

西北太平洋 NOAA AVHRR 海表温度日变化校正研究*

滕伟成, 管磊

中国海洋大学 海洋遥感研究所/信息科学与工程学院海洋技术系, 山东 青岛 266100

摘要: 白天, 太阳辐射将海面上层加热, 会出现海表温度日变化的情况, 该变化对海气热交换以及海洋生态等的研究具有重要意义, 且在不同海域有着不尽相同的变化规律。文章首先介绍了海表温度日变化经验和数值模型, 然后在西北太平洋海域范围内, 利用美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)的改进型甚高分辨率辐射计(Advanced Very High Resolution Radiometer, AVHRR)海表温度数据、美国宇航局“水”卫星 Aqua 上先进微波扫描辐射计(Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS, AMSR-E)的海面风速和经计算得到的太阳辐射强度数据, 通过对已有经验模型系数进行重新回归拟合, 得到在该海域 NOAA AVHRR 海表温度数据日变化的经验模型。验证结果显示, 重新回归系数后的模型在西北太平洋海域内计算所得的海表温度日变化大小与 AVHRR 数据本身计算所得结果相比, 其平均偏差为 -0.01 , 标准偏差为 0.22 , 可以在该海域内较好地对 NOAA AVHRR 海表温度数据进行日变化校正。

关键词: 海表温度; 日变化; 西北太平洋; NOAA AVHRR; Aqua AMSR-E

中图分类号: P731.11 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2012)04-0001-07

Diurnal variation correction of AVHRR SST data for the Northwest Pacific region

TENG Wei-cheng, GUAN Lei

Ocean Remote Sensing Institute/Department of Marine Technology, College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

Abstract: There is a near-surface diurnal warming layer due to the effect of solar heating during the daytime. The diurnal variation is important for studying air-sea interaction and marine ecology, among others. The characteristics of the diurnal variation are different in different regions. In this paper, firstly the empirical and physical models for estimating diurnal warming are introduced. Secondly, the sea surface temperature (SST) from the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), surface wind speed of Aqua Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS (AMSR-E) and solar radiation in the Northwest Pacific are used to regress the coefficients in an empirical model, which is applied in the diurnal variation correction of NOAA AVHRR SST in the studied area. It shows that, for the correction of AVHRR SST, the mean bias is -0.01 and the standard deviation is 0.22 . The new model can be applied in the diurnal variation correction of the satellite data in the Northwest Pacific.

Key words: sea surface temperature; diurnal warming; Northwest Pacific; NOAA AVHRR; Aqua AMSR-E

海洋是全球气候系统的主要成员, 由于海洋(包括海冰)占地球表面 $2/3$ 以上, 海水热容量大, 且较

收稿日期: 2011-01-14; 修订日期: 2011-04-20。孙淑杰编辑

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(2008AA09Z101); 新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-10-0715)

作者简介: 滕伟成(1984—), 男, 山东省烟台市人, 硕士研究生, 主要从事海表温度日变化相关研究。E-mail: weichengt@gmail.com

通信作者: 管磊, 教授, 博士, 主要从事卫星海洋遥感研究。E-mail: leiguan@ouc.edu.cn

* 感谢美国宇航局喷气推进实验室物理海洋学数据分发存档中心提供的改进型甚高分辨率辐射计海表温度数据及美国加利福尼亚圣罗莎市遥感系统公司提供的先进微波扫描辐射计数据。

大气和陆地对气候变化有着更长的记忆能力,因此海洋对季节以上时间尺度的气候变化尤其重要。海表温度(sea surface temperature, SST)是重要的海洋环境参数之一,是定量探测其他海洋环境参数的重要参数,也是探测诸如上升流等海洋现象的重要依据。目前,卫星遥感已逐渐成为探测全球海表温度场的最佳手段。

在白天,太阳辐射会将海面上层加热,使得在海气交界面由于热流的存在而形成一个薄的热分层,从而出现 SST 日变化的情况。SST 日变化于 1942 年被发现^[1],随后,很多学者对其进行了深入研究^[2-4]。SST 日变化平均幅度不大,但这微小的变化却对海气热交换以及海洋生态等研究有着重要意义^[1,5]。通过卫星遥感获得的 SST 是海水表面的温度,因此太阳辐射、海面风速等对其有着较大的影响。

