

# 中国东部海域卫星遥感 PFSST 和现场观测资料的差异

高郭平<sup>1</sup>, 钱成春<sup>1</sup>, 鲍献文<sup>1</sup>, 侍茂崇<sup>1</sup>

(1. 青岛海洋大学 海洋环境学院, 山东 青岛 266003)

**关键词:** 中国东部海域; 海面温度; PFSST; 现场资料; 校正参数

**中图分类号:** P731. 11      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0253- (2001)04- 0121- 06

## 1 引言

海表面温度(SST)是海洋- 大气系统中的一个重要物理量,是影响天气和气候的一个重要因子,也是气候的指示因子之一,在海洋学研究中也占有非常重要的地位。

通常观测 SST 方式有两种<sup>[1]</sup>,一是现场的直接测量,如利用商船、“天气”测量船或其他调查船在某一地点,使用测温仪器进行海水温度观察,或是利用漂流浮标和定点锚碇浮标等进行海表面温度观测,随着技术的不断进步,测温仪器感温时间大大缩短,准确度也不断提高。但船舶的航线是很有限的,浮标的布放数量也是很有限制的。这种方式观测的 SST 的覆盖率相当低,即使将几十年的资料进行统计,在全球海洋仍然有许多地方是空白。另一种观测方式是间接测量,如采用卫星遥感来反演海表面温度,其传感器有红外型的如改进型甚高分辨率辐射计(AVHRR)和沿轨道扫描辐射计(ATSR),也有微波型的多通道微波扫描辐射计(SMMR)。卫星遥感 SST 具有覆盖范围广,几乎遍及全球所有海(水)域,并且具有长期重复测量的特点,因而得到广泛的应用。

卫星遥感 SST 的各种技术及传感器情况 Barton<sup>[2]</sup>作了一个完整的评价,由卫星上红外传感器测得的辐射值反映的是蒸发面上水膜的温度,而船舶测量的是近表面水层(厚度在几十厘米到几米之间)的温度,这两个温度值本身的差异可能达到 1~ 2 °C,采用统计回归的方法反演出 SST 值的平均误差可以控制在 0.5 °C到 1 °C左右。在过去的 20 多年中,利用卫星遥感观测 SST 的产品在不断增加,在没有云的天气条件下,SST 资料是相当可靠的,但是卫星进行 SST 观察时天空完全没有云的影响的情况是极少的,尤其是在一些水汽特别丰富的区域如热带。由于火山喷发的影响,大气气溶胶等会造成卫星遥感 SST 比船上测量结果偏低 0.3~ 0.4 °C,均方差达 0.5~ 0.6 °C。在使用卫星遥感 SST 产品时,必须十分仔细,认真甄别受到云的影响

收稿日期: 2000- 07- 31; 修订日期: 2000- 12- 05.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40006002); 教育部科学技术重点资助项目(99075); 863 青年基金 Q- 12 和国家海洋局 LOPSO 基金资助项目.

作者简介: 高郭平(1972-),男,江苏省泰县人,讲师,从事极地海洋学研究.

资料的质量. 不同的反演方法所得到的卫星遥感 SST 资料与现场观测的偏差、云的影响所造成大面积的资料缺测等原因, 在很大程度上影响了卫星遥感 SST 资料的实际使用.

美国大气海洋局 NOAA 系列太阳同步轨道卫星, 传感器是 AVHRR, 它能够提供每日两次的 SST 资料. NOAA 对外发布的两种主要 SST 产品, 一种是多通道 SST 算法 (MCSST), 另一种是 Pathfinder 算法 (PFSST), 其算法都是由喷气推进实验室 (JPL/NASA) 的海面温度反演研制组研制的. 反演算法的理论基础是 McMillin (1975) 提出利用两个波长测量辐射的线性结合可以给出物体表面辐射 (即 SST) 的良好估计, 实际 SST 和卫星所测量的亮温的线性关系:

