

# 西北太平洋红外辐射计海表温度数据 交叉比对分析\*

奚 萌<sup>1</sup> 宋清涛<sup>1, 2①</sup> 林明森<sup>1, 2</sup> 邹 斌<sup>1, 2</sup> 李文君<sup>3</sup> 徐玉柱<sup>1</sup>

(1. 国家海洋局国家卫星海洋应用中心 北京 100081; 2. 国家海洋局空间海洋遥感与应用研究重点实验室 北京 100081;  
3. 国家海洋局国家海洋环境监测中心 大连 116023)

**摘要** 本文将西北太平洋海域作为研究区域, 以 2003—2009 年的三个海表温度(sea surface temperature, SST)红外产品(AVHRR Pathfinder/NOAA, MODIS/Terra 和 MODIS/Aqua)为研究对象, 分别与 Argo 浮标数据进行了真实性检验, 同时红外产品之间也进行了交叉比对分析。通过评定产品间的差异及使用条件, 为融合产品数据源选取和权重分配提供参考依据, 用以提高融合产品的数据质量。结果表明, 三种红外数据与 Argo 浮标的平均偏差在 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$  之间, 均方根误差小于  $0.8^{\circ}\text{C}$ , 且存在明显的季节性变化, 白天的平均偏差均是夏季为正、冬季为负, 夜间的平均偏差基本均为负偏差, 冬季比夏季的偏差更大, 冬季的均方根误差较小; 三种红外数据之间的平均偏差在 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$  之间, 均方根误差小于  $0.6^{\circ}\text{C}$ ; 三个红外产品在空间上均能反映西北太平洋海域的海表温度变化趋势, 三个产品之间无明显优劣差异; 尽管红外数据的空间覆盖率偏低, 但是它提供了高精度和高特征分辨率的数据产品, 并弥补了近岸海域缺乏观测数据的不足。

**关键词** 海表温度; 红外辐射计; Argo 数据; 西北太平洋; 统计分析

中图分类号 P731 doi: 10.11693/hyh20161100248

海表温度(sea surface temperature, SST)作为海洋环境基础参数之一, 其精确测量及时空变化规律可准确反映海-气相互作用和全球气候变化。目前获取海表温度有现场观测和卫星遥感两种方式。现场观测易受到海况、仪器、船只和人员等多种因素的制约, 获取的数据量有限且覆盖范围小。卫星遥感探测分为热红外遥感和被动微波遥感: 热红外遥感产品空间分辨率高达  $1.1\text{km}$ , 但其空间覆盖率易受到天气条件制约; 被动微波遥感产品可实现全天候观测, 但空间分辨率低至  $25\text{km}$  且在近岸海域易受到陆地信号干扰(蒋兴伟等, 2010)。总体而言, 相对于现场观测, 卫星遥感具有可实现大面积同步测量、获取速度快、更新周期短、信息量大等优势。为制作出高时空分辨率和高精度的全天候近实时海表温度产品, 需克服单一

卫星传感器获取数据存在的局限性和差异性, 结合不同卫星传感器的特点, 对数据进行有效融合。进行数据融合前首先要对选取的输入数据进行真实性检验和交叉比对分析。

近年来, 国内外有许多学者研究红外辐射计反演海表温度并开展了真实性检验, 如, Barton 等(2006)将西澳大利亚海域的 GLI、AVHRR、AATSR 和 MODIS 产品数据与 Argo 实测数据进行检验, 发现标准偏差均优于  $0.6^{\circ}\text{C}$ , 分析认为低风速状况下红外数据容易产生较大误差。Sakaida 等(2006)对 GLI 海表温度数据反演算法进行改进, 与实测数据的比对发现, 白天和夜间的平均偏差分别为  $0.03^{\circ}\text{C}$ 、 $-0.01^{\circ}\text{C}$ , 均方根误差分别为  $0.66^{\circ}\text{C}$ 、 $0.70^{\circ}\text{C}$ 。Hosoda 等(2007)评估了西北太平洋 MODIS 海表温度数据区域性算法,

\* 海洋公益性行业科研专项经费项目, 201305032 号; 国家自然科学基金面上项目, 41276019 号; 国家基金委-山东省联合基金项目, U1406405 号。奚萌, 助理研究员, E-mail: ximeng@mail.nsoas.org.cn

通讯作者: 宋清涛, E-mail: qsong@mail.nsoas.org.cn

收稿日期: 2016-11-14, 收修改稿日期: 2017-02-16

认为风速对反演精度的大小有重要影响; MODIS 海表温度与浮标数据比对结果显示白天和夜间的平均偏差分别是 $-0.04/-0.01^{\circ}\text{C}$ (Terra/Aqua)和 $-0.05/-0.14^{\circ}\text{C}$ , 均方根误差分别是 $0.65/0.70^{\circ}\text{C}$ 和 $0.66/0.65^{\circ}\text{C}$ 。高郭平等(2001)利用覆盖率较高年份的现场资料验证了 $1/12^{\circ}$ 分辨率的 Pathfinder 产品质量, 发现两者偏差小于等于 $0.5^{\circ}\text{C}$ 的数据占所分析资料的 67.6%, 均方根误差约为 $0.61^{\circ}\text{C}$ 。管磊等(2002)对 ESR-1/ATSR 数据反演的海表温度与浮标数据进行印证, 结果发现, 在热带太平洋, 三通道双观测角算法反演的 ATSR 海表温度与浮标海表温度的平均偏差为 $-0.22^{\circ}\text{C}$ , 标准偏差为 $0.25^{\circ}\text{C}$ ; 在西北太平洋, 平均偏差为 $-0.51^{\circ}\text{C}$ , 标准偏差为 $0.61^{\circ}\text{C}$ 。孙凤琴等(2007)选取西北太平洋海域的 Argo 浮标数据对 AVHRR、MODIS 和 TMI 海表温度白天数据进行验证, 总体的平均偏差在 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 之间, 均方根误差在 $0.6-0.9^{\circ}\text{C}$ 。由于没有使用多年长时间序列数据, 多数研究并没能全面的评价多源红外数据及实测之间在时空尺度上的差异及产生原因。

本文交叉比对分析了 AVHRR Pathfinder/NOAA (以下简称为 Pathfinder)、MODIS/Terra(以下简称为 Terra)和 MODIS/Aqua(以下简称为 Aqua)三个红外辐射计海表温度数据的空间分布, 评定出三种产品的差异以及使用条件, 为融合产品数据源的取舍和数据权重的分配提供参考, 用以提高融合产品的数据质量; 同时也展示了西北太平洋海域比对分析结果的空间分布和差异, 日后可以结合我国卫星红外辐射计海表温度数据和相关数据融合算法, 为预报和应用等部门提供高时空分辨率、高精度的海表温度融合产品。

## 1 数据源

本文使用的数据源为三个红外辐射计海表温度数据(Pathfinder、Terra 和 Aqua)和 Argo 浮标数据, 研究时间范围为 2003—2009 年, 研究区域范围为西北太平洋海域( $0^{\circ}-60^{\circ}\text{N}$ ,  $100^{\circ}-160^{\circ}\text{E}$ )。西北太平洋副热带高压是台风高发区, 黑潮途经该海域蜿蜒北上, 气候和水动力环境复杂多变, 是研究海表温度红外数据精度检验的理想海域。

### 1.1 AVHRR Pathfinder/NOAA

搭载在 NOAA 极轨系列卫星上的 AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer)传感器(Kilpatrick *et al.*, 2001)具有 5 个观测通道(可见光、近

红外和红外光谱“窗区”, 见表 1)。其中通道 1、2 为反照率, 通道 3、4、5 为亮温。从 NOAA-15 开始, AVHRR 的通道数由 5 个增加到 6 个, 将第三通道分为 3a 和 3b 两个通道, 3a 通道的中心波长为 $1.6\mu\text{m}$ , 对冰、雪的分辨能力较强, 适用于白天; 3b 通道的中心波长为 $3.7\mu\text{m}$ , 受太阳反射辐射干扰严重, 适用于夜间, 与 3a 通道交替工作。扫描角为 $\pm 55.4^{\circ}$ , 扫描刈幅为 $2800\text{km}$ 。其最新版本 AVHRR Pathfinder 5.3 数据集, 使用全新的陆地掩模, 将空间分辨率修改为 $1/24^{\circ}\times 1/24^{\circ}$ , 同时包括海冰和风速等辅助数据以支持海表温度数据。Pathfinder 提供了 1981—2014 年的全球海表温度数据, 每天按照升降轨生成两组数据, 对应白天和夜间。在进行资料反演时采用逐级质量控制方法, 最终的产品中包含有质量标识文件(7 代表最高质量等级, 0 代表最底质量等级)。本文选取质量标记为 4—7 的海表温度作为有效数据。

表 1 AVHRR 波段特征(奚萌, 2011)  
Tab.1 Characteristics of AVHRR bands (Xi, 2011)

通道	波长( $\mu\text{m}$ )	星下点 分辨率(km)	扫描刈幅 (km)	主要用途
1	0.58—0.68			白天云、地表绘图
2	0.725—1.00			水路分界线、云、植被
3a	1.58—1.64	1.1	2800	雪、冰
3b	3.55—3.93			晚上云况绘图、海温
4	10.30—11.30			海、陆、云、顶温度
5	11.50—12.50			

### 1.2 MODIS/Terra 和 MODIS/Aqua

MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)是美国国家航空航天局对地观测系统(EOS)计划中最有特色的传感器之一(Minnett *et al.*, 2002)。MODIS 拥有 36 个光谱通道, 覆盖可见光、近红外和热红外三个波段, 拥有 250m、500m、1000m 三个不同的空间分辨率, 扫描刈幅为 $2330\text{km}$ 。MODIS 在红外大气窗口的 5 个波段(见表 2)可用来反演海表温度。其热红外窗口的第 31、32 波段与 AVHRR/NOAA 的第 4、5 波段基本对应, 中红外窗口的第 20 波段与 AVHRR/NOAA 的第 3 波段相似。此外 MODIS 在中红外窗口还拥有第 22、23 两个窄波段, 这些波段可为海表温度观测提供良好的数据基础。

Terra 卫星发射于 1999 年 12 月 18 日, 是 EOS 计划中第一颗装载有 MODIS 传感器的卫星, 于每日地方时间上午 10:30 分过境; Aqua 卫星于 2002 年 5 月 4 日发射, 于每日地方时间下午 1:30 分过境。它们的运

行轨道都是太阳同步近极地轨道, 轨道高度近似 700km, 可确保低轨道地球观测的基本需求。

两颗卫星的 MODIS 三级产品由逐日产品(分为白天和夜间数据)、8 天平均产品、月平均产品和年平均产品组成; 空间分辨率分为  $1/12^\circ \times 1/12^\circ$  和  $1/24^\circ \times 1/24^\circ$ 。本文使用的 MODIS 海表温度产品为逐日产品, 空间分辨率为  $1/24^\circ \times 1/24^\circ$ , 全球数据格点数为  $8640 \times 4320$ 。

表 2 MODIS 波段特征  
Tab.2 Characteristics of MODIS bands

通道号	中心波长 ( $\mu\text{m}$ )	通道宽度 ( $\mu\text{m}$ )	噪声指标 ( $^\circ\text{C}$ )
20	3.750	0.1800	0.05
22	3.950	0.0594	0.07
23	4.050	0.0608	0.07
31	11.030	0.5000	0.05
32	12.202	0.5000	0.05

### 1.3 Argo

Argo 计划是旨在快速、准确的收集全球海洋上层的海水温度、盐度和海流剖面资料, 于 1998 年推出的全球海洋观测项目(Roemmich *et al.*, 2000; Argo Science Team, 2001)。图 1 是 2003—2009 年研究海域 Argo 浮标的观测点分布图, 这些观测点均经过质量控制并插值到与红外数据相同空间分辨率的空间网格。由于选取的空间网格分辨率更高, 相比于微波

