

基于多源卫星融合资料的中国近海海洋锋检测研究

施英妮, 张根生, 张春华, 易 欣, 刘洪伟, 李 冰
(北京 5111 信箱, 北京 100094)

摘要: 海洋锋是海洋动力学中重要的研究对象。目前主要利用卫星遥感海面温度数据分析海洋锋。由于夏季中国近海海域海面温度趋同特性, 无法利用海面温度数据分析海洋锋, 而卫星遥感海色数据可以有效弥补海面温度检测海洋锋的不足, 提高海洋锋检测的准确性。基于多源卫星融合数据, 利用梯度检测算法对中国近海海域进行海洋锋研究, 结合海面温度和蓝绿波段遥感反射率比值的季节变换规律, 利用不同季节适用的不同梯度检测阈值, 获取中国近海的海温锋和海色锋分布规律。通过海温锋和海色锋互补, 可以实现对中国近海锋面更全面的检测。

关键词: 中国近海; 海洋锋面; 梯度检测; 多源卫星融合资料

中图分类号: TP75 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2022)02-0104-07

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210927001

引用格式: 施英妮, 张根生, 张春华, 等. 多源卫星融合资料的中国近海海洋锋检测研究[J]. 遥测遥控, 2022, 43(2): 104-110.

Research on ocean front detection in China coastal waters based on multi-source merging data

SHI Yingni, ZHANG Gensheng, ZHANG Chunhua, YI Xin, LIU Hongwei, LI Bing
(Mailbox No. 5111, Beijing 100094, China)

Abstract: Ocean front is a very important research object in ocean dynamics. At present, satellite remote sensing mainly uses sea surface temperature data to analyze the ocean front. However, due to the convergence of sea surface temperature in summer in China's offshore waters, the existence of the front is covered up, and the biooptical characteristics of different water masses are often different, and there is no significant seasonal variation cycle caused by the influence of solar radiation. Therefore, satellite sea color data can effectively make up for the deficiency of ocean front detection and improve the accuracy of ocean front detection. Based on Multi-source Satellite merging data, this paper uses gradient detection algorithm to study the ocean front in China's offshore waters. Combined with the seasonal transformation law of SST and blue-green band remote sensing reflectance ratio, this paper uses different gradient detection thresholds applicable in different seasons to obtain the distribution law of SST front and sea color front in China's offshore waters. A more comprehensive detection of China's offshore front can be realized through the complementarity of sea temperature front and sea color front.

Key words: China coastal waters; Ocean front; Gradient detection; Multi-source satellite merging data

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210927001

Citation: SHI Yingni, ZHANG Gensheng, ZHANG Chunhua, et al. Research on ocean front detection in China coastal waters based on multi-source merging data[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(2): 104-110.

引 言

海洋锋作为海洋学重要的中尺度现象, 影响涉及天气变化、水声传输、海洋渔业等诸多方面: 海洋锋区所在海域, 热量、动量和水汽等的海气相互作用活动丰富, 对天气变化影响很大, 是海上风暴的爆发区; 海洋锋强烈影响水声传输, 声波在通过锋区时将产生不同程度的折射或反射, 使能量损失增大, 对导弹、鱼雷、雷达和声纳等武器系统作战使用效能发挥产生显著的影响, 潜艇战和反潜艇战的战术应用, 迫切需要获取准确的海洋锋信息^[1-3]; 海洋锋区的浮游植物较聚集, 初级生产力高, 渔获量明显高于其它海区, 是主要渔场所在。因此, 海洋锋研究一直是海洋学研究中的一个重要领域, 且具有可观的研究前景。

中国近海自北向南包括渤海、黄海、东海及南海，四海相连，构成一个弧状分布，环绕亚洲大陆的东南部。中国近海在河流径流、海底地形、季风以及海面热通量的相互作用下，环流结构复杂，产生了物理特性相对独立的各种水团，为中国近海海洋锋面的形成和发展提供有利条件。目前关于中国近海海洋锋面的研究大部分都是基于海面温度数据，但中国近海海域海面温度季节性变化显著，尤其是夏季受太阳辐射影响表层海水增温明显，海面温度梯度的差异降低，从而使得用遥感海面温度锋判定海洋锋的方法失效。而各种水团具有的生物光学特性往往是不相同的，且受太阳辐射影响较小，因此卫星海色遥感资料可作为研究海洋锋的有效依据^[4]。