$$\text{SST} = \alpha_1 + \alpha_2 T_i + \gamma (T_i - T_j), \quad (1)$$

式中,  $T_i, T_j$  为卫星红外传感器通道  $i$  和通道  $j$  测量得到的亮温;  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  为利用卫星和现场观测结果进行回归分析得到的系数;  $\gamma$  为吸收项的导数, 在 MCSST 算法中,  $\gamma$  被取为常数, 因此它也是一种线性的反演方法. PFSST 算法引入了一个 SST 初始估计场, 对于不同的水汽区域计算时吸收项以  $(T_4 - T_5)$  的差异来考虑, 其计算公式为:

$$\text{SST} = \alpha_1 + \alpha_2 T_4 + \alpha_3 (T_4 - T_5) \cdot T_{\text{surf}} + \alpha_4 (\sec(\theta) - 1) (T_4 - T_5), \quad (2)$$

式中,  $\alpha_s (s = 1, 4)$  仍然是卫星资料和现场观测最小二乘法逼近得到的数据;  $T_4, T_5$  为卫星上通道 4 和 5 测得的亮温;  $\theta$  为卫星的扫描角度, 即 SST 场的入射角.  $T_{\text{surf}}$  是 SST 场的估计场, 选取的气候场进行最优插值得到的.

MCSST 反演方法是 NOAA 较早采用的一种方法, 主要产品为全球约 18 km 分辨率的周平均、月平均资料. 在该资料中, 缺测点在进行资料处理时已经被插值.

PFSST 反演计算中采用一套逐级控制的质控方法, 例如在初级测试中要求通过: (1) 传感器亮温控制, 即要求 AVHRR 传感器中的 3, 4, 5 三个通道的亮温值在  $-10 \sim 35$  °C; (2) 在卫星扫描的 9 个像点中最大与最小的温度差应小于 0.7 °C; (3) 卫星天顶角应小于 55°; (4) 阳光影响的测试等. 在通过这一系列的初级质量控制后进入下一质量测验流程, 这样在原始的卫星测量值中就包括了 0~7 这样 8 级的信息, 通常资料质量级在 3 以上的被认为是比较可靠的. 在由卫星像点资料制作 SST 最终产品时, 往往尽量选取质量级别较高的, 舍弃质量级别较低的.

PFSST 产品有全球逐日、8 d 平均和月平均的约 9, 18 和 54 km 分辨率的资料.

对于许多利用卫星遥感 SST 从事海洋科学研究的人员来说, 希望了解卫星遥感 SST 与现场观测之间的实际差异. 在大洋上, 由于在确定反演系数时, 采用了许多现场观测资料, 因此与现场资料的平均误差较小, 在边缘海这种差异比较显著, 现在这项研究工作, 已经在许多海区进行过, 如 Okhotsh 海南部<sup>31</sup>. 对于中国东部海域普遍存在的观点是卫星遥感 SST 的准确度较低, 但一直没有量化的报道. 本文旨在利用现场资料来检验中国东部海域的卫星遥感 SST 准确度情况.

## 2 资料情况

### 2.1 现场资料情况

检验卫星遥感 SST 准确度的最好方式是在卫星过境时刻实施现场观测, 在求取反演计算系数时, 往往需要大量的现场观测资料, 这主要由布放于全球海域的浮标提供, NOAA 在提供卫星遥感 SST 产品的同时, 也提供他们使用的浮标资料 (Match Up Data), 这一资料总量十分巨大, 但划分到各海域, 也很有限. 比如, 1995 年 3 月共有资料总数 15 778, 全球的分布如图 1, 在中国东部海域除了日本周围有一些资料外, 绝大部分海域没有相应的资料. 本文所使用的现场资料是