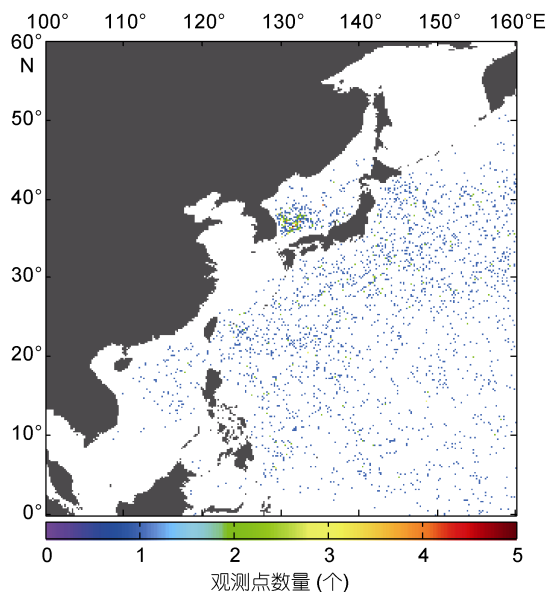


图 1 2003—2009 年 Argo 浮标海表温度观测点分布  
Fig.1 Distribution of SST observation points of Argo during 2003 to 2009

传感器比对分析的实测数据(奚萌等, 2016), 此次空间覆盖率从每年 23%左右下降到不足 1%, 下降幅度较大。7 年间共计获得观测数据 56327 个, 仅能够覆盖研究海域的 4.03%左右, 其中日本海南部海域观测频次较高, 而在中国南海南部、东海、黄海、渤海和鄂霍茨克海等海域几乎没有获得有效的观测数据。

## 2 研究方法

### 2.1 匹配方法

本文选取水深 0—1m 范围内的 Argo 浮标数据, 先剔除无质量标识或包含错误地理及时间信息的数据, 并参考 Marcello 等(2004)的做法对其进行修订和剔除; 再根据空间就近点原则, 将经纬度信息和时间信息逐日插值到空间分辨率为  $1/24^\circ \times 1/24^\circ$  均匀网格上。当一个网格点包含多个数据时, 需进行算术平均后作为网格点观测值保留。由于海表温度融合产品是以红外和微波辐射计数据作为输入数据制作的, 其时间分辨率往往分为白天、夜间和单天平均, 因此红外数据与浮标数据的匹配点选择 12 小时作为时间窗口。空间窗口的匹配参考 Bailey 等(2006)的方法, 具体如下: (1)以 Argo 浮标对应的网格点为中心, 选取  $5 \times 5$  的空间网格作为空间窗口匹配红外数据; (2)统计空间窗口内的有效数据个数  $N$ (即有海表温度观测值的网格点个数)和非陆地数据总数  $M$ , 要求  $N > M/2 + 1$  且  $N \geq 2$ , 以保证空间均值的代表性; (3)计算有效数据的均值  $\bar{X}$  和标准差  $\sigma$ , 剔除  $\bar{X} \pm (1.5 \times \sigma)$  之外的数据, 以减少较异常数据对均值计算的影响; (4)重新计算均值和标准差, 并计算方差系数  $CV = \text{标准差} / \text{均值}$ , 若  $CV < 0.15$ , 则通过均匀性判识。

由于三个红外辐射计海表温度产品都是相同空间分辨率的均匀网格产品, 本文对相同时间窗口内的同一空间网格点红外辐射计海表温度数据分别进行匹配。

### 2.2 比对方法

本文对海表温度匹配点数据分别进行平均偏差、绝对偏差、标准偏差和均方根误差的统计分析(奚萌

等, 2016)。平均偏差 bias 计算公式为  $\text{bias} = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - I_i)}{n}$ ,

式中  $S$  和  $I$  表示不同红外辐射计或 Argo 浮标的海表温度数据,  $S_i$  表示第  $i$  个匹配点海表温度数据的大小,  $n$  表示匹配点海表温度数据总数, 是两种数据的系统偏差之间差异程度的量度; 绝对偏差  $\text{abs\_bias}$  计算公

式为  $\text{abs\_bias} = \frac{\sum_{i=1}^n (|S_i - I_i|)}{n}$ , 由于离差被绝对值化,

不会出现正负抵消的情况, 因此能更好的反映系统偏差的实际情况; 标准偏差 STD(standard deviation)

计算公式为  $\text{STD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(S_i - I_i) - (\overline{S - I})]^2}{n}}$ , 标准偏

差反映了观测的海表温度数据之间的偏差相对于其平均偏差的离散程度, 标准偏差越大则海表温度数据的偏差分布越分散; 均方根误差 RMSE (root mean

square error)计算公式为  $\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - I_i)^2}{n}}$ , 对产

品之间特大或特小误差非常敏感, 能够很好的反映出观测结果的精密度。

### 3 结果与分析

#### 3.1 红外辐射计海表温度数据分布

图 2 为 2003—2009 年在研究海域三个红外辐射计的海表温度观测点分布, 其中 Pathfinder 共有 788 800 356 个观测点, 平均每天可以覆盖研究区域 20.23% 左右的海域, 相比于其他两个辐射计观测点最少, 单天覆盖率只有其他两个辐射计的 65% 左右, 主要是由于制作三级海表温度产品时进行质量控制剔除数据造成的; Terra 共有 1 219 951 965 个观测点, 平均每天可以覆盖研究区域 30.14% 左右的海域;

Aqua 共有 1 185 598 399 个观测点, 平均每天可以覆盖研究区域 31.39% 左右的海域, 覆盖率与 Terra 相当。

红外辐射计单天的空间覆盖率远低于微波辐射计, 这是由于微波辐射计观测海表温度不受云覆盖的影响。但是, 红外辐射计不受陆地电磁波干扰, 可提供微波产品中无法使用的近岸海域数据。三个红外数据在渤海海域和日本海西北部观测频次最高, 基本保证每两天至少获得一次观测数据; 在西北太平洋 10°—30°N 之间海域, 由于较少受到云雨天气影响导致观测频次较高; 黄岩岛东北部海域、根室海峡南部相比其周围海域观测频次较高。

按照上述 2.1 的匹配方法, 图 3 所示为三个红外辐射计与 Argo 浮标的海表温度数据匹配点分布, Pathfinder 与 Argo 浮标在研究区域共有 12 104 个匹配数据, Terra 与 Argo 浮标在研究区域共有 17296 个匹配数据; Aqua 与 Argo 浮标在研究区域共有 17 413 个匹配数据, Pathfinder 与浮标的匹配点数远少于其他两个辐射计, 匹配点空间分布基本一致。图 4 所示分别为 Terra 与 Pathfinder、Aqua 与 Pathfinder 和 Terra 与 Aqua 的海表温度数据匹配点分布。7 年时间范围内, Terra 与 Pathfinder 共有 407 282 243 个匹配数据; Aqua 与 Pathfinder 共有 422 888 372 个匹配数据; Terra 与 Aqua 共有 501 542 089 个匹配数据。辐射计的匹配点分布基本和观测点分布成比例, 由于 Pathfinder 的观测点少, 相应的和 Terra 与 Aqua 的匹配点也更稀少, 图 4a 和图 4b 除在 20—30°N 部分海域比图 4c 的匹配点略多, 在其他海域匹配点都少于图 4c。

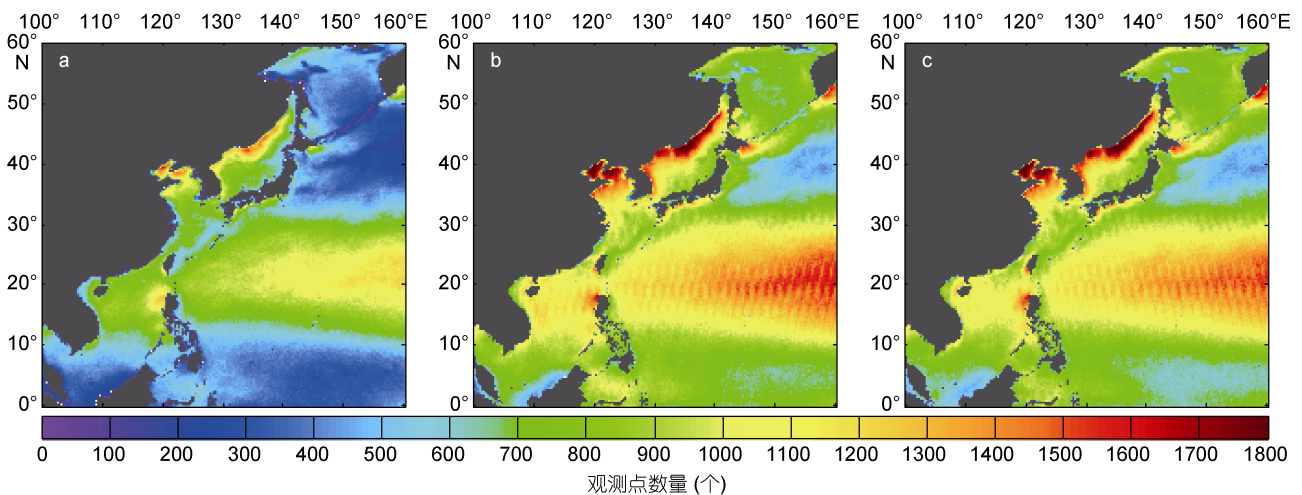


图 2 2003—2009 年红外辐射计海表温度观测点数分布

Fig.2 Distribution of SST observation points of infrared radiometer during 2003 to 2009

a: Pathfinder, b: Terra, c: Aqua



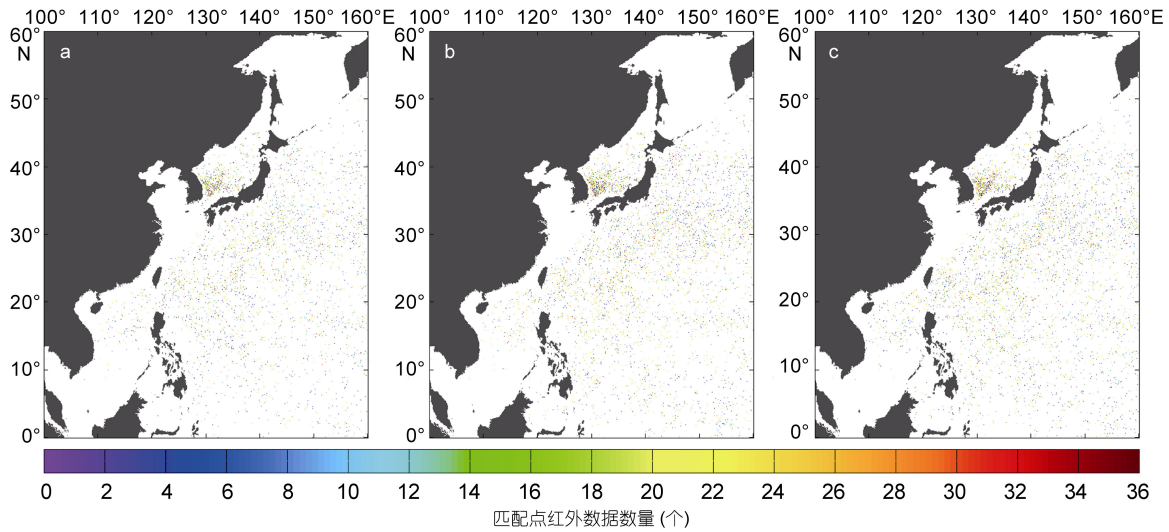


图 3 2003—2009 年红外辐射计与 Argo 浮标海表温度匹配点分布

Fig.3 SST matching points between infrared radiometer and Argo during 2003 to 2009

