

# 2013~2019 年渤海夏季高温现象及机制分析\*

郭世安<sup>1</sup> 张海彦<sup>1</sup> 魏皓<sup>1</sup> 赵亮<sup>2</sup>

(1. 天津大学海洋科学与技术学院 天津 300072; 2. 天津科技大学 海洋与环境学院 天津 300457)

**摘要** 在全球变暖背景下,海洋上层平均温度的上升将可能导致更频繁的极端高温事件。渤海生态系统将会面临更大的风险和挑战,了解海洋极端高温事件的发生过程,可为应对将来气候变化和防灾减灾提供有力支撑。通过长期现场观测和卫星遥感数据,发现渤海 8 月海表温度(sea surface temperature, SST)在 2013 年发生温度跃迁,并利用 regional ocean modeling system (ROMS)物理模型分析了 2013 年之后渤海夏季升温的影响因素。2013~2019 年阶段 8 月的 SST,比 1994~2012 年阶段整体高 1.37 °C。在空间分布上,表层水体升温较大区域主要集中在 3 个海湾及渤海中部浅滩。在水体温度结构上,2013 年之后夏季上混合层温度整体升高,上混合层厚度变薄,温跃层整体变浅;表底温差增大,水体层结增强约 17.5%。2013 年之后渤海表层水体的升温现象总体上存在于春季和夏季,升温幅度在春季呈线性增强趋势,而在夏季处于稳定的状态。春季的热量累积为夏季升温提供了一个较高的温度初始值,是导致近年来渤海连续多年夏季高温现象的主要因素。春季升温受春季云量减少和短波辐射增强的影响。渤海春夏季水体变暖,尤其是连续多年的温度升高,对浮游植物群落结构、渔业、水母暴发以及整个生态系统有重要影响。

**关键词** SST; 夏季高温; 春季热量累积; 渤海

**中图分类号** P734 **doi:** 10.11693/hyhz20210900208

海表温度(sea surface temperature, SST)是研究海洋系统最重要的热力参数之一。海面作为海洋与大气的边界,其在大气、海洋及海气相互作用的研究中也至关重要。在存在季节性跃层的区域,夏季海面温度的变化,将会影响水体的层结强度,进而影响水体垂向的物质输运和能量传递等(Deser *et al.*, 2010)。

随着全球变暖,海洋的平均温度也在逐渐升高,全球上层海洋正在发生显著增暖(IPCC, 2013)。中国近海的海表温度在近几十年里也存在显著增暖,而且因大部分海域靠近陆地,升温速率高于全球其他开阔大洋区域(Liu *et al.*, 2013; Bao *et al.*, 2014)。张秀芝等(2005)对渤海、黄海、东海以及南海选择代表区域来研究中国近海的长期变化,发现近 100 多年来各海区 SST 都在逐渐升高,20 世纪 80 年代以后 SST 显著升高,20 世纪 90 年代至 21 世纪初, SST 最暖。冯

琳等(2009)研究发现东中国海海表温度在 1945~2006 年的 60 余年中一共升高了 0.9 °C,升温速率约为 0.015 °C/a。

近年来,中国近海升温机制已得到大量研究。Cai 等(2017)通过分析 1958~2018 年 HadISST 数据认为,中国近海夏季 SST 升温是由短波辐射增加引起的,并与东亚夏季风减弱和西太平洋副热带高压增强相关。Pei 等(2017)用经验正交函数(empirical orthogonal function, EOF)分析 1870~2016 年黄东海 SST,得到显著增温趋势而海面净热通量下降,他认为层化加强、垂向混合减弱会促进 SST 升高,海面净热通量下降可能是 SST 升高、海气温差减小的结果。Tang 等(2009)通过分析东海 1957~1996 年的水文观测数据,认为台湾暖流和黑潮加强是东海夏季变暖的主要原因,宋春阳等(2019)通过分析 optimum interpolation SST (OISST)资料 1982~2017 年中国近海海表温度,也认

\* 国家自然科学基金项目, 41806018 号, 41876018 号; 天津自然科学基金项目, 19JCZDJC40600 号。郭世安, 硕士研究生, E-mail: guoshian@tju.edu.cn

通信作者: 张海彦, 讲师, E-mail: haiyan\_zhang@tju.edu.cn

收稿日期: 2021-10-26, 收修改稿日期: 2021-11-16

为黑潮的热输送加强是海表温度偏高的重要原因。近年来中国近海海表极端高温事件频繁发生引起普遍关注。2017 年全球平均海表温度较常年偏高  $0.29\sim 0.43\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 是没有厄尔尼诺事件影响的全球海洋最热年(Cheng *et al.*, 2017), 在中国近海平均海表温度也比常年值偏高  $0.64\text{ }^{\circ}\text{C}$  (李琰等, 2018)。Tan 等(2018)基于 1982~2016 年卫星 SST 发现东中国海 2016 年 8 月极端高温现象, 认为极端高温形成主要归因于平流输运(24%)和净热通量(58%)。Yan 等(2020)通过卫星观测数据发现, 黄、东海夏季海表温度在 2004, 2006 及 2016 年均异常偏高, 分别为  $29.08$ ,  $29.25$  和  $29.68\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 打破了夏季海表温度历史记录, 认为夏季太阳辐射增强和风应力减弱使得混合减弱是造成高温的主要原因。

渤海是中国近海北部的一个半封闭陆架浅海, 仅通过渤海海峡与北黄海相连, 是我国海洋渔业生产的重要区域(李显森等, 2008)。其夏季海表温度的变化, 不仅可以对周围的陆地气候产生影响, 同时也会影响渤海生态系统。而以往研究中, 针对渤海夏季升温现象及机制探讨较少。宋春阳等(2019)在中国近海温度分析中提到渤海近几年的升温现象, 但未作出深入分析。因此, 渤海夏季温度升温特征仍缺少量化, 其升温机制需进一步探究。本文将基于长期现场调查资料、卫星观测数据及数值模拟分析渤海温度变化特征, 并探究其升温影响因素。

