

# 水体表面温度反演研究综述

阎福礼<sup>1</sup>, 吴亮<sup>1,2</sup>, 王世新<sup>1</sup>, 周艺<sup>1\*</sup>, 徐晨娜<sup>1,2</sup>, 王利双<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要** 水体表面温度是研究全球或区域气候变化、数值天气预报的重要参数,是控制水体与大气热量、水分交换的重要变量,对理解水体生物物理过程具有重要意义。卫星观测水表温度具有传统手段不可比拟的技术优势,同时也存在精度和质量上的限制和挑战。本文总结了观测水表温度常用的红外、微波传感器及其分辨率特征,并比较分析了各类传感器的优势、劣势和分辨率适用的时空尺度;在区别不同手段观测的水表温度基础上,分别概述了红外遥感和微波遥感反演水表温度的理论基础,以及常用的算法模型;基于水表温度反演的原理和过程,系统分析了云、水汽、气溶胶、比辐射率等不确定性因素,对反演精度的影响及解决方法,并对精度验证方法做了简单介绍;最后,对水体表面温度反演的发展趋势进行了展望,并指出多源数据的同化融合、优势互补是提升水温反演精度的重要途径。

**关键词** 水体表面温度;遥感定量反演;红外;微波;不确定性分析

**DOI:**10.3724/SP.J.1047.2015.00969

## 1 引言

地球表面温度是全球气候系统首要的、不可缺少的参数之一,是控制地球表面与大气之间热量、水分、气体交换的重要变量<sup>[1]</sup>。在全球视角下,根据不同地表领域将地球表面温度分为4类:陆地表面温度(Land Surface Temperature, LST)、冰表面温度(Ice Surface Temperature, IST)、海洋表面温度(Sea Surface Temperature, SST)和湖泊表面温度(Lake Water Surface Temperature, LWST)<sup>[2]</sup>。遥感卫星可对地球表面连续的大面积同步观测,其数据是定量反演地球表面温度的重要来源。其中,水体(本文指海洋和湖泊)表面的热力学性质、热量传输过程、空间特征,以及比辐射率等与陆地、冰有较大的差异,这种差异使得水体与陆地、冰表面温度遥感定量反演的研究应予区别开来<sup>[1,3]</sup>。

1981年,美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)发射运行的AVHRR传感器可观测全球海域的表面温度,其对SST大尺度的连续观测打破了传统离散

点实地测量的局限,在海洋观测和预报、商业捕鱼、气候气象等领域发挥重要的作用<sup>[4]</sup>。与地球同步的静止气象卫星上的红外辐射计,每天提供48幅影像,可监测海洋中尺度现象及海温日变化<sup>[5-6]</sup>。微波技术的发展使微波辐射计应用于SST观测,增强了各种气候条件下遥感观测SST的能力<sup>[7-8]</sup>。随着全球性SST遥感观测取得巨大成功,学者们也开始研究区域性海域、内陆湖泊的表面温度遥感反演<sup>[9-10]</sup>。至今,水体表面温度的反演已呈现出兼有全球和区域不同尺度,红外遥感和微波遥感不同手段,多平台多视角多分辨率,卫星数据、实测数据,以及大气数据不同数据源支持下的综合反演模式。

研究和预测气候变化、数值天气预报时,对SST的精度要求是0.3 K<sup>[4]</sup>。但遥感反演在实际中特别是数据源较为单一的情况下,难以得到如此高精度的SST;一些长期困扰温度反演的不确定性因素依旧限制着SST/LWST的可利用性和精度,例如,云的干扰、大气组分及大气温度的干扰、比辐射率差异、水体表面的“皮肤效应”(Skin Effect)等;而且随着遥感传感器的发展,不同分辨率、不同观测手

收稿日期 2014-09-19;修回日期:2014-12-11.

基金项目 国家自然科学基金项目“富营养化水体的比辐射率测定及其红外水温遥感反演”(41371363);国家自然科学基金项目“浅水下垫面光学效应与水体水质光学辐射传输模型研究”(40701126)。

作者简介 阎福礼(1973-),男,副研究员,主要从事资源环境定量遥感研究。E-mail: yanfl@radi.ac.cn

\*通讯作者:周艺(1964-),女,研究员,博导,主要从事人居环境遥感研究。E-mail: zhouyi@radi.ac.cn

段也带来了多源多尺度数据的对比分析、数据同化融合等问题。本文初步总结分析了水体表面温度反演的卫星数据,并对它们的分辨率特征、优劣作了对比;论述了红外辐射计和微波辐射计反演水体表面温度的理论基础及算法模型,分析了影响反演精度的不确定性因素,并对未来水体表面温度遥感反演的发展趋势进行了展望。

2 反演数据分析

根据国际卫星对地观测委员会(Committee for Earth Observation Satellites, CEOS)在线数据库的统计(2014年),已发射的30余种传感器为水体表面温度的遥感监测提供了大范围、高频次的遥感数据支撑<sup>[1]</sup>。进行业务化的水温遥感监测,除了海量的卫星遥感数据之外,还离不开大气观测数据、水体温度实测数据的支持。

2.1 卫星数据

用于反演水体表面温度的卫星数据包括微波数据和红外数据,红外数据种类繁多,可分为极轨卫星红外数据和静止气象卫星红外数据。表1为常

用的具有观测水体表面温度能力的部分传感器及相关信息。多类型、多时相、多分辨率、多频段的卫星数据能够提供不同时空尺度、不同精度要求的水表温度产品。

(1) 红外数据

AVHRR数据是应用于水体表面温度反演时间最长的卫星数据,已持续观测30余年。其成像面积大,每天重复观测地球2次,利于获得宏观同步信息。与之相近的还有MODIS数据和NPP/VIIRS数据,不过MODIS和VIIRS的波段较AVHRR丰富,这使得它们在夜间可供使用的中红外波段数更多,另外检测云和气溶胶的能力也更强。NPP卫星发射于2011年,VIIRS热红外波段星下点空间分辨率提升到0.75 km,其轨道与AVHRR类似,被认为是替代AVHRR的新一代传感器<sup>[1]</sup>。为了获取高精度的SST,欧空局设计并运行了ATSR系列传感器,其与AVHRR同样有3个红外波段,不同的是它通过2个视角观测,能很好地校正大气效应。

