

基于多源参数合并的海洋数据分辨率优化分析

虞丽娟, 李世超, 陈成明, 曹守启

(上海海洋大学工程学院, 上海, 201306)

摘要: 精准的高分辨率海洋环境数据, 尤其是在低密度海面测量装置的海域中, 对于渔业资源的规划和管理至关重要。为此以 2009 年 1 月至 2010 年 12 月收集的南海海域海表温度 (Sea surface temperature, SST) 数据为样本, 采用逐次校正法 (Successive correction method, SCM) 对卫星遥感和海洋浮标所测得的海洋环境数据进行合并, 以提高大尺度下的海洋环境数据分辨率, 合并结果与最优插值 (Optimal interpolation, OI) 方法进行了比较。结果表明, SCM 和 OI 方法的地图检测结果虽有相似的空间分布, 但由空间统计分析可知, SCM 方法的平均误差和平均绝对误差更接近; 留一法交叉验证表明, SCM 的均方根误差更小。因此, 相比传统的 OI 方法, SCM 通用性更强, 可以增加校正的迭代平滑性, 具备实时提供高分辨率精准的海洋环境数据的能力。

关键词: 海表温度数据插值; 数据合并; 偏差校正; 遥感技术

中图分类号: TP273; X820 **文献标志码:** A

Analysis of Ocean Data Merge Based on Multi-source Parameters

YU Lijuan, LI Shichao, CHEN Chengming, CAO Shouqi

(College of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai, 201306, China)

Abstract: It is essential for the planning and management of fishery resources that accurate and high-resolution marine environmental data in the sea area of low-density sea surface measurement devices. Hence, the sea environmental data measured by satellite remote sensing and marine buoys are merged to improve the resolution of sea environmental data at a large scale by the successive correction method (SCM). The South China Sea surface temperature (SST) data collected from January 2009 to December 2010 are taken as a sample. The SCM algorithm is more versatile with fast calculation speed. The iterative smoothness of the correction can be improved, compared with the traditional optimal interpolation (OI) method.

Key words: sea surface temperature data interpolation; data merge; bias correction; remote sensing

引 言

渔情建模系统^[1]已广泛应用于预测和分析经济鱼类的时间和空间位置, 以便对海洋资源进行更好地开发与管理。可靠的渔情预报主要由建模过程中使用准确的海洋环境数据来确定。海表温度是通过海洋环境因子进行渔情预报系统模拟的最重要数据之一^[2]。目前, 比较传统的海洋环境因子评估方

法普遍采用海洋浮标直接测量海洋环境数据,收集到相对准确的海洋环境因子资料,进而通过遥感技术^[3](例如卫星或气象遥感)测量大尺度的海洋环境数据。南海及远海海域海洋浮标网络的稀疏空间分布使捕获具有时空变异性的海洋环境数据变得困难。此外,气候变化、仪表型号的不同和人为错误使海洋浮标测量数据的准确度极难量化。而目前,仅凭卫星遥感获得的海洋环境数据分辨率不够高,可用性较差^[4]。

海表温度与捕获鱼群大小和空间位置具有相关性,但海表温度数据在渔情模拟系统中的直接使用受到与其相关的误差限制,可能导致水产资源规划和管理的不合理。为克服这种限制,本文提出一种新方法,即使用逐次校正法(Successive correction method, SCM)将从中国国家海洋科学数据中心(National marine scientific data center, NMSDC)所获得的高分辨率卫星数据与海洋浮标数据相结合^[5-8]。所提出的方法综合考虑了南海区域所特有的海洋环境数据、海洋浮标布设密度、海洋环境因子的时空分辨率、鱼群空间偏差等特点^[9],讨论如何以现有的海洋环境数据库提炼出更精确的高分辨率海洋环境数据,因而具有切实的产业发展意义与应用价值。

1 二维数据合成算法

过去60年来,不同来源数据集的合并算法得以持续发展和改进,主要缘于包括海洋科学在内的许多领域的长足进步,特别是水文学和数字渔情预报。这些领域的技术发展均基于遥感海洋环境数据可靠的基本假设,如卫星遥感数据(通常称背景场)。目前比较传统的数据合成方法为最优插值(Optimal interpolation, OI)方法及其改进方法(卡尔曼滤波、三维变分同化或空间分析)^[10-12]。上述方法在实时性与适用性上受到自身样本的制约,为此本文采用最小方差估计意义上评估线性分析,SCM方法。

SCM是一种迭代经验方法,被广泛应用于全球范围的气象空间分析和很多工程领域^[13]。在经典SCM中,分析网格点(x_i^o)的第1个估计值由在第*i*个网格点处评估的背景(x_i^b)给出。在第1次估计之后,通过SCM获得迭代式

$$x_i^{n+1} = x_i^n + \frac{\sum_{k=1}^{k_i^n} \omega_{ik}^n (x_k^o - x_k^n)}{\sum_{k=1}^{k_i^n} \omega_{ik}^n + \epsilon^2} \quad (1)$$