## 1 数据与方法

### 1.1 观测数据

本文所使用的观测数据来自国家海洋局渤海中部断面常规观测。调查断面大致呈西南-东北走向, 从黄河口延伸至辽河口, 由 10 个观测站位组成(图 1), 时间跨度为 1978~2018 年共 41 a (2013 年之前垂向观测深度为 0, 5, 10, 15, 20, 25 m 和底层, 之后数据间隔为 0.1 m), 观测时间为每年 8 月, 其中 1993 年数据缺失。

### 1.2 卫星数据

卫星 SST 数据资料来自美国国家气象局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)发射的太阳同步极轨卫星所载的高分辨率辐射计(advanced very high resolution radiometer, AVHRR)。数据空间分辨率为  $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ , 时间为 1982~2019 年共 38 a, 将其处理为渤海区域月平均数据, 取 8 月份的数据进行夏季统计分析。已有研究表明, 卫星反演 SST 的系统偏差为  $(0.18\pm 1.00)\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 空间

分布及长期变化趋势与观测较为一致, 可以用于分析海域 SST 长期变化规律(罗晓凡等, 2012)。此外, 所用海面 10 m 风速和海面短波辐射通量来自欧洲中期天气预报中心(European Center for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)的 ERA5 数据集, 选用时间长度与卫星数据一致, 空间分辨率为  $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 。

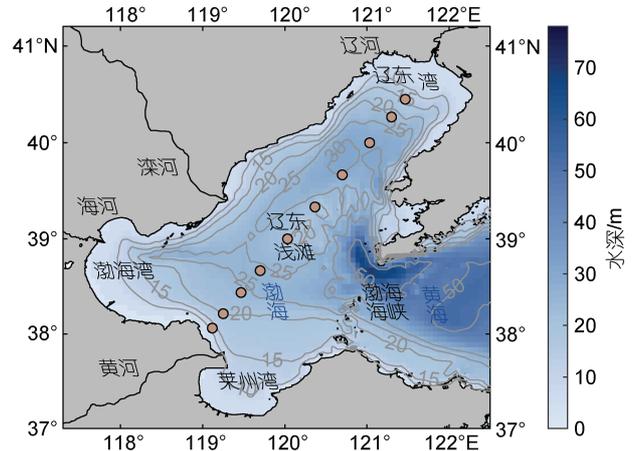


图 1 渤海地形及渤海中部断面观测站位分布

Fig.1 The topography of the Bohai Sea and the distribution of observation stations in the middle section of the Bohai Sea  
注: 灰色曲线表示 10, 15, 20, 25, 30 和 50 m 的等深线; 陆地上黑色曲线表示河流; 圆点表示观测站位

### 1.3 ROMS 模型

本研究使用三维物理模型为 regional ocean modeling system (ROMS) (Shchepetkin *et al.*, 2005)。模拟区域包含渤海、黄海及部分东海区域, 模型水平分辨率  $2.2\sim 4\text{ km}$ , 其中渤海分辨率较高。垂向采用  $\sigma$  坐标, 分为 30 层, 并在表底进行加密。温盐初始场来自 World Ocean Atlas (WOA13), 初始流速和为零。温盐、流、水位开边界来自于 hybrid coordinate ocean model (HYCOM) 数据, 边界处潮汐从 OSU tidal prediction software (OTPS) 中提取, 包含  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $N_2$ ,  $K_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$ ,  $P_1$  和  $Q_1$ , 共 8 个分潮。大气强迫(风应力、短波辐射、净热通量和淡水通量)来自于 ECMWF (<https://www.ecmwf.int/>)。模型中河流包含辽河、滦河、海河、黄河、鸭绿江、汉江、淮河、长江和钱塘江, 河流流量数据来源于中国河流泥沙公报, 其中鸭绿江和汉江为气候态数据。该物理模型配置已在渤海夏季潮汐锋研究(张广跃等, 2020)和渤海氧亏损研究(李志成等, 2021)中得到应用。

### 1.4 跃迁检验

本文采用基于  $t$ -检验的循环算法(Rodionov, 2004)进行跃迁检验, 判断渤海表层温度是否发生跃迁及

发生年份。得到的 regime shift index (RSI)值是标准化所得距平的累积和, 其大小取决于位相的预设长度  $L$  (类似于截断长度)和 Huber 权重参数  $H$  (定义为平均值的一个离散范围, 超出这个范围即认为是异常值), 可以反映跃迁发生的可靠性。 $P$  值为预先设定的显著性检验的置信度。本文在较长的时间尺度上分析 SST 的变化, 因此将预设长度  $L$  设为 10 a, 置信度设为 0.1,  $H$  取为 1。

### 1.5 水体热收支计算

渤海水体热收支各项由公式(1)和公式(2)计算:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y}\right) - w \frac{\partial T}{\partial z} + K_v \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \quad (1)$$

$$\frac{T - T_0}{\Delta T} h \times \rho \times C_p = Q_{\text{net}} + Q_{\text{hadv}} + Q_{\text{vadv}} + Q_{\text{vdiff}}, \quad (2)$$

式(1)中,  $T$  为水体温度;  $u$ ,  $v$  和  $w$  分别代表东向、北向和垂向的流速;  $K_v$  为垂向湍扩散系数; 等号右边第一项为水平平流; 第二项为垂向对流; 第三项为垂向扩散。式(2)中, 等号左边为水体热含量变化项;  $T_0$  为温度初始值;  $C_p$  为海水比热容;  $h$  为混合层深度;  $\rho$  为密

度;  $Q_{\text{net}}$  代表海面净热通量变化;  $Q_{\text{hadv}}$  表示物理场的水平平流作用;  $Q_{\text{vadv}}$  表示垂向对流作用;  $Q_{\text{vdiff}}$  代表垂向扩散作用。