数值天气预报、气象模型以及中尺度海洋学的研究中,需要精度在 0.1—0.3K 的 SST^[6],这些研究通常需要用通过卫星遥感获得的日平均、周平均或者月平均包括白天和晚上的 SST 数据。如果没有正确考虑 SST 的昼夜循环,会导致在研究过程中出现错误^[7-8],同时也会造成卫星 SST 与实测 SST 数据进行印证时出现偏差^[9]。此外热带大气环流以及当地大气对流对 SST 的变化都非常敏感^[10-11],并且 SST 的变化对研究区域气候的改变有着重要的意义。

为了更好地研究 SST 日变化情况,Donlon 等^[12]提出基础海表温度(foundation sea surface temperature, SST_{fund})的概念,将其定义为没受到日变化及表皮效应影响的、通过对白天和晚上 SST 测量数据进行校正后得到的一个可应用于全球 SST 精确分析的理想 SST,基本上可以代表海洋混合层的 SST。为了获得 SST_{fund},必须估算由于白天太阳加热而造成的 SST 升温并将其从测量的 SST 数据中去除。

在天气状况较好时,随着一天中时间的推移,表层 SST 会出现周期性的变化规律,此时 SST 与 SST_{fund} 之间的差值本文记为 Δ SST;而通常在下午的 2—3 点 SST 日变化会到达峰值,而此时的差值则为一天中 Δ SST 的峰值。对于 SST_{fund},从时间的角度来看,在白天,晴空少云且风速较低的情况下, SST 日变化情况如图 1 所示。

本文第一部分介绍了所使用的数据及预处理方法,第二部分是关于 SST 日变化研究模型的内容,第三部分则为经验模型在西北太平洋海域(经纬度

范围为 10°—50°N, 105°—145°E,如图 2 所示)的应用,最后一部分对结果进行讨论。

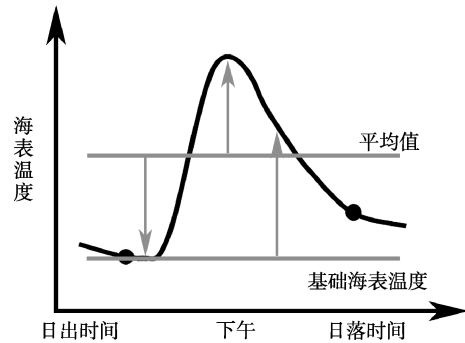


图 1 海表温度日变化示意图

Fig. 1 Diurnal variation in SST

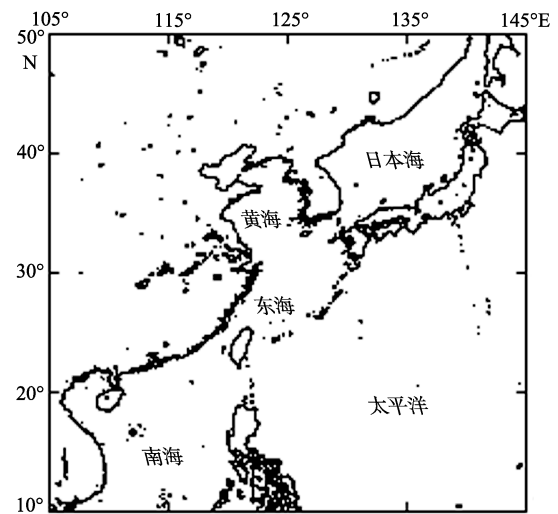


图 2 研究区域示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the study region

1 数据简介

SST 日变化幅度会随着纬度及季节的变化而变化,同时也受到云层厚度以及风速的影响,海面风速较大时几乎会使 SST 的纵向结构完全消失,而较强的太阳辐射会使得 SST 出现较大幅度的增长^[13]。可以说,太阳辐射强度以及风速是 SST 日变化幅度的主要影响因素,可以仅使用这两个因素对其进行近似估算^[14-16]。同时,在风速较高的情况下, SST 日变化幅度应该为 0,但在实际中,由于传感器、计算方法以及测量深度的不同,会有一定的偏差,对于红外卫星辐射计所测得的 SST 数据而言,在风速大于 $11.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,日变化情况消失;当风速低于该数值时,则会出现较为明显的 SST 日变化现象^[9,15]。本文将使用卫星 SST、卫星海面风速和通过计算得到的日平均太阳辐射强度数据进行研究。