a: Pathfinder vs Argo, b: Terra vs Argo, c: Aqua vs Argo

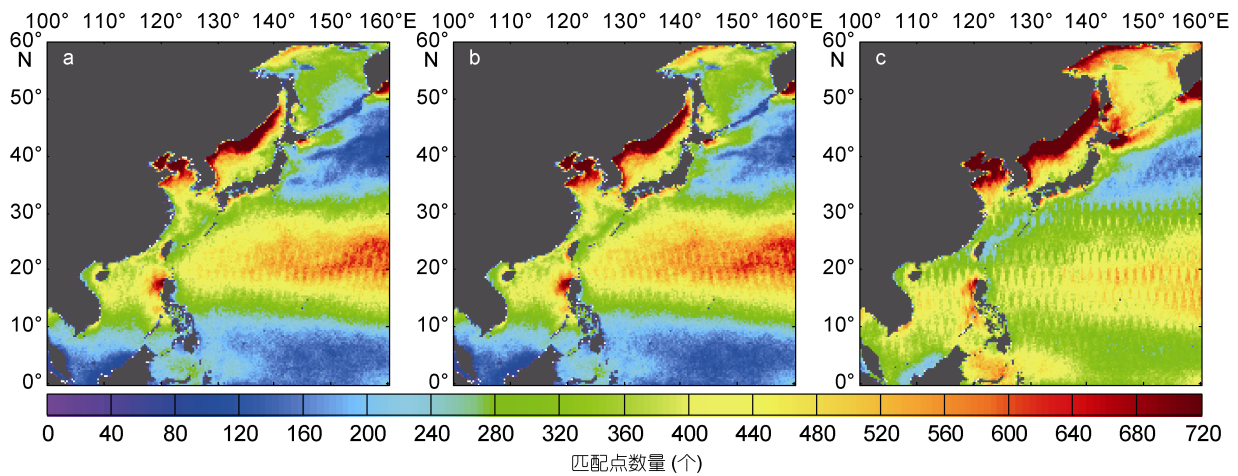


图 4 2003—2009 年红外辐射计海表温度匹配点分布

Fig.4 Distribution of SST matching points of infrared radiometer during 2003 to 2009

a: Terra vs Pathfinder, b: Aqua vs Pathfinder, c: Terra vs Aqua

图 5 为 2009 年 1 月 17 日三个红外辐射计白天和夜间的海表温度; 图 6 和图 7 分别为 2009 年 1 月和 7 月三个红外辐射计的月平均海表温度和海表温度梯度(蒋兴伟等, 2013)。受云雨天气影响, 辐射计逐日产品空间覆盖率低, 难以获取连续的观测数据, 在应用中受限。三个辐射计的月平均产品基本可以覆盖整个西北太平洋海域, 鄂霍茨克海的西部海域由于 1 月份有海冰覆盖, 因此没有海表温度观测数据(图 6a—c)。相比周围海域, 鄂霍茨克海海域(145°E, 55°N)的观测频次较低且海表温度也较低。和微波辐射计相比, 红外辐射计空间分辨率更高, 由于观测频次偏低导致数据离散度高, 梯度分布偏高, 红外数据月平均海表

温度梯度分布结果几倍于微波数据的结果, 且包含很多中小尺度噪声, 如不进行低通滤波处理则噪声会很明显, 红外数据无法像微波辐射计一样直接通过梯度分布观测海表温度变化趋势。由图 5—7 所示, 定性比较三个红外辐射计的逐日、月平均海表温度分布和海表温度梯度分布, 发现三个传感器均能在空间上反映西北太平洋海域的海表温度变化趋势, 并且比较一致。

### 3.2 红外辐射计与实测海表温度数据比对结果

表 3—5 为三个红外数据分别与 Argo 浮标匹配点海表温度的统计分析结果, 包括匹配点数量、平均偏差、绝对偏差、标准偏差和均方根误差, 结果发现,

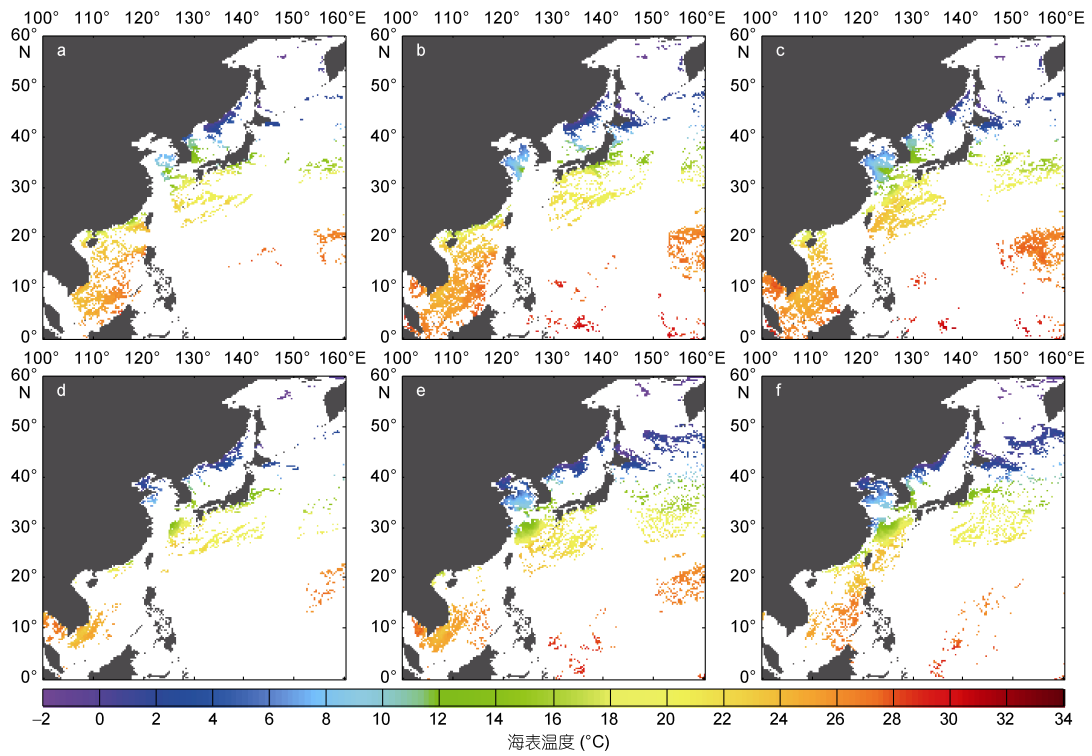


图 5 2009 年 1 月 17 日红外辐射计海表温度分布

Fig.5 Daily SST of infrared radiometer on January 17, 2009

a: Pathfinder 白天, b: Pathfinder 夜间, c: Terra 白天, d: Terra 夜间, e: Aqua 白天, f: Aqua 夜间

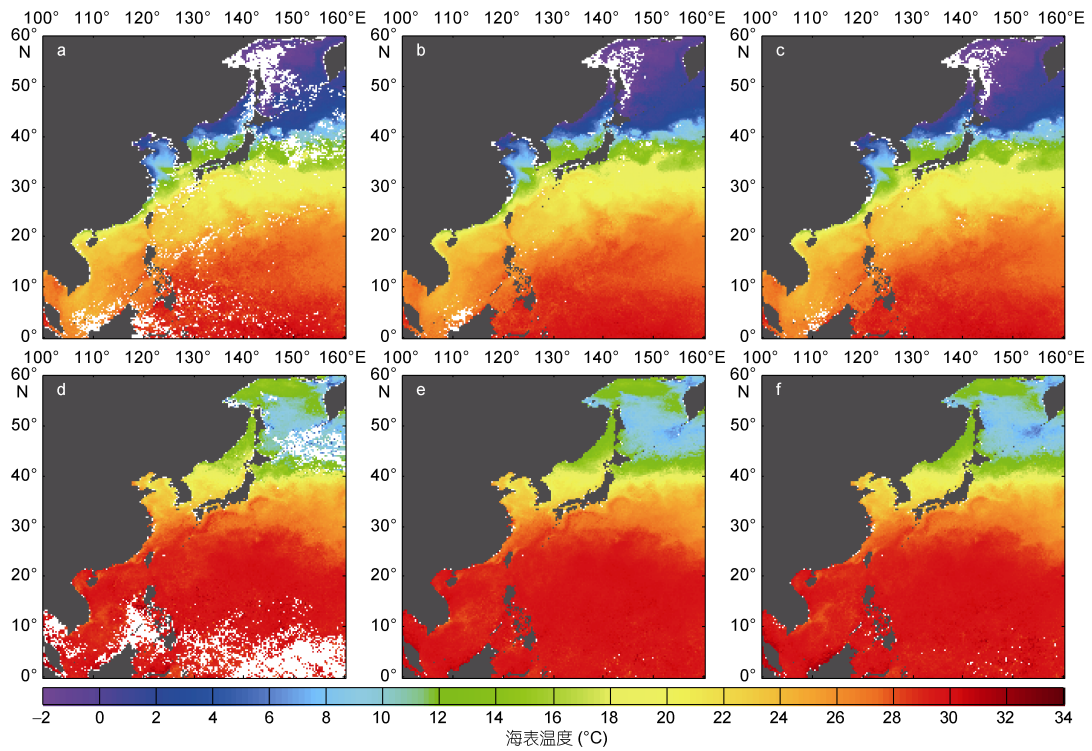


图 6 2009 年 1 月和 7 月红外辐射计月平均海表温度分布

Fig.6 Monthly averaged SST distribution of infrared radiometer for January 2009 and July 2009

a: Pathfinder 1 月, b: Pathfinder 7 月, c: Terra 1 月, d: Terra 7 月, e: Aqua 1 月, f: Aqua 7 月

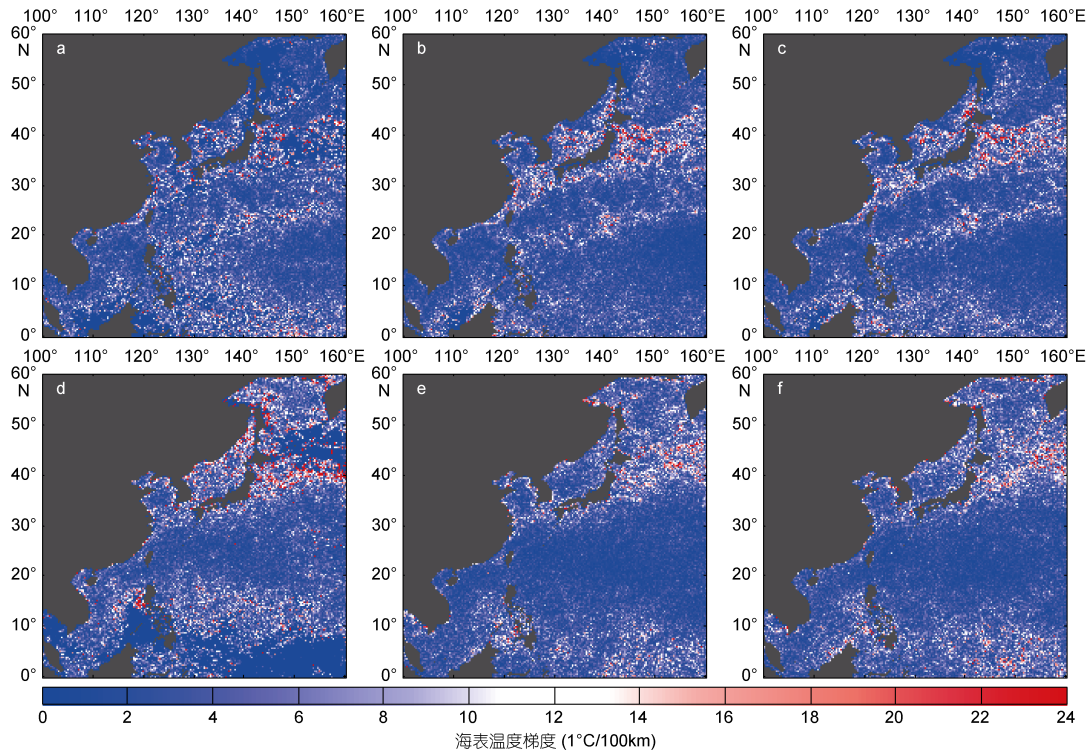


图7 2009年1月和7月红外辐射计月平均海表温度梯度分布

Fig.7 Monthly averaged SST gradient distribution of infrared radiometer for January 2009 and July 2009

a: Pathfinder 1月, b: Pathfinder 7月, c: Terra 1月, d: Terra 7月, e: Aqua 一月, f: Aqua 7月

