

卫星遥感速报北太平洋渔场海温方法研究

毛志华, 朱乾坤, 潘德炉, 龚芳

(国家海洋局第二海洋研究所, 海洋动力过程与卫星海洋学重点实验室, 浙江 杭州 310012)

摘要: 渔场海温速报是开展渔情分析和确定中心渔场的基础, 卫星遥感技术可以快速提供大面积海洋环境参数分布图, 由于大洋渔场超出了陆基卫星地面站的接收范围, 发展船载遥感系统是提供远洋渔场海洋环境条件的有效途径。本研究介绍基于船载的北太平洋渔场海温速报系统、海表温度遥感反演算法和渔场海温速报产品制作等内容。海温精度分析结果表明, 卫星遥感海表温度与船测温度具有良好的一致性, 周平均偏差小于 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$, RMS 平均值为 $0.7967\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。系统已业务试运行 2 年, 完成北太平洋渔场海温速报产品制作 33 期, 取得了预期目标。

关键词: 北太平洋渔场; 卫星遥感; 海表温度

中图分类号: S951.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-8737-(2003)06-0502-05

北太平洋渔场已成为我国远洋渔业的重要作业区域, 每年有 300 多艘鱿钓船在该区域作业, 渔船的生产调度依赖于渔场况速报, 利用卫星遥感技术可以及时提供大面积的海况参数分布图, 因此有必要开展渔场海况速报技术的研究。本研究研制开发的北太平洋鱿鱼渔场环境要素速报系统, 主要由船载多卫星遥感信息接收站、卫星数据传输系统和渔场环境速报产品制作系统组成, 接收处理多颗卫星遥感资料, 接收卫星资料范围为北太平洋 $7\ 000\text{ km} \times 5\ 000\text{ km}$ 区域, 完全覆盖了北太鱿钓作业范围, 经卫星数据传输系统传回后, 制作成北太平洋渔区的海温速报产品, 提供给全国相关渔业公司。

1 卫星遥感温度反演技术

在海温速报产品制作中, 遥感海表温度 (SST) 是基础, 可从美国气象卫星 (NOAA) 系列和我国的气象卫星 (FY-1C/1D) 等卫星资料反演得到。SST 的反演模式是基于分裂窗技术^[1], 用于 NOAA 系列卫星的业务化处理算法主要有通道算法 (MC-

SST)^[2], 交叉 SST 算法 (CPSST)^[3]、非线性算法 (NLSST)^[4] 和 Pathfinder SST 算法 (PFSST)^[5] 等, 这些算法的基础是光谱辐射传输理论。

1.1 卫星遥感红外辐射传输理论

海洋具有不断辐射、吸收、反射电磁波的特性, 辐射的谱分布与物体本身的特性和温度有关。卫星接收到的红外辐射传输方程由下式表示:

$$L_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} B(T_s) \tau_{\lambda}(\theta) + \int_{\tau_{\lambda}}^1 B_{\lambda}(T_p) d\tau_{\lambda}(\theta, p) + (1 - \varepsilon_{\lambda}) \tau_{\lambda}(\theta) \int_{\tau_{\lambda}}^1 B_{\lambda}(T_p) d\tau_{\lambda}(\theta, p) \quad (1)$$

其中, L_{λ} 是卫星接收到的辐射率, λ 是波长, ε_{λ} 是海水比辐射率, $B_{\lambda}(T_s)$ 是海水黑体辐射, T_s 和 T_p 分别是海表温度和大气温度, θ 是卫星观测天顶角, p 是大气压, $\tau_{\lambda}(\theta)$ 是大气透过率, $B_{\lambda}(T_p)$ 是大气黑体辐射, 由于大气辐射传输路径中参数变化很快, 一般采用大气分层方法来计算。上式不能从卫星辐射率直接推算海表温度, 需要一些假设条件来推导解析式, 不同的假设条件就产生不同的反演模式。

1.2 海表温度遥感反演算法

在晴空无云的条件下, 大气对热红外通道的影响主要是水汽带吸收, 对水汽的红外吸收校正通道采用分裂窗技术, 每个窗区通道的水汽削弱量不同, 因此单个通道的水汽削弱总量可由 2 个通道测得的温度差来估算。多通道算法 (MCSST) 是假设单个窗区通道测值与实际海洋表面温度值的衰减量与 2 个窗区通道测值的温度差成正比, 从红外辐射传输

收稿日期: 2003-04-18; 修订日期: 2003-07-07.