中小尺度水体的表面温度反演需要空间分辨率较高的卫星数据。常见的有Landsat-7上的ETM+数据,Landsat-8上的TIRS数据,以及搭载在Aqua卫星上的ASTER数据。ETM+热红外波段空

表1 可用于水表温度反演的卫星遥感数据

Tab. 1 The available remote sensing datasets for water surface temperature retrieval

类型	时间分辨率	空间分辨率	卫星传感器(传感器英文全称)	波段
红外数据	1~16 d	约100 m	Landsat-7-ETM+(Landsat Enhanced Thematic Mapper Plus)	ASTER和TIRS有2个或2个以上热红外波段,ETM+只有1个热红外波段;无中红外波段
			Landsat-8-TIRS(Thermal Infrared Sensor)	
			Terra-ASTER(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)	
	1~4 d	约300 m	HJ-1B-IRS(Infrared Spectrometer)	均有1个热红外波段;IRS有1个中红外波段
			FY-3-MERSI(Medium Resolution Spectral Imager)	
	2次/d	约1 km	NOAA-AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer)	均有2个位于大气窗口的热红外波段,中红外波段数不一
			Terra/Aqua-MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)	
			NPP-VIIRS(Visible Infrared Imaging Radiometer Suite)	
	1次/3 d	约1 km	FY-3-VIRR(Visible Infrared Radiometer)	2个热红外,1个中红外波段
			ENVISAT-AATSR(Advanced Along Track Scanning Radiometer)	
			ERS-ASTR-1/2(Along Track Scanning Radiometers 1/2)	
微波数据		12~14 km	Aqua-AIRS(Atmospheric Infrared Sounder)	2378个红外通道
			Metop-IASI(Infrared Atmospheric Sounding Interferometer)	8461个红外通道
	0.5~1 h	3~10 km	FY-2-S-VISSR(Stretched Visible and Infrared Spin Scan Radiometer)	2个位于大气窗口的热红外波段,中红外波段数不一
			Meteosat-SEVIRI(Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager)	
	1~2 d	25~50 km	GOES-Imager/ABI(Advanced Baseline Imager)	有1~3个不等的波段,多个极化通道
			TRMM-TMI(Microwave Imager)	
			Aqua-AMSR-E(The Advanced Microwave Scanning Radiometer-EOS)	
			FY-3-MWRI(Microwave Radiometer Imager)	
			GCOM-W1-AMSR-2(Advanced Microwave Scanning Radiometer 2)	

间分辨率达到 60 m,TIRS 有 2 个处于大气窗口的热红外波段且空间分辨率为 100 m,ASTER 数据热红外波段分辨率也达到 90 m 并有 5 个热红外波段。这类数据空间分辨率较高,但其覆盖全球需要 16 d,周期长。中国环境 1 号卫星搭载的 IRS 传感器,以及风云 3 号搭载的中分辨率成像光谱仪 MERSI,热红外波段分辨率在 300 m 左右,时间分辨率 1~4 d,对特定时空尺度的应用具有重要意义<sup>[12]</sup>。

IASI、AIRS 等高光谱卫星数据主要用于大气温度、湿度廓线的估算,臭氧含量的探测,云的检测等应用,同时也可用于表面温度的反演<sup>[13]</sup>。AIRS 于 2002 年搭载在 Aqua 卫星升空,共 2378 个通道,空间分辨率为 13.5 km。IASI 则于 2006 年搭载在 Metop 卫星上升空,共 8461 个通道,空间分辨率为 12 km。

相对于其他数据,静止气象卫星数据最大的优势,在于其重复观测时间间隔短,一般在 0.5~1 h 之间,可对覆盖区域进行每天 24 h 的连续监测。它们一般有 2 个热红外波段和 1 个中红外波段,空间分辨率在 5 km 左右。常见的静止气象卫星红外遥感载荷有我国 FY-2 卫星搭载的 VISSR 传感器,美国 GEOS 系列卫星搭载的 Imager 传感器等。

(2)微波数据

红外数据受水汽、云和气溶胶的影响较大,一般仅适用于晴空条件下表面温度的反演。而微波数据由于其全天时、全天候,多极化等特点,能够克服红外数据的局限性,在大尺度表面温度反演中具

有独特优势<sup>[7]</sup>。目前,常用的微波辐射计有 TMI、AMSR-E、AMSR-2,以及我国 FY-3 卫星搭载的 MWRI, HY-2 卫星搭载的 RAD。Chelton 等<sup>[7]</sup>指出全球性的 SST 微波观测,是从 2002 年 AMSR-E 的使用开始的。AMSR-E 搭载在 Aqua 卫星上,频率为 6.925 GHz, 10.65 GHz 的 2 个波段空间分辨率为 50 km。AMSR-2 是接替 AMSR-E 的下一代传感器,增加了 7.3 GHz 频率波段,于 2012 年搭载在日本 GCOM-W 卫星上发射成功,2013 年起向公众发布数据。HY-2/RAD 传感器观测海温频率为 6.6 GHz 和 10.7 GHz,与 AMSR-E 频率设置接近。

2.2 实测数据

实测数据是水体表面温度反演必不可少的数据源,由 Argo、漂流浮标、固定浮标、测船等现场实地测得,可提供全球性或区域性水域的实时的、离散的、较为精确的表面温度<sup>[14]</sup>。水表实测温度有 3 个功能:评价卫星数据估算的 SST/LWST 精度;利用实测温度和卫星数据观测值回归分析得到卫星数据反演 SST/LWST 的算法模型的系数;利用实测温度和卫星数据 SST/LWST 观测值插值,补足由云造成的数据缺失,并提升精度。但由于人员的随机观测误差以及平台材质、局地气象,以及水体测量深度不同也会引起误差。其中,测船的测量误差约在 1~3.5 K 左右,漂流浮标的误差在 0.12~0.67 K,固定浮标的误差约在 0.05~0.39 K<sup>[15]</sup>。了解不同水温实

表 2 不同卫星数据源反演水体表面温度的适用性与优劣  
Tab. 2 The advantages/disadvantages of different satellite datasets for water surface temperature retrieval.