本文基于多源卫星融合资料，利用梯度检测算法对中国近海海域进行海洋锋研究，结合海面温度和蓝绿波段遥感反射率比值的季节变换规律，利用不同季节适用的不同梯度检测阈值，获取中国近海的海温锋和海色锋分布规律。可以通过海温锋和海色锋互补，实现对中国近海锋面更全面的检测。

1 海洋锋检测算法

本文所用的多源海面温度融合数据，为欧空局海洋环境监测服务系统 MYOCEAN 提供的全球网格化近实时海面温度数据 OSTIA^[5]。该数据集利用最优插值方法融合的多颗 NOAA/AVHRR、SEVIRI 和 AATSR 红外传感器海面温度数据、TMI 和 AMSR 微波传感器海面温度数据以及实测数据，产品时间分辨率为 1d，空间分辨率为 5 km。多源卫星海色融合数据为美国 NASA 的 OCEANCOLOR 网站提供的遥感反射率融合数据集^[6]，该数据集利用最优插值方法融合了 ENVISAT/MERIS、AQUA/MODIS 和 NPP/VIIRS 等多颗卫星传感器的数据，产品时间分辨率 1d，空间分辨率为 9 km。

本文检测中国近海海洋锋面采用梯度算法。梯度算法被广泛应用于海洋锋的识别研究中^[7]，主要由预处理、梯度计算、梯度阈值选择和锋面提取等部分组成，流程如图 1 所示。

① 预处理

预处理主要减少噪声对锋面提取影响，采用中值滤波方法滤除数据的噪声，同时保持图像数据中的边缘信息。本文采用 3×3 窗口对图像进行中值滤波，对于海陆边缘像素，如果 3×3 窗口内不存在空值，则对该像素进行中值滤波，否则保留原像素值，不进行任何处理。

② 梯度计算

梯度算法中锋面梯度的计算公式为：

$$GM = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2} \tag{1}$$

利用 Sobel 算子计算梯度^[8]，其中水平梯度计算公式为：

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix} \times \frac{1}{4} T \tag{2}$$

垂直梯度计算公式为：

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \begin{bmatrix} +1 & +2 & +1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & +2 \end{bmatrix} \times \frac{1}{4} T \tag{3}$$