基金项目: 国家“八六三”计划海洋监测主题资助项目 (818-11-02 和 2002AA639220); 国家自然科学基金资助项目 (40006011); 国家重点基础研究发展规划资助项目 (G1999043701).

作者简介: 毛志华 (1966-), 男, 研究员, 博士, 从事海洋遥感研究.
E-mail: maozh@hzenc.com

方程导出:

$$MCSST = AT_i + B(T_i - T_j) + C \quad (2)$$

其中系数 A 、 B 、 C 由实测海表温度和卫星遥感值进行回归统计来确定。

交叉 SST 算法 (CPSST) 认为 2 个通道的大气传输引起的温度变化是非线性关系,其基本模式为:

$$CPSST = T_i + \frac{SST_i - T_i}{SST_j - T_j + T_i - SST_i} (T_i - T_j) \quad (3)$$

非线性算法 (NLSST) 是对 CPSST 简化,其函数关系为:

$$NLSST = T_i + f(T) [T_i - T_j] \quad (4)$$

式中的 $f(T)$ 是温度函数,一般采用海表温度估计值。

Pathfinder SST 算法 (PFSST) 根据通道 4 与 5 的亮温差是否小于 0.7°C 来选用不同的 NLSST 算法,在实际资料处理时,分时段统计回归系数,其基本模式为:

$$PFSST = w1 \cdot PFSST1 + (1 - w1) \cdot PFSST2 \quad (5)$$

由于观测的是地球表面,要考虑加入卫星观测角订正项来提高精度,把 MCSST, CPSST 和 NLSST3 种算法归纳为:

$$SST = AT_4 + Bf(T_4 - T_5) + C[\sec(\theta) - 1](T_4 - T_5) + D \quad (6)$$

式中的系数 A 、 B 、 C 、 D 均由实测海表温度和卫星遥感值进行回归统计来确定。研究采用 NLSST 算法,是根据美国 NOAA 提供的业务 SST 反演算法基础上实现,该算法是利用浮标测量温度与遥感温度进行回归统计建立的,分为白天和晚上 2 种模式。

NOAA-16 卫星白天遥感温度反演算法:

$$SST = 0.9171T_4 + 0.0795f(T_4 - T_5) + 0.7975[\sec(\theta) - 1](T_4 - T_5) - 248.8961 \quad (7)$$

NOAA-16 卫星晚上遥感温度反演算法:

$$SST = 0.9622T_4 + 0.0336f(T_3 - T_5) + 1.6073[\sec(\theta) - 1] - 261.3291 \quad (8)$$

2 渔场海温速报

2.1 速报产品制作流程

利用卫星遥感技术可以制作渔场海温和水色两种速报产品。从美国宽视场海洋水色扫描仪 (SeaWiFS)、中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 和我国第一颗海洋水色卫星 (HY-1) 等遥感资料可生成海洋水色产品,从美国气象卫星 NOAA 系列、我国的气象卫星 (FY-1C/FY-1D) 等遥感资料可生成海表

温度产品。从卫星遥感资料生成渔场海温速报产品需要经过一系列资料处理。预处理技术是将原始卫星资料生成 1B 数据集;云检测技术是将遥感资料分为晴空和有云 2 类,云覆盖区域需要采用云替补技术,晴空区则采用 SST 反演模式来计算海表温度;经过几何投影、几何精校正和图像镶嵌等技术将多轨遥感资料生成 SST 专题图;利用海洋动力模型提取锋区、冷暖涡、海表流场等动力信息;通过图层叠加技术将相关信息制作成海温速报产品;利用产品分发网络向相关渔业公司提供速报产品。