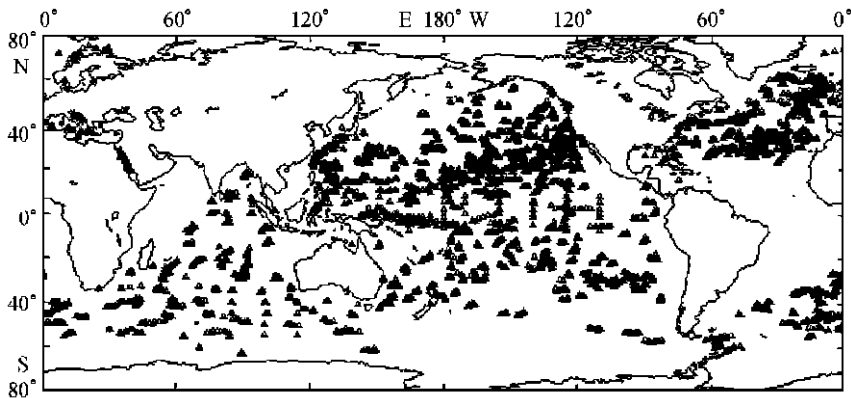


图 1 NOAA 数据中心制作 PFSST 使用的现场资料位置分布(1995 年 3 月, 站点数: 15 778)

来自目前全球最大的海洋温盐数据库, 该数据库由美国国家海洋数据中心(NODC——National Oceanographic Data Center, NOAA/NESDIS)管理, 是在国际合作计划——全球温盐计划(Global Temperature-Salinity Pilot Project)下建立的, 资料提供国家包括澳大利亚、加拿大、法国、德国、日本、俄罗斯和美国等. 该数据库中的资料由分布在全球各海区的船舶和浮标等平台上采集的, 所利用的仪器包括抛弃式温度计(XBT)、深海温度计(DBT——Digital Bathythermograph)、CTD 仪以及测温链(Thermistor Chain)等. 该资料由资料说明部分和要素值两部分组成, 说明部分包含的信息包括资料编号、观测时间、位置(经纬度)、观测仪器、资料来源、质量控制情况、观测标准等. 要素部分包括深度(或压力, 在说明部分指示)和要素(温度或盐度). 对于进行了质量控制的记录, 温度观测的准确度以表 1 代码标注.

表 1 温度资料的观测准确度标识

代 码	1	2	4	5	B	C	E	F	H	I
准确度范围 // 1 °C	0.01	0.1	未知	0.001	0.001~0.002	0.002~0.005	0.01~0.02	0.02~0.05	0.1~0.2	> 0.2

本文分析中选取了在研究海域资料覆盖率较高的 1990, 1991 和 1995 年 3 年的资料, 根据数据提供的质量控制代码, 从中选取出温度观测准确度好于 0.1 °C 的资料, 最后所得站点总数为 11 307. 图 2 是 1995 年 1~3 月在中国东部海域的资料分布.

## 2.2 卫星资料情况

本文所选取的卫星遥感资料是 NOAA 发布的 PFSST 产品, 在进行资料反演时采用了逐级质量控制方法, 最终的产品中包含有质量级别的信息. 为此, 我们从中选择了最高质量级别(质量级为 7)的部分与现场资料进行比较. PFSST 资料的空间分辨率约 9 km, 时间上是每天两次, 分别对应于白天和夜晚. 图 3 是 1995 年 1 月 8 日白天的一张 SST 分布图, 图中空白区域为资料缺失或质量级较低.

## 3 现场实测 SST 和卫星遥感 PFSST 的比较

为尽量使卫星遥感 PFSST 与现场资料在时间上较为一致, 我们在进行比较时, 根据现场资料的观测时间将现场资料也分为白天段和夜晚段, 然后在相应日期的白天和夜晚的卫星资料中进行对应资料的查找, 我们选取的搜索半径为 10 km. 中国东部海域上空的天气多变, 云覆盖量

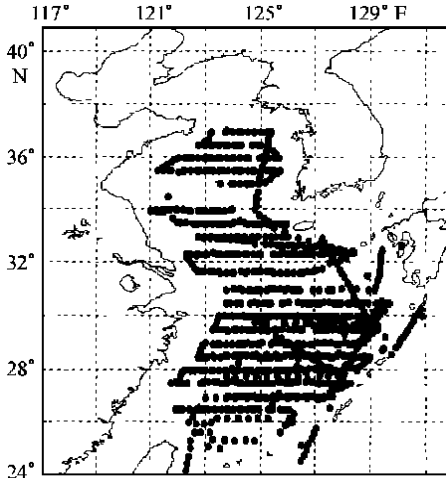


图2 现场资料位置分布(1995年1~3月)