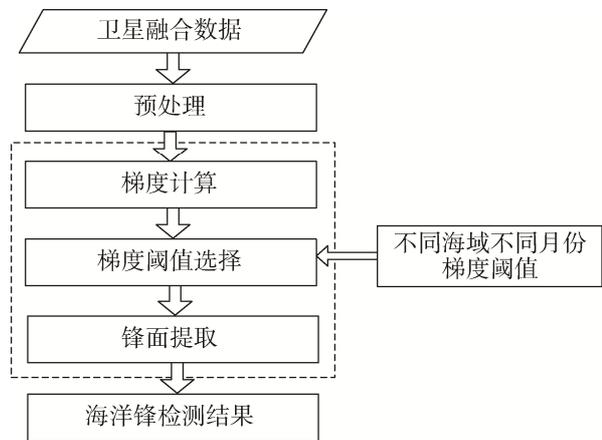


图 1 海洋锋检测算法流程图

Fig. 1 Flow chart of ocean front detection algorithm

式中, T 表示要锋面计算的像素点为中心的 3×3 数据矩阵。

③ 梯度阈值选择

海洋锋梯度检测算法中, 梯度阈值的不同选择会影响海洋锋检测结果, 不同研究者采用的梯度阈值标准不同, 得到的锋面检测结果会存在一些差异^[9,10]。目前, 关于中国近海海洋锋的判别, 没有一致的梯度阈值标准。中国近海海洋锋面有强有弱, 弱的锋面会对比较高的梯度阈值不敏感, 因此在研究具体锋面时需要根据情况调整梯度阈值的大小。本文针对中国近海沿岸锋、陆架锋和陆坡锋三种不同类型海洋锋, 按冬季、春季、夏季和秋季划分, 分别选取 1 月、4 月、7 月、10 月, 作为四个季节的代表月份处理。海面温度选取 $0.01 \sim 0.06 \text{ } ^\circ\text{C km}^{-1}$ 进行比较作为梯度阈值获得锋面月频率分布图, 蓝绿波段遥感反射率比值选取 $0.002 \sim 0.007 \text{ km}^{-1}$ 进行比较作为梯度阈值获得锋面月频率分布图, 从保持锋面的完整性及对零碎锋区的剔除效应选择出合适的梯度阈值。本文在不同季节采用的梯度阈值如表 1 所示。

表 1 中国近海海洋锋梯度阈值

Table 1 Gradient threshold of ocean front of China coastal waters

梯度阈值	海洋锋类型			
		沿岸锋	陆架锋	陆坡锋
海面温度数据梯度阈值 (单位: $^\circ\text{C}/\text{km}$)	冬	0.05	0.04	0.03
	春	0.04	0.03	0.02
	夏	0.01	0.01	0.01
	秋	0.04	0.03	0.02
蓝绿波段遥感反射率比值梯度阈值 (单位: km^{-1})	冬	0.005	0.004	0.002
	春	0.006	0.005	0.003
	夏	0.007	0.006	0.004
	秋	0.006	0.005	0.003

④ 每日锋面提取

通过上述步骤 1~3, 利用 Sobel 算子计算研究范围内各点的梯度变化, 针对不同区域不同季节采用表 1 所示梯度阈值作为判别海洋锋的标准, 大于阈值判断为海洋锋区域, 小于阈值判断为非海洋锋区域, 从而得到每天的海洋锋检测结果, 以海面温度日融合产品为例, 得到海温锋日检测结果如图 2 所示。

