarius L3_v2	EROKF
Vernieres 等 <sup>[34]</sup>	GEOS	全球	全球:1/2° 赤道区经向加密:1/4°;	1 d	Aquarius L2	EnOI
Chakraborty 等 <sup>[35-36]</sup>	MITGCM	全球	1°	1 d	Aquarius L3	SEEK
Toyoda 等 <sup>[37]</sup>	MRI	全球	全球:1° 赤道区经向加密:1/3°;	10 d	Aquarius L3	3Dvar
Kohl 等 <sup>[38]</sup>	MITGCM	全球	全球:1° 赤道区经向加密:1/3°;	月	SMOS L2	松弛逼近
Lu 等 <sup>[39]</sup>	LICOM	全球	1/2°	10 d	SMOS L3	EnOI

间分辨率为  $1/2^\circ$  的海洋模式中,研究了卫星海表盐度同化对海洋垂向结构模拟的影响。通过对比分析不同均方根误差的海表盐度产品的同化效果,他们指出同化 Aquarius 数据可以改善模式对海表及垂向盐度结构的模拟,特别是在热带及南半球海域。同时,研究结果还表明,同化所用海表盐度产品的均方根误差越小,模式对盐度模拟的改进效果就越好。而 Chakraborty 等<sup>[35-36]</sup>在同化海表温度产品的基础上,将 Aquarius 三级产品通过 SEEK 方法同化入空间分辨率为  $1^\circ$  的全球海洋环流模式中,研究了海表盐度同化对于海洋中的流场、热盐结构(混合层与障碍层)模拟的影响。此外,为了研究盐度卫星产品在预报系统中的同化效果,Toyada 等<sup>[37]</sup>将 Aquarius 三级产品同化入日本海洋预报系统 MRI 中,并与浮标数据进行了对比。结果表明,同化 Aquarius 卫星产品可显著提高模式对海表及上层海洋温盐结构的模拟水平。

## 6.2 基于 SMOS 卫星产品的研究

Kohl 等<sup>[38]</sup>使用松弛逼近法将 SMOS 二级产品同化入空间分辨率为  $1^\circ$  的 MIT 模式中,发现该产品并不能提高海洋模式对海表盐度的模拟水平,而 Lu 等<sup>[39]</sup>则进行了多个同化实验,并将实验结果与 Kohl

的结果进行对比分析,得出海表盐度资料的版本与所用的同化方法是影响卫星海表盐度同化效果的关键因素。此外, Lu 等还使用 EnOI 方法仅同化 SMOS 三级产品和在同化海表温度、海表面高度与垂向温盐廓线的基础上同化 SMOS 三级产品的模拟效果进行了对比分析。结果表明,虽然仅同化 SMOS 三级产品可以提高海洋模式对海表盐度及垂向盐结构的模拟能力,但对海表温度及垂向热结构的模拟效果的改善却不甚明显,而同时同化多种资料则可显著提高模式对海洋状态的模拟。

综上所述,通过使用不同的卫星盐度产品,科学家们进一步证实了海表盐度同化可以提高模式对海洋状态的模拟和预报能力,但同化效果显著依赖于数据产品的质量和所用的同化方法,比较而言现代同化方法可以更好地提高同化效果。

## 7 展望

随着盐度遥感和反演技术的发展,卫星海表盐度资料同化作为一个新的研究热点,正日渐受到人们的关注。需要指出的是,卫星海表盐度的资料同化效果依赖于高质量的卫星产品和有效的同化方法。因此,在同化前,对卫星产品的甄别、卫星产品