## 2 结果

### 2.1 2013 年之后渤海 SST 跃迁现象

渤海中部断面夏季的长期观测表明:1978 年以来渤海中部断面 SST 距平呈波动变化, 变化范围在  $-4 \sim 4$  °C 之间(图 2a), 在 2013 年之后基本为正异常, 呈现明显的高温现象, 总体高温异常约在  $1 \sim 4$  °C。观测期间平均的 AVHRR SST 与现场观测变化一致, 表现出 2013 年以来渤海夏季高温的现象, 现场观测与卫星观测存在显著相关, 相关系数  $R$  为 0.99 ( $P < 0.001$ ), 均方根误差为 1.03 °C。为进行模型结果校验, 图 2b 给出了 1994~2019 年整个渤海区域模型模拟与卫星观测的 SST 对比。结果表明, 模拟结果与卫星观测的 8 月平均 SST 具有一致的变化, 相关系数  $R$  为 0.96 ( $P < 0.01$ ), 整个渤海区域的 8 月 SST 在 2013 年之后普遍较高。

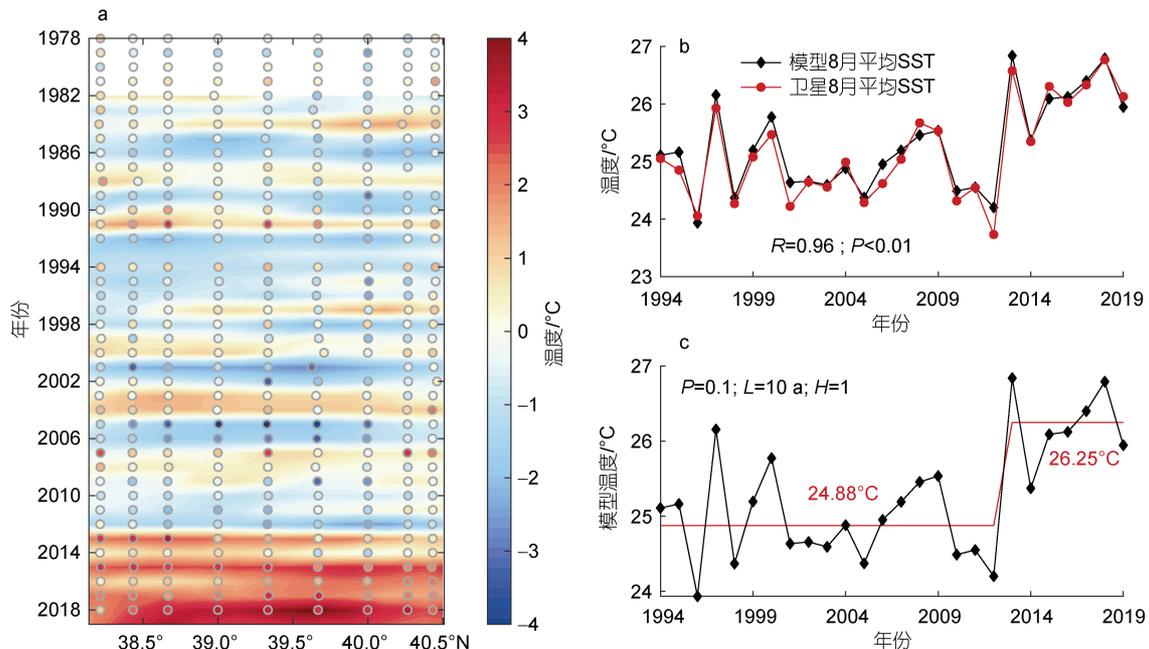


图 2 1978~2018 年渤海中部断面夏季 SST 距平时间序列(a), 1994~2019 年渤海 8 月 SST 时间序列(b)以及模拟的 8 月平均 SST 跃迁检验(c)

Fig.2 SST anomaly time series 1978 to 2018 at the middle section of the Bohai Sea (a), time series during 1994~2019 of SST averaged in August in the Bohai Sea, and regime shift of simulated time series of SST averaged in August in the Bohai Sea (c)

注: a 中底色为卫星数据, 圆点为观测值; c 中红线为跃迁前后状态的平均值; SST: sea surface temperature, 海表面温度;  $P$  表示显著性检验置信度;  $L$  表示截断长度;  $H$  表示权重参数;  $R$  表示相关系数; 跃迁指数为 1.01

对 1994~2019 年模拟的渤海 8 月 SST 时间序列进行跃迁检验得出, 2013 年前后出现明显的由冷到暖

的状态跃迁, 跃变指数 RSI 为 1.01。根据跃迁检验结果, 可将 1994~2019 年分为 2 个阶段, 前一个阶段

1994~2012 年的夏季平均温度为 24.88 °C, 后一个阶段 2013~2019 年的夏季平均温度为 26.25 °C (图 2c), 2 个阶段温度相差 1.37 °C。可见相对于以往发现的 1990 年代“最暖”(张秀芝等, 2005), 2013 年以来则是进入了“更暖”的时期。

### 2.2 水体温度结构变化

1994~2012 年和 2013~2019 年 2 个阶段多年平均的 8 月 SST, 呈现出一致的空间分布特征(图 3)。莱州湾、渤海湾及辽东湾顶部区域温度较高, 渤海海峡及辽

东湾东部温度较低, 总体呈现湾顶高、中部低以及西部高、东部低的特征。特别是在渤海湾平均温度达到 27 °C, 渤海海峡处温度偏低在 23 °C 左右。2 个阶段相比, 渤海 8 月平均 SST 有明显升高, 总体升高 0.5~2.5 °C 之间。该增温现象在空间分布上存在差异, 增温最显著的区域为渤海湾顶部区域, 最高在 2 °C 以上。其次为在渤海中东部区域, 增温在 1.2 °C 以上。除渤海湾顶以外的渤海西部区域, 增温幅度最小, 在 1.2 °C 以下。