式中, x_i^n 为网格点*i*处的第*n*次迭代估值, x_k^o 为围绕网格点*i*的第*k*次观测, x_k^n 为观测位置*k*处的第*n*次场估计值, ω_{ik}^n 为围绕网格点*i*的观察点*k*的第*n*次背景估计的权重值,而 ϵ^2 为误差方差的观测和场误差方差之间的比($\epsilon^2 = \epsilon_o^2 / \epsilon_b^2$)。权重定义为

$$\omega_{ik}^n = \begin{cases} \frac{R_n^2 - r_{ik}^2}{R_n^2 + r_{ik}^2} & r_{ik}^2 \leq R_n^2 \\ 0 & r_{ik}^2 > R_n^2 \end{cases} \quad (2)$$

式中, R_n 为影响半径, r_{ik}^2 为网格点*i*和观测值*k*之间的平方距离。权重定义为

$$\omega_{ik}^n = \exp\left(-\frac{r_{ik}^2}{\gamma R_n^2}\right) \quad (3)$$

式中, γ 为常数因子。2种方法均取决于分析网格点*i*与影响半径 R_n 内的观测值之间的权重。 R_n 在第1次迭代时固定不变,随着影响区域在每次迭代时的改变, γ 在0和1之间变化。在第1次迭代中,半径通常设置为较大的值($\gamma = 1$)以捕获背景场的大尺度相关性。然后,缩小分析较小的尺度($\gamma < 1$)。半径值的选择取决于许多因素,例如观测的数量和空间分布(少数点可能导致变异性的子网格点不具代表性的样本)和观测数据的相关距离。而且,误差方差 ϵ^2 的比率起着重要作用。如果 $\epsilon^2 = 0$ 在半径较小的

情况下,分析场在 i 网格点处反映了小半径内的 k 个观测值。如果观察结果有噪声或仅仅表示较小的尺度变异性,则可以在分析域中观察到“牛眼”现象。为了避免这个问题,假设观测值的误差 $\epsilon^2 > 0$, 因此给予背景场一些权重^[14]。

2 研究区域和数据来源

2.1 研究区域

研究区域是中国南海某海域,位于 $10^\circ\text{S}\sim 20^\circ\text{S}$ 和 $110^\circ\text{W}\sim 120^\circ\text{W}$ 之间(见图1)。总面积为 $1\,185\,593\text{ km}^2$ 。该海域约占我国南海总面积 $2\,100\,000\text{ km}^2$ 的 56% 。中国南海有丰富的海洋油气矿产资源、滨海和海岛旅游资源、海洋能资源、港口航运资源、热带亚热带生物资源,是中国最重要的海岛和珊瑚礁、红树林、海草床等热带生态系统分布区^[15-16]。

2.2 数据来源

本文使用的海洋浮标测量数据主要由 NMSDC 收集、处理和维护。研究区域的浮标分布如图1所示。

本研究共使用了16个海洋浮标。浮标数据及遥感数据估计值从 NMSDC 数据库中获得,2个数据集的时间跨度均为2009年1月至2018年12月。

3 数据处理方法与实验验证

3.1 数据预处理

从16个海洋浮标获取的数据中,只有很少质量不太好的测量数据,因此在得到月平均值前,已做了一些调整:(1)从日常记录中删除了极端值($>42^\circ\text{C}$, $<10^\circ\text{C}$),这些可能是人为因素或仪器故障造成的;(2)全分辨率下用最邻近插值替换温度图中的缺失值或错误值;(3)通过采样增加数据分辨率,将海洋浮标测量结果与遥感数据库进行比较,使用双线性内插法^[17]检测极端差异($>42^\circ\text{C}$)。逐个比较这些差异,评估2个数据集中差异位置周围的空间分布。

由于水平空间的有限分辨率、数值算法的简化、对海洋系统不完全了解以及仪器的偏差,对温度的估算容易产生误差。在合并这2个数据集之前,必须消除2类数据的系统偏差。

随着遥感卫星测量的出现,在过去的十年中发展了许多不同的偏差校正算法。这些方法中的大多数可分为4种^[18]。

(1)平均偏差校正:包括在一定时间段内估计所有海洋浮标的平均偏差,使用该值校正遥感数据。这种方法可用于偏置场均匀的情况。否则将该区域划分为具有均匀偏差的较小区域^[19]。

(2)回归方程:包括估算回归方程系数,使用每个浮标的历史时间序列和平均系数来校正遥感数据。通常在文献中得到的回归方程是 $y = ax + b$, $y = ax^2 + bx$, 或者 $y = ax^b$ 。当海洋浮标测量值与遥感估计值之间有良好的空间相关性时则可以使用该方法^[20]。