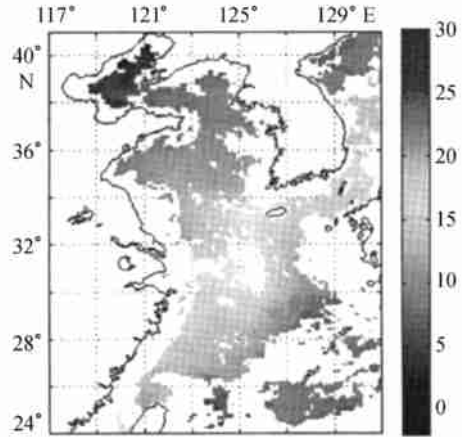


图3 PFSST分布(1995年1月8日)

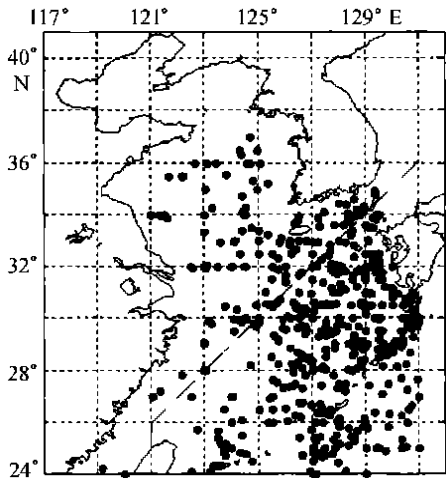


图4 可与卫星资料比较的现场资料分布

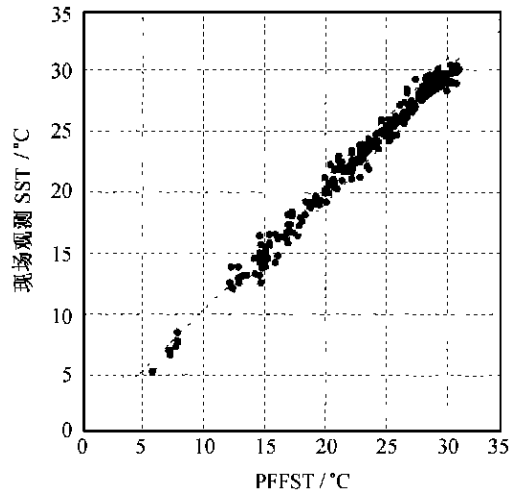


图5 PFSST与现场资料分布(白天)

较大,这就造成卫星遥感资料中缺测较为严重的现象.我们选用的是 PFSST 资料中质量级别最高的,在 PFSST 产品制作中采用严格逐级质量控制,这也剔除了一些低精度值.这样,尽管我们搜集的现场资料量是比较大的,但能与卫星资料一致起来的却很少.在我们收集的现场资料中仅仅使用了约 6% 的资料.图 4 是本文进行卫星资料验证中使用到的全部现场观测站点分布.在这样的限制下我们使用的卫星资料总量为 512 幅,其中白天的为 274 幅(1990 年 102 幅,1991 年 75 幅和 1995 年 97 幅),夜晚 238 幅(1990 年 69 幅,1991 年 53 幅和 1995 年 116 幅),样本相对分散,但是对于本文所进行对比工作来说更具有代表性.对比结果如表 2 所示.由表 2 看出,在白天卫星资料所观测到的 SST 与现场观测之差小于  $1^{\circ}\text{C}$  的占总资料量的 87.0%,小于  $0.5^{\circ}\text{C}$  的占总资料量的 70.5%,均方误差为 0.63.在夜晚两者之差在  $1^{\circ}\text{C}$  以内的为 88.6%,在  $0.5^{\circ}\text{C}$  以内的为 64.2%,均方误差为 0.62.将白天和夜晚资料合在一起考虑一整天的均方误差为 0.61.采用 Pathfinder 反演方法反演的 SST

在中国东部海域较好地与现场资料一致(见图 5, 图中虚线为  $\pm 1^\circ\text{C}$  的置信分布).

如果我们定义由卫星观测反演得到的 PFSST 为  $X_0$ , 校正后的 SST 为  $X$ , 则我们所采用的校正关系式为:  $X = aX_0 + b$ .