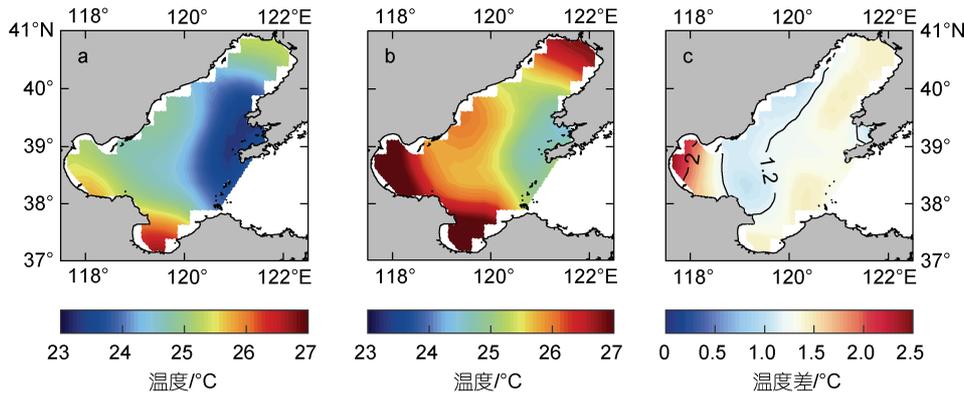


图 3 1994~2012 年(a)与 2013~2019 年(b)8 月 SST 及其差异(c)的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of August SST in 1994~2012 (a) and 2013~2019 (b) and their difference (c)

除了表层增温以外, 渤海温度结构在近几年也发生了变化。图 4 给出了观测和模拟的渤海中部断面海水温度在 1994~2012 年和 2013~2019 年的分布。在这 2 个阶段, 温度均呈现出明显的温度梯度和温度跃层, 以及在浅滩南北两侧洼地的冷水团结构, 且北侧洼地水深更深, 温度更低, 与以往认识一致(俎婷婷等, 2005; 贾瑞丽等, 2008; 周锋等, 2009)。由于上层水体混合均匀, 在 2013~2019 年阶段的渤海 8 月增温不只发生在表层, 整个上层水体均呈现一致的升温。对于跃层以下水体, 模拟的海水温度与上层水体一

致, 也呈现升温现象。而观测的浅滩以南的冷水区域, 其温度出现了降低现象, 这可能与观测时间有关。总体来说, 模型数据与观测值的均方根误差较小, 相关性显著, 相关系数  $R$  均在 0.9 左右, 且通过显著性检验。以上结果表明, ROMS 模型能够很好的再现渤海区域的垂向温度结构的变化, 可以用模型数据进行之后的热收支分析。

渤海水体温度结构的变化引起水体层结的变化, 对表底温差、上混合层深度和跃层强度有明显影响。8 月渤海的层化区域主要分布在渤海中部洼地、莱州

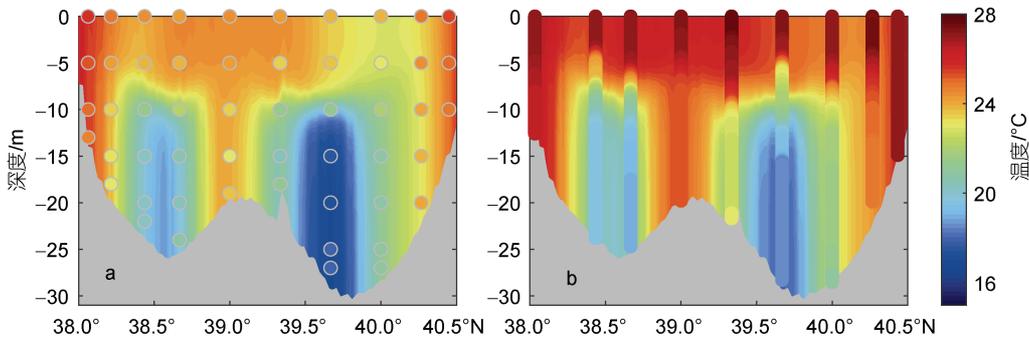


图 4 1994~2012 年(a)和 2013~2018 年(b)渤海中部断面 8 月温度分布

Fig.4 The August temperature along the central section of the Bohai Sea in 1994~2012 and 2013~2018

注: 小圆圈为观测值, 背景图为模型结果

湾口及渤海海峡附近(图 5)。除黄河口附近, 渤海水体的层结主要受到温度控制。从表底温差来看, 水深较大的区域表底温差较大, 最大可在  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上(图 5a, 5b)。2013~2019 年和 1994~2012 年相比, 表底温差总体表现为增大(图 5c)。前一个阶段的平均表底温差为  $3.21\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 后一个阶段为  $3.70\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 总体升温约  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (表 1)。以垂向最大浮力频率平方( $N^2$ )表示水体层结强度, 层化区域  $N^2$  均在  $10^{-3}\text{ s}^{-2}$  以上, 其中渤海中部洼地层结最强(图 5d, 5e)。除了洼地西侧的部分区域外, 2013~2019 年阶段的水体垂向最大  $N^2$  值总体上大于 1994~2012 年(图 5f)。前一个阶段的平均跃层强度为  $4.0\times 10^{-3}\text{ s}^{-2}$ , 后一个阶段为  $4.7\times 10^{-3}\text{ s}^{-2}$ , 总体增强 17.5%。

以垂向最大  $N^2$  值的深度表示跃层的深度, 结果显示, 水深较深的区域跃层深度也较深, 渤海中部洼地和渤海海峡附近跃层深度较深, 在 8 m 以上(图 5d, 5e)。2 个阶段相比较而言, 后一个阶段跃层深度普遍变浅(图 5f)。平均上混合层深度在 1994~2012 年为 7.18 m, 2013~2019 年为 6.48 m(表 1)。总体上, 上混合层变浅约 0.70 m。这表明, 在 2013~2019 年阶段上层水体厚度变薄。上混合层深度的变化也影响到了上层与下层水体热含量的变化。虽然温度升高, 但是由于上混合层变薄, 2013~2019 年阶段的上混合层热含量也有所减少, 而下层水体热含量有所增加(表 2)。