1.1 海表温度及风速数据

文中所使用的 SST 数据为来源于美国宇航局喷气推进实验室物理海洋学数据分发存档中心(NASA JPL PODACC)的美国国家海洋和大气管理局改进型甚高分辨率辐射计探路者 5.0 版本 SST(NOAA AVHRR Pathfinder Version 5.0 SST, 以下简称 AVHRR SST)白天平均和晚上平均数据, 空间分辨率约为 4km (ftp://podaac.jpl.nasa.gov/documents/dataset_docs/avhrr_pathfinder_sst.html), 数据中带有数据质量标志, 其中 7 为数据最优, 0 为最差。海面风速则使用美国加利福尼亚圣罗莎市遥感系统公司提供的“水”(Aqua)卫星上先进微波扫描辐射计(Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS, AMSR-E)的海面风速数据, 空间分辨率为 0.25° , 同样分为白天和晚上数据。

1.2 数据的预处理

本文选取 2007—2009 年西北太平洋海域的 SST 和海面风速数据。由于 AMSR-E 风速数据与 AVHRR SST 数据空间分辨率不同, 因此处理时, 先对 AMSR-E 风速数据进行双线性插值运算, 从而获得与 Pathfinder 相同空间分辨率的风速数据。

对于 AVHRR SST, 选取相同时间地点的白天、晚上质量标志均为 7 的数据, 同时需要相对应的 AMSR-E 风速数据有效且数值在 $11.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以内。将 AVHRR SST 白天与晚上数据之差视为实际的 ΔSST , 记为 AVHRR ΔSST 。对 SST 日变化相关研究的结果指出, 在大多数情况下, ΔSST 不会超过 3°C [15], 因此本文只取 ΔSST 在 $0\sim 3^\circ\text{C}$ 之间的数据进行讨论。

1.3 太阳辐射强度的计算

太阳辐射强度由 Liou 相关公式 [17], 通过经纬度以及时间信息来进行计算。

地球是在以太阳为焦点的椭圆形轨道上运动, 日地距离的大小直接决定了到达地球的太阳辐射强度。当地球和太阳之间处于平均距离 a_0 时, 大气层上界的太阳辐照度(在单位时间内垂直投射到单位积上的太阳辐射能)约为 $1366\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, 称之为太阳常数 S_0 。假定 a 为一年中任意时刻的日地距离, 则地球轨道偏移率修正因子 r^2 定义为 $(a_0/a)^2$ 。 r^2 可以通过公式(1)进行估算, 其计算精度大约为 10^{-4} 。

$$r^2 = \sum_{n=0}^2 (a_n \cos nt + b_n \sin nt) \quad (1)$$

其中, $t = 2\pi d/365$, d 为 0(1月1日)到 364(12月31日, 平年)。地球赤道平面与太阳和地球中心的连线之间的夹角定义为太阳赤纬 δ , 可由公式(2)计算得出,

精度大约为 0.0006 弧度。

$$\delta = \sum_{n=0}^3 (c_n \cos nt + d_n \sin nt) \quad (2)$$

其中的系数 a_n 、 b_n 、 c_n 、 d_n 数值如表 1 所示。

表 1 地球轨道偏移率修正因子与太阳赤纬计算系数 [17]
Tab. 1 Coefficients for the calculation of the Sun-Earth distance and the declination angle [17]

n	a_n	b_n	c_n	d_n
0	1.000110	0	0.006918	0
1	0.034221	0.001280	-0.399912	0.070257
2	0.000719	0.000077	-0.006758	0.000907
3	—	—	-0.002697	0.000148

半天时间长度(从日出到中午或者是从中午到日落时间) H 则通过公式(3)算得:

$$\cos H = -\tan \varphi \tan \delta \quad (3)$$

而太阳辐射强度的计算则如公式(4)所示:

$$Q \equiv \frac{S}{\pi} r^2 (\sin \varphi \sin \delta H + \cos \varphi \cos \delta \sin H) \quad (4)$$

其中, S 为太阳常数, 本文中使用的为 $1366\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$; r 为地球轨道偏心率修正因子, 通过公式(1)计算得出; φ 为地理纬度; δ 为太阳赤纬, 通过公式(2)计算得出; H 为半天长度(从日出到中午或者是从中午到日落时间), 通过公式(3)计算得出。

2 海表温度日变化模型简介

现有的研究上层海面温度日变化的模型可以分为经验及数值模型 [18]。然而, 到目前为止, 仍没有一种模型可以完全精确地对 SST 日变化情况进行模拟 [19]。

2.1 经验模型

Price 等 [20] 提出了一个使用表面应力以及表面热通量计算 0.6m 深度处的 SST 日变化幅度的经验模型; Webster 等 [8] 曾提出一个基于 Kantha 混合层仿真模型 [21], 并包含降水量、风速以及太阳辐射的简单经验模型。该经验模型通过公式(5)对 ΔSST 进行计算:

$$\Delta\text{SST} = f + a \cdot \text{PS} + b \cdot P + c \cdot \ln U + d \cdot \text{PS} \cdot \ln U + e \cdot U \quad (5)$$