(3)分布变换:最简单的方法是使用从2个统计分布估计的参数(平均值 μ 和标准偏差 σ),第1个是从海洋浮标中得出的,第2个来自遥感估计值(在海洋浮标的位置)^[21]。使用式(4)将第二分布转换为第一分布

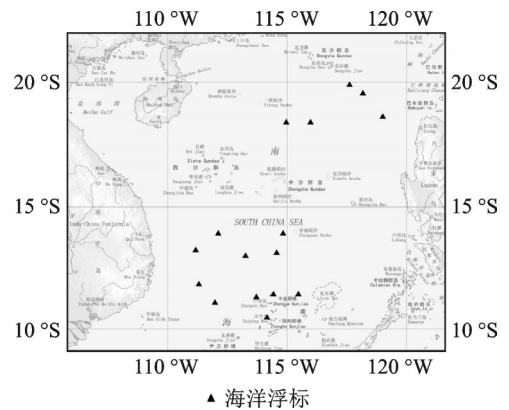


图1 中国南海某海域的海洋浮标位置分布
Fig.1 Location distribution of ocean buoys in an area of the south China sea

$$R_c = (R_0 - \mu_R) \cdot \frac{\sigma_B}{\sigma_R} + \mu_R \cdot \frac{\sigma_B}{\sigma_R} \quad (4)$$

式中, R_c 为从偏差校正的遥感估计, R_0 为未校正的遥感估计值, B 和 R 分别为海洋浮标和遥感数据。

(4) 空间变换: 这种方法包括使用海洋浮标和遥感估计之间确定的偏差, 在每个浮标的位置, 生成平滑的 2D 偏差曲线, 通常使用样条插值算法。最后, 在遥感估计中加入差值^[22]。

为评估上述 4 种方法的性能, 将伽玛分布拟合至海洋数据、未校正的遥感数据(仅用于可视化)和校正的遥感数据中, 使用的是最大似然估计的伽玛分布参数($\hat{\alpha}$ 为形状参数, $\hat{\beta}$ 为尺度参数)。伽玛分布广泛用于表示不同时间分辨率的海表温度, 因为它非负、正偏态的, 具有形状灵活性。此外, 只需由 2 个参数即可定义。海洋浮标与遥感海表温度的伽玛拟合优度评估如下

$$\delta = [(\hat{\mu}_G - \hat{\mu}_R)^2 + (\hat{\sigma}_G - \hat{\sigma}_R)^2]^{1/2} \quad (5)$$

$$\hat{\mu}_{G,R} = \hat{\alpha}_{G,R} \cdot \hat{\beta}_{G,R} \quad (6)$$

$$\hat{\sigma}_{G,R} = (\hat{\alpha}_{G,R} \cdot \hat{\beta}_{G,R}^2)^{1/2} \quad (7)$$

式中, $\hat{\mu}$ 和 $\hat{\sigma}$ 为平均值和标准偏差, 分别由伽玛分布的 2 个参数($\hat{\alpha}$, $\hat{\beta}$) 估算, 下标“G”和“R”分别代表浮标数据和遥感数据。非参数的 Kolmogorov-Smirnov (K-S)^[23] 检验用于验证 2 个样本是否都来自显著性水平 10% 的相同分布。图 2 显示了 2009 年 3 月上述每个修正的结果示例。其中, 在回归方程组中选择幂函数 $y = ax^b$; 通过最小二乘法估计系数 a 和 b ; 在分布变换组中使用式(4); 在空间变换组中采用 T 样条回归算法^[24]。