数据源	绝对精度(K)	空间分辨率	适用性	优势	劣势
AVHRR、MODIS、NPP/VIIRS、FY-3/VIRR 等数据	0.4~0.6	0.75~4 km	适用于海洋及面积较大的湖泊	每天观测全球 2 次;算法成熟、应用广泛;有非常成熟的数据产品	观测小尺度水体空间分辨率不够高
ATSR-1/2 和 AATSR 数据	0.2~0.3	1~2 km	适用于海洋及面积较大的湖泊	更精确地校正大气效应,反演精度高,噪声低	扫描宽度较窄;重复观测周期较长(3 d)
TM/ETM+、HJ-1B/HRS、TIRS 等资源卫星数据	约 1	60~300 m	适用于内陆湖泊及临近海岸海域	空间分辨率高	红外波段单一;覆盖面积小;重复观测周期较长
GOES/Imager FY-2/S-VISSR、Meteosat-SEVIRI 等静止气象卫星数据	0.5~0.8	3~10 km	适用于传感器观测区域内的海域	重复观测时间间隔短(0.5~1 h),其他数据难以企及的高时间频率	空间分辨率不高;受到观测角限制,不能观测全球
以 IASI、AIRS 为代表的高光谱数据		12~14 km	适用于大面积海域	能提供综合反演,即能够识别云,能够计算大气温度、湿度廓线等大气数据	空间分辨率低;处理过程复杂;其主要用于大气廓线反演、云检测等领域
以 AMSR-E、TMI 为代表的微波数据	0.5~1	25~50 km	仅适用于大面积且远离陆地海域	全天时、全天候、多极化,尤其是在云覆盖条件下观测 SST,保证数据可用性	空间分辨率低、反演精度不高;易受陆地辐射的干扰;易受海风影响



测数据的来源及其误差的大小,对研究水温定量遥感反演算法和真实性检验,都具有极其重要的意义。

### 2.3 数据对比分析

不同的卫星数据有不同的时间、空间、光谱分辨率,而水表温度反演有着不同的时空尺度、精度需求,所以,需根据研究目的选择合适的卫星数据源。表2比较了不同类型数据源反演水体表面温度的适用性与优劣,为数据的选择提供参考。

多类型、多时相、多分辨率、多频段的遥感数据具有各自的优势和局限,水表温度的反演有时需要将多种遥感数据结合起来,以提高精度或达到某种实用目的。全球海洋同化实验(Global Ocean Data Assimilation Experiment, GODAE)计划认为,为了提高SST在气候变化监测、海洋和大气模型等应用中的性能,其必须达到优于0.4 K的精度、准实提供,以及较好的空间分辨率(<10 km)和时间分辨率(6~12 h)。但是,没有哪种单一的数据源能达到这一要求,所以,GODAE提出了不同数据源结合的方法,并开发出GHRSSST(GODAE High-Resolution SST)<sup>[16]</sup>。

## 3 温度反演理论基础与算法模型

### 3.1 水体表面温度的含义

水体表面温度的测量有2个来源:实地测量和卫星数据反演,二者因测量深度不同有着本质的差异。传统的船测或浮标实地测得的水表温度是0.3~5 m不等深度的温度,这个温度叫做“体温”(Bulk Temperature),代表吸收大部分太阳辐射的水层平均温度。卫星传感器由于观测波段波长的不同,所测量的水表温度对应的深度也不一致:热红外辐射计测量值代表约10~20 μm深度的水表温度;微波辐射计频率在10 GHz左右的波段测量值是约1~5 mm深度的水表温度。Donlon等<sup>[17]</sup>对各类水表温度作了精确的定义,并进行了比较。学者们将水体表面小于1 mm厚度的水温叫做“皮肤温度”(Skin Temperature),其与传统概念上的水表温度相比,往往表现得要低。“皮肤温度”和“体温”的差异叫做“皮肤效应”<sup>[18-19]</sup>。

### 3.2 水温红外遥感反演方法

#### (1) 水温红外遥感反演理论基础

卫星传感器接收到的红外辐射信号源自地物

和大气。若考虑热辐射的方向性,可表示为<sup>[3]</sup>:

$$L_{\lambda}(\theta) = B_{\lambda}(T_s)\varepsilon_{\lambda}(\theta)\tau_{0\lambda}(\theta) + L_{0\lambda}^{\uparrow}(\theta) + \tau_{0\lambda}(\theta) \int_0^{\pi} f(\theta', \varphi', \theta, \varphi) L_{0\lambda}^{\downarrow}(\theta') \cos \theta' d\theta' \quad (1)$$

式中,  $\theta$ 、 $\varphi$  分别指传感器的天顶角和方位角;  $\theta'$ 、 $\varphi'$  分别指大气下行辐射的天顶角和方位角。  $L_{\lambda}(\theta)$  指视角为  $\theta$  时传感器接收到的波长为  $\lambda$  的辐射亮度;  $B_{\lambda}(T_s)$  指表面温度为  $T_s$  的黑体辐射强度;  $\varepsilon_{\lambda}(\theta)$  指天顶角为  $\theta$  时波长为  $\lambda$  的地表比辐射率;  $\tau_{0\lambda}(\theta)$  指天顶角为  $\theta$  时电磁波穿透大气的透过率;  $L_{0\lambda}^{\uparrow}(\theta)$  指视角为  $\theta$  时波长为  $\lambda$  的大气上行辐射;  $L_{0\lambda}^{\downarrow}(\theta)$  指视角为  $\theta'$  时波长为  $\lambda$  的大气下行辐射;  $f(\theta', \varphi', \theta, \varphi)$  为地表双向反射分布函数;  $\int_0^{\pi}$  代表半球积分,  $d\theta'$  代表微分立体角。式(1)说明影响水温反演的地物(比辐射率、双向反射分布函数)、大气(大气上下行辐射、透过率)和观测几何(天顶角、方位角)等几个影响因素。