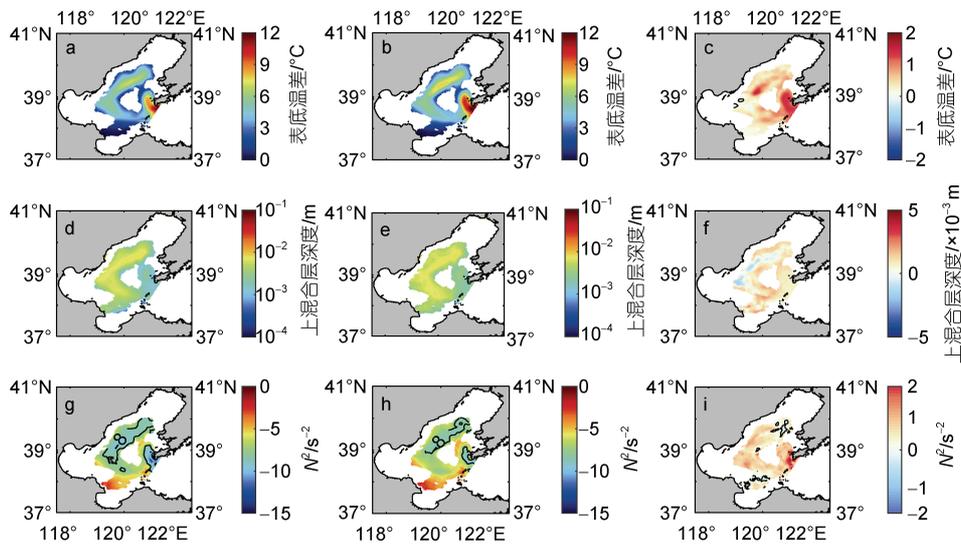


图 5 表底温差(a, b, c)、上混合层深度(d, e, f)和跃层强度  $N^2$  (g, h, i) 2 个阶段及其差值的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of bottom temperature difference (a, b, c), upper mixing layer depth (d, e, f), and  $N^2$  (g, h, i) and their differences

注: a, d, g 为 1994~2012 年平均; b, e, h 为 2013~2019 年平均; c, f, i 为 2 个态的差值

表 1 1994~2012 年和 2013~2019 年 8 月的表底温差、跃层强度及上混合层深度

Tab.1 Surface-bottom temperature difference, stratification intensity, and upper mixing layer depth in August in 1994~2012 and 2013~2019

| 时间          | 表底温差<br>/ $^{\circ}\text{C}$ | 上混合层深度<br>/m | 跃层强度/ $\text{s}^{-2}$ |
|-------------|------------------------------|--------------|-----------------------|
| 1994~2012 年 | 3.21                         | 7.18         | 0.0040                |
| 2013~2019 年 | 3.70                         | 6.48         | 0.0047                |

表 2 渤海夏季(6~8 月)热含量变化( $\times 10^{19}\text{ J}$ )

Tab.2 Heat content changes in summer (Jun to August) in the Bohai Sea ( $\times 10^{19}\text{ J}$ ).

| 时间          | 6 月初始热含量 |      | 8 月末热含量 |      |
|-------------|----------|------|---------|------|
|             | 上层       | 下层   | 上层      | 下层   |
| 1994~2012 年 | 3.73     | 5.47 | 5.63    | 8.31 |
| 2013~2019 年 | 3.60     | 6.22 | 5.22    | 9.11 |

### 3 讨论

#### 3.1 夏季升温影响因素

图 6a 给出了 1994~2019 年渤海区域月均 SST 距平时间序列。可以发现, 2013 年之后, SST 呈现明显的正异常, 尤其是 3~9 月。这表明, 近几年渤海升温不只是发生在 8 月或者夏季, 很多年份从 3 月开始就存在升温现象, 并且可持续到 9 月。将 2 个阶段 SST 季节变化对比可以看出, 2 个阶段的月平均 SST 呈现相似变化特征, 2 月温度最低, 约  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 8 月温度最高, 在  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右(图 6b)。在温度最低的 2 月份, 1994~2012 年和 2013~2019 年 2 个阶段的 SST 值几乎相等, 从 3 月开始温度差异开始增大, 即升温现象开始增强。具体地, 2 个阶段在 3 月的温差约  $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 在 4 月约为

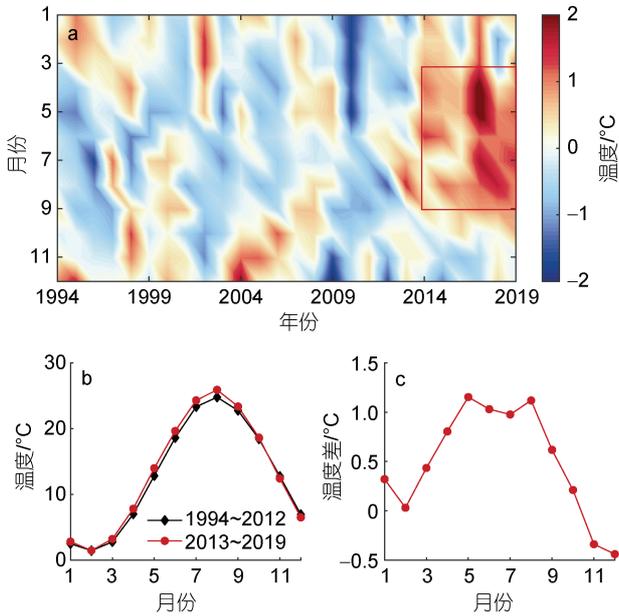


图6 1994~2019年渤海逐月的SST异常(a), 2个阶段的渤海月平均SST变化(b)以及2个阶段的渤海月平均SST差值(c)

Fig.6 Monthly SST anomalies in the Bohai Sea from 1994 to 2019 (a); monthly mean SST in the two stages (b); monthly mean SST difference between two states in Bohai Sea (c)

0.8 °C, 在5月份达到约1.2 °C (图6c)。温差在春季(3~5月)整体上呈线性升高趋势。到了夏季(6~8月), 2

个阶段的温差与春季相比, 较为稳定, 在1.0~1.2 °C之间。从9月开始, 温差开始减小, 到了11月、12月温差在零以下。

由温差的逐月变化可知, 2013~2019年阶段的升温现象总体上存在于春季和夏季, 在春季不断加强, 在夏季处于稳定的状态。这表明, 升温过程主要发生在春季, 春季的升温为夏季提供了较高的初始值。为探究升温的影响因素, 下面将对春季上混合层水体进行热收支估算。