Pathfinder、Terra、Aqua 与 Argo 浮标的平均偏差分别为 $-0.07^{\circ}\text{C}$ 、 $-0.14^{\circ}\text{C}$ 、 $-0.15^{\circ}\text{C}$ ，Terra 和 Aqua 略差于 Pathfinder。Pathfinder、Terra、Aqua 与 Argo 浮标的绝对偏差分别为  $0.50^{\circ}\text{C}$ 、 $0.49^{\circ}\text{C}$  和  $0.52^{\circ}\text{C}$ ；Pathfinder、Terra、Aqua 与 Argo 浮标的标准偏差分别为  $0.68^{\circ}\text{C}$ 、 $0.66^{\circ}\text{C}$  和  $0.69^{\circ}\text{C}$ ；Pathfinder、Terra、Aqua 与 Argo 浮标的均方根误差分别为  $0.69^{\circ}\text{C}$ 、 $0.67^{\circ}\text{C}$  和  $0.71^{\circ}\text{C}$ 。三个传感器红外数据与 Argo 浮标的比对结果基本一致，本文统计分析结果与其他学

者(高郭平等, 2001; Barton *et al*, 2006; 孙凤琴等, 2007; Hosoda *et al*, 2007)分析结果基本一致，但研究区域红外数据比对分析结果略差于全球数据，主要是由于研究海域多有涡旋和锋面，所以海表温度时空变化比全球数据更剧烈。相比于微波数据与 Argo 浮标的比对结果(奚萌等, 2016)，微波辐射计 AMSR-2、TMI、WindSat 在研究海域的平均偏差分别为  $0.15^{\circ}\text{C}$ 、 $0.03^{\circ}\text{C}$  和  $0.04^{\circ}\text{C}$ ；均方根误差分别为  $0.73^{\circ}\text{C}$ 、 $0.80^{\circ}\text{C}$  和  $0.73^{\circ}\text{C}$ ，红外数据的精度更高。

表3 Pathfinder 与 Argo 浮标海表温度匹配点统计分析结果

Tab.3 SST statistics of matching points between Pathfinder and Argo

年份	匹配点数量(个)	平均偏差( $^{\circ}\text{C}$ )	绝对偏差( $^{\circ}\text{C}$ )	标准偏差( $^{\circ}\text{C}$ )	均方根误差( $^{\circ}\text{C}$ )
2003	593	0.00	0.39	0.52	0.52
2004	1 109	0.01	0.45	0.64	0.64
2005	1 674	0.00	0.47	0.63	0.63
2006	2 224	-0.01	0.47	0.65	0.65
2007	1 929	-0.15	0.57	0.74	0.76
2008	2 203	-0.08	0.54	0.72	0.72
2009	2 372	-0.13	0.52	0.70	0.71
总计	12 104	-0.07	0.50	0.68	0.69

表 4 Terra 与 Argo 浮标海表温度数据匹配点统计分析结果  
Tab.4 SST statistics of matching points between Terra and Argo

年份	匹配点数量(个)	平均偏差(°C)	绝对偏差(°C)	标准偏差(°C)	均方根误差(°C)
2003	800	-0.07	0.46	0.64	0.64
2004	1 378	-0.12	0.47	0.64	0.65
2005	2 414	-0.20	0.50	0.65	0.68
2006	3 003	-0.16	0.48	0.64	0.66
2007	2 881	-0.16	0.50	0.67	0.69
2008	3 347	-0.08	0.49	0.68	0.68
2009	3 473	-0.16	0.50	0.66	0.68
总计	17 296	-0.14	0.49	0.66	0.67

表 5 Aqua 与 Argo 浮标海表温度数据匹配点统计分析结果  
Tab.5 SST statistics of matching points between Aqua and Argo

年份	匹配点数量(个)	平均偏差(°C)	绝对偏差(°C)	标准偏差(°C)	均方根误差(°C)
2003	871	-0.10	0.48	0.67	0.68
2004	1 447	-0.13	0.52	0.70	0.72
2005	2 337	-0.19	0.52	0.66	0.69
2006	2 956	-0.17	0.52	0.69	0.71
2007	2 880	-0.17	0.53	0.69	0.71
2008	3 480	-0.10	0.51	0.69	0.70
2009	3 442	-0.17	0.53	0.70	0.72
总计	17 413	-0.15	0.52	0.69	0.71

图 8—10 为 2003—2009 年三个红外辐射计白天、夜间及昼夜平均数据与 Argo 浮标匹配点海表温度平均偏差、标准偏差和数量的逐月演变, 结果发现: 三个统计结果变化曲线基本一致, 数据质量相对稳定; Terra 和 Aqua 分别与 Argo 浮标的负偏差更为明显, Pathfinder 的平均偏差更接近 Argo 观测结果; 相对于 Argo 浮标, 三个红外辐射计的海表温度都存在明显的季节变化, 白天的平均偏差均是夏季为正、冬季为负, 偏差都在 $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ 之间, 夜间的平均偏差基本均为负偏差, 冬季比夏季的偏差更大; 昼夜平均的平均偏差偏离度减小, 但依然存在明显的季节性变化, 这与微波辐射计与 Argo 浮标的比对分析结果一致(奚萌等, 2016)。Pathfinder 的分析结果与 Reynolds 等(2007)的分析也基本一致。以 Argo 数据为基准, 可以看出, Terra 白天数据偏低, Aqua 夜间数据偏低, 这是卫星的过境时间不同造成的, 正可反映海表温度的日变化过程; 标准偏差同样也存在周期变化, 夏季的标准偏差略大于冬季的结果; Argo 浮标数量逐年增加, 与红外数据的匹配点数量也逐渐增多, 但数据量的多少并未影响比对分析结果的稳定性。

图 11 为海表温度误差棒分析结果, 展示的是在

$1^{\circ}\text{C}$  温度区间内红外数据与 Argo 浮标的匹配点个数、平均偏差和标准偏差。三个红外数据与 Argo 浮标匹配点主要分布在  $10\text{—}31^{\circ}\text{C}$ , 占匹配点总数的近 97%, 最为集中的  $27\text{—}30^{\circ}\text{C}$  占匹配点总数的 47% 左右。在各个温度区间, 红外数据与 Argo 浮标的平均偏差都比较一致( $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ )。在  $24\text{—}30^{\circ}\text{C}$  温度区间, Pathfinder 与 Argo 浮标的标准偏差小于  $0.7^{\circ}\text{C}$ , 占匹配点总数的 63.59%。在  $21\text{—}31^{\circ}\text{C}$  和  $26\text{—}29^{\circ}\text{C}$  的温度区间, Terra 与 Argo 浮标的标准偏差分别小于  $0.7^{\circ}\text{C}$  和  $0.6^{\circ}\text{C}$ , 占匹配点总数的 75.93% 和 33.04%。在  $23\text{—}30^{\circ}\text{C}$  和  $27\text{—}29^{\circ}\text{C}$  温度区间, Aqua 与 Argo 浮标的标准偏差分别小于  $0.7^{\circ}\text{C}$  和  $0.6^{\circ}\text{C}$ , 占匹配点总数的 68.24% 和 27.56%。由此可见, 在相同的标准偏差范围内, Terra 比 Pathfinder 和 Aqua 有更宽的温度区间。总体上, 三种融合数据与浮标数据的偏差程度和离散程度均较小, 数据质量可靠。与微波数据与 Argo 浮标的比对结果不同(奚萌等, 2016), 红外数据与浮标数据比对没有出现低温区正偏差高温区负偏差的现象, 数据质量相对稳定。如果单从温度区间的标准偏差比较, 部分区间的红外数据与 Argo 浮标的标准偏差略差于微波数据与 Argo 浮标的标准偏差, 这是



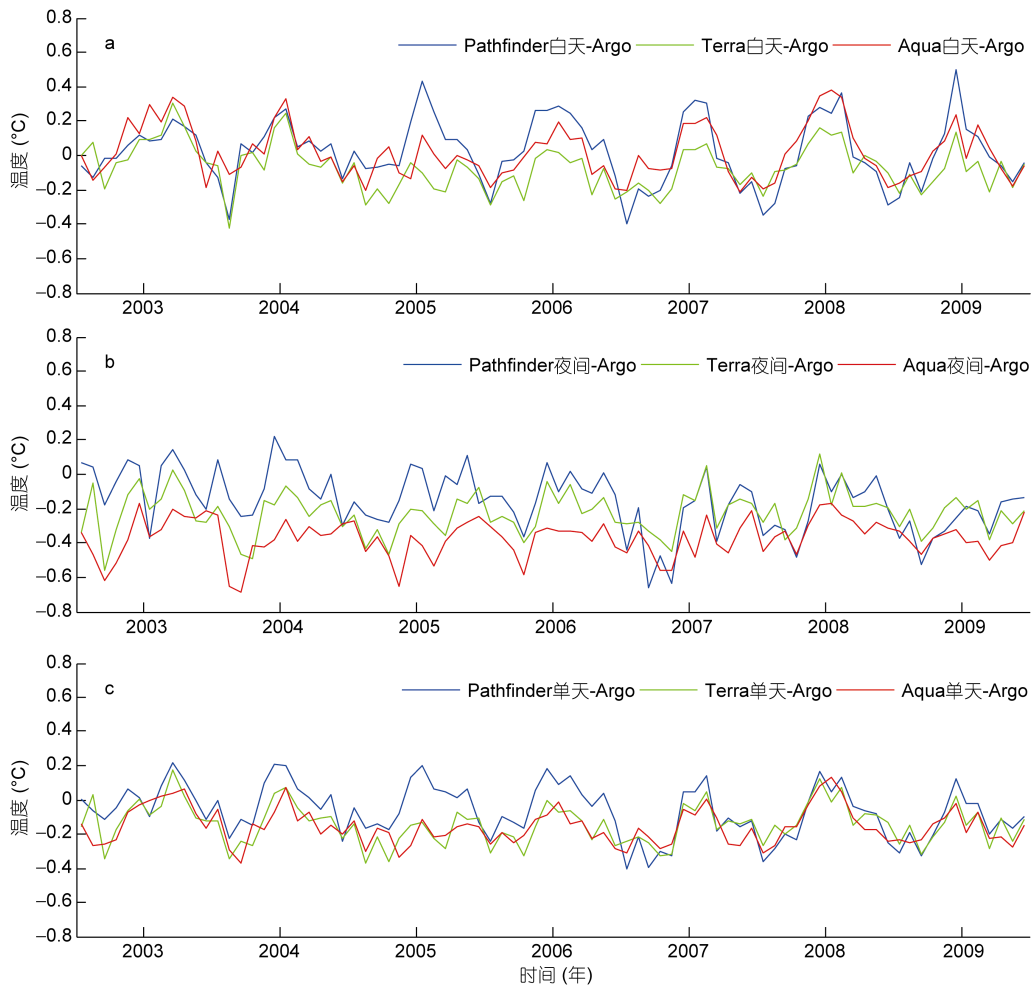
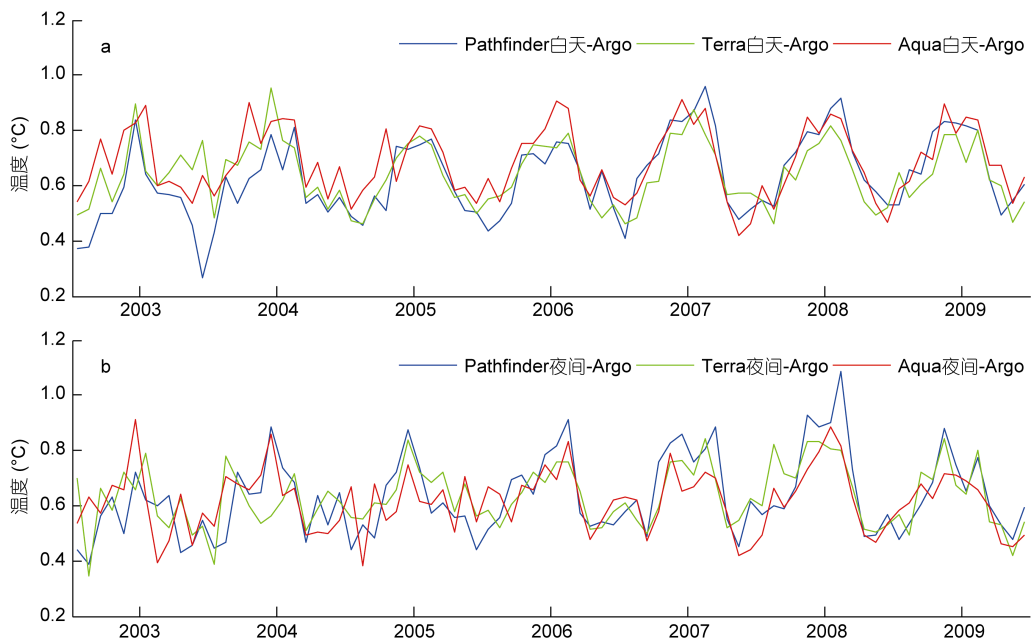