假设地表和大气对热辐射有朗伯体性质,且大气下行辐射在半球空间取常数,则式(1)可简化为:

$$L_{\lambda} = B_{\lambda}(T_s)\varepsilon_{\lambda}\tau_{0\lambda} + L_{0\lambda}^{\uparrow} + (1 - \varepsilon_{\lambda})L_{0\lambda}^{\downarrow}\tau_{0\lambda} \quad (2)$$

水体表面温度的反演是由传感器接收到的辐射信号定量地估算水表真实温度的过程,这个过程需校正2方面的影响:水体表面比辐射率的影响,以及大气对红外辐射传输的影响。由于红外波段的波长较长,所以,大气散射的影响较弱,其大气效应主要是大气对热辐射的吸收和发射。如图1所示,带来热辐射传输大气效应的因素包括云、微量气体(如臭氧)、气溶胶及水汽等大气成分,不同程度地吸收和发射红外辐射。

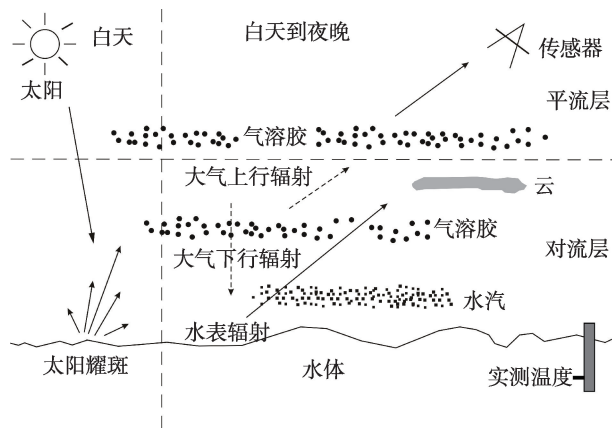


图1 红外辐射计反演 SST/LWST 原理图<sup>[20]</sup>

Fig. 1 A schematic diagram of the infrared SST/LWST retrieval<sup>[20]</sup>

鉴此,学者们提出了一系列表面温度反演算法,反演水体表面温度的常见算法,包括辐射传输算法<sup>[21-22]</sup>、单窗算法<sup>[23-24]</sup>、分裂窗算法<sup>[25-28]</sup>等。

### (2) 辐射传输算法

在获取大气温度和湿度垂直廓线的条件下,利用大气辐射传输模型计算出大气辐射和大气透过率带入辐射传输方程,对大气效应进行订正和剔除,从传感器所测得的辐射亮度计算地表辐射亮度值,假设已知比辐射率就可求出表面温度<sup>[21-22]</sup>。辐射传输算法考虑到各种大气影响,是较为全面和理想的算法。但是,其计算复杂,且实时的大气垂直廓线数据难以获取,大气廓线数据的不确定性,加大了表面温度反演结果的误差。

ATSR 系列传感器具有双视角观测水表温度的能力,在不同的角度,红外辐射受到大气吸收和发射等大气效应的影响也不相同。研究者利用这个特点,在辐射传输模型的基础上,模拟出传感器观测到的红外辐射值,并将模拟得到的红外辐射值与 ATSR 观测值对比,得到水表温度反演的经验公式<sup>[22]</sup>。相比纯经验模型,这种辐射传输模型的算法更全面,利用 ATSR 系列数据反演得到的 SST 精度能达到 0.3 K。

### (3) 单窗算法

常用于只有一个热红外通道的卫星数据反演表面温度,具有代表性的是 Qin 等<sup>[23]</sup>的单窗算法,以及 Jiménez-Muñoz 和 Sobrino<sup>[24]</sup>提出的普适单窗算法。前者根据地表热辐射传输方程推导得到,该算法需要用地表辐射率、大气透射率和大气平均温度 3 个参数进行地表温度的估算。后者仅利用大气水汽含量和波段的有效波长来估算表面温度。单窗算法需要实时的大气数据,而大气数据并不容易获得,因此,这类算法受到很大的限制。与有多个红外波段的 AVHRR、MODIS 等数据相比, TM、ETM+、HJ/HRS 等数据热红外波段空间分辨率较高,在反演小型湖泊或近岸海域表面温度时具有较大优势。由于其热红外波段单一,故需采用单窗算法。

### (4) 分裂窗算法

其是水体表面温度反演应用最广泛的算法,其精度一般约 0.4~0.8 K<sup>[16,29]</sup>。相比单窗算法,分裂窗算法需要的参数较少,精度较高,不需要精确的大气廓线数据,在实际应用中非常有效。Anding 和 Kauth<sup>[25]</sup>发现了 2 个红外波段的辐射差异与需要校

正的大气效应成比例,且证明在没有气象数据的情况下,可利用 2 个红外波段的辐射值纠正水汽的吸收和发射影响。故此,McClain<sup>[26]</sup>提出了多通道 SST 算法即 MCSST (multi-channel SST),其表达如式 (3) 所示。

$$T_s = \alpha + \beta T_i + \gamma(T_i - T_j) + \delta(T_i - T_j)(1 - \sec(\theta)) \quad (3)$$

式中,  $T_s$  指待计算的水体表面温度;  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  是算法的待定系数;  $T_i$  和  $T_j$  是 2 个红外(包括中红外和热红外)通道的亮度温度,如 AVHRR 数据第 3、4、5 通道的亮温,MODIS 数据第 20、22、23,以及 31、32 波段;  $\theta$  是天底角。