表 1 总结了在整个时间跨度内夏季和冬季的每种实施方法的参数 δ 和 p 。较小的 δ 值代表 2 个伽马

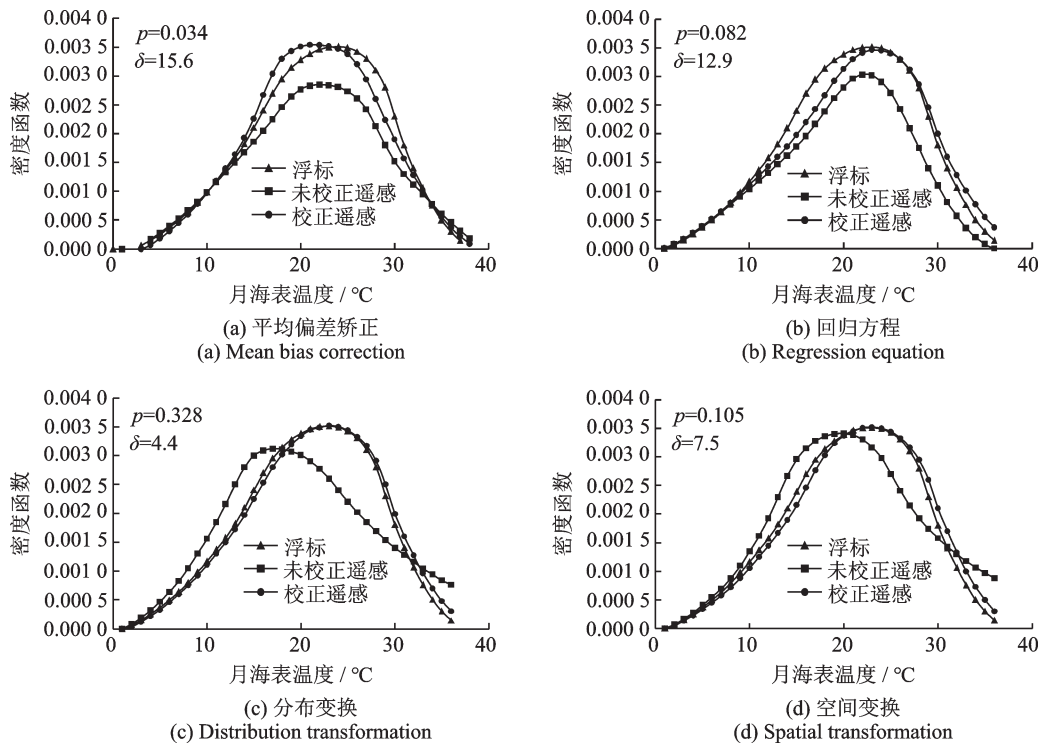


图 2 海洋浮标值的伽马概率密度函数、未校正的遥感数据和校正的遥感数据估计值(2009 年 3 月)

Fig.2 Gamma probability density function of ocean buoy values, uncorrected remote sensing data and corrected remote sensing data estimates (March 2009)

分布之间的拟合更好,且大于0.1的 p 值表示从相同分布中抽取样本的假设无效。分布变换和空间变换效果最佳,其次分别是平均偏差校正和回归方程。在最后2个中, p 值表示在夏季中拒绝零假设,而非在冬季。夏季的最佳 δ 值是通过分布变换方法获得的,而在冬季通过空间变换方法获得。

如表1所示,当在具有均匀偏差值的区域中进行回归和空间变换校正算法时可能改善平均偏差的结果。关于回归校正技术,可使用其他类型的

回归方程,但是否成功很大程度上与数据集所选的时间尺度相关。因此,考虑到冬季结果的相似性(δ 参数)和分布变换方法得到的结果对夏季 δ 值的变异性,本文将采用分布变换方法。

3.2 数据处理

使用所提出的SCM方法评估以获得最终的海表温度估算值。为了计算空间相关距离(式(3)中的参数 R),海洋浮标数据的拟合由式(3)给出的模型来估计空间相关图。通过半变异函数分析已证实,海洋浮标测量的各向异性程度可忽略不计,因此可应用式(3)中的各向同性函数。图3显示了2个平均相关图,一个用于夏季,另一个用于冬季。该相关图仅是基于半变异函数并排除了块金效应的近似值,使用夏季6个月和冬季6个月(随机选择)的数据来计算平均值,再利用指数变异函数模型来描述观测值之间的空间相关性。对应于空间相关性0.5的距离,夏季约为100 km,冬季约为66 km。由于距离差的差异很小,最大值100 km将采用2个季节($R=0.5^\circ$)的相关距离。背景场是从NMSDC得到的遥感海表温度,水平分辨率为 $21\text{ km} \times 21\text{ km}$ 。

在SCM中仅使用1个相关距离和1次迭代,其中 $R=0.5^\circ, \gamma=1$ 。仅选择1个相关距离是由于:(1)在质量控制程序中减少了观测值和背景场的主要误差;(2)假设观测结果包含一个具有代表性的亚格尺度变异性样本(由于测量记录的丢失);(3)在海表温度空间分布特殊的情况下,最终场应只反映较小尺度的背景场;(4)背景场(遥感海表温度)应该是在海洋浮标数据之上的最佳解决方案。否则,使用统计参数(如 R^2 、ME和其他参数)和目视检查,最佳结果在一次迭代后获得。

3.3 数据验证

最后通过留一法交叉验证算法^[25]来评估估算的准确性。本文使用了120组记录(在研究时间跨度内至少98%的海洋浮标有完整的数据记录),连续每个月留下一个,每个算法有1 920个估值(总共3 840个估值)。为评估不同海表温度估值的表现,使用平均误差ME,平均绝对误差MAE,均方根误差RMSE和确定系数 R^2 ,根据式(8—11)计算

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i) \quad (8)$$

表1 时间跨度内夏季和冬季各种方法的参数 δ 和 p
Table 1 δ and p values for the four methods in full summer and winter periods

参数	平均偏差校正	回归方程	分布变换	空间变换
δ_{sum}	26.22	36.10	6.76	10.54
p 值	0.08	0.06	0.25	0.89
δ_{win}	9.20	11.52	6.21	4.17
p 值	0.12	0.32	0.13	0.33