图 8 2003—2009 年红外辐射计与 Argo 浮标海表温度匹配点平均偏差逐月演变

Fig.8 Analysis of monthly SST bias in the matching points between infrared radiometer and Argo during 2003 to 2009



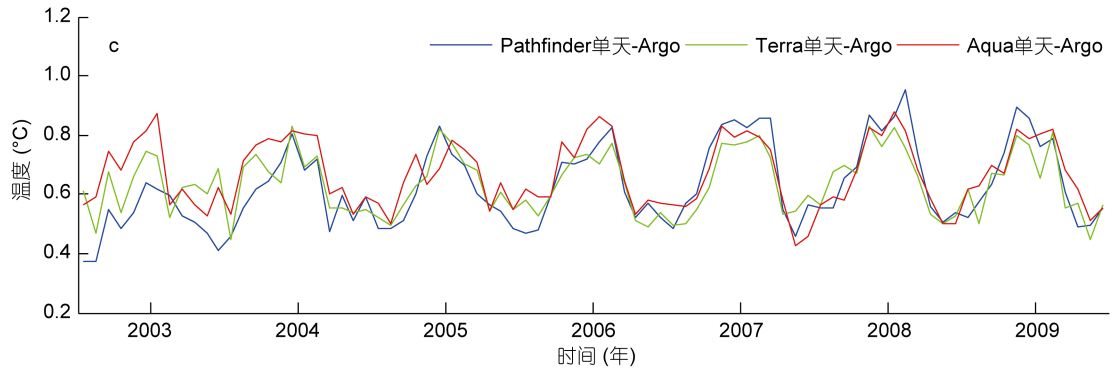


图 9 2003—2009 年红外辐射计与 Argo 浮标海表温度匹配点标准偏差逐月演变

Fig.9 Analysis of monthly SST standard deviation of matching points between infrared radiometer and Argo during 2003 to 2009

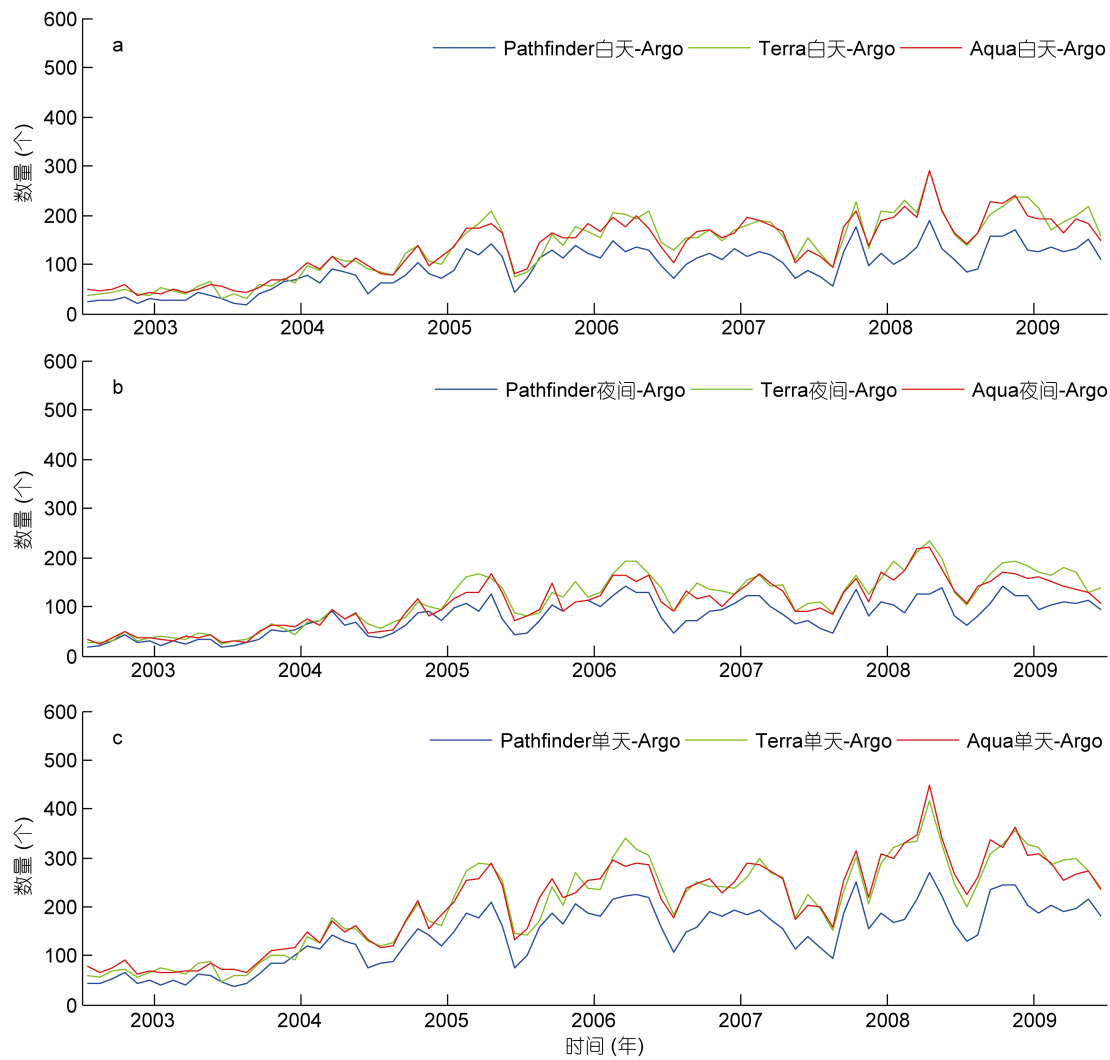


图 10 2003—2009 年红外辐射计与 Argo 浮标海表温度匹配点数量逐月演变

Fig.10 Quantitative analysis of monthly SST of matching points between infrared radiometer and Argo during 2003 to 2009

因为红外数据的空间分辨率更高、匹配的空间窗口选择的更小, 如果红外数据选取与微波数据一样的匹配窗口, 则标准偏差会进一步降低并小于微波数据。

造成海表温度红外数据与浮标数据偏差的原因主要有以下几方面: (1)Argo 浮标数据测得是水下 1m 的水体温度, 而红外辐射计测量的是水下 1 $\mu$ m 左右

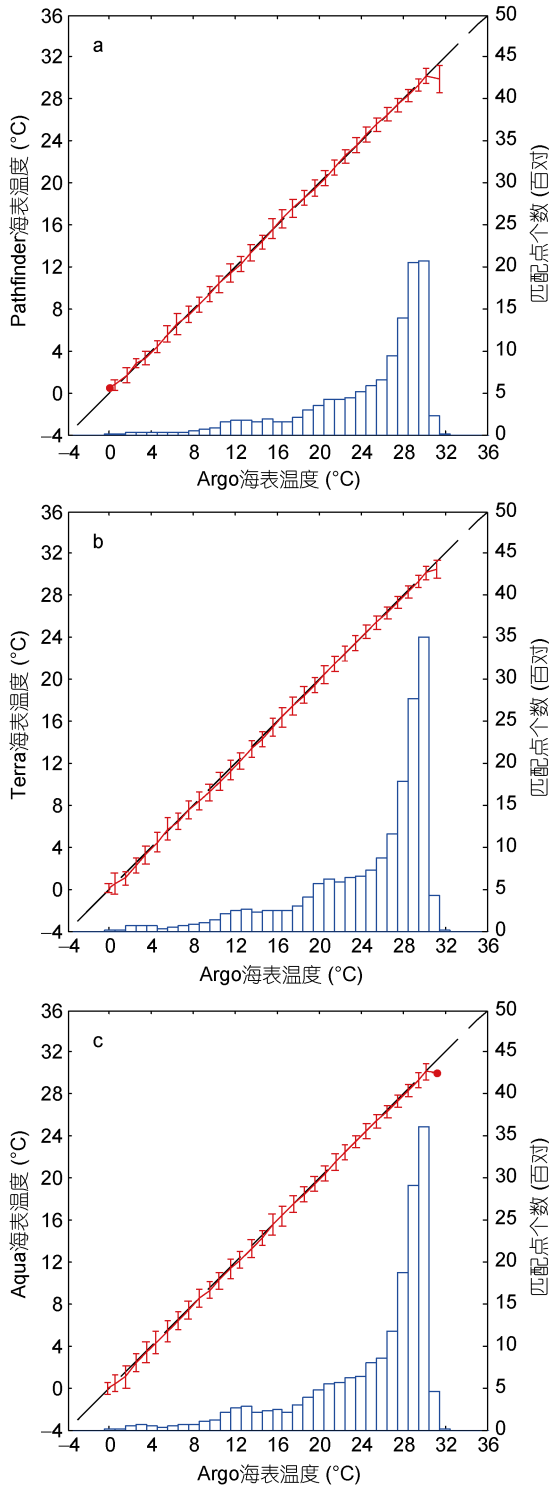


图 11 2003—2009 年红外辐射计与 Argo 浮标海表温度匹配点误差棒分析

Fig.11 Analysis of SST error bar of matching points between infrared radiometer and Argo during 2003 to 2009

海表层温度, 尽管对 Argo 浮标数据进行了质量校正, 但由于观测深度不同仍会产生偏差(Ricciardulli *et al.*, 2004)。(2)皮温与体温的大小依赖于海面风、浪和光

照时间, 海面发出长波辐射使皮层冷却, 同时从海洋到大气的潜热和感热输送, 也使皮层冷却, 因此一般皮温比体温低(Robinson, 1985)。(3)白天由于太阳辐射的加热作用, 海表温度升高, 皮温比体温变化更大, 故红外数据要高于浮标数据, 而夜间辐射冷却效应则导致相反结果, 这种差异在晴空尤其明显。(4)西北太平洋海域海洋表层和次表层的温度差异存在明显的季节变化, 皮温与体温的差异在冬季比夏季更小, 这也是红外数据和浮标数据产生偏差的原因。(5)红外辐射计海表温度产品与 Argo 浮标数据匹配的时间窗口为 12 小时和 24 小时, 在昼夜温差明显的海域, 观测时间的差异必然会影响检验精度。(6)Argo 浮标数据是  $1/24^{\circ} \times 1/24^{\circ}$  的观测网格内所有单点观测的瞬时海表温度平均值, 而红外辐射计海表温度是网格化反演结果, 即  $1/24^{\circ} \times 1/24^{\circ}$  的观测网格内观测海表温度的平均值。在海表温度梯度变化较大的区域, 遥感数据与浮标数据差异值会更大。由于西北太平洋海域有黑潮经过, 产生许多涡旋和锋面, 所以该海域海表温度时空变化较为剧烈。(7)红外辐射计的定标存在误差及衰减的现象, 也可能对反演结果造成误差(Walton *et al.*, 1998)。