对于白天由卫星观测反演得到的 PFSST 并被校正的 SST( $X$ ) 和现场观测(SST)( $Y$ ) 的分布(图 6), 在这里我们采用了校正关系式  $0.98286X_0 + 0.47023$ ; 图 7 是夜晚校正后的 PFSST( $X$ ), 和现场观测 SST( $Y$ ) 的分布, 在这里我们采用的校正关系式  $0.9947X_0 + 0.34187$ ; 不考虑白天和夜晚的两者分布如图 8 所示, 我们采用的校正关系为  $0.98899X_0 + 0.39816$ . 图中虚线为其  $\pm 1^\circ\text{C}$  置信分布.

表 2 卫星遥感资料和现场资料的对比

总站点	误差小于等于 $1^\circ\text{C}$		误差小于等于 $0.5^\circ\text{C}$		正偏		负偏		一致		均方差	校正参数		
	记录数	百分比	记录数	百分比	记录数	百分比	记录数	百分比	记录数	百分比		斜率( $a$ )	截距( $b$ )	
白天	393	342	87.0	277	70.5	159	40.5	173	44.0	61	15.5	0.63	0.9829	0.4702
夜晚	344	303	88.6	221	64.2	116	33.7	186	54.1	42	12.2	0.62	0.9947	0.3419
全天	737	645	87.5	498	67.6	275	37.3	359	48.7	103	14.0	0.61	0.9890	0.3982

注: 定义 PFSST 现场观测为正时即正偏, 为负时即负偏, 为零时即一致.

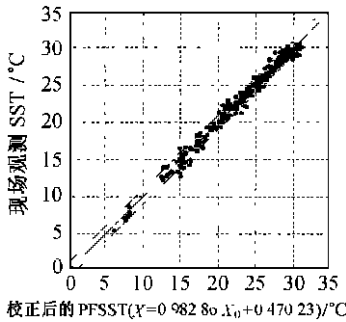


图 6 校正后的 PFSST 与现场资料分布(白天)

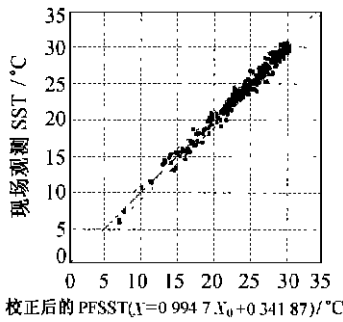


图 7 校正后的 PFSST 与现场资料分布(夜晚)

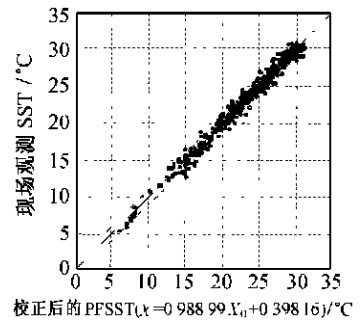


图 8 校正后的 PFSST 与现场资料分布(全天)

采用卫星遥感方法反演的 SST 在深水区的准确度与浅水区有一定差异, 为此我们将 PFSST 与现场资料也分为浅水区和深水区来分别研究, 如图 3 所示, 虚线以南设为深水区, 依此分析得到的对卫星遥感 PFSST 的校正系数及其与现场资料的均方误差如表 3 所列, 可以看出在深水区, 均方误差略低于浅水区, 但两者的差异并不显著. 但是, 由于在进行资料选取时沿岸的资料往往质量级别较低而被舍弃, 因此尚不能得出 PFSST 资料在中国东部海域浅水区与深水区准确度一致的结论.