其中, PS 为太阳辐射强度峰值; P 为日平均降水量; U 为日平均风速; a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 为回归系数, 如表 2 所示。

但是由于存在较大范围内的降水数据不易获得等因素, Kawai 等 [14] 对 Webster 公式进行了改进, 如公式(6)所示:

$$\Delta \text{SST} = a \cdot \text{PS}^2 + b \cdot \ln U + c \cdot \text{PS}^2 \cdot \ln U + d \quad (6)$$

其中, PS 为太阳辐射强度峰值; U 为日平均风速, 且当 $U < 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 按 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 进行计算; a 、 b 、 c 、 d 为回归系数, 当模型算得 ΔSST 小于 0 时, 令其等于 0。Kawai 等^[14]在研究的过程中发现, 在一定太阳辐射强度下, ΔSST 在风速大于和小于 $2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右时有着较为明显的不同, 因此以风速 $2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 为界限, 分别得出 2 组回归系数, 如表 3 所示。

表 2 Webster 模型回归系数^[8]

Tab. 2 Regression coefficients for the Webster model^[8]

回归系数	$U > 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$U < 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
f	0.262000	0.328000
a	0.002650	0.002000
b	0.028000	0.041000
c	-0.838000	0.212000
d	-0.001050	-0.000185
e	0.158000	-0.329000

表 3 Kawai 模型回归系数^[14]

Tab. 3 Regression coefficients for the Kawai Model^[14]

回归系数	$U > 2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$U < 2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
a	3.2708×10^{-6}	5.6814×10^{-6}
b	-7.9982×10^{-2}	4.0052×10^{-1}
c	-1.3329×10^{-6}	-3.9637×10^{-6}
d	-7.3287×10^{-2}	-3.6700×10^{-1}

Alice 等^[22]使用全球范围内月平均的 AVHRR SST、风速以及太阳辐射强度数据, 通过 Kawai 模型来估算月平均 ΔSST 。

此外, 还有 Gentemann 等^[15]提出的分别基于 TMI(TRMM Microwave Imager)微波传感器 SST 数据(SST_{tmi})和 AVHRR 红外传感器 Pathfinder SST 数据(SST_{pf}), 估算实时 ΔSST 的经验模型, 如公式(7)所示, 并指出, 当太阳辐射较弱或者风速较高时, 其所使用的数据几乎没有 SST 日变化, 因此在模型将数值设为零。

$$\Delta \text{SST}_{\text{tmi}}(t, Q, u)$$

$$= f(t) \left[(Q - Q_0^t) - 9.632 \times 10^{-4} \cdot (Q - Q_0^t)^2 \right] \cdot e^{-0.53u} \quad (Q \geq Q_0^t) \quad (7a)$$

$$\Delta \text{SST}_{\text{pf}}(t, Q, u)$$

$$= 0.344 f(t) \left[(Q - Q_0^p) - 1.444 \times 10^{-4} \cdot (Q - Q_0^p)^2 \right] \cdot e^{-0.29u} \quad (Q \geq Q_0^p) \quad (7b)$$

$$f(t) = [6.814 - 6.837 \cos(\omega t) - 8.427 \sin(\omega t) + 1.447 \cos(2\omega t) + 4.274 \sin(2\omega t)$$

$$-0.407 \cos(3\omega t) - 0.851 \sin(3\omega t) + 0.457 \cos(4\omega t) - 0.555 \sin(4\omega t) - 0.101 \cos(5\omega t)] \times 0.001$$

$$\omega = 0.2668 \text{ h} \cdot \text{r}^{-1}; Q_0^t = 132 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}; Q_0^p = 24 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

其中, $\Delta \text{SST}_{\text{tmi}}$ 为 TMI 日变化温度差; $\Delta \text{SST}_{\text{pf}}$ 为 AVHRR 日变化温度差; u 为 10m 风速; Q 为日平均辐射强度, 通过公式(4)计算得出; Q_0^t 、 Q_0^p 分别针对为 TMI、AVHRR 传感器数据的模型最低太阳辐射强度; $f(t)$ 为依赖于时间的五阶傅里叶变换序列, t 为时间; ω 为常量(代表日变化, 24h)。