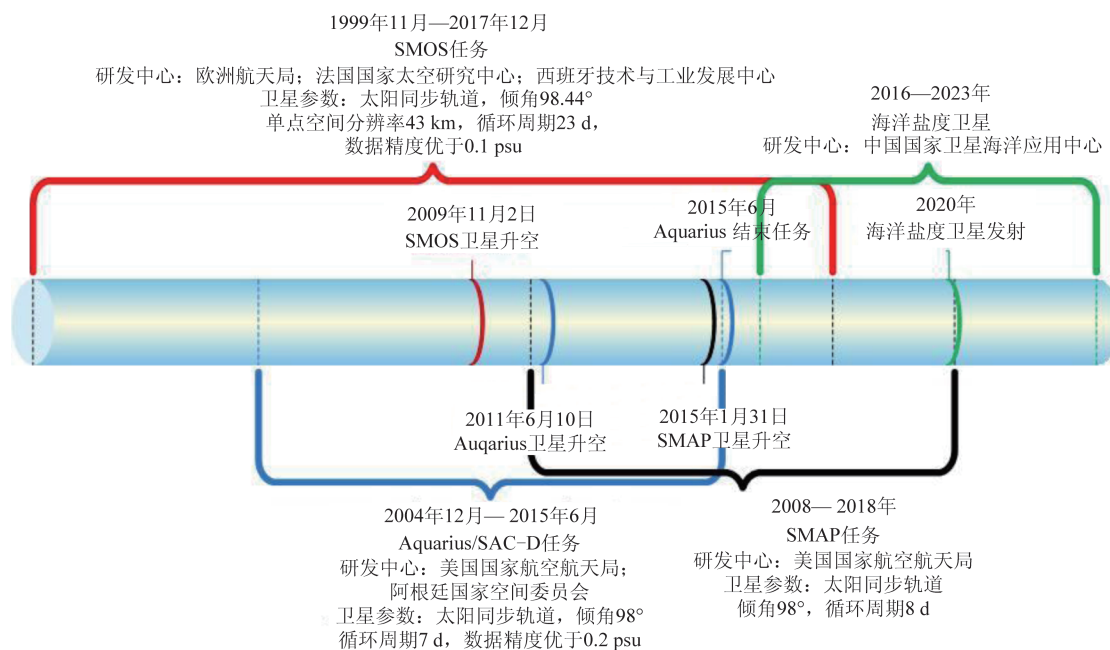


图2 全球盐度卫星探测任务统计

偏差的订正以及同化方法的选择就显得尤为重要了。

在业务化海洋预报中,基于高分辨率的海洋模式,能够分辨中尺度涡的精细化预报(空间分辨率达到了 $1/12^\circ$ )已成为全球海洋预报系统的发展趋势<sup>[12]</sup>。受观测数据的限制,现有的海表盐度同化研究多将海表盐度月平均资料同化入空间分辨率较粗的海洋模式中,这样的研究难以满足精细化预报的要求。因此,为了满足未来精细化预报的发展需求,进一步改进同化方法,研究海表盐度资料同化在高分辨率预报模式中的作用是非常必要的。

作为海表盐度资料同化的硬件基础,盐度观测卫星的发射与持续运行对于该项研究的发展具有重要意义。当前,我国已初步建立了以海洋一号、海洋二号、高分三号系列卫星为主的包括海洋水色、海洋动力环境与海洋监视监测的海洋卫星体系,并完成了新一代海洋水色卫星和海洋盐度探测卫星工程的先期攻关工作<sup>[40]</sup>(见图2)。由此可以认为,随着“十三五”期间我国海洋盐度观测卫星的升空,海表盐度反演技术的发展与同化技术的改进,海表盐度的资料同化研究必将进入一个崭新的快速发展阶段。