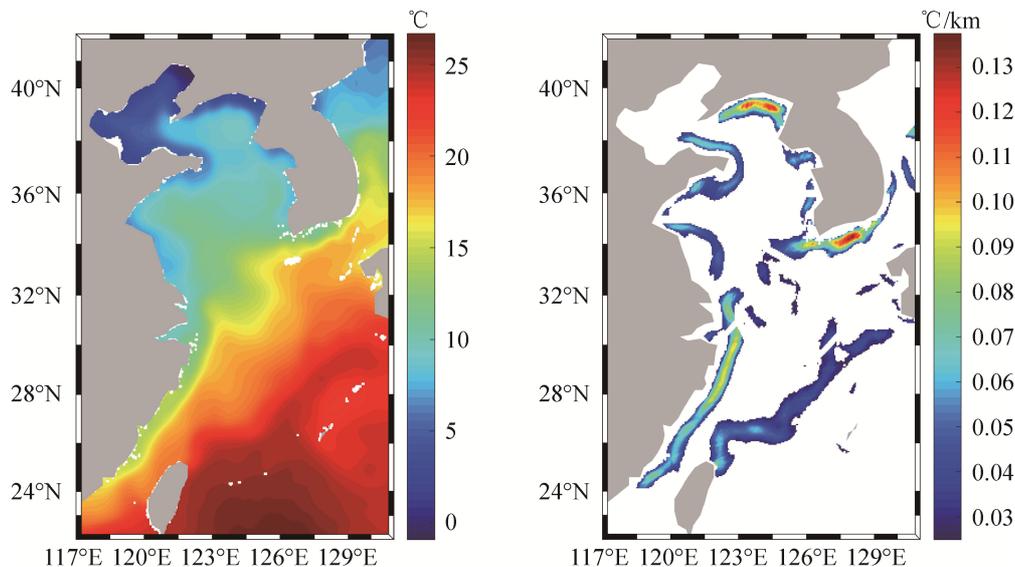
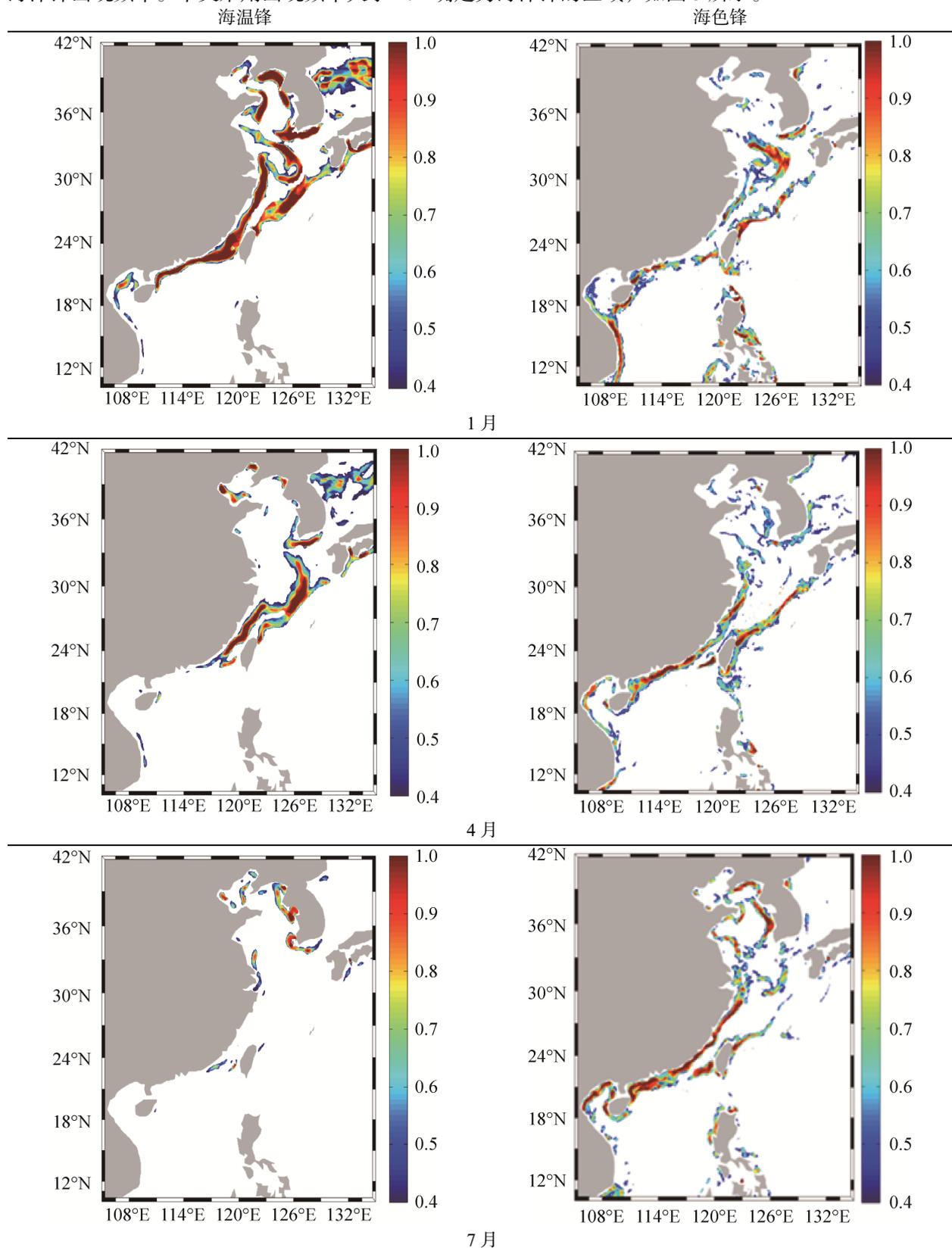


图 2 海面温度日融合产品 (左) 及海温锋检测结果 (右)

Fig. 2 Sea surface temperature daily merging products (left) and sea temperature fronts detection results (right)