表 3 卫星遥感资料和现场资料的差异在深水区域和浅水区的差异

	深水区			浅水区		
	斜率( $a$ )	截距( $b$ )	均方差	斜率( $a$ )	截距( $b$ )	均方差
白天	0.9542	1.2393	0.61	0.9918	0.2030	0.69
夜晚	0.9910	0.4224	0.61	1.0114	0.0815	0.68
全天	0.9732	0.8156	0.61	0.9999	0.1416	0.70

对于季节变化的情况, 我们设定的各季的特征月份及 PFSST 与现场资料的差异及相应的校正系数见表 3, 在秋季和冬季两者的均方差较小, 而春季均方差最大. 但是, 冬、春季的回归

方程的截距最小, 资料的倾向性较夏、秋季要小。

通过以上分析, 我们可以看出, PFSST 产品较好地与现场资料一致, 但是在进行实际使用时有必要进行订正, 对于不同区域(深水区和浅水区), 不同时间段(白天和夜晚), 不同季节(春、夏、秋、冬), 其校正参数不完全一致, 可以根据需要进行选择。

表 4 卫星遥感资料和现场资料的差异季节变化

	春季(3~5月)			夏季(6~8月)			秋季(9~11月)			冬季(12~2月)		
	斜率( <i>a</i> )	截距( <i>b</i> )	均方差	斜率( <i>a</i> )	截距( <i>b</i> )	均方差	斜率( <i>a</i> )	截距( <i>b</i> )	均方差	斜率( <i>a</i> )	截距( <i>b</i> )	均方差
白天	0.997 5	0.152 6	0.75	0.973 7	0.634 4	0.61	0.957 3	1.198 1	0.55	1.018 3	-0.097 1	0.59
夜晚	1.016 5	-0.060 0	0.87	0.956 4	1.496 8	0.56	0.965 5	0.945 7	0.60	1.009 3	0.102 5	0.44
全天	1.005 4	0.062 4	0.80	0.957 8	1.284 1	0.61	0.960 5	1.097 5	0.57	1.015 4	-0.030 9	0.53

## 4 小结

利用卫星进行重复性的海面温度的观测, 为许多研究工作提供了宝贵的基础资料, 并弥补了传统上的 SST 观测的不足, 但是卫星观测的 SST 是海洋的皮温, 通过与现场资料比较回归为海面的温度, 这样的做法必然会在资料中存在一定的系统误差; 至于云对卫星观测 SST 的影响, 目前几种反演方法均采用经验的做法, 并没有直接将云的观测参数直接考虑到资料的反演中, 这样的误差也是无法克服的。

本文通过现场资料验证了美国 NOAA 发布的逐日的约 9 km 分辨率的 PFSST, 该资料较好地与现场观测一致, 两者之差小于或等于 0.5 °C 占所分析资料约 67.6%, 均方误差约为 0.61, 但也应看到, 在实际使用该资料时, 有必要进行卫星资料的校正。另外, 在进行两者比较时并没有考虑 SST 的日变化, 而且在沿岸区域的 PFSST 数据中往往未包括在内, 在今后的进一步工作中有必要进行更深入的研究。

总之, 美国海洋大气局每天实时发布的 PFSST 产品, 为我们进行中国东部海域的研究提供了较好的资料保障, 资料准确度、空间分辨率也能满足大部分的物理海洋研究需要。

本文中所用的 PFSST 资料和现场观测资料分别来自美国宇航局的喷气推进实验室(JPL/NASA)和美国海洋大气局的海洋数据中心(NODC/NOAA), 对于他们提供资料在此表示感谢! 青岛海洋大学郭佩芳、蒋德才等教授, 以及审稿者曾提出许多有益的建议, 在此表示感谢!

## 参考文献:

- [1] 侍茂崇, 高郭平, 鲍献文. 海洋调查方法[M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1999.
- [2] BARTON I J. Satellite-derived sea surface temperature: Current status[J]. J Geophys Res, 1995, 100: 8 777~ 8 790.
- [3] KAWAI Y, KAWAMURA H. Seasonal and diurnal variability of differences between satellite-derived and in situ sea surface temperature in the south of the sea of Okhotsk[J]. J Oceanogr, 1997, 53: 343~ 354.

## Difference between the PFSST and the in-situ data in East China Sea

GAO Guo-ping<sup>1</sup>, QIAN Cheng-chun<sup>1</sup>, BAO Xian-wen<sup>1</sup>, SHI Mao-chong<sup>1</sup>

(1. College Physical and Environmental Oceanography, Ocean Univ. of Qingdao, Qingdao 266003, China)

**Key words:** East China Sea; sea surface temperature; PFSST; in-situ data; corrected parameters