由于云区覆盖阻挡了卫星观测海表温度,严重影响海温速报产品的业务化运行,制作高质量的速报产品的前提条件是云信息提取和替补技术。云信息提取方法主要有:设置单波段和组合波段的静态阈值、波段差分法、空间协调性法、主成分分析法、聚类分析法、纹理结构模型法、自适应阈值法、神经网络法、多时相判别法等^[6-7]。单一遥感图产生大量资料空缺现象,需将不同轨道和不同时相的 SST 反演产品融合,开展多源信息的同化和替补工作。云替补方法有资料插值、平滑、匹配修正等常规方法,数值内插、曲面拟合和动力方程的数模替补方法,利用历史同期标准温度图进行时间域的替补等,本研究采用的云提取和替补方法是对上述几种方法的综合。

渔场速报产品制作系统利用安装在舟渔 1301 渔船上的卫星地面站现场接收的 NOAA、SeaWiFS、FY-1C 等卫星数据,经过资料处理生成渔场海洋环境速报产品。系统具有将 1 d 接收到的几十轨遥感资料经过批处理后自动生成当天的渔场温度分布图,同时生成 3 d 和 7 d 的温度专题图,具有自动云信息替补、等温线自动构画、温度值自动标记等功能,可交互提取海洋锋面、冷暖涡、流场等动力信息,自动将相关属性参数存入数据库。由于该系统可现场实时提供大面积海洋温度分布实况,提高了渔场海温速报产品的时效性,为渔情和中心渔场分析提供可靠依据。利用该系统制作成的北太平洋渔场速报产品见图 1。

2.2 速报产品精度分析

遥感 SST 的反演精度是衡量反演模式性能的重要指标。McMillin^[1]对分裂窗算法 3 个红外通道 9 种组合的反演模式统计 SST 模式均方根误差 (RMS) 在 $1.04 \sim 1.71^\circ\text{C}$,认为在无云条件下, SST 精度可达到 1°C 。McClain^[2]对 MCSST 模型的误差

统计结果为遥感与实测温度的偏差在 $-0.3 \sim 0.4$ $^{\circ}\text{C}$, RMS 误差在 $0.5 \sim 0.6$ $^{\circ}\text{C}$, 相关系数在 $0.3 \sim 0.7$ 。Walton^[3]对 CPSST 的误差统计结果得到平均偏差为 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 和 RMS 值为 0.6 $^{\circ}\text{C}$; 如采用 NLSST 反演模式, 可以使全球 SST 产品精度从 0.8 $^{\circ}\text{C}$ 提高到

0.5 $^{\circ}\text{C}$ ^[4]。对 PFSST 的误差统计结果为 0.02 $^{\circ}\text{C}$ 的平均偏差和 0.53 $^{\circ}\text{C}$ 的 RMS 值^[5]。但这些精度分析都基于晴空无云的条件, 将超过 2 $^{\circ}\text{C}$ 偏差的值作为异常值处理^[8], 在卫星遥感业务系统中, SST 反演精度很难达到上述结果。