⑤ 每月锋面频率统计

以月为周期，统计海洋锋出现频率结果，该点出现锋面天数与参与计算月份有效天数之比即为某点海洋锋出现频率。本文采用出现频率大于40%确定为海洋锋的区域，如图3所示。



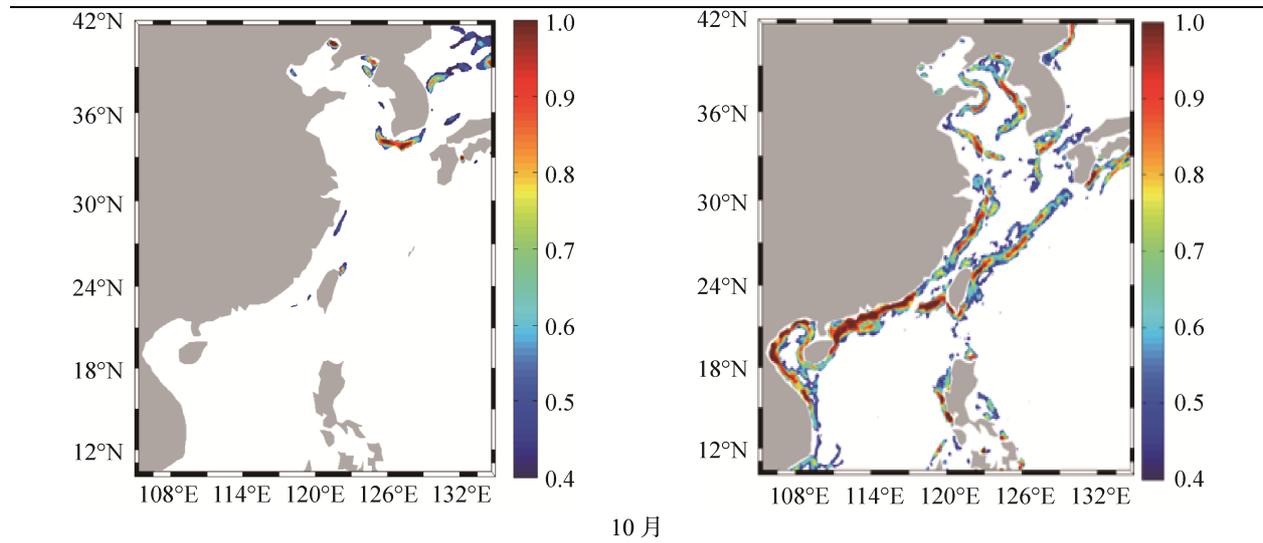


图 3 中国近海 2020 年典型月份海温锋和海色锋检测结果对比

Fig. 3 Comparison of sea surface temperature front and sea color front in typical months of China coastal waters in 2020 year

2 中国近海海洋锋检测结果与讨论

目前,通过梳理前人的研究成果得到中国近海主要锋面分布为:渤海主要存在渤海沿岸锋和渤海海峡锋^[11];黄海锋面比较丰富,主要存在山东半岛锋、朝鲜半岛西岸锋(包括西朝鲜湾锋和江华湾锋)、济州岛西岸锋和济州岛东岸锋^[9,12];东海水文状况非常复杂,海洋锋也较丰富,主要有江苏沿岸锋、长江口环状锋、黑潮锋、浙闽沿岸锋^[13,14];南海北部主要存在台湾浅滩锋、广东沿岸锋、珠江口近岸锋、海南岛东部沿岸锋、北部湾锋、黑潮入侵锋^[15];南海中部和南部海区主要存在南海中部温盐锋和越南东部沿岸的海洋锋。

利用本文提出的海洋锋检测算法和检测阈值,得到的 2020 年中国近海典型月份海温锋面结果如图 3 左侧图所示,同时间同区域的多源卫星海色融合数据检测的锋面结果如图 3 右侧图所示。

从表 2 的检测结果看,渤海海域的海温锋,冬季锋区大体分布在辽东湾的边缘,锋面紧贴岸界,海峡锋明显;春季,辽东湾海温锋部分消失,仅渤海的南岸沿岸锋存在,锋区沿岸分布,形状不规则;夏季锋区主要存在于辽东湾湾底和渤海南部,海峡锋明显;秋季基本没有锋面出现。渤海海域无法检测到稳定的海色锋,这主要是因为渤海属于水深较浅(平均水深 18 m)海域,海水对流混合可达海底,海色锋梯度不明显。