## 参考文献:

- [1] Ricci S, Weaver A T, Vialard J, et al. Incorporating State-dependent temperature-salinity constraints in the background error covariance of variational ocean data assimilation[J]. *Monthly Weather Review*, 2005, 133(1): 317-338.
- [2] Cooper N S. The effect of salinity on tropical ocean models[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1988, 18(5): 697-707.
- [3] Lagerloef G S E. Introduction to the special section: the role of surface salinity on upper ocean dynamics, air-sea interaction and climate[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2002, 107 (C12): 8000.
- [4] Terray L, Corre L, Cravatte S, et al. Near-surface salinity as nature's rain gauge to detect human influence on the tropical water cycle [J]. *Journal of Climate*, 2012, 25(3): 958-977.
- [5] Chen X Y, Tung K K. Varying planetary heat sink led to global-warming slowdown and acceleration[J]. *Science*, 2014, 345(6199): 897-903.
- [6] Maes C, Picaut J, Belamari S. Salinity barrier layer and onset of El Niño in a Pacific coupled model[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(24): 2206.
- [7] Bosc C, Delcroix T, Maes C. Barrier layer variability in the western Pacific warm pool from 2000 to 2007[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2009, 114(C6): C06023.
- [8] Hackert E, Ballabrera-Poy J, Busalacchi A, et al. Impact of sea surface salinity assimilation on coupled forecasts in the tropical Pacific[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2011, 116 (C5): C05009.
- [9] Hackert E, Busalacchi A J, Ballabrera-Poy J. Impact of Aquarius sea surface salinity observations on coupled forecasts for the tropical Indo-Pacific Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(7): 4045-4067.
- [10] 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.
- [11] 李宏, 许建平. 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.
- [12] 王辉, 万莉颖, 秦英豪, 等. 中国全球业务化海洋学预报系统的发展和应[J]. *地球科学进展*, 2016, 31(10): 1090-1104.
- [13] 刘娜, 王辉, 凌铁军, 等. 全球业务化海洋预报进展与展望[J]. *地球科学进展*, 2018, 33(2): 131-140.
- [14] 沈浙奇, 唐佑民, 高艳秋. 集合资料同化方法的理论框架及其在海洋资料同化的研究展望[J]. *海洋学报*, 2016, 38(3): 1-14.
- [15] Bingham F M, Howden S D, Kobalinsky C J. Sea surface salinity measurements in the historical database[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2002, 107(C12): 8019.
- [16] Kobalinsky C J, Hildebrand P, LeVine D, et al. Sea surface salinity from space: science goals and measurement approach[J]. *Radio Science*, 2003, 38(4): 8064.
- [17] McMullan K D, Brown M A, Martin-Neira M, et al. SMOS: the payload[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(3): 594-605.
- [18] Martín-Neira M, Oliva R, Corbella I, et al. SMOS instrument performance and calibration[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 180: 19-39.
- [19] Wentz F J, LeVine D. Algorithm theoretical basis document: Aquarius level-2 radiometer algorithm: revision 1[R]. RSS Technical Report 012208. RSS, 2008: 1-14.
- [20] Lagerloef G, Colomb F R, Le Vine D, et al. The aquarius/SAC-D mission: designed to meet the salinity remote-sensing challenge [J]. *Oceanography*, 2008, 21(1): 68-81.
- [21] Piepmeier J R, Focardi P, Horgan K A, et al. SMAP L-band microwave radiometer: instrument design and first year on orbit [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(4): 1954-1966.
- [22] Burgin M S, Colliander A, Njoku E G, et al. A comparative study of the SMAP passive soil moisture product with existing satellite-based soil moisture products[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(5): 2959-2971.
- [23] 张庆君, 殷小军, 蒋昱. 发展海洋盐度卫星完善我国海洋动力卫星观测体系[J]. *航天器工程*, 2017, 26(1): 1-5.
- [24] Reynolds R W, Ji M, Leetmaa A. Use of salinity to improve ocean modeling[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 1998, 23(5-6): 1-14.