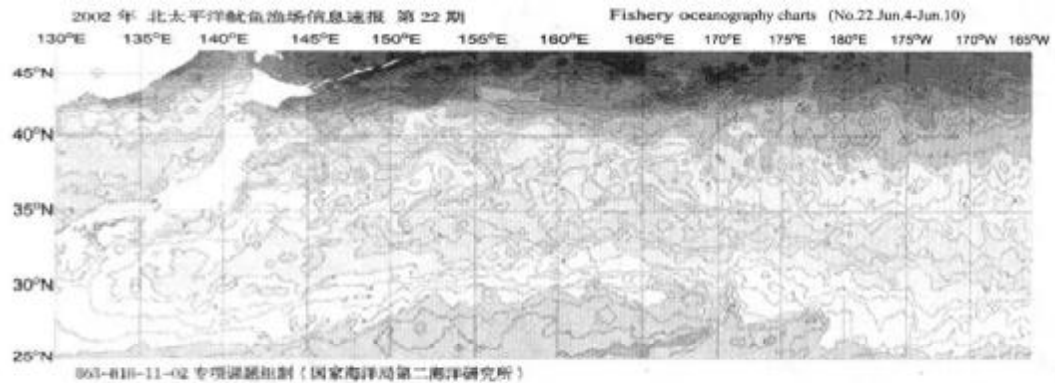


图1 北太平洋渔场海温速报图

Fig. 1 A sample image of fisheries oceanography charts in north Pacific fishery grounds

产生遥感 SST 误差的因素很多, 卫星遥感和 SST 反演的许多环节都会产生误差。卫星上红外传感器本身精度和辐射定标精度可产生 0.15 $^{\circ}\text{C}$ 的误差^[9], 在遥感 SST 图像上可发现许多由遥感仪器造成的噪音; 用相同资料采用不同 SST 反演模式所产生的差值为 $0.5 \sim 0.7$ $^{\circ}\text{C}$ ^[9], McMillin^[1]对 9 个模式归纳的温度误差为 $0.15 \sim 1.59$ $^{\circ}\text{C}$; 相同模型在不同区域的精度相差很大, Emery^[10]对 PFSST 算法的全球数据统计得到 RMS 值为 0.5 $^{\circ}\text{C}$, 但对热带和极地地区分别统计时, 得到 RMS 值都超过 2 $^{\circ}\text{C}$; 遥感测量的是海表皮辐射温度与实测的水体温度可差 ± 1 $^{\circ}\text{C}$, 这种差异受风速、温度、云量、海况、昼夜等因素影响^[9]; 实测温度本身误差统计的 RMS 值在 0.5 $^{\circ}\text{C}$ 以上^[10]; SST 反演模式即使对水汽的校正不可能做到非常准确^[11]; 未检测的云是 SST 主要误差源^[6]。上述各种因素对海温反演的误差影响在实际的遥感资料处理中很难定量测得, 也就无从进行定量校正。目前所采用的 SST 反演模式只是对水汽吸收进行校正, 认为水汽吸收影响可通过双通道的亮温差来校正^[1~5], 这种反演模式本身很难适应各种环境条件变化, 使卫星遥感能精确测量海面温度。需要采用误差控制技术来提高 SST 的精度。

从 2001 年 6 月 1 日到 11 月 23 日, 利用渔船和大洋调查船在北太渔区进行同步海表温度测量, 共

有 833 个实测温度值。将船测温度值作为准确值来计算遥感 SST 产品的误差, 搜索同一天和相同地点的船测温度值与遥感 SST 进行比较, 共得到 474 个匹配数据点。利用船测温度值对遥感 SST 精度进行检验(图 2), 图 2 是经过海温反演误差控制处理, 显示二者的温度分布存在很好的一致性, 大部分点分布在对角线附近, 说明遥感温度可以很好地反映出实际海表温度。北太渔区测量温度分布在 10°C 到 20°C , 平均温度为 16.47 $^{\circ}\text{C}$ 。

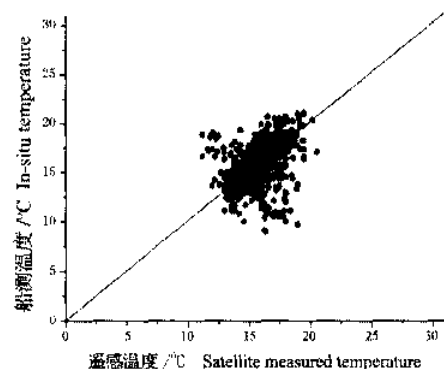


图2 遥感 SST 和船测海表温度值的关系图

Fig. 2 A distribution of satellite-measured SST and in-situ temperature

用实测数据对 2001 年的 7 d 遥感温度图和等温图进行精度分析,基于周平均温度来统计平均偏差和均方根误差(RMS),结果见表 1。

表 1 遥感 SST 图和等温图精度分析
Table 1 Temperature precision analysis for satellite - measured SST images and isotherm images