黄东海海域,从温度锋结果看,冬季锋面丰富,形状规则,位置较为固定;春季山东半岛锋、江苏沿岸锋消失,浙闽沿岸锋南缩,长江口环状锋范围缩小和黑潮锋相连,朝鲜半岛西岸锋和济州岛西岸锋也减弱;夏季水温分布较均匀,中国近海海洋锋只有零星区域存在,至秋季 10 月份,中国近岸锋面较少,仅济州岛东岸和浙闽沿岸存在少量锋区。冬季海色锋不如海温锋检测结果丰富明显,只较为完整地检测到了黑潮锋、浙闽沿岸锋和济州岛东岸锋;春季朝鲜半岛周边海域的海色锋、黑潮锋和浙闽沿岸锋检测较为完整,长江口环状锋几乎消失;夏季,除了济州岛近岸锋和长江口环状锋只有部分被检测到,其它锋区都在海色锋结果上表现明显,特别是中国近岸的山东半岛锋、江苏沿岸锋和浙闽沿岸锋检测结果较完整;秋季和夏季情况类似。

南海海域,海温锋检测结果中,冬季可以检测到广东沿岸锋、珠江口近岸锋、北部湾锋和越南沿岸锋;其它季节由于海面温度差异不明显,几乎检测不到锋区。在海色锋检测结果中,四个季节均能明显检测出沿岸锋。

根据全年检测结果,总结利用海面温度和海色数据明显检测到各海洋锋的月份如表 2 所示。中国近

海海温锋面在 11 月至次年 5 月较明显, 其他月份锋面较弱或完全消失。海色锋面中除了渤海海域、长江口及南海中部等区域无固定锋面外, 其它海域海色锋较明显, 像东海黑潮区、台湾浅滩区及南海海域沿岸等海域常年可以检测到海色锋。

表 2 中国近海 2020 年海温锋面和海色锋面明显存在月份对比

Table 2 Contrast between SST front and sea color front of China coastal waters in 2020

编号	海洋锋名称	海温锋明显存在月份	海色锋明显存在月份
1	渤海近岸锋	11 月-次年 5 月	无稳定锋面
2	渤海海峡锋	11 月-次年 2 月	无稳定锋面
3	山东半岛锋	11 月-次年 2 月	5 月-11 月
4	朝鲜半岛西岸锋	12 月-次年 2 月	5 月-11 月
5	济州岛西岸锋	12 月-次年 5 月	6 月-9 月
6	济州岛东岸锋	12 月-次年 5 月	6 月-9 月
7	长江口环状锋	1 月-2 月	无稳定锋面
8	江苏沿岸锋	12 月-次年 2 月	6 月-10 月
9	浙闽沿岸锋	11 月-次年 5 月	2 月-9 月
10	东海黑潮锋	12 月-次年 5 月	全年
11	台湾浅滩锋面	12 月-次年 5 月	全年
12	广东沿岸锋	12 月-次年 2 月	全年
13	珠江口近岸锋	12 月-次年 2 月	全年
14	海南岛东部沿岸锋	无稳定锋面	全年
15	北部湾锋	12 月-次年 1 月	全年
16	黑潮入侵锋	12 月-次年 1 月	全年
17	南海中部海洋锋	无稳定锋面	无稳定锋面
18	南海中部(越南东部)沿岸锋	12 月-次年 1 月	全年

3 结束语

本文基于多源卫星传感器海面温度和海色融合数据, 针对中国近海近岸锋、陆架锋和陆坡锋三类海洋锋, 利用不同季节适用的不同梯度检测阈值获取中国近海的海温锋和海色锋分布规律, 海温锋面冬春季比较明显, 夏秋季消失。海色锋除了在渤海海域、长江口及南海中部区域无固定反映外, 其它海域可以通过蓝绿波段遥感反射率比值检测到海色锋, 像东海黑潮区域、台湾浅滩区及南海海域沿岸区可常年检测到海色锋。通过海温锋和海色锋检测互补可实现对中国近海锋面更全面的监测。

参考文献

- [1] RYAN J, YODER J, BARTH J, et al. Chlorophyll enhancement and mixing associated with meanders of the shelf break front in the Mid-Atlantic Bight[J]. Journal of Geophysical Research. Biogeosciences, 1999, 23479-23493
- [2] 郭婷婷, 高文洋. 海洋锋现象及其对水声传播的影响[J]. 海洋预报, 2015, 32(5): 80-88.
GUO Tingting, GAO Wenyang. The phenomenon of ocean front and the effect for sound propagation. Marine Forecast, 2015, 32(5): 80-88.
- [3] 施英妮, 石立坚, 张高英. 基于海色融合数据的东海黑潮锋面检测研究[J]. 海洋技术学报, 2018, 37(2): 43-49.
SHI Yingni, SHI Lijian, ZHANG Gaoying. Study on east china sea kuroshio front detection based on satellite ocean color merging data[J]. Journal Of Ocean Technology, 2018, 37(2): 43-49.