Walton<sup>[27]</sup>认为大气透过率不是恒定的常数,而与亮度温度成比例关系,提出了非线性算法即 NLSST(non-linear SST),其表达如式(4)所示。

$$T_s = \alpha + \beta T_i + \gamma(T_i - T_j)T_{\text{guess}} + \delta(T_i - T_j)(1 - \sec(\theta)) \quad (4)$$

式中,  $T_{\text{guess}}$  是水表温度的最初估计值,可用 MCSST 结果代替。

## 3.3 水温微波遥感反演方法

### (1) 水温微波遥感反演理论基础

被动微波遥感测量地物微波波段的辐射亮度,普朗克辐射定律经简化导出瑞利-金斯定律,该定律揭示了微波辐射计探测到的辐射亮度与亮度温度有简单的线性关系<sup>[8]</sup>。考虑大气效应的情况下,微波在大气的辐射传输方程<sup>[30]</sup>如式(5)所示。

$$T(\theta) = T_{\text{Atm}}^{\uparrow}(\theta) + \tau[eT_s + (1 - e)(\Omega T_{\text{Atm}}^{\downarrow}(\theta) + \tau T_c)] \quad (5)$$

式中,  $\theta$  指入射角;  $T(\theta)$ 、 $T_s$ 、 $T_c$  分别指辐射计观测的亮度温度、海洋表面温度,以及宇宙背景辐射;  $T_{\text{Atm}}^{\uparrow}(\theta)$  和  $T_{\text{Atm}}^{\downarrow}(\theta)$  分别指大气上行、下行辐射亮温;  $e$  是海面比辐射率;  $\tau$  是大气透过率;  $\Omega$  是海面散射校正因子。

与红外辐射计反演原理类似,为得到真实水表温度,需进行大气效应和海表比辐射率的校正。其中,比辐射率的校正是被动微波反演水表温度的难点,其与海水表面盐度、粗糙度、温度等相关。

### (2) 反演算法模型

利用微波数据反演海洋表面温度的算法主要包括 3 类:统计算法、辐射传输模型的半经验算法和神经网络算法。统计算法根据微波辐射计多通道数据获得的亮度温度与实际测量的表面温度数据进行多元回归,得到反演水体表面温度的表达式,该方法简单易行,但缺少物理约束,对各种环境的

适用性弱。辐射传输模型的半经验算法,以Wentz等<sup>[30]</sup>提出的多元线性回归算法和非线性迭代算法为代表,是微波辐射计反演SST业务化算法。神经网络算法是以人工神经网络原理的SST反演算法<sup>[31-32]</sup>。

## 4 反演不确定性分析与精度验证

### 4.1 不确定性分析

卫星观测水表面温度的过程较复杂,存在诸多不确定性因素,包括传感器仪器特征、云覆盖、水汽和气溶胶的吸收和辐射、水体比辐射率、水温日变化,以及“皮肤效应”等带来的不确定性,还包括全球性SST算法应用到区域水体所带来的不确定性<sup>[33-34]</sup>。其中,传感器特征属于传感器性能问题,本文不作讨论。红外遥感和微波遥感观测水表面温度的原理和深度均不同,所以其主要的 uncertainty 影响因素也不一致<sup>[35]</sup>:红外遥感反演水表面温度不确定性,主要来源于未被检测到的云,以及对水汽和气溶胶引起的大气效应的不完全校正;微波遥感反演水表面温度不确定性,主要来源于水表面粗糙度,以及水表面粗糙度对比辐射率造成的影响。水温日变化和“皮肤效应”则对微波遥感和红外遥感反演水表面温度均有影响。

#### 4.1.1 云的干扰

卫星数据中有云的干扰时水温反演精度将大幅度降低,检测出“有云”、“无云”、“部分云覆盖”像是红外遥感反演水表面温度非常关键的步骤。云检测的主要依据包括<sup>[36]</sup>:云相比地球表面有较高的反射率和较低的温度等特征;云与地表的差异在不同的波段是不同的;云和地表有着空间结构差异。例如,薄云、碎云、低云等类型的云较难检测识别,会带来较大的不确定性。云检测的算法主要有阈值法和统计法2类:阈值法是根据发射率、温度或多个通道发射率的比值等选取阈值剔除云<sup>[36-37]</sup>;统计法是基于概率模型的云检测算法,如Merchant等<sup>[38]</sup>提出了严格贝叶斯定理、概率密度函数的云检测算法。此外,微波能穿透云,受云的影响较红外波段小很多,微波数据能帮助红外数据判断识别云像元。经过插值和数据同化,微波数据能很大程度地补足红外数据云层覆盖部分。

#### 4.1.2 大气效应

由式(1)、(2)可知,大气温度和透过率影响水温反演结果精度。研究者针对单热红外波段数据,通过获取过境时刻的大气参数(一般由同步大气廓

线获得),由大气辐射传输模型对大气贡献进行模拟,从而完成对热辐射大气效应的校正。另外,分裂窗技术利用相邻通道的亮度温度之差与水汽吸收成正比来校正其影响。但是,这种方法的效果会受到区域、季节等因素的影响而变化,例如,夏季的校正性能要比其他季节好,亮度温度与水汽的函数关系在中纬度和高纬度地区不如低纬度地区稳定,常常会过高或过低估计水汽的作用<sup>[39]</sup>。因此,在实际水温反演中,需要分不同的区域、季节、大气类型建立不同的算法模型,使大气校正尽可能地准确。大气窗口的水汽吸收率随大气温度和气压变化而轻微变化,这种变化带来的误差随着大气总水汽含量和观测天顶角的增大而增大,很多研究者针对该误差,在分裂窗算法添加了观测角度的修正项和对环境温度的修正项。

分裂窗算法主要校正大气水汽吸收,很大程度上忽略了气溶胶的作用。Martin<sup>[20]</sup>指出水温反演分裂窗算法,在卫星数据和实测温度的对比回归中已计入了气溶胶效应。然而,大气中高负荷气溶胶(如火山爆发、沙漠粉尘等)会导致SST巨大的负值偏差( $>1.0\text{ K}$ )<sup>[39]</sup>,所以,高负荷气溶胶对反演算法性能的影响不容忽视,学者们也提出各种方法校正水温反演过程中气溶胶的影响<sup>[39-40]</sup>。