表3给出了渤海上混合层水体在春季(3~5月)的热收支, 上混合层指的是海面至跃层深度的水体, 每年的上混合层由8月的跃层深度决定。3月初始值指利用3月1日水体温度计算的热含量, 5月末热含量指的是利用5月31日水体温度计算的热含量。在3月初, 2个阶段上混合层的平均热含量基本相同, 后一阶段的平均热含量比前一阶段高出 $0.13 \times 10^6 \text{ J/m}^3$ , 约占前一阶段的1.8%。而到了5月末, 2个阶段的热含量差异显著增大, 为 $4.3 \times 10^6 \text{ J/m}^3$ , 约占前一阶段的7.1%。这表明春季初始值的贡献仅为3%, 约有97% ( $4.2 \times 10^6 \text{ J/m}^3$ )的热含量是由春季热含量的变化过程引起的, 主要为海洋内部动力过程(垂向对流、水平平流及垂向扩散项)和海气界面热通量引起。

表3 渤海上层水体3~5月热收支估算(单位:  $\times 10^6 \text{ J/m}^3$ )  
Tab.3 Heat budget in the upper layer in the Bohai Sea from March to May (unit:  $\times 10^6 \text{ J/m}^3$ )

| 多年平均       | 3月初始值 | 热含量变化量 | $Q_{\text{net}}$ | $Q_{\text{hadv}}$ | $Q_{\text{vadv}}$ | $Q_{\text{vdif}}$ | 5月末热含量 |
|------------|-------|--------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------|
| 1994~2019年 | 7.35  | 54.1   | 126.0            | 12.8              | -9.13             | -75.5             | 61.7   |
| 1994~2012年 | 7.31  | 53.0   | 120.4            | 11.9              | -8.59             | -70.5             | 60.5   |
| 2013~2019年 | 7.44  | 57.4   | 140.9            | 15.2              | -10.5             | -88.3             | 64.8   |
| 差值         | 0.13  | 4.4    | 20.5             | 3.3               | -1.91             | -17.8             | 4.3    |

注:  $Q_{\text{net}}$  为净热通量项;  $Q_{\text{hadv}}$  为水平平流;  $Q_{\text{vadv}}$  为垂向对流;  $Q_{\text{vdif}}$  为垂向扩散

在3~5月的上混合层热含量变化中, 海面热通量和水平平流是源项, 体现了春季海洋吸热, 以及渤海海峡出上层水体流入渤海的特征。垂向对流和垂向扩散为汇项, 体现了春季上层水体向下层水体传递热量的过程。总体上海面热通量是主要源项, 而垂向扩散为主要汇项, 表明海面吸热之后在垂向传递的主要过程。垂向对流、水平平流、垂向扩散和海面热通量引起的热含量变化在2个阶段存在明显差异, 且后一阶段的绝对值均在增大, 其中海面热通量和垂向扩散是差异较大的项。

为探究影响海面热通量的因素, 图7给出了春季云量、短波辐射和风速的长期变化。云量呈现明显的

年际变化, 近些年的变化幅度较小。1994~2012年阶段渤海春季平均云量为0.45, 在2013~2019年阶段降低为0.42, 减少了0.03(表4)。与春季云量减少相对应, 后一阶段的春季短波辐射有所增加, 较前一阶段增加了 $2.54 \text{ w/m}^2$ , 而平均风速略有增加, 由 $1.53 \text{ m/s}$ 增至 $1.57 \text{ m/s}$ 。这表明春季短波辐射增强是引起海面热通量升高进而使得水温升高的重要因素。而春季温度的升高为夏季升温提供了较高的初始值, 是夏季升温的决定因素, 这与以往整个中国近海升温或黄东海升温的影响因素认识有所不同。以往研究认为, 夏季台湾暖流和黑潮引起的平流热输运增强(Tang *et al.*, 2009; 宋春阳等, 2019)、太阳辐射增强和风应力减

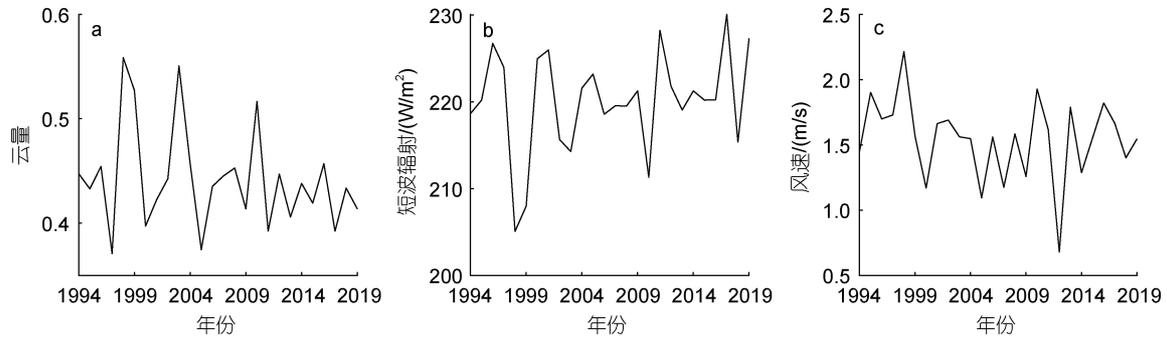


图 7 3~5 月平均的渤海区域云量(a)、短波辐射(b)和风速(c)的时间序列

Fig.7 Time series of cloud cover (a), short—wave radiation (b) and wind speed (c) in Bohai Sea from Mar to May

表 4 渤海区域 2 个阶段 3~5 月的云量、短波辐射和风速  
Tab.4 Cloud cover, short-wave radiation and wind speed during March to May in Bohai Sea in the two stages

| 年份          | 云量   | 短波辐射/(W/m <sup>2</sup> ) | 风速/(m/s) |
|-------------|------|--------------------------|----------|
| 1994~2012 年 | 0.45 | 219.38                   | 1.53     |
| 2013~2019 年 | 0.42 | 221.92                   | 1.57     |

弱(Yan *et al.*, 2020)及净热通量增大(Tan *et al.*, 2018)是影响近年来夏季升温的主要因素。近年来,中国近海高温现象时有发生,像渤海这样连续多年的高温现象在中国其他海域并不显著。因此,春季升温对连续多年夏季高温现象的作用在其他海域也并未发现。