2.2 数值模型

在数值模型中, Price 等^[23]提出的使用表面通量、垂直剖面温度、盐度以及流速进行估算的 PWP 模型曾被广泛使用; 然而, PWP 模型所使用的参数并不能很容易获得^[24], 且其估算的 SST 日变化幅度与实测数据相比有着较大的出入^[21,25]。对此, Fairall 等^[3]提出了一个基于 PWP 的简化模型——F96 模型, 他们假设海洋表面通量以及动力通量均被限制在暖温层, 并且在该层的温度梯度是线性的。

F96 模型非常简单实用, 但是线性的温度剖面与实际并不相符^[26]。Zeng 等^[27]提出了基于另一种更接近实际温度垂直剖面分布假设的模型。暖温层的温度由公式(8)定义:

$$T(z) = \text{SST}_{\text{skin}} - \left(\frac{z - \delta}{D_T - \delta} \right)^\gamma [\text{SST}_{\text{skin}} - T(D_T)] \quad (8)$$

其中, SST_{skin} 为海表皮温; z 为深度; δ 为皮温层厚度; D_T 为暖温层厚度; γ 为经验参数, F96 模型中其数值为 1, 在 Zeng-Beljaars 模型中为 0.3。此外, Gentnmann 等^[24]也对 F96 模型中参数的计算进行了一些改进, 提出 POSH 模型。

2.3 经验及数值模型比较

经验模型是通过回归等方法, 在特定深度通过其他辅助测量数据——通常是海面风速和太阳辐射强度, 对 SST 日变化的情况进行估算^[24]。经验模型可以计算当日 SST 日变化的峰值或逐小时变化的情况; 数值模型则大都是从海洋上层 SST 剖面的角度出发, 主要通过对海洋上层垂直方向的热传导等物理规律进行研究后得出。数值模型除了能够估算某一特定位置 SST 日变化峰值和逐小时变化情况外, 还可应用于在整个垂直剖面的不同深度处, 对 SST 日变化情况的估算。

但是由于输入参数不易获得等因素, 数值模型往往很难在较大范围的海区内或较长时间段中应用; 而经验模型所需数据的获得相对来说较为容易, 弥

补了数值模型的不足, 在大范围海区以及较长时间段中可以广泛应用。

3 西北太平洋海域 Kawai 模型的应用

3.1 Kawai 模型应用结果

将通过筛选后的 2009 年风速及与其在时间和空间上匹配的太阳辐射强度数据代入到公式(6), 即 Kawai 模型中, 得出计算的 ΔSST , 并与 AVHRR ΔSST 进行比较。

表 4 为 AVHRR ΔSST 与模型计算所得 ΔSST 统计情况, 图 3 是两者数据分布的直方图。从结果中可以看出, 模型得出的 ΔSST 最大值仅为 1.25 , 与 AVHRR ΔSST 存在着较大差距, 且模型的结果整体偏低。究其原因, Kawai 模型本身是用于对 SST 日变化峰值进行估算, 而本文则用来估算 AVHRR SST 日变化的情况, 并且所使用的 SST 数据、太阳辐射强度数据以及研究海域与 Kawai 研究过程中的相应数据有所不同, 因而造成本研究中出现的模型和实际情况存在较大偏差。所以需要针对本文中使用的 AVHRR SST 数据在西北太平洋海域对模型的各回归系数进行重新拟合。

表 4 2009 年 AVHRR 与模型 ΔSST 比较统计情况(单位: $^{\circ}C$)
Tab. 4 Statistics of the model and AVHRR ΔSST (units: $^{\circ}C$)

	最小值	最大值	平均值	标准偏差
AVHRR ΔSST	0	3.00	0.47	0.39
模型 ΔSST	0	1.25	0.07	0.17
AVHRR ΔSST 与 模型 ΔSST 之差	-0.70	2.80	0.40	0.27

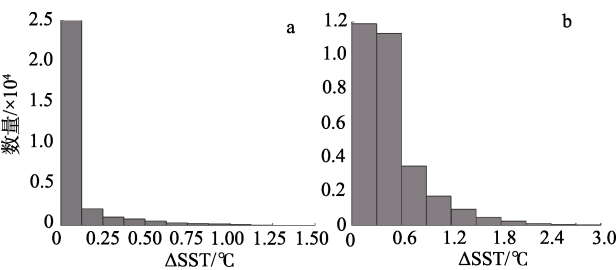


图 3 2009 年 Kawai 模型(a)及 AVHRR ΔSST (b)直方图分布
Fig. 3 Histogram of AVHRR and model ΔSST of year 2009