#### 4.1.3 比辐射率效应

目前,大多数的红外遥感反演算法,假设水体表面比辐射率为1或接近1的常数。然而,水体不是绝对的黑体辐射源,即它的比辐射率要小于1,而且还随着电磁波波长、视角、水体表面粗糙度,以及水体悬浮物浓度变化而变化<sup>[41-42]</sup>。例如,当视角从 $0^\circ$ 转换到 $55^\circ$ 时,相应地 $11\text{ }\mu\text{m}$ ( $12\text{ }\mu\text{m}$ )波段的比辐射率会减少 $1.5\%$ ( $2.4\%$ )<sup>[43]</sup>。而比辐射率1%的误差将导致 $\text{SST}0.69\text{ K}$ 的误差,所以比辐射率的精确化必须引起高度重视<sup>[42]</sup>。除了传统的实地测量,对水体而言,比辐射率可由观测角、波长、风速等参数计算得到,常用的有Wu和Smith<sup>[42]</sup>提出的模型,以及Masuda<sup>[44]</sup>提出的模型。学者们还参考LST算法给SST算法引入了比辐射率参数项,更精确地校正比辐射率多方面的影响<sup>[43]</sup>。

利用微波辐射计反演SST时,即使是 $6\sim 10\text{ GHz}$ 波段,海水表面的比辐射率也要比红外波段低得多,这使得比辐射率的精确程度对最后的反演结果影响很大。平静海面比辐射率由菲涅耳反射率公式估算,其中,海水相对电容率是关键变量,它与波



段频率、海水温度、海水盐度等相关<sup>[8]</sup>。在有风的情况下,要考虑风速对比辐射率的影响,比辐射率随风速的增大而增大。当风速增加到一定程度时,需考虑泡沫的影响,并进行海面散射校正<sup>[8]</sup>。

#### 4.1.4 “皮肤效应”和海温日变化

“皮肤效应”是水温反演不确定性的关键性因素之一,是造成卫星数据反演水温相比实测水温负值偏差的主要原因。“皮肤效应”的大小由太阳辐射、水体-大气热量交换,以及“湍流混合”(Turbulent Mixing)决定,水表风速对其有很大的影响。太阳辐射的热量大部分被顶层2 m厚的水体所吸收,这部分水体会形成一热层即“暖层”或“日跃温层”<sup>[19]</sup>。传统现场实测的“体温”是“暖层”的平均温度,而卫星传感器观测的是水体表面非常薄的“皮肤层”的温度,二者之间的差异给水体表面温度的反演带来不确定性。此外,太阳辐射的日际变化使“体温”和“皮肤温度”之间的差异存在着日际变化,给水温反演和不同水温比较带来不确定性。水表风速对“皮肤效应”有很大的影响,例如,当风速超过 $6\text{ ms}^{-1}$ ，“日跃温层”热效应会达到最小化，“皮肤温度”与“体温”的差异也会达到最小化<sup>[1,19]</sup>。

#### 4.1.5 内陆湖泊及高纬度水体

反演全球海域SST算法的比辐射率设置单一,专门针对海洋上空的大气环境,将其应用到内陆湖泊会带来与区域环境相关的不确定性<sup>[45]</sup>。内陆湖泊有着各自不同的区域条件,湖泊的陆地位置和海拔高度会影响大气厚度、水汽含量及气溶胶;湖泊边缘存在大量的陆地-水体混合像元;水体的比辐射率除了和水表粗糙度、观测角度、悬浮物浓度相关外,还与水体盐度、浮游植物等密切相关。

高纬度地区的水温反演需解决2个问题<sup>[46]</sup>:冰和水体的识别提取,尤其在夜间显得特别困难;与中纬度及低纬度不同的大气条件,高纬度地区水汽含量较低,大气非常干燥且冰冷,全球性SST算法应用到该区域水体会带来较大的误差。

## 4.2 精度验证

由于水表温度反演过程中存在着诸多不确定性因素,而不确定性因素所带来的误差大小,决定了温度反演结果进一步的应用和解释,所以,必须对卫星数据估算的SST/LWST进行精度验证。广义上的精度验证是使用与需要验证数据同时、同地且精度更高的数据,去检验反演SST/LWST算法的性能,并对反演结果做出精度评定。验证方法通常

有3类<sup>[34]</sup>: (1)利用精度较高的SST数据集验证,如ATSR数据反演的SST/LWST, OISST等; (2)同实地测量的水表温度比较; (3)利用数值天气预报或者大气辐射传输模型的模拟值检验。在对反演结果进行验证和精度评定后,还应对其进行误差分析,找出影响反演精度的不确定性因素。如果识别出系统性不确定性因素,则能帮助提升反演算法的性能和精度。

另外,还要对多源SST/LWST数据集进行交叉验证,评定数据的可靠性和一致性,以进一步进行数据对比分析与同化融合等应用。多源数据的交叉验证是多源数据同化的重要基础。

## 5 展望

综观近年来,国内外水表温度反演的研究,从4个方面展望了水表温度反演的发展趋势:

(1)卫星传感器的性能及其分辨率的改进和提升,将提高卫星数据反演水表温度的能力和精度。例如,2014年底搭载在欧空局Sentinel-3卫星上的SLSTR传感器,是ATSR系列传感器的衍生,延续双视角观测,其SST的反演温度在特定情况下能优于 $0.2\text{ K}$ <sup>[45]</sup>。此外,热红外高光谱传感器的出现,极大地促进了水体温度反演算法的研究和应用;微波数据和静止气象卫星数据,由于其各自的优势而受到研究者的重视,但是,目前的微波辐射计和静止气象卫星红外载荷都有很大的限制,例如,二者的分辨率都很低,未来传感器在分辨率,以及其他性能的提高将弥补这些劣势。例如,美国2015年将发射GOES-R卫星搭载ABI传感器,热红外通道分辨率达2 km。