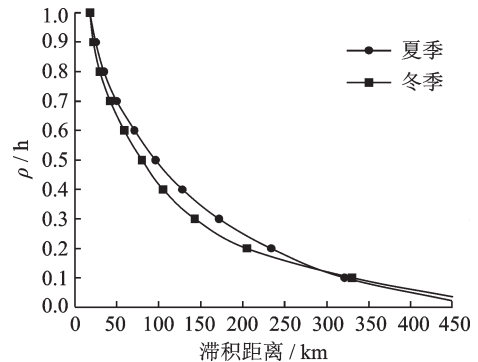


图3 使用海洋浮标数据估算的相关图

Fig.3 Correlation for estimation using ocean buoy data

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{Y}_i - Y_i| \tag{9}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2} \tag{10}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2}{\left[\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y}_i)^2 + \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2 \right]} \tag{11}$$

式中, n 为每个月的观测数量, \hat{Y}_i 和 Y_i 分别为测量 i 位置的海表温度估值和观测值, \bar{Y}_i 为估值的平均值^[26]。

4 性能比较

为分析SCM方法的数据合成效果,将其应用于中国南海海表温度的数据合成,所得结果与OI方法进行比较。本文计算 120 个月(2009—2018)的平均值,以便对由这 2 种算法所获得的空间分布进行统计比较^[27-29]。图 4(a)显示了用于计算月平均值的海洋浮标位置。注意,海洋浮标数据仅在每个月的可用数据超过 27 d 时方为有效记录。图 4(b)显示了消除偏移后的遥感海表温度估算所生成的背景场云图;图 4(c—d)显示了 SCM 方法和 OI 方法的对比结果,其中所有云图均取 2009—2018 年跨度内的月平均值。

由 2 种方法对地图检测的结果可知,SCM 方法和 OI 方法的结果具有相似的空间分布,但也能观察到个别海洋浮标的测量值对背景场的校正不明显,比较图 4(a)和图 4(b)可知,校正不明显的多数位于中国南海的中央和西北侧,且可在地图中观察到“牛眼”效应,见图 4(c),4(d)。“牛眼”效应在南海中心更为明显,其中某些海洋浮标与背景场的海表温度数据存在差异,但在每日和每月验证程序中这些差异并不是错误的^[30]。与 OI 算法相比,SCM 方法具有更平滑且细节更丰富的海表温度云图(图 4(d))。表面上,2 种方法似乎都合并了海洋浮标数据和遥感数据,显示了相似的结果(图 4(a))。因此,如果不通过空间统计分析而仅凭目测检查很难看出哪种方法的结果更优。

表 2 总结了统计分析的结果。所有值都是在 2009 年至 2018 年的某个月中计算出来的。表 2

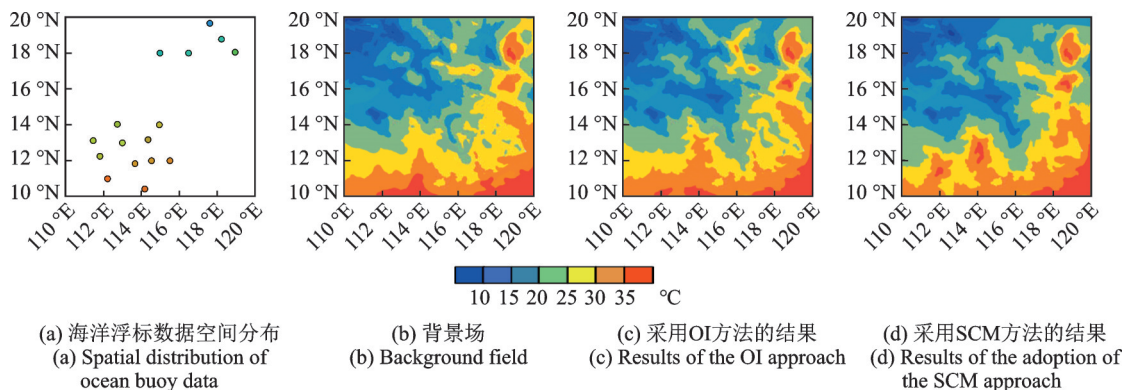


图 4 对海表温度图像的目视检查用数据分布图和云图

Fig.4 Visual inspection of SST cloud maps and cloud maps refer to the monthly mean values over the span of 2009-2018

表2 总时间跨度的月度统计(2009—2018)

Table 2 Monthly statistics of total time span (2009—2018)