3.2 Kawai 模型系数的重新拟合及结果验证

利用 2008 年全年经过筛选后的数据, 使用最小二乘法对 Kawai 公式的系数进行重新拟合, 得出系

数如表 5 所示。

使用 2007 和 2009 年的数据对结果进行验证, 如图 4 所示(每隔 100 个数据点画出一个)。从图中可以看出, 大部分情况下, AVHRR ΔSST 与模型 ΔSST 结果较为吻合, 即在低风速以及较高太阳辐射的情况下 ΔSST 较大, 当风速较大或者是太阳辐射强度较低时 ΔSST 几乎消失。但同时也存在着两个问题: 首先, 当 AVHRR ΔSST 较大时, 模型结果偏小; 其次, 在风速与太阳辐射强度都较低和高风速低辐射的情况下, 出现了个别模型与 AVHRR ΔSST 数值相差较大的情况。

表 5 Kawai 模型经重新拟合后的回归系数
Tab. 5 New regression coefficients for the Kawai Model

回归系数	$U > 2.5 m \cdot s^{-1}$	$U \leq 2.5 m \cdot s^{-1}$
a	4.8387×10^{-6}	8.3631×10^{-6}
b	5.5253×10^{-2}	4.9266×10^{-1}
c	-1.4235×10^{-6}	-3.1413×10^{-6}
d	1.8012×10^{-2}	-5.2236×10^{-3}

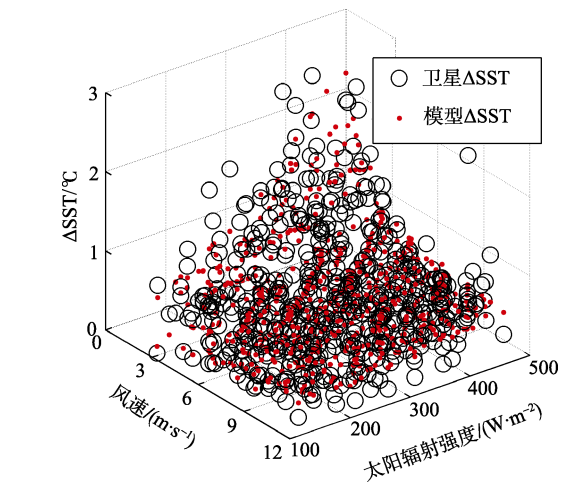


图 4 AVHRR 与新回归系数模型 ΔSST
Fig. 4 ΔSST of AVHRR and the new model

利用 AVHRR 与模型 ΔSST 三维直方图, 对结果进行进一步的分析验证, 如图 5 所示。该图同样可以说明, 在大部分情况下, 模型所算得的结果与 AVHRR 数据情况相符, 出现较大偏差的点只是其中的较小的一部分, 具体原因将在 3.3 中进行具体的分析讨论。

AVHRR ΔSST 与模型计算所得 ΔSST 以及两者之差的统计情况如表 6 所示。可以看到, 模型所得的结果比 AVHRR 结果的最大值偏小, 而两者之差的最大最小值看上去都不理想; 但是通过图 4 能够得出, 这是由于个别点的差异造成, 两者之

差的平均值和标准偏差均在一个较为理想的范围之内。

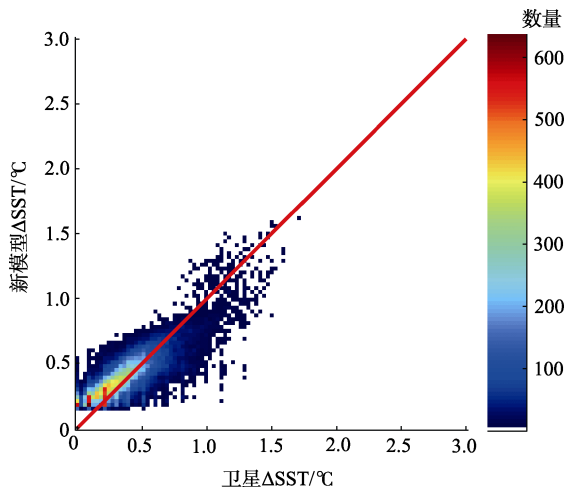


图5 AVHRR与新回归系数模型 Δ SST三维直方图

Fig. 5 Three-D histogram of AVHRR and new model Δ SST

表6 2007、2009年新回归系数AVHRR与模型 Δ SST统计情况(单位: $^{\circ}\text{C}$)