日期 Date	遥感温度图 SST		等温图 Isotherm	
	偏差 Bias	均方根误差 RMS	偏差 Bias	均方根误差 RMS
Jun. 1 - Jun. 29	-0.3	0.34	-1.5	1.53
Jun. 30 - Jul. 15	0.15	0.92	-0.58	1.08
Jul. 16 - Jul. 29	0.25	0.14	-1.4	0.92
Jul. 30 - Aug. 14	-0.42	0.32	-1.7	0.85
Aug. 15 - Sep. 2	0.09	1.12	-1.45	1.0
Sep. 3 - Sep. 9	0.62	0.99	0.07	0.86
Sep. 10 - Sep. 16	-0.3	1.02	-0.73	0.86
Sep. 17 - Sep. 23	0.41	0.85	-0.31	0.97
Sep. 24 - Sep. 30	0.18	0.93	-0.85	1.03
Oct. 1 - Oct. 7	-0.44	1.16	-1.24	1.18
Oct. 8 - Oct. 21	-0.25	0.9	-1.17	1.28
Oct. 22 - Nov. 11	-0.07	0.87	-0.96	1.12
平均 Average	-0.0067	0.7967	-0.985	1.0567

从表中可以看出,7 d 遥感温度图与实测海温的周平均偏差都在 0.8℃以内,平均值为-0.0067℃,RMS 周平均值都在 1.2℃以内,平均值为 0.7967℃。经过 1℃等温处理后,因采用取整的方法来计算等温值,降低了等温图的精度,其周平均偏差在 1.7℃以内,平均偏差为-0.985℃,平均 RMS 值为 1.0567℃。影响遥感 SST 精度的因素很多,传感器本身精度、反演模式、大气条件、海况、实测温度精度等因素都可影响 SST 精度,特别是云覆盖问题。云覆盖减少了红外遥感资料的利用率,严重影响卫星遥感系统业务化应用,也是降低 SST 反演精度的主要原因^[6]。误差分析结果表明,尽管遥感温度与实测海表温度在某些测量点的差值超过 2℃,但平均温度偏差不到 0.01℃,说明二者在总体上的海温测量结果非常接近。

3 结论

速报系统在北太鱿鱼渔场作业期间(5 月到 12 月)业务试运行 2 年,共接收卫星遥感资料 4 000 多条轨道,接收的原始数据达到 500 GB,完成北太渔场海况速报产品制作共 33 期,取得了明显的社会和

经济效益。

船载实时渔场速报系统可每天提供现场大面积实时海洋环境参数,实时显示台风等灾害性天气情况,为渔场转移、探捕、避风等生产调度提供科学依据。远洋渔业是高风险、高投入的产业,2 年业务试运行已体现该系统的应用价值,国内已有厂家计划开发廉价的船载卫星遥感接收系统,希望能推广到我国主要的远洋渔场上,将对我国远洋渔业发展起到重要作用。

参考文献:

[1] McMillin L M, Crosby D S. Theory and validation of the multiple window sea surface temperature technique[J]. J Geophys Res, 1984, 89: 3 655-3 661.

[2] McClain E P, Pichel W G, Walton C C. Comparative performance of AVHRR based multichannel sea surface temperatures[J]. J Geophys Res, 1985, 90: 11 587-11 601.

[3] Walton C C. Nonlinear multichannel algorithms for estimating sea surface temperature with AVHRR satellite data[J]. J App Meteor, 1988, 27: 115-124.

[4] Walton C C, Pichel W G, Sapper F J, et al. The development and operational application of nonlinear algorithms for the measurement of sea surface temperatures with NOAA polar-orbiting environmental satellites[J]. J Geophys Res, 1998, 103: 27 999-28 012.