时间	OI/(°C/月)				SCM/(°C/月)			
	ME	MAE	RMSE	R^2	ME	MAE	RMSE	R^2
Jan.	2.0	3.0	46.3	0.87	1.2	2.5	50.1	0.76
Feb.	2.5	3.1	45.5	0.86	2.8	2.4	48.4	0.88
Mar.	1.8	1.9	50.1	0.77	0.9	3.1	45.0	0.89
Apr.	1.0	1.6	45.6	0.90	0.4	1.6	56.1	0.75
May	0.1	1.6	24.6	0.85	-0.6	2.0	52.3	0.79
Jun.	0.3	0.7	50.6	0.86	-0.3	1.6	42.3	0.94
Jul.	0.6	1.5	45.8	0.79	0.6	1.4	38.4	0.93
Aug.	1.3	1.3	36.1	0.96	0.4	1.6	36.5	0.91
Sep.	0.4	1.2	24.5	0.91	1.2	1.2	31.3	0.86
Oct.	1.3	1.7	39.4	0.75	0.9	0.7	29.6	0.84
Nov.	1.8	1.5	33.8	0.84	1.2	2.6	44.3	0.89
Dec.	0.9	1.9	41.6	0.86	1.3	1.4	45.2	0.90
夏	1.9	1.5	45.6	0.88	0.4	2.1	48.6	0.84
冬	0.3	1.3	36.9	0.78	0.5	0.9	36.4	0.83
总计	1.1	1.5	39.4	0.84	0.4	1.2	39.5	0.87

的最后3行显示了夏季、冬季和整个数据集的统计数据。ME、MAE和RMSE平均值的大小在冬季(浅灰色系)和夏季增加时略有减少。正如预期的那样, R^2 的值在夏季会降低,但在冬季会有所增加。OI方法显示了遥感海表温度和 R^2 的中间值,但使用SCM方法得到的ME和MAE值更接近。

这里考虑的统计参数有:平均误差(ME)、平均绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)和判定系数(R^2)。最后3行分别是夏季、冬季和2个季节的平均值。

为评估2种方法之间的性能差异,在本研究应用了留一法交叉验证技术。对所选择的16个海洋浮标数据集,留下一组其余每种方法应用120次;在计算下一个海洋浮标之前,在对应海洋浮标位置的遥感数据网格中添加所有的120个值。该方法一共应用了3840次(16个海洋浮标,120个月,2个算法)。图5(a)显示了海洋浮标数据与OI结果交叉验证之间的散点图;图5(b)显示了海洋浮标数据与使用SCM方法结果交叉验证之间的散点图。最终2种方法的结果非常相似,与SCM方法相比OI方法呈现了更优值 $R^2=0.77$,但采用SCM方法产生了更好的RMSE值。

虽然OI方法的个体差异较小,且方差与SCM方法几乎相同,但SCM方法在夏季产生的ME值和MAE值较低,表明它对数据不足比较敏感(观察值较少会导致局部效应的高变异性)。虽然OI方法具有分析增量的空间分布由背景误差协方差矩阵定义的优点,但SCM方法的权重通常是各向同性且任意的,仅取决于与观测点的距离,因而SCM方法更适用于海面测量装置稀疏的偏远海域。