### 3.3 红外辐射计海表温度数据交叉比对结果

表 6—8 分别为三个红外辐射计海表温度数据交叉比对后匹配点的统计分析结果, Pathfinder 与 Terra、Aqua 的平均偏差略大于 Terra 和 Aqua 之间的平均偏差, 而绝对偏差、标准偏差和均方根误差都略好于 Terra 和 Aqua 的相互比对结果。

图 12—14 比较了三个红外辐射计之间的逐月演变统计分析结果, 在整个研究时间范围内数据质量保持稳定。红外辐射计交叉比对的平均偏差逐月演变与 Argo 浮标的比对结果不同, 没有明显的季节性变化, 月份之间平均偏差不超过  $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ , 红外数据之间比对的标准偏差也均小于与 Argo 浮标比对的结果。Aqua 和 Pathfinder 之间的平均偏差白天偏差不明显, 夜间为负偏差; Terra 和 Aqua 之间的平均偏差白天为负偏差, 夜间为正偏差, 单天平均后平均偏差趋近于 0。三个红外辐射计白天的标准偏差交叉比对结果也存在季节性差异变化, 如夏季偏大冬季偏小, 但远没有与 Argo 浮标比对时季节性变化明显, 而且夜间的比对结果也无明显季节性变化。Terra 和 Pathfinder、Aqua 和 Pathfinder 逐月演变曲线在 2005 年 6 月开始有明显变化, 之后又趋于稳定, 这是由于在 2005 年 6 月之前 Pathfinder 是基于搭载在 NOAA-17 卫星上的

表 6 Terra 与 Pathfinder 海表温度匹配点统计分析结果  
Tab.6 SST statistics of matching points between Terra and Pathfinder

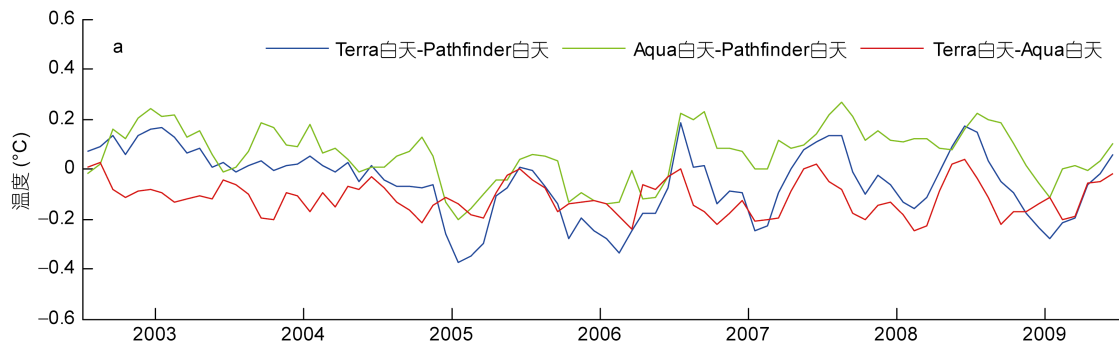
年份	匹配点数量(个)	平均偏差(°C)	绝对偏差(°C)	标准偏差(°C)	均方根误差(°C)
2003	57 508 503	0.01	0.30	0.40	0.40
2004	75 265 831	-0.04	0.29	0.39	0.39
2005	64 012 209	-0.15	0.35	0.45	0.48
2006	56 136 124	-0.16	0.41	0.52	0.54
2007	53 194 485	-0.01	0.40	0.55	0.55
2008	49 328 389	0.02	0.40	0.54	0.54
2009	51 836 702	-0.05	0.41	0.57	0.57
总计	407 282 243	-0.06	0.36	0.49	0.49

表 7 Aqua 与 Pathfinder 海表温度数据匹配点统计结果  
Tab.7 SST statistics of matching points between Aqua and Pathfinder

年份	匹配点数量(个)	平均偏差(°C)	绝对偏差(°C)	标准偏差(°C)	均方根误差(°C)
2003	46 775 470	-0.06	0.44	0.59	0.60
2004	61 367 424	-0.09	0.43	0.57	0.58
2005	62 715 306	-0.16	0.39	0.49	0.51
2006	66 196 641	-0.15	0.34	0.42	0.44
2007	63 506 793	0.02	0.32	0.43	0.43
2008	59 556 189	0.04	0.32	0.42	0.42
2009	62 770 549	-0.03	0.33	0.43	0.43
总计	422 888 372	-0.06	0.36	0.48	0.49

表 8 Terra 与 Aqua 海表温度数据匹配点统计结果  
Tab.8 SST statistics of matching points between Terra and Aqua

年份	匹配点数量(个)	平均偏差(°C)	绝对偏差(°C)	标准偏差(°C)	均方根误差(°C)
2003	64 958 460	0.01	0.39	0.56	0.56
2004	73 493 901	-0.01	0.39	0.56	0.56
2005	74 410 610	-0.03	0.39	0.55	0.55
2006	72 141 879	-0.02	0.40	0.56	0.56
2007	73 597 492	-0.03	0.40	0.57	0.57
2008	70 780 599	-0.02	0.39	0.56	0.56
2009	72 159 148	-0.02	0.40	0.57	0.57
总计	501 542 089	-0.02	0.39	0.56	0.56





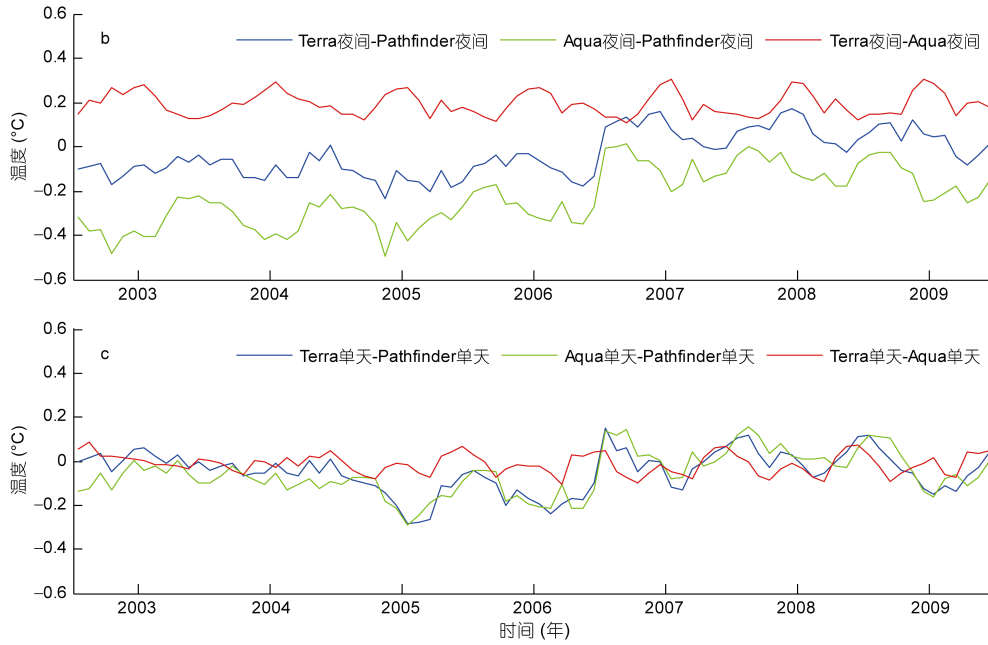


图 12 2003—2009 年红外辐射计海表温度匹配点平均偏差逐月演变  
 Fig.12 Monthly SST bias of matching points of infrared radiometer during 2003 to 2009

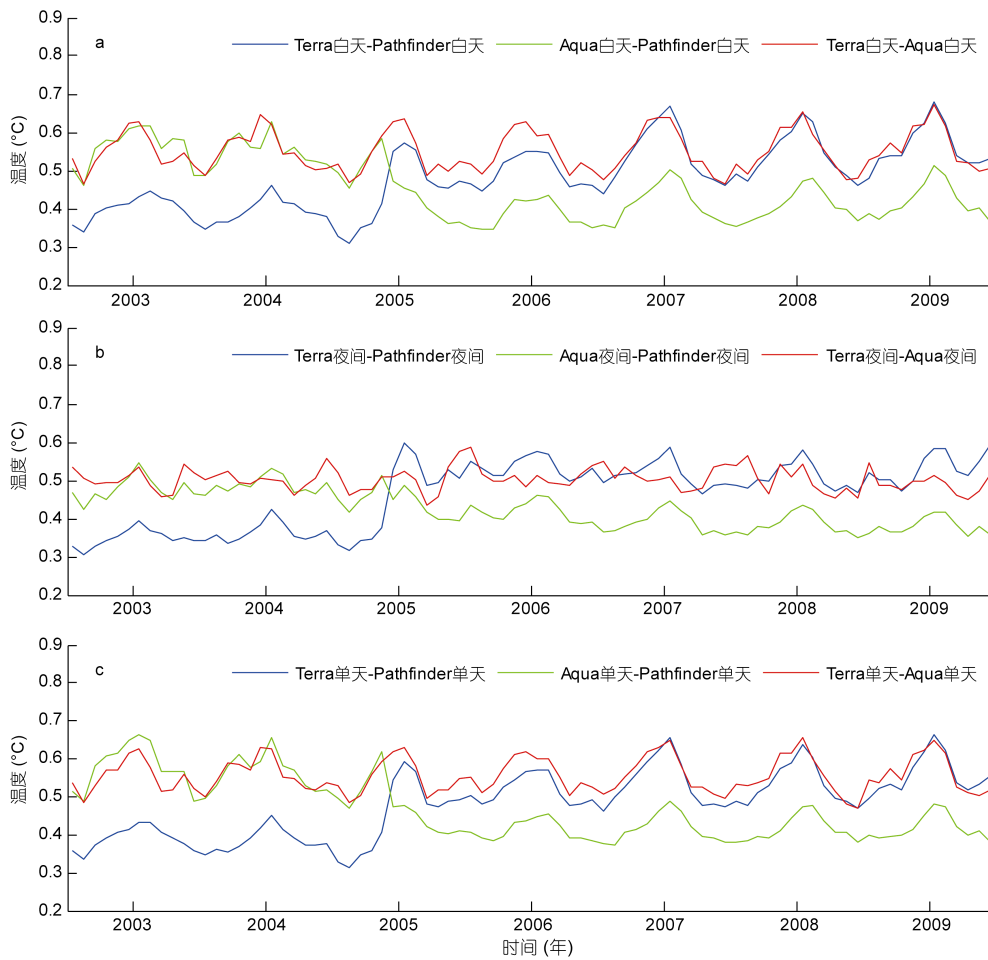


图 13 2003—2009 年红外辐射计海表温度匹配点标准偏差逐月演变  
 Fig.13 Monthly SST standard deviation of matching points of infrared radiometer during 2003 to 2009