Tab. 6 Statistics of AVHRR and new model Δ SST of years 2007 and 2009 (units: $^{\circ}\text{C}$)

	最小值	最大值	平均值	标准偏差
AVHRR Δ SST	0	3.00	0.47	0.39
新回归系数模型 Δ SST	0	2.44	0.48	0.32
AVHRR Δ SST 与 模型 Δ SST 之差	-1.80	2.22	-0.01	0.22

3.3 模型的误差分析

3.2 中已经指出该模型主要存在两个问题: AVHRR Δ SST 较大时模型所得结果偏小; 在个别点处, 模型与实际情况相差较大。前者主要由以下原因所造成: 所使用 Kawai 模型的回归系数是由 2008 年 AVHRR Δ SST 通过回归计算得出, 由图 6 可以看到, AVHRR 数据中 Δ SST 较大的数量不多, 从而造成基于此数据拟合出的模型会出现在 AVHRR Δ SST 较大时模型数值偏小的情况。而后者, 则是和所使用的数据有关。本文在前面的讨论中已经指出, 当太阳辐射较弱或者风速较大时, SST 日变化的情况将会消失。对于 AVHRR 数据, 该阈值分别是 $24\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $11.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ [15]。但是从图 4 中可以看到, 即使是在风速较大的情况下, AVHRR Δ SST 还是有较

大数值出现, 因此, 虽然在研究之前对数据进行了较为严格的筛选, 但仍无法保证去除数据中所有质量较差的点, 从而造成在 AVHRR 与模型 Δ SST 进行对比时出现较大差值的情况。

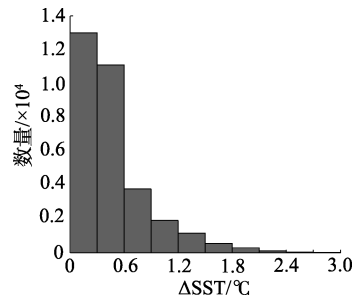


图6 2008年AVHRR Δ SST直方图分布

Fig. 6 Histogram of AVHRR Δ SST of year 2008

4 结语

通过卫星遥感所获得的 SST 数据受太阳辐射、海面风速等影响出现日变化现象, 在实际应用过程中, 若没有正确考虑日变化对 SST 造成的影响, 会使得数值模拟等结果出现错误。对卫星 SST 进行日变化校正必不可少。

本文利用 2008 年 AVHRR SST 数据对 Kawai 模型的系数进行重新拟合运算, 并通过 2007 和 2009 年数据进行验证, 得出一个基于 AVHRR SST 数据、适用于西北太平洋海域的 SST 日变化校正的经验模型。由于数据本身的限制, 使得模型所算得的数值在一些情况下较实际情况偏低。虽然如此, 该模型仍然可以用来对该区域的 SST 日变化情况进行估算和预测, 同时对卫星 SST 中日变化的情况进行初步校正。另外, 本文所使用的太阳辐射强度数据是通过计算得出, 为理论值, 而在实际中, 真正到达海面上的太阳辐射会受到云、气溶胶以及各种天气状况的影响, 因此会有一定的偏差。为了得到更为精确的 SST 日变化模型, 可以在以下几个方面进行改进: 第一, 积累较多的实测数据, 通过实测数据来对 SST 日变化情况进行研究, 使得模型的结果与实际变化情况更为接近; 第二, 利用实际测量的太阳辐射强度数据代替公式计算的结果; 第三, 探索使用更好的回归算法来确定模型系数。

参考文献

- [1] SVERDRUP H U, JOHNSON M W, FLEMING R H. The oceans: Their physics, chemistry and general biology [M]. New York: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1942: 60-64.
- [2] SCHLUESSEL 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]. Geophys Res,