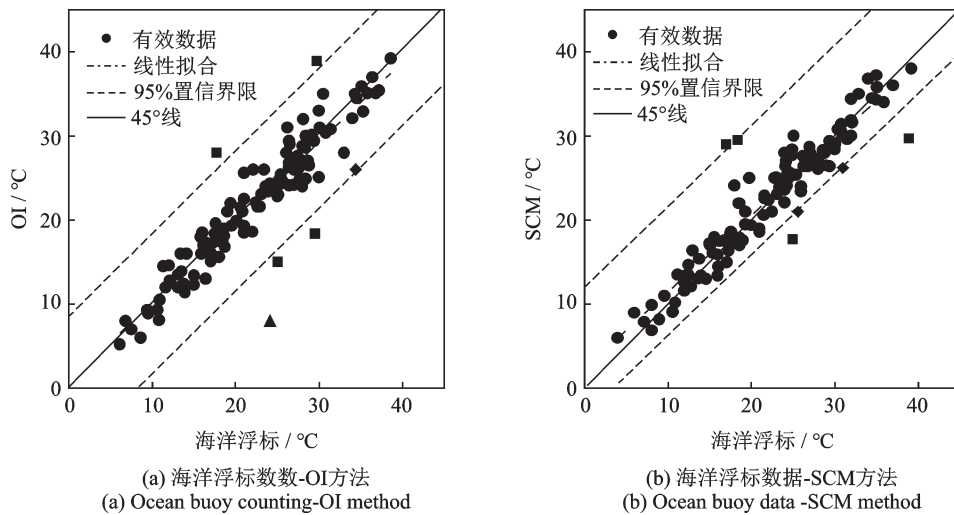


图5 留一法交叉验证技术结果

Fig.5 Results of the leave-one-out cross-validation technique

5 结束语

本文应用了SCM方法将2009年1月至2018年12月期间来自NMSDC数据集中的海洋浮标和遥感海表温度进行合并,并使用留一法交叉验证技术评估结果以获得更优的数据融合方法。经比较后发现SCM较OI方法提供了稍好的结果($ME=0.8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{月}$, $MEA=1.8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{月}$, $RMSE=41.7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{月}$, $R^2=0.87$)。相比之下,OI方法不太准确($ME=0.9\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{月}$, $MEA=1.8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{月}$, $RMSE=37.3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{月}$, $R^2=0.85$)。与OI方法相比,SCM实现性更优,通用性更强,计算速度更快(无需转置大矩阵),且可以迭代地增加校正的平滑性,具备实时提供高分辨率精准的海洋环境数据的能力,尤其是在海面装置非常稀疏的南海海域,可以提高渔情模拟预测的精度,以便更好地对海洋资源进行规划和管理。

参考文献:

- [1] 陈新军, 高峰, 官文江. 渔情预报技术及模型研究进展[J]. 水产学报, 2013, 37(8): 1270-1280.
CHEN Xinjun, GAO Feng, GUAN Wenjiang. Review of fishery forecasting technology and its models[J]. Journal of Fisheries, 2013, 37(8): 1270-1280.
- [2] 张孝民, 朱清澄, 花传祥. 2013年北太平洋公海秋刀鱼渔场与海洋环境的关系[J]. 上海海洋大学学报, 2015, 24(5): 773-782.
ZHANG Xiaomin, ZHU Qingcheng, HUA Chuangxiang. Study on the fishing ground of saury (*Cololabis saira*) in the Northwest Pacific high seas[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2015, 24(5): 773-782.
- [3] 王冬, 黄德森, 刘洪刚, 等. 海洋遥感卫星数据库建立与应用[J]. 气象水文海洋仪器, 2017, 34(2): 40-45.
WANG Dong, HUANG Desen, LIU Honggang, et al. Establishment and application of marine remote sensing satellite database[J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instrument, 2017, 34(2): 40-45.
- [4] 蒋锦刚, 徐曜, 聂晨晖, 等. 海表面温度时空变异特征及对验证误差影响[J]. 遥感学报, 2019, 23(2): 336-348.
JIANG Jingang, XU Yao, NIE Chenhui, et al. Influence of temporal and spatial variation of sea surface temperature on validation errors[J]. Journal of Remote Sensing, 2019, 23(2): 336-348.
- [5] 国家海洋科学数据中心. 实测数据、地理与遥感数据[EB/OL]. (2018-01-03) [2020-02-05]. <http://mds.nmdis.org.cn/pages/home.html>.
- [6] RUTHERFORD I D. Data assimilation by statistical interpolation of forecast error fields[J]. J Atmos Sci, 1972, 29(5): 809-815.