- [4] 刘泽. 中国近海锋面时空特征研究及现场观测分析[D]. 北京: 中国科学院大学, 2012.
- [5] 欧空局海洋环境监测服务系统 MYOCEAN[EB/OL]. <ftp://cmems.isac.cnr.it/>.
- [6] 美国 NASA 的 OCEANCOLOR[EB/OL]. <ftp://ftp.oceancolor.ucsb.edu/pub/org/oceancolor/REASoN>.
- [7] BELKIN I M., O'REILLY J E. An algorithm for oceanic front detection in chlorophyll and SST satellite imagery[J]. *Journal of Marine Systems*, 2009, 78(3): 319–326.
- [8] 刘传玉. 中国东部近海温度锋面的分布特征和变化规律[D]. 北京: 中国科学院大学, 2009.
- [9] 郑义芳, 丁良模, 谭锋. 黄海南部及东海海洋锋的特征[J]. *黄渤海海洋*, 1985, 5(1): 16–19.
ZHENG Yifang, DING Liangmo, TAN Feng. Distribution characteristics of marine fronts in the southern Huanghai Sea and the Donghai Sea[J]. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 1985, 5(1): 9–17.
- [10] CHU P C, WANG G H. Seasonal variability of thermohaline front in the central South China Sea[J]. *Journal of Oceanography*, 2003, 59(1), 65–78.
- [11] 赵保仁, 曹德明, 李徽翡, 等. 渤海的潮混合特征及潮汐现象[J]. *海洋学报*, 2001, 23(4): 2001–2007.
ZHAO Baoren, CAO Deming, LI Weifei, et al. Tidal mixing characters and tidal fronts phenomenons in the Bohai Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica(Chinese)*, 2001, 23(4): 2001–2007.
- [12] 许素芹, 陈标, 陶荣华, 等. 中国近海温度锋时空分布特征及验证[J]. *遥测遥控*, 2015, 36(3): 62–69.
XU Suqin, CHEN Biao, TAO Ronghua, et al. The Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Thermal Front in the China Seas[J]. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2015, 36(3): 62–69.
- [13] 林传兰. 东海黑潮锋的海洋学特征及其与渔场的关系[J]. *东海海洋*, 1986, 4(2): 8–16.
LIN Chuanlan. Oceanographic characteristics of the Kuroshio Front in the East China Sea and the relationship with fisheries[J]. *Donghai Marine Science*, 1986, 4(2): 8–16.
- [14] 陈标, 马亮, 张春华, 等. 基于卫星遥感海面温度数据的海洋锋分海区分析方法[J]. *海洋工程*, 2018, 36(2): 108–118.
CHEN Biao, MA Liang, ZHANG Chunhua, et al. Ocean front analysis in subdivided sea areas by using satellite remote sea surface temperature data[J]. *The Ocean Engineering*, 2018, 36(2): 108–118.
- [15] 陈俊昌. 南海北部冬季海面温度实时分布特征的若干解释[J]. *海洋学报*. 1983, 5(3): 391–395.
CHEN Junchang. Some explanation of sea surface temperature distribution in northern South China Sea in winter[J]. *Acta Oceanologica Sinica(Chinese)*, 1983, 5(3): 391–395.

[作者简介]

- 施英妮 1979 年生, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为大气海洋遥感。
张根生 1978 年生, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为大气海洋遥感。
张春华 1980 年生, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为大气海洋遥感。
易欣 1981 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为大气海洋遥感。
刘洪伟 1981 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为大气海洋遥感。
李冰 1983 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为大气海洋遥感。

(本文编辑: 潘三英)