- 1990, 95: 13341–13356.
- [3] FAIRALL C W, BRADLEY E F, GODFREY J S, et al. Cool-skin and warm-layer effects on sea surface temperature [J]. *Geophys Res*, 1996, 101:1295–1308.
- [4] DONLON C J, MINNETT P J, GENTEMANN C, et al. Toward improved validation of satellite sea surface skin temperature measurements for climate research [J]. *Climate*, 2002, 15: 353–369.
- [5] WANG SUFEN, TANG DANLING. Remote Sensing of Day/Night Sea Surface Temperature Difference Related to Phytoplankton Blooms [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010,31(17-18): 4569-4578
- [6] Implementation Advisory Group. Global physical ocean observations for GOOS/GCOS: An action plan for existing bodies and mechanisms [M]. Paris: GOOS Rep 66, Intergov Oceanogr Comm, 1999: 6.
- [7] WOODS J D, BARKMANN W, HORCH A. Solar heating of the oceans-diurnal, seasonal, and meridional variations [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1984, 110, 633-686.
- [8] WEBSTER P J, CLAYSON C A, CURRY J A. Clouds, radiation, and the diurnal cycle of sea surface temperature in the tropical western Pacific [J]. *Climate*, 1996, 9:1712–1730.
- [9] QIU CHUNHUA, WANG DONGXIAO, KAWAMURA H, et al. Validation of AVHRR and TMI-derived sea surface temperature in the northern South China Sea [J]. *Continental Shelf Research*, 2009, 29: 2358–2366
- [10] PALMER T N, MANSFIELD D A. Response of two atmospheric general circulation models to sea-surface temperature anomalies in the tropical East and West Pacific [J]. *Nature*, 1984, 310(5977): 483-485.
- [11] SHUKLA J. Predictability in the midst of chaos: A scientific basis for climate forecasting [J]. *Science*, 1998, 282(5389): 728-731.
- [12] DONLON C J, MINNETT P J, BARTON I J, et al. The character of skin and subsurface sea surface temperature [R]. Switzerland: World Meteorol Organ, Geneva, 2001: 298-302.
- [13] STOMMEL H, SAUNDERS K, SIMMONS W et al. Observations of the diurnal thermocline [J]. *Deep-Sea Res*, 1969, 16: 269–284.
- [14] KAWAI Y, KAWAMURA H. Evaluation of the diurnal warming of sea surface temperature using satellite-derived marine meteorological data [J]. *Oceanogr*, 2002, 58: 805–814.
- [15] GENTEMANN C L, DONLON C J, STUART-MENTETH A, et al. Diurnal signals in satellite sea surface temperature measurements[J]. *Geophys Res*, 2003, 30(3): 1140.
- [16] CLAYSON C A, WEITLICH D. Diurnal warming in the tropical Pacific and its interannual variability [J]. *Geophys Res*, 2005, 32: L21604.
- [17] LIOU, KUO-NAN. An introduction to Atmospheric Radiation[M]. New York: Academic Press Inc, 2002: 45-51.
- [18] KAWAI Y, WADA A. Diurnal Sea Surface Temperature Variation and Its Impact on the Atmosphere and Ocean: A Review [J]. *Oceanogr*, 2007, 63: 721-744.
- [19] SOLOVIEV A, LUKAS R. The near-surface layer of the ocean: Structure, dynamics and application [M]. Dordrecht: Atmospheric and Oceanographic Sciences Library, 2006: 496-502.
- [20] PRICE J F, WELLER R A, BOWERS C M et al. Diurnal response of sea surface temperature observed at the long-term upper ocean study (34°N, 70°W) in the Sargasso Sea [J]. *Geophys Res*, 1987, 92: 14480–14490.
- [21] KANTHA L H, CLAYSON C A. An improved mixed layer model for geophysical applications [J]. *Geophys Res*, 1994, 99: 25235–25266.
- [22] ALICE C, STUART-MENTETH, ROBINSON I S. A global study of diurnal warming using satellite-derived sea surface temperature [J]. *Geophys Res Let*, 2003, 108: 3155.
- [23] PRICE J F, WELLER R A, PINKEL R. Diurnal cycling: observations and models of the upper ocean response to diurnal heating, cooling and wind mixing [J]. *Geophys Res* 1986, 91: 8411-8427.
- [24] GENTEMANN C L, MINNETT P J, WARD B. Profiles of Ocean Heating (POSH): a new model of upper ocean diurnal thermal variability [J]. *Geophys Res*, 2009, 114: C07017.
- [25] LARGE W G, WILLIAMS M, DONEY S C. Ocean vertical mixing: A review and a model with a nonlocal boundary layer parameterization [J]. *Rev geophysics*, 1994, 32: 363-403.
- [26] WARD B, WANNINKHOF R, MCGILLIS W R, et al. Biases in the air-sea flux of CO₂ resulting from ocean surface temperature gradients [J]. *Geophys Res*, 2004, 109: C08S08.
- [27] ZENG X, BELJAARS A. A prognostic scheme of sea surface skin temperature for modeling and data assimilation [J]. *Geophys Res*, 2005, 32: L14605.