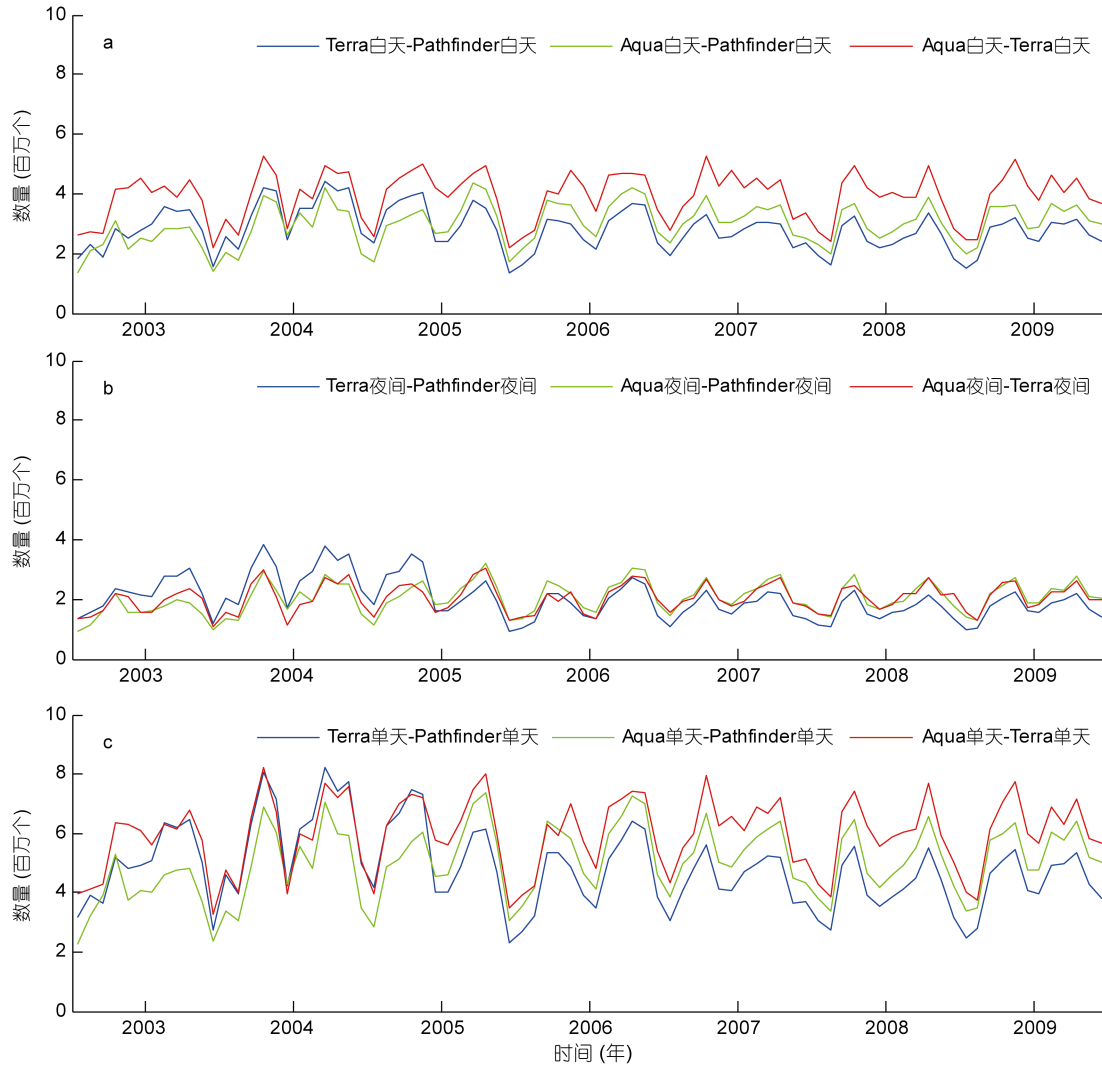


图 14 2003—2009 年红外辐射计海表温度匹配点数量逐月演变

Fig. 14 Quantitative analysis of monthly SST of matching points of infrared radiometer during 2003 to 2009

AVHRR 传感器重处理反演的海表温度, 在此之后使用的是 NOAA-18 卫星搭载的 AVHRR 传感器处理的数据, 两颗卫星过境时间的改变导致标准偏差产生了变化。冬季的云覆盖面积最大, 致使其红外数据匹配点数量最少。红外辐射匹配点数量的多少也未影响比对分析结果的稳定性。

由图 15 所示, 三个红外辐射计之间的匹配点均主要分布在 23—31°C, 占匹配点总数的 69.3%, 其中 26—30°C 的匹配点占总数的 53.8%。在高于 30°C 的匹配点, 三个红外辐射计之间开始有明显负偏差(个别匹配区间偏差大于 2.0°C, 如图 15a、c), 标准偏差甚至大于 0.5°C, 但匹配点稀少, Terra 和 Pathfinder 大于 31°C 的匹配点占总量的 0.66%, Aqua 和 Pathfinder 大于 33°C 的匹配点占总量的 0.01%, Terra 和 Aqua 大

于 31°C 的匹配点占总量的 2.29%。在小于 30°C 的温度区间, 三个红外辐射计之间的平均偏差较一致 ( $\pm 0.1^\circ\text{C}$  之间), 标准偏差小于 0.5°C, 甚至绝大多数温度区间小于 0.4°C。说明三种红外数据之间的偏差程度和离散程度都较小, 数据质量可靠。在低温区域(3—8°C 区间), 微波数据与 Argo 浮标存在较大的正偏差和标准偏差, WindSat 与 TMI 之间也有较明显的正偏差(奚萌等, 2016), 而红外辐射计之间以及与 Argo 浮标的比对过程中都没有出现这种情况, 说明在高纬海域红外辐射计反演的海表温度质量要明显好于微波数据。

由图 16a 和 b 可以看出, Pathfinder 与 Terra、Aqua 在高纬海域存在负偏差, 在低纬海域存在正偏差, 偏差部分均匀过渡。由图 16c 可以看出, Terra 和 Aqua

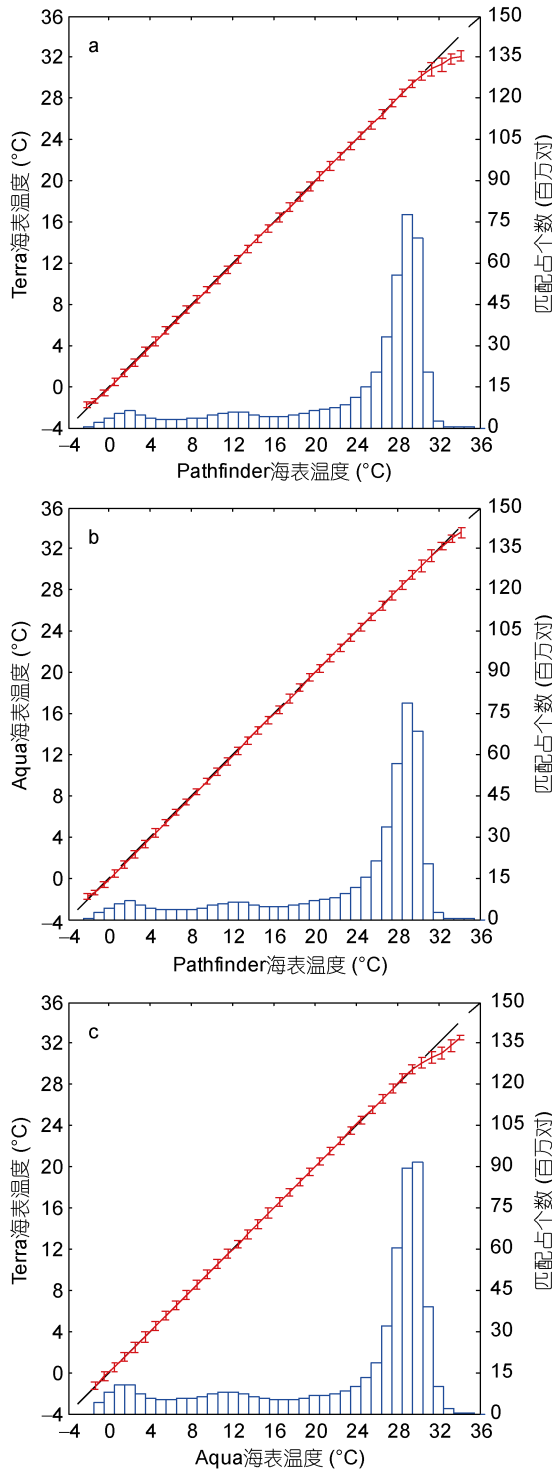


图 15 2003—2009 年红外辐射计海表温度匹配点误差棒分析

Fig.15 SST error bars of matching points of infrared radiometer during 2003 to 2009

在低纬海域负偏差偏大, 尤其是近岸海域较明显; 北纬  $20^{\circ}$  以上海域除了黑潮延伸体海域平均偏差略大 ( $0.15^{\circ}\text{C}$  左右), 其他海域偏差均小于  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。主要原

因是 Terra 和 Aqua 每天卫星的过境时间不同, 造成白天负偏差(图 12a)而夜间正偏差(图 12b), 而昼夜平均后正负偏差互抵(图 12c)。

如图 16 和 17 所示, 近岸海域水汽、气溶胶等复杂的大气条件, 较高的泥沙悬浮物含量, 以及上升流、波浪破碎等诸多海洋动力因素, 均会对卫星传感器接收海面辐射产生影响, 从而给遥感反演海表温度带来误差, 进而导致红外数据之间在近岸差异较大, 数据质量较差。从图 17 的三个辐射计之间的均方根误差分布得出, Pathfinder 和 Terra 的均方根误差分布平均, 差异最小, 但有一些离散点的均方根误差偏大, 甚至大于  $1^{\circ}\text{C}$ , 这可能是由于 Terra 数据在进行云检验时误将云边缘的云顶温度标识为海表温度, 继而保留在产品数据中造成的。Terra 和 Aqua 的均方根误差分布差异略大于 Terra 和 Pathfinder、Aqua 和 Pathfinder 之间的比对结果, 尤其是在低纬和黑潮延伸体海域。通过均方根误差分布可更清晰的发现比对数据之间的差异, 不会因为昼夜平均而掩盖产品间的差异。在低纬近岸海域, Pathfinder 和 Terra 没有明显的均方根误差, 而二者与 Aqua 之间却存在较大的均方根误差。从平均偏差和均方根误差的空间分布来看, 红外辐射计之间海表温度的差异远小于微波辐射计之间海表温度的差异(奚萌等, 2016)。

由以上交叉比对分析结果可以看出, 三个红外辐射计的海表温度数据质量接近, 均能很好的反映研究区域海表温度变化趋势, 反演精度也优于微波辐射计反演的结果, 但近岸和云边缘数据在应用过程中仍需加强质量控制。

#### 4 结论与讨论

本文对西北太平洋海域 2003—2009 年的三个红外辐射计(Pathfinder, Terra 和 Aqua)海表温度产品以及 Argo 浮标的产品特性进行介绍, 并进行了交叉比对分析。通过计算研究区域的红外辐射计白天和夜间海表温度分布、月平均海表温度分布和温度梯度分布、红外数据和 Argo 浮标的观测点分布、统计分析结果的逐月演变曲线、海表温度误差棒分析、以及红外辐射计之间的匹配点分布、平均偏差分布和均方根误差分布, 评估了红外辐射计产品的特性。结果表明:

(1) 红外数据与 Argo 浮标的平均偏差在  $\pm 0.02^{\circ}\text{C}$  之间, 均方根误差小于  $0.7^{\circ}\text{C}$ 。但是红外数据与浮标数据存在季节性变化, 白天的平均偏差均表现为夏季为正、冬季为负; 夜间的平均偏差基本均为负偏差,

