

齐庆华, 蔡榕硕. 中国近海海表温度变化的极端特性及其气候特征研究[J]. 海洋学报, 2019, 41(7): 36–51, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.07.004

Qi Qinghua, Cai Rongshuo. Analysis on climate characteristics of sea surface temperature extremes in coastal China seas[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(7): 36–51, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.07.004

# 中国近海海表温度变化的极端特性及其气候特征研究

齐庆华<sup>1</sup>, 蔡榕硕<sup>1</sup>

(1. 自然资源部第三海洋研究所 海洋环境管理与可持续发展研究中心, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 本文基于 1982–2017 年日再分析数据, 分析了中国近海海表温度变化的极端特性、历史演变、空间格局及可能影响, 并探讨了与全球变化和区域气候变率的关联性。近 30 多年来, 中国近海海表总体升温明显, 尤以春季长江口附近及以南的外部近岸海域升温最为显著, 线性升温速率高达  $0.2^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ 。相比而言, 沿岸海域对气候变暖暂缓的响应可能更为明显; 极端高(低)温强度以显著增强(减弱)为主, 尤以春(夏)季幅度最大。沿岸海域春季极值温差增强显著, 易通过物候变化引起生物迁移和赤潮等生态灾害突发、频发; 北部海域极端事件持续天数大于南部, 其中, 黄海、东海极端高温持续天数增加显著, 可能对渔业资源产生较大影响。受气候变暖暂缓影响, 极端低温持续天数亦显著增加; 极端高温在长江口附近, 台湾海峡和南海北部等海域累积频次上升显著, 未来极端海洋热浪事件可能持续增加, 将对南海珊瑚礁等产生较大影响。极端低温累积频次以显著降低为主。然而长江口及以南沿岸极端低温在冬春季增强明显, 可能对红树林等产生一定影响; 太平洋年代际振荡(PDO)暖位相期间, ENSO 暖事件得到增强, 易引起中国近海海表极端低温的频发。北极涛动(AO)正位相时, 限制了极区冷空气向南扩展, 中国近海海表极端高温频次趋于增加, 其危险性增强。

**关键词:** 极端气候事件; 海洋热浪; 海洋生态系统; 孕灾环境; 区域气候变率; 全球气候变化

中图分类号: P732.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2019)07-0036-16

## 1 引言

作为海洋中的关键热力要素, 海表温度(Sea Surface Temperature, SST)不仅通过海陆气相互作用影响周边的气候与环境演变, 更是维持局地海洋生物、生态系统, 调控其变化和演替, 影响生物资源及其生态服务功能的关键海洋环境因子<sup>[1]</sup>, 此外, 海表温度也是海洋气象灾害(如台风等)重要的孕灾环境要素<sup>[2]</sup