[5] Kilpatrick K A, Podesta G P, Evans R. Overview of the NOAA advanced very high resolution radiometer Pathfinder algorithm for sea surface temperature and associated matchup database[J]. J Geophys Res, 2001, 106: 9 179-9 197.

[6] Simpson J J, McIntire T J, Stitt J R, et al. Improved cloud detecting in AVHRR daytime and night-time scenes over the ocean[J]. Int J Remote Sensing, 2001, 22: 2 585-2 615.

[7] Karner O, Giromano L D. On automatic cloud detection over ocean[J]. Int J Remote Sensing, 2001, 22: 3 047-3 052.

[8] Kumar A, Minnett P J, Podesta G, et al. Error characteristics of the atmospheric correction algorithms used in retrieval of sea surface temperatures from infrared satellite measurements: Global and regional aspects[J]. J Atmos Science, 2001, 60: 575-585.

[9] Brown J W, Brown O B, Evans R H. Calibration of advanced very high resolution radiometer infrared channels: A new approach to nonlinear correction[J]. J Geophys Res, 1993, 10: 18 257-18 268.

[10] Emery W J, Baldwin D J, Schluskel P, et al. Accuracy of in situ sea surface temperature used to calibrate infrared satellite measurements[J]. J Geophys Res, 2001, 106: 2 387-2 405.

Method of satellite-measured sea surface temperature charts for North Pacific fishery grounds

MAO Zhi-hua, ZHU Qian-kun, PAN De-lu, GONG Fang

(Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China)

Abstract: The key information for fishery analysis and locating fishing center are provided by ocean fishery environmental charts, which can be produced from satellite remote sensing data in large areas. Ocean fishery grounds are far away beyond range of land-base receiving stations, but in the coverage of a ship-boarding telemetry receiving system which is introduced in this paper. The system consists of four sub-systems which are a ship-boarding telemetry receiving system, a ship-board real-time ocean environmental condition analysis system, a satellite communication system, and a land-base operational fisheries oceanography system. The statistic analysis shows that satellite-measured SST using NLSST algorithm has a good consistency with in-situ values in North Pacific. The average week bias of temperature is lower than 0.01 °C and the average value of root mean square is 0.796 7 °C. The system has run for two years and the expected goals were achieved with 33 terms of products, which proved the system is a useful tool for ocean fishery analysis.

Key words: North Pacific fishery grounds; satellite remote sensing; sea surface temperature

书 讯

宋微波等著《海水养殖中的危害性原生动动物》已经由科学出版社于2003年11月出版,书号ISBN7-03-011510-4。该书16开本,铜版纸精装,483页,约87万字,113版线条图及黑白照片版,14页彩色图版,定价95元/本。

本书汇集了作者近20年来在海洋病害及危害性原生动动物领域中的研究成果。全书以第一手资料为基础,分别论述和介绍了我国北方海水养殖中常见的经济鱼类、贝类以及对虾之各类寄生性/危害性纤毛虫及粘孢子虫原生动动物的病原学、宿主分布、危害性以及开展相关研究的基本方法学等。考虑到本书所收录的内容仍属阶段性成果,更多的病原种类可能尚待发现,而许多海洋寄生性原生动动物均为世界性分布,因此在本书中的最后一编中,在同时对国际间迄今所知的两大类主要寄生原生动动物(粘孢子虫和车轮虫类纤毛虫)的分布以及宿主情况做了资料性介绍。

本书虽然以病原生物的鉴别为中心,但同时包含了利用现代技术在其病害生物学、方法学及生态地理学及其分布等方面所开展的工作。从专业和学术角度看,本书是国内迄今第一份较为全面地涉及海水养殖中危害性原生动动物研究的专著。作为一部应用与基础理论并重的著述,作者在强调学术性的同时也充分考虑了其在非专业领域/人员的实用性和通用性。

本书可作为相关领域的研究者、教师以及各类水产养殖从业人员的参考用书。