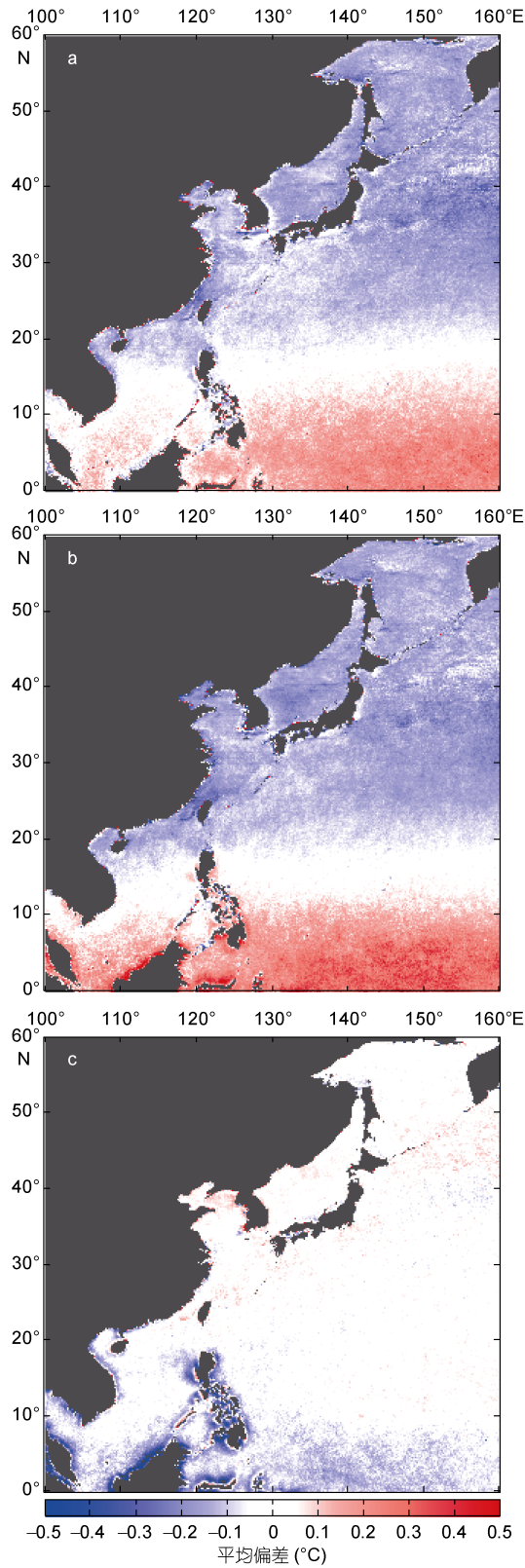


图 16 2003—2009 年红外辐射计海表温度匹配点平均偏差分布

Fig.16 SST bias of matching points of infrared radiometer during 2003 to 2009  
a: Terra vs. Pathfinder, b: Aqua vs. Pathfinder, c: Terra vs. Aqua

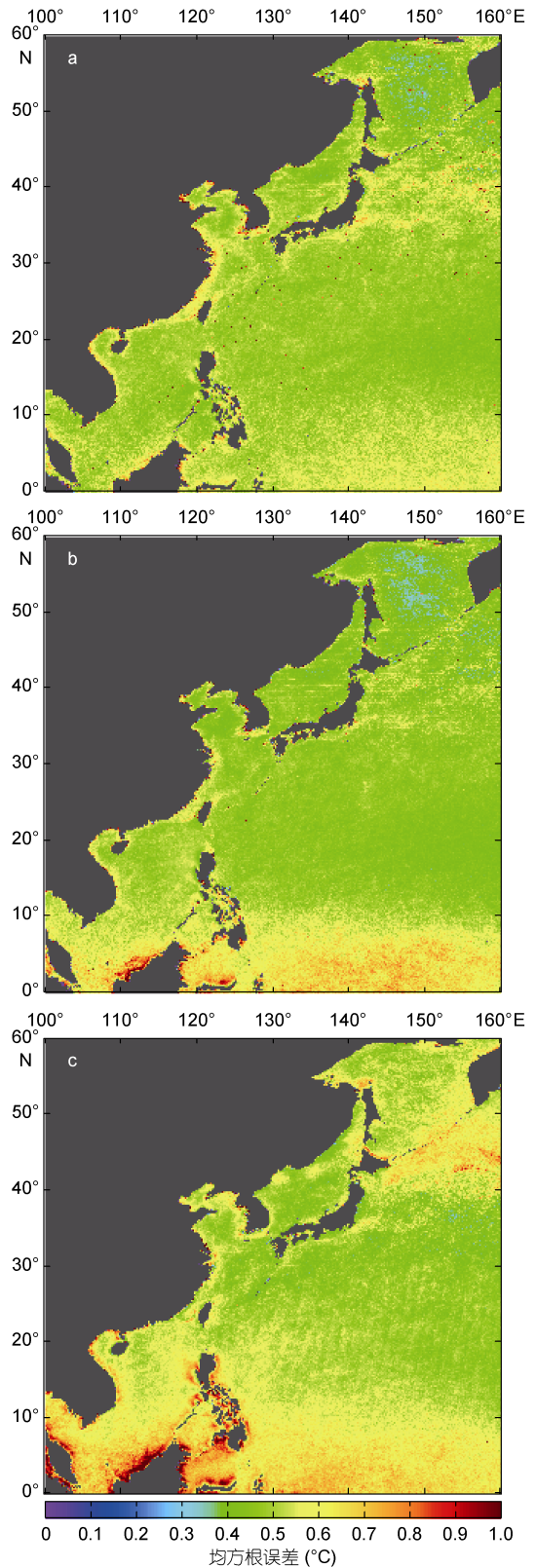


图 17 2003—2009 年红外辐射计海表温度匹配点均方根误差分布

Fig.17 SST RMSE of matching points among infrared radiometer during 2003 to 2009  
a: Terra 与 Pathfinder, b: Aqua 与 Pathfinder, c: Terra 与 Aqua



冬季比夏季的偏差大; 红外数据与浮标数据的均方根误差在冬季较小, 夏季较大。

(2) 过境时间的差异会明显影响统计分析结果, 以红外或微波遥感作为输入数据制作海表温度融合产品时, 需要考虑时间窗口的选取对产品质量的影响并合理处理海表温度日变化。

(3) 尽管 Pathfinder 是重处理数据, 对云覆盖海域数据进行了更严格的剔除, 但是并没有明显提高产品质量, 观测结果与 Terra 和 Aqua 反演结果的平均偏差( $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ )和标准偏差( $0.5^{\circ}\text{C}$ )差异很小, 与 Argo 浮标比对结果没有明显不同, 也说明三个红外辐射计在空间尺度上均能比较一致的反映西北太平洋海域的海表温度变化趋势, 数据质量稳定。

(4) 红外数据和微波数据相比, 不仅有效提高了产品空间分辨率( $1/24^{\circ}$ 和  $1/4^{\circ}$ )和特征分辨率, 且数据质量更优于微波数据(均方根误差分别为  $0.5^{\circ}\text{C}$  和  $0.7^{\circ}\text{C}$ ), 在高纬海域红外数据没有出现负偏差, 可弥补微波数据在近岸海域没有观测数据的缺陷, 但红外产品在近岸海域的精度需要更多的现场匹配数据进一步验证。但微波数据可弥补云覆盖海域无法获取有效红外观测数据的缺陷, 提高产品的空间覆盖率。所以, 合理利用红外和微波海表温度数据的优点, 可制作高精度、高时空分辨率全覆盖的海表温度融合产品。

### 参 考 文 献

- 孙凤琴, 张彩云, 商少平等, 2007. 西北太平洋部分海域 AVHRR、TMI 与 MODIS 遥感海表层温度的初步验证. 厦门大学学报(自然科学版), 46(S): 1—5
- 奚 萌, 2011. 基于最优插值算法的红外和微波遥感海表温度数据融合. 北京: 国家海洋环境预报研究中心硕士学位论文, 15—16
- 奚 萌, 宋清涛, 林明森等, 2016. 西北太平洋多源微波辐射计海表温度数据交叉比对分析. 海洋学报, 38(7): 32—47
- 高郭平, 钱成春, 鲍献文等, 2001. 中国东部海域卫星遥感 PFSST 和现场观测资料的差异. 海洋学报, 23(4): 121—126
- 蒋兴伟, 宋清涛, 2010. 海洋卫星微波遥感技术发展现状与展望. 科技导报, 28(3): 105—111
- 蒋兴伟, 奚 萌, 宋清涛, 2013. 六种遥感海表温度产品的比对分析. 海洋学报, 35(4): 88—97
- 管 磊, 陈 锐, 贺明霞, 2002. ERS-1/ATSR 海表温度在热带太平洋和西北太平洋的印证与分析. 遥感学报, 6(1): 63—69
- Argo Science Team, 2001. Argo: the global array of profiling floats. In: Kobalinsky C J, Smith N P eds. Observing the Oceans in the 21st Century. Melbourne, Australia: GODAE Project Office, 248—258
- Bailey S W, Werdell P J, 2006. A multi-sensor approach for the on-orbit validation of ocean color satellite data products. Remote Sensing of Environment, 102(1—2): 12—23
- Barton I, Pearce A, 2006. Validation of GLI and other satellite-derived sea surface temperatures using data from the Rottneest Island ferry, Western Australia. Journal of Oceanography, 62(3): 303—310
- Hosoda K, Murakami H, Sakaida F *et al*, 2007. Algorithm and validation of sea surface temperature observation using MODIS sensors aboard terra and aqua in the western north pacific. Journal of Oceanography, 63(2): 267—280
- Kilpatrick K A, Poddestá G P, Evans R, 2001. Overview of the NOAA/NASA advanced very high resolution radiometer pathfinder algorithm for sea surface temperature and associated matchup database. Journal of Geophysical Research: Oceans, 106(C5): 9179—9197
- Marcello J, Eugenio F, Hernandez A, 2004. Validation of MODIS and AVHRR/3 sea surface temperature retrieval algorithms. In: Proceedings of 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Anchorage, AK: IEEE, 839—842
- Minnett P J, Evans R H, Kearns E J *et al*, 2006. Sea-surface temperature measured by the moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS). In: Proceedings of 2006 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Toronto, Canada: IEEE, 2: 1177—1179
- Reynolds R W, Smith T M, Liu C Y *et al*, 2007. Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature. Climate, 20(22): 5473—5496
- Ricciardulli L, Wentz F J, 2004. Uncertainties in sea surface temperature retrievals from space: comparison of microwave and infrared observations from TRMM. Journal of Geophysical Research: Oceans, 109(C12): C12013
- Robinson I S, 1985. Satellite Oceanography. Chichester: Ellis Horwood
- Roemmich D, Owens B, 2000. The ARGO project: global ocean observations for understanding and prediction of climate variability. Oceanography, 13(2): 45—50
- Sakaida F, Hosoda K, Moriyama M *et al*, 2006. Sea surface temperature observation by global imager (GLI)/ADEOS-II: algorithm and accuracy of the product. Journal of Oceanography, 62(3): 311—319
- Walton C C, Sullivan J T, Rao C R N *et al*, 1998. Corrections for detector nonlinearities and calibration inconsistencies of the infrared channels of the advanced very high resolution radiometer. Journal of Geophysical Research: Oceans, 103(C2): 3323—3337

## COMPARISON IN MULTI-INFRARED PRODUCTS OF SEA SURFACE TEMPERATURE IN NORTHWEST PACIFIC

XI Meng<sup>1</sup>, SONG Qing-Tao<sup>1,2</sup>, LIN Ming-Sen<sup>1,2</sup>, ZOU Bin<sup>1,2</sup>, LI Wen-Jun<sup>3</sup>, XU Yu-Zhu<sup>1</sup>

(1. *National Satellite Ocean Application Service, State Oceanic Administration, Beijing 100081, China;*

2. *Key Laboratory of Space Ocean Remote Sensing and Applications, Beijing 100081, China;*

3. *National Marine environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China)*

**Abstract** Three infrared radiometer sea surface temperature (SST) products (Pathfinder/NOAA, MODIS/Terra, and MODIS/Aqua) and their sensors were compared and analyzed against Argo counterparts for Northwest Pacific in 2003–2009. Differences among products and their application conditions were revealed to provide information for fusion product selection and weight allocation. The results show that the bias between infrared products and those of Argo is  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$  and root mean square error (RMSE) is within  $0.8^{\circ}\text{C}$ . Meanwhile, infrared data and buoy data displayed obvious seasonal and diurnal cycles. In daytime, bias is positive in summer and negative in winter, while in nighttime, bias is negative in overall, larger RMSE in winter and smaller in winter. Bias among the three infrared datasets is  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ , RMSE  $< 0.6^{\circ}\text{C}$ . In general, all the three products could reflect the trend of SST with no obvious difference. Although the spatial coverage of infrared data is smaller, they provide high accuracy and characteristic resolution products, with which data deficiency in coastal waters can be balanced.

**Key words** sea surface temperature; infrared radiometer; Argo data; the Northwest Pacific; statistical analysis