### 3.2 升温对生态系统的潜在影响

作为海洋中的关键热力要素,海表温度不仅通过海气相互作用影响周边的气候与环境,更是维持局地海洋生物、生态系统,调控其变化和演替的关键海洋环境因子。近年来,持续的海洋热浪易引发有毒海藻激增和珊瑚礁白化,威胁脆弱的海洋生态系统,破坏海洋生物多样性,对水产养殖、渔业和旅游业等产生重大影响(王爱梅等, 2019)。历史记录显示,升温可导致鱼类尺寸变小,减弱鱼类移动能力及物种形成速度(Avaria-Llatureo *et al.*, 2021)。渤海近几年春夏季的持续升温,可能会对渤海经济鱼类产生潜在的不利影响。温度对水母生活史有重要影响(王彦涛, 2013; 张广跃, 2019),渤海春季升温可能会使得水母横裂过程提前,夏季温度升高则主要影响水母生长过程,最终影响水母暴发情况。水母丰度及生物量的分布情况,则会影响电站附近海域水母聚集情况及电站生产安全(孙雪等, 2019)。

不同种类浮游植物对温度变化的响应存在差异。硅藻和甲藻是中国近海浮游植物的重要藻类,而两种藻类受温度的影响不同。硅藻的最适温度约为 24 °C,而甲藻的最适温度在 26 °C 左右。硅藻在温度

超过 24 °C 时的下降幅度远比甲藻超过最适温度时大得多,表明甲藻对高温具有更好的耐受性(Xiao *et al.*, 2018)。对于渤海来说,上层水体 8 月平均温度由 1994~2012 年的 24.88 °C,升高至 2013~2019 年的 26.25 °C,会不利于硅藻生长,而会促进甲藻生长,进而影响生态系统中的浮游植物群落结构。栾青杉等(2017, 2018)通过观测调查发现,渤海区域在进入 21 世纪以来甲、硅藻比的平均水平较 20 世纪升高了 2.82 倍,群落结构由硅藻主导演替到硅、甲藻共同控制,海线藻、夜光藻和角藻开始形成绝对优势。此外,通过对 2017 年秦皇岛海域现场观测发现,8 月份过高的水体温度与低浓度的营养盐物质等因素一起也会限制超微型真核藻中褐潮种的生长(赵相伟等, 2020)。

渤海赤潮发生的空间分布也集中在 3 个海湾处(窦勇等, 2020; 张善发等, 2020),而此处的海表温度和热浪持续时间均高于中部邻近海域,这将会加重甲藻类赤潮的发生。而渤海区域很大一部分的海洋牧场和养殖区也分布在这些浅海海湾和沿海地区(杨红生, 2016),强烈的海表升温可能会对养殖区的生物生长造成严重影响。

## 4 结论

本文通过近 40 a 渤海长期观测和卫星遥感数据,发现渤海 8 月 SST 在 2013 年发生高温跃迁,并利用 ROMS 物理模型分析了 2013 年之后渤海夏季升温的影响因素。渤海 8 月 SST 在 2013~2019 年总体较高,与 1994~2012 年相比,升高幅度约在 1~4 °C,平均升高约 1.37 °C;在水体温度结构上,2013 年之后夏季上混合层变薄,温跃层整体变浅,水体层结增强约 17.5%。

2013 年之后渤海的高温现象从 3~8 月均存在,在 3~5 月升温幅度呈线性增加,而在 6~8 月升温幅度处于稳定的状态。分析表明,春季的热含量累积为夏

季高温提供了一个较高的温度初始值,这是引起2013~2019年来渤海连续多年夏季海表高温现象的主要因素。春季升温则受春季云量减少和短波辐射增强的影响。

渤海春夏季水体变暖,对浮游植物群落结构、渔业、水母暴发等有重要影响,而连续多年的高温对整个生态系统更是影响巨大。在未来气候背景下,全球持续变暖似乎是不可避免的,海洋上层将发生更频繁的极端高温事件,渤海作为我国高生产力海区,其海洋生态系统将会面临更大的风险和挑战,应高度重视和了解海洋极端高温事件的发生过程及可预测性,为应对将来气候变化和防灾减灾提供有力支撑。