- 543-553.
- [25] Sen A, Kim Y, Caruso D, et al. Aquarius/SAC-D mission overview [C]//Proceedings of the 6361, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites X. Stockholm, Sweden: SPIE, 2006: 14.
- [26] Silvestrin P, Berger M, Kerr Y H, et al. ESA's second earth explorer opportunity mission: the soil moisture and ocean salinity mission-SMOS[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letter, 2001, 118: 11-14.
- [27] Le Vine D M, Abraham S, Kerr Y H, et al. Comparison of model prediction with measurements of galactic background noise at L-band[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(9): 2018-2023.
- [28] Reul N, Tenerelli J, Guimabrd S. SMOS Level 3&4 research products of the centre d'expertise ifremer du CATDS[Z]. Plouzane France: Centre Aval de Traitement des Donnees SMOS Expertise Center Ocean Salinity, 2015.
- [29] Durand F, Gourdeau L, Delcroix T, et al. Assimilation of sea surface salinity in a tropical Oceanic General Circulation Model (OGCM): a twin experiment approach[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2002, 107(C12): 8004.
- [30] Durand F, Gourdeau L, Delcroix T, et al. Can we improve the representation of modeled ocean mixed layer by assimilating surface-only satellite-derived data? A case study for the tropical Pacific during the 1997-1998 El Niño[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2003, 108(C6): 3200.
- [31] Tranchant B, Testut C E, Ferry N, et al. Data assimilation of simulated SSS SMOS products in an ocean forecasting system[J]. Journal of Operational Oceanography, 2008, 1(2): 19-27.
- [32] Tranchant B, Testut C E, Renault L, et al. Expected impact of the future SMOS and Aquarius Ocean surface salinity missions in the Mercator Ocean operational systems: new perspectives to monitor ocean circulation[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(4): 1476-1487.
- [33] Brassington G B, Divakaran P. The theoretical impact of remotely sensed sea surface salinity observations in a multi-variate assimilation system[J]. Ocean Modelling, 2009, 27(1-2): 70-81.
- [34] Vernieres G, Kovach R, Keppenne C, et al. The impact of the assimilation of Aquarius sea surface salinity data in the GEOS ocean data assimilation system[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2014, 119(10): 6974-6987.
- [35] Chakraborty A, Sharma R, Kumar R, et al. A SEEK filter assimilation of sea surface salinity from Aquarius in an OGCM: implication for surface dynamics and thermohaline structure[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2014, 119(8): 4777-4796.
- [36] Chakraborty A, Sharma R, Kumar R, et al. Joint assimilation of Aquarius-derived sea surface salinity and AVHRR-derived sea surface temperature in an ocean general circulation model using SEEK filter: implication for mixed layer depth and barrier layer thickness[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2015, 120(10): 6927-6942.
- [37] Toyoda T, Fujii Y, Kuragano T, et al. Improvements to a global ocean data assimilation system through the incorporation of Aquarius surface salinity data[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2015, 141(692): 2750-2759.
- [38] Köhl A, Martins S M, Stammer D. Impact of assimilating surface salinity from SMOS on ocean circulation estimates[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2014, 119(8): 5449-5464.
- [39] Lu Z T, Cheng L J, Zhu J, et al. The complementary role of SMOS sea surface salinity observations for estimating global ocean salinity state[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2016, 121(6): 3672-3691.
- [40] 蒋兴伟. 聚焦主业夯实基础推动海洋卫星事业再创新佳绩[J]. 海洋开发与管理, 2017, 34(S1): 66-70.

## Progress Review of sea surface salinity data assimilation

QIN Si-si<sup>1,2</sup>, WANG Hui<sup>1</sup>, ZHU Jiang<sup>2,3</sup>, WAN Li-ying<sup>1</sup>, XING Jian-yong<sup>1</sup>, ZHANG Yu<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Research on Marine Hazards Forecasting, National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing, 100081 China; 2. International Center for Climate and Environment Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Beijing 100029 China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049 China)

**Abstract:** This paper reviews the research progress of Sea Surface Salinity (SSS) data assimilation, analyzes the quality of SSS observations and data assimilation methods in different periods, and looks forward to the research key areas and development trend of SSS data assimilation in the future.

**Key words:** sea surface salinity; data assimilation; salinity satellite