(2)云覆盖限制红外数据定量反演表面温度的能力。云检测算法尽管已有30多年的发展,但依旧存在巨大的问题和挑战,例如,简单的云检测算法很难识别亚像元云污染。传统的阈值算法系数较为固定,难以适应不同的状况及用户特定的需求,基于概率模型或动态模型智能地确定阈值,是未来云检测算法的发展方向<sup>[45]</sup>。

(3)未来需深入、详尽地研究水体表面及大气层的各个过程,降低不确定性因素对反演精度的影响,并在此基础上开发出更稳定的、适用性更好的反演算法。例如,需进一步理解控制皮肤层的物理现象,更准确地校正“皮肤效应”及其日际变化的影响。此外,区域性水体的表面温度反演一直是持续

而不断深入的问题,需要考虑各种因素(如尺度、陆地干扰、局部大气环境等),并建立适应于局部水体特征及其大气环境的反演算法模型。

(4)为了促进水体表面温度产品的业务化应用及数据融合,需对多源数据进行对比分析,包括:红外辐射计和微波辐射计观测的水表温度分析、遥感卫星数据及现场实测数据分析和不同反演算法产品的对比分析等。此外,通过多源遥感数据的复合、优势互补、资源共享,以提升水温反演产品的精度和质量,更好地为气候变化研究、资源环境调查等服务,这也是水体表面温度遥感反演及应用的主要趋势之一。

#### 参考文献:

- [1] Minnett P J, Barton I J. Remote sensing of the Earth's surface temperature: Radiometric temperature measurements: II Applications[A]. In: Zhang Z M, Tsai B K, Machin G (eds.). *Experimental Methods in the Physical Sciences*, Vol 43[M]. Salt Lake City: Academic Press, 2010.
- [2] Merchant C J, Matthiesen S, Rayner N A, *et al.* The surface temperatures of the earth: steps towards integrated understanding of variability and change[J]. *Geoscientific Instrumentation Methods and Data Systems*, 2013,3:305-345.
- [3] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [4] Walton C C, Pichel W G, Sapper J F. The development and operational application of nonlinear algorithms for the measurement of sea surface temperatures with the NOAA polar-orbiting environmental satellites[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998,103(C12):27999-28012.
- [5] Merchant C J, Harris A R, Maturi E, *et al.* Sea surface temperature estimation from the Geostationary Operational Environmental Satellite-12 (GOES-12)[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009,26:570-581.
- [6] Karagali I, Hyer J L, Hasager C B. SST diurnal variability in the North Sea and the Baltic Sea[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012,121:159-170.
- [7] Chelton D B, Wentz F J. Global microwave satellite observations of sea surface temperature for numerical weather prediction and climate research[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2005,86:1097-1115.
- [8] Hosoda K. A review of satellite-based microwave observations of sea surface temperatures[J]. *Journal of Oceanography*, 2010,66:430-473.
- [9] Bloszies C, Forman S L. Potential relation between equatorial sea surface temperatures and historic water level variability for Lake Turkana, Kenya[J]. *Journal of Hydrology*, 2015,520:489-501.
- [10] 罗晓凡,魏皓,袁承仪. 利用卫星资料分析黄前海表温度的年际与年代际变化[J]. *中国海洋大学学报*, 2012,42(10):19-25.
- [11] Committee for Earth Observation Satellites. The Earth Observation Handbook[DB/OL]. <http://www.eohandbook.com/>, 2014-8.
- [12] Gong S Q, Dong G K, Sun D Y, *et al.* Application of HJ/IRS to retrieve water surface temperature in Lake Taihu, China[C]. *Information Science and Technology (ICIST)*, Jiangsu, 2011.
- [13] August T, Klaes D, Schlüssel P, *et al.* IASI on Metop-A: Operational Level 2 retrievals after five years in orbit[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2012,113:1340-1371.
- [14] Brown O B, Minnett P J. MODIS infrared sea surface temperature algorithm theoretical basis document version 2.0[EB/OL]. [http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd\\_mod25.pdf](http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod25.pdf), 1999-04-30.
- [15] Kennedy J J. A review of uncertainty in in situ measurements and data sets of sea surface temperature[J]. *Reviews of Geophysics*, 2014,52(1):1-32.
- [16] Donlon C, Robinson I, Casey K S, *et al.* The global ocean data assimilation experiment high-resolution sea surface temperature pilot project[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2007,88:1197-1213.
- [17] Donlon C J, Minnett P J, Gentemann C, *et al.* Toward improved validation of satellite sea surface skin temperature measurements for climate research[J]. *Journal of Climate*, 2002,15:353-369.
- [18] Schlüssel P, Emery W J, Grassl H, *et al.* On the bulk-skin temperature difference and its impact on satellite remote sensing of sea surface Temperature[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990,95(C8):13341-13356.
- [19] Fairall C W, Bradley E F, Godfrey J S, *et al.* Cool-skin and warm-layer effects on sea surface temperature[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996,101(C1):1295-1308.
- [20] Martin S. An introduction to ocean remote sensing, 2th edition[M]. New York: Cambridge University Press, 2014.
- [21] 田国良,柳钦火,陈良富,等. 热红外遥感[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.
- [22] Embury O, Merchant C J, Filipiak M J. A reprocessing for climate of sea surface temperature from the along-track scanning radiometers: Basis in radiative transfer[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012,116:32-46.
- [23] Qin Z H, Karnieli A, Berliner P. A mono-window algo-



- rithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(18):3719-3746.
- [24] Jiménez-Muñoz J C, Sobrino J A. A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D22):4688-4696.
- [25] Walton C C. Nonlinear multichannel algorithms for estimating sea-surface temperature with AVHRR satellite data [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1988, 27:115-124.
- [26] Hulley G C, Hook S J, Schneider P. Optimized split-window coefficients for deriving surface temperatures from inland water bodies[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(12):3758-3769.
- [27] Li Z L, Tang B H, Wu H, *et al.* Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 131(15):14-37.
- [28] Wan Z M. New refinements and validation of the collection-6 MODIS land-surface temperature/emissivity product[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 140(1):36-45.
- [29] Hilburn K A, Wentz F J. Intercalibrated passive microwave rain products from the Unified Microwave Ocean Retrieval Algorithm (UMORA) [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2008, 47:778-794.
- [30] Wentz F J, Meissner T. Remote Sensing Systems[J]. Algorithm Theoretical Basis Document(ATBD) version 2: AMSR ocean algorithm[EB/OL]. [http://images.remss.com/papers/rsstech/2000\\_121599A-1\\_Wentz\\_AMSR\\_Ocean\\_ATBD\\_V2.pdf](http://images.remss.com/papers/rsstech/2000_121599A-1_Wentz_AMSR_Ocean_ATBD_V2.pdf), 2000-11-02.
- [31] 伍玉梅, 申辉, 张胜茂, 等. AMSR-E 辐射计反演南大洋实时海面气温[J]. *遥感学报*, 2013, 17(2):471-475.
- [32] Meng L, He Y J, Chen J N, *et al.* Neural network retrieval of ocean surface parameters from SSM/I data[J]. *Monthly Weather Review*, 2007, 135(2):586-597.
- [33] Ricciardulli L, Wentz F J. Uncertainties in sea surface temperature retrievals from space: Comparison of microwave and infrared observations from TRMM[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109:C12013.
- [34] Minnett P J. The validation of sea surface temperature retrievals from spaceborne infrared radiometers[A]. In: Barale V, Gower JFR, Alberotanza L (eds.). *Oceanography from Space*[C]. Springer, 2010.
- [35] Castro S L, Wick G A, Jackson D L, *et al.* Error characterization of infrared and microwave satellite sea surface temperature products for merging and analysis[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113:C03010.
- [36] Ackerman S, Frey R, Strabala K, *et al.* Discriminating clear-sky from cloud with MODIS-Algorithm theoretical basis document (MOD35), v6.1[EB/OL]. <http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/docs/MOD35ATBDCollection6.pdf>, 2012.
- [37] Petrenko B, Ignatov A, Kihai Y, *et al.* Clear-sky mask for the advanced clear-sky processor for oceans[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2010, 27:1609-1623.
- [38] Merchant C J, Harris A R, Maturi E, *et al.* Probabilistic physically based cloud screening of satellite infrared imagery for operational sea surface temperature retrieval[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2005, 131(611):2735-2755.
- [39] Nalli N R, Stowe L L. Aerosol correction for remotely sensed sea surface temperatures from the National Oceanic and Atmospheric Administration advanced very high resolution radiometer[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(C10):36-1-36-18.
- [40] Bogdanoff A S. Impact of airborne dust on sea surface temperature retrievals[D]. Tallahassee, FL: Florida State University, 2010.
- [41] Liu W Y, Field R T, Gantt R G, *et al.* Measurement of the surface emissivity of turbid waters[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 1987, 5(4):363-369.
- [42] Wu X Q, Smith W L. Emissivity of rough sea surface for 8-13 mm: Modeling and verification[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(12):2609-2619.
- [43] Niclos R, Caselles V, Coll C, *et al.* Determination of sea surface temperature at large observation angles using an angular and emissivity-dependent split-window equation [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 111(1):107-121.
- [44] Masuda K. Infrared sea surface emissivity including multiple reflection effect for isotropic Gaussian slope distribution model[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 103(4):488-496.
- [45] Woostera M J, Xua W, Nightingale T. Sentinel-3 SLSTR active fire detection and FRP product: Pre-launch algorithm development and performance evaluation using MODIS and ASTER datasets[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 120:236-254.
- [46] Donlon C J. Sea surface temperature measurements from thermal infrared satellite instruments: Status and outlook [A]. In: Barale V, Gower JFR, Alberotanza L (eds.). *Oceanography from Space*[C]. Springer, 2010.

## Review on Remote Sensing Retrieval of Water Surface Temperature

YAN Fuli<sup>1</sup>, WU Liang<sup>1,2</sup>, WANG Shixin<sup>1</sup>, ZHOU Yi<sup>1\*</sup>, XU Chenna<sup>1,2</sup> and WANG Lishuang<sup>1,2</sup>

(1. *Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** Water surface temperature (including sea surface temperature and lake water surface temperature) is a key parameter for studying global or regional climate change and numerical weather prediction (NWP), as well as being an essential controlling variable in the exchange of heat, moisture and gases between water surface and atmosphere. It has important significance for understanding the biophysical processes of water body. Satellite measurements of water surface temperature are well established with 30 years' collection of practical data and have incomparable advantages over traditional observations. Their limitations and challenges are also identified at the same time. There are more than 30 types of infrared/microwave radiometers which can be used for measuring SST/LWST, and their resolutions, advantages and disadvantages are summarized and compared in this paper. SST/LWST measurements depend on a combination of atmospheric properties and water surface radiances. Therefore, it is necessary to adjust and correct the atmospheric effect and water surface processes. The basic principles and the main types of algorithms for water surface temperature inversion using infrared and microwave data are illuminated and reviewed briefly. There are many uncertainties associated with SST/LWST measurements, and the magnitude of these uncertainties has put restrictions on the application or interpretation of SST/LWST measurements. A detailed analysis about these uncertainties in both infrared and microwave SST/LWST retrieval including undetected cloud, water vapor, aerosols, emissivity and skin effect is conducted. In order to determine the uncertainties in satellite-derived surface temperature, the validation of surface temperature retrieval is an indispensable step. Finally, a prospection about the trend of water surface temperature retrieval is proposed. Additionally, a strategy is advised for assimilating measurements from multi-sensor data in order to take the advantage of their complementary strengths.

**Key words:** water surface temperature; RS quantitative inversion; infrared; microwave; uncertainty analysis

\*Corresponding author: ZHOU Yi, E-mail: zhouyi@radi.ac.cn