- [7] FRANKE R. Statistical interpolation by iteration[J]. *Monthly Weather Review*, 2009, 116(4): 15.
- [8] 赵聪聪, 周燕. 国内海洋浮标监测系统研究概况[J]. *海洋开发与管理*, 2013(11): 17-22.
ZHAO Congjiao, ZHOU Yan. Research overview of domestic ocean buoy monitoring system[J]. *Ocean Development and Management*, 2013(11): 17-22.
- [9] 鞠海龙. 南海渔业资源衰减相关问题研究[J]. *东南亚研究*, 2012(6): 51-55.
JU Hailong. Studies on the decrement of fishery resource in the South China Sea[J]. *Southeast Asian Studies*, 2012(6): 51-55.
- [10] 朱求安, 张万昌, 余钧辉. 基于GIS的空间插值方法研究[J]. *江西师范大学学报(自然科学版)*, 2004, 28(2): 183-188.
ZHU Qiu'an, ZHANG Wanchang, YU Junhui. The spatial interpolation in GIS[J]. *Journal of Jiangxi Normal University (Natural Science)*, 2004, 28(2): 183-188.
- [11] 洪樱, 欧吉坤, 彭碧波. GPS卫星精密星历和钟差三种内插方法的比较[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2006, 31(6): 516-518, 556.
HONG Ying, OU Jikun, PENG Bibo. Three interpolation methods for precise ephemeris and clock offset of GPS satellite[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(6): 516-518, 556.
- [12] LI Jin, HEAP A D. A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: Performance and impact factors[J]. *Ecological Informatics*, 2014, 6(3/4): 228-241.
- [13] BRATSETH A M. Statistical interpolation by means of successive corrections[J]. *Tellus: Series A*, 1986, 38A (5): 439-447.
- [14] 王勇, 李朝奎, 陈良, 等. 权重对空间插值方法的影响分析[J]. *湖南科技大学学报(自然科学版)*, 2008, 23(4): 77-80.
WANG Yong, LI Chaokui, CHEN Liang, et al. Analysis on impact of weight to spatial interpolation methods[J]. *Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2008, 23(4): 77-80.
- [15] 张君珏, 苏奋振, 王雯玥. 南海资源环境地理研究综述[J]. *地理科学进展*, 2018, 37(11): 1443-1453.
ZHANG Junjue, SU Fenzhen, WANG Wenyue. A review of geographical information research on resources and environment of the South China Sea region[J]. *Progress in Geography*, 2018, 37(11): 1443-1453.
- [16] 纪世建, 周为峰. 南海外海渔场渔情分析预报的研究综述[C]// 2014年中国水产学会学术年会. 长沙, 中国: 中国水产学会, 2014.
JI Shijian, ZHOU Weifeng. An overview of analysis and forecast of fishery ground in the open South China Sea[C]// *Proceedings of Annual Meeting of China Society of Fisheries*. Changsha, China: China Society of Fisheries, 2014.
- [17] LI Wei, XIE Yuanfu, HAN Guijun. A theoretical study of the multigrid three-dimensional variational data assimilation scheme using a simple bilinear interpolation algorithm[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 32(3): 80-87.
- [18] 王春媛. 遥感图像几何矫正校正及目标识别技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
WANG Chunyuan. Research on geometric correction and object recognition for remote sensing image[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [19] 周雄鹏. 平均发展速度偏差率及其水平法矫正模型的研究[J]. *统计研究*, 1984(2): 65-70, 79.
ZHOU Xiongpeng. Average deviation rate of development speed and its horizontal method correction model[J]. *Statistical Research*, 1984(2): 65-70, 79.
- [20] 张敏静, 刘雅娜, 薛志群. 一元线性回归方程有关检验问题的研究[J]. *价值工程*, 2012(2): 1-2.
ZHANG Minjing, LIU Yana, XUE Zhiqun. Linear regression equation study of relevant inspection question[J]. *Value Engineering*, 2012(2): 1-2.
- [21] 吴燕, 李松仕. 应用分布转换法插补展延水文系列的探讨[J]. *福州大学学报(自然科学版)*, 1986(4): 70-76.
WU Yan, LI Songshi. A study for interpolating and extending hydrologic series by applying distributional transformation[J]. *Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition)*, 1986(4): 70-76.
- [22] 王子良. 空间数据预处理及插值方法对比研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
WANG Ziliang. Comparison and research of spatial data pretreatment and interpolation[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2010.
- [23] LILLIEFORS H W. On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown[J]. *Publications of the American Statistical Association*, 2017, 62(318): 399-402.
- [24] DOERFEL M R, JUETTNER B, SIMEON B. Adaptive isogeometric analysis by local h-refinement with T-splines[J].

Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering, 199(5/6/7/8): 264-275.

- [25] VOLPE V, MANZONI S, MARANI M, et al. Leave-one-out cross-validation[M]. [S.l.]: Springer US, 2011.
- [26] CAWLEY G C. Leave-one-out cross-validation based model selection criteria for weighted LS-SVMs[C]//Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks 2006, Part of the IEEE World Congress on Computational Intelligence. Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2006.
- [27] 韩梅,魏亮.最优插值法在海温数据同化中的应用研究[J].海洋技术,2008,27(4): 90-92.
HAN Mei, WEI Liang. Study on data assimilation of ocean temperature based on the optimum interpolation method[J]. Ocean Technology, 2008, 27(4): 90-92.
- [28] 丁润杰,赵朝方.基于最优插值和贝叶斯最大熵的海表温度融合方法研究[J].海洋技术学报,2018,37(2): 35-42.
DING Runjie, ZHAO Chaofang. Study on the merging sea surface temperature data based on optimal interpolation and Bayesian maximum entropy method[J]. Journal of Ocean Technology, 2018, 37(2):35-42.
- [29] HERRERA I, KEYES D E, WIDLUND O B, et al. Successive subspace correction method for singular[M].[S.l.]: Springer, 2010.
- [30] YANG X, SUZAN Köknar-Tezel, LATECKI L J. Locally constrained diffusion process on locally densified distance spaces with applications to shape retrieval[C]//Proceedings of 2009 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2009). Miami, Florida, USA: IEEE, 2009.

作者简介:



虞丽娟(1963-),女,博士,教授,博士生导师,研究方向:物联网工程、海洋工程、体育工程、高等教育管理等方面的科学研究,E-mail: ljiyu@shou.edu.cn。



李世超(1993-),男,硕士研究生,研究方向:机械工程、物联网技术开发,E-mail: leon_shichao_li@163.com。



陈成明(1978-),通信作者,男,博士,副教授,研究方向:物联网工程、机械电子工程、人因工程,E-mail: cmchen@shou.edu.cn。



曹守启(1973-),男,博士,教授,博士生导师,研究方向:主要从事海洋物联网工程、渔业工程及其自动化等技术研究,E-mail: sqcao@shou.edu.cn。

(编辑:张彤)