### 参 考 文 献

- 王彦涛, 2013. 海月水母(*Aurelia* sp.1)生活史关键过程研究[D]. 青岛: 中国科学院研究生院.
- 王爱梅, 王慧, 范文静, 等, 2021. 2019年中国近海海洋热浪特征研究[J]. 海洋学报, 43(6): 35-44.
- 冯琳, 林霄沛, 2009. 1945~2006年东中国海海表温度的长期变化趋势[J]. 中国海洋大学学报, 39(1): 13-18.
- 孙雪, 魏皓, 张海彦, 等, 2019. 近岸海域大型水母来源与迁移路径分析——以红沿河电厂海域为例[J]. 海洋与湖沼, 50(6): 1281-1291.
- 李志成, 魏皓, 张海彦, 等, 2021. 渤海夏季底层氧亏损分布的年际差异分析[J]. 海洋与湖沼, 52(3): 601-613.
- 李显森, 牛明香, 戴芳群, 2008. 渤海渔业生物生殖群体结构及其分布特征[J]. 海洋水产研究, 29(4): 15-21.
- 李琰, 范文静, 骆敬新, 等, 2018. 2017年中国近海海温和气温气候特征分析[J]. 海洋通报, 37(3): 296-302.
- 杨红生, 2016. 我国海洋牧场建设回顾与展望[J]. 水产学报, 40(7): 1133-1140.
- 宋春阳, 姜华, 张守文, 等, 2019. 2017年中国近海海表温度特征[J]. 海洋预报, 36(1): 1-9.
- 张广跃, 2019. 渤海海月水母种群动态模拟与分析[D]. 天津: 天津大学.
- 张广跃, 魏皓, 肖劲根, 等, 2020. 2017年辽东湾夏季潮汐锋位置变化的分析[J]. 海洋与湖沼, 51(1): 1-12.
- 张秀芝, 袁越芳, 吴迅英, 2005. 近百年中国近海海温变化[J]. 气候与环境研究, 10(4): 799-807.
- 张善发, 王茜, 关淳雅, 等, 2020. 2001—2017年中国近海水域赤潮发生规律及其影响因素[J]. 北京大学学报(自然科学版), 56(6): 1129-1140.
- 罗晓凡, 魏皓, 袁承仪, 2012. 利用卫星资料分析黄海海表面温度的年际与年代际变化[J]. 中国海洋大学学报, 42(10): 19-25.
- 周锋, 黄大吉, 苏纪兰, 2009. 夏季渤海温跃层下的双中心冷水结构的数值模拟[J]. 科学通报, 54(9): 1591-1599.
- 赵相伟, 魏玉秋, 孙军, 等, 2020. 春、夏季秦皇岛海域超微型浮游植物[J]. 海洋学报, 42(2): 106-114.
- 姐婷婷, 鲍献文, 谢骏, 等, 2005. 渤海中部断面环境要素分布及其变化趋势[J]. 中国海洋大学学报, 35(6): 889-894, 1016.
- 贾瑞丽, 苏洁, 胡宪敏, 等, 2008. 渤海B1断面夏季温盐结构及变化趋势[J]. 中国海洋大学学报, 38(5): 705-711.
- 栾青杉, 康元德, 王俊, 2017. 黄河口邻近海域浮游植物群落及其多样性的长期变化(1960-2010)[J]. 中国水产科学, 24(5): 913-921.
- 栾青杉, 康元德, 王俊, 2018. 渤海浮游植物群落的长期变化(1959~2015)[J]. 渔业科学进展, 39(4): 9-18.
- 窦勇, 尚金沛, 邵蓬, 等, 2020. 2000-2016年渤海赤潮发生规律及影响因素研究[J]. 水生生态学杂志, 41(6): 141-148.
- AVARIA-LLAUTUREO J, VENDITTI C, RIVADENEIRA M M, et al, 2021. Historical warming consistently decreased size, dispersal and speciation rate of fish [J]. Nature Climate Change, 11(9): 787-793.
- BAO B, REN G Y, 2014. Climatological characteristics and long-term change of SST over the marginal seas of China [J]. Continental Shelf Research, 77: 96-106.
- CAI R S, TAN H J, KONTOYIANNIS H, 2017. Robust surface warming in offshore china seas and its relationship to the East Asian monsoon wind field and ocean forcing on interdecadal time scales [J]. Journal of Climate, 30(22): 8987-9005.
- CHENG L J, ZHU J, 2018. 2017 was the warmest year on record for the global ocean [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 35(3): 261-263.
- DESER C, ALEXANDER M A, XIE S P, et al, 2010. Sea surface temperature variability: patterns and mechanisms [J]. Annual Review of Marine Science, 2: 115-143.
- IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis[R/OL]. Cambridge University Press, 2018, [2021-12-21]. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wgl/>.
- LIU Q Y, ZHANG Q, 2013. Analysis on long-term change of sea surface temperature in the China Seas [J]. Journal of Ocean University of China, 12(2): 295-300.
- PEI Y H, LIU X H, HE H L, 2017. Interpreting the sea surface temperature warming trend in the Yellow Sea and East China Sea [J]. Science China Earth Sciences, 60(8): 1558-1568.
- RODIONOV S N, 2004. A sequential algorithm for testing climate regime shifts [J]. Geophysical Research Letters, 31(9): L09204.
- SHCHEPETKIN A F, MCWILLIAMS J C, 2005. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model [J]. Ocean Modelling, 9(4): 347-404.
- TAN H J, CAI R S, 2018. What caused the record-breaking warming in East China Seas during August 2016? [J]. Atmospheric Science Letters, 19(10): e853.
- TANG X H, WANG F, CHEN Y L, et al, 2009. Warming trend in northern East China Sea in recent four decades [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 27(2): 185.
- XIAO W P, LIU X, IRWIN A J, et al, 2018. Warming and eutrophication combine to restructure diatoms and dinoflagellates [J]. Water Research, 128: 206-216.
- YAN Y W, CHAI F, XUE H J, et al, 2020. Record-breaking sea surface temperatures in the Yellow and East China Seas [J]. Journal of Geophysical Research, 125(8): e2019JC015883.

## SUMMER HIGH TEMPERATURE PHENOMENON AND ITS MECHANISMS IN THE BOHAI SEA FROM 2013 TO 2019

GUO Shi-An<sup>1</sup>, ZHANG Hai-Yan<sup>1</sup>, WEI Hao<sup>1</sup>, ZHAO Liang<sup>2</sup>

(1. *School of Marine Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China*; 2. *College of Marine and Environmental Sciences, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China*)

**Abstract** In the context of global warming, the average temperature increase in the upper ocean will likely cause more frequent extreme high temperature events. The ecosystem of the Bohai Sea will face greater risks and challenges. Understanding the progression of extreme high temperature events will provide strong support for coping with future climate change and disaster prevention and mitigation. A high temperature regime shift of August SST since 2013 was revealed based on long term observations and remotely sensed data, and factors influencing summer warming since 2013 were analyzed based on a physical model ROMS. The SST in August from 2013 to 2019 was 1.37 °C higher than that from 1994 to 2012. In terms of spatial distribution, relatively higher SST distributed mainly in the three bays and the central bank of the Bohai Sea. In terms of vertical structure, the temperature of the upper mixing layer in summer overall increases; the thickness of the upper mixing layer becomes thinner; the pycnocline becomes shallower; surface-bottom temperature difference becomes larger, and the stratification intensity increased by about 17.5% after 2013. The warming phenomenon in the Bohai Sea generally exists in spring and summer after 2013. The warming amplitude shows a linear increase trend in spring, but remains relatively stable in summer. The heat accumulation in spring provides a relatively high initial value for summer warming, which is the key factor for high temperature phenomenon in summer for years in the Bohai Sea. The temperature rise in spring is closely influenced by the decrease of cloud cover and the increase of short-wave radiation in spring. The warming in spring and summer in the Bohai Sea, especially the continuous warming for years, has important impacts on phytoplankton community structure, harmful algae blooms such as red tide and brown tide, the growth of living organisms in marine ranching and aquaculture area, and even the whole ecosystem.

**Key words** sea surface temperature (SST); summer high temperature; heat accumulation in spring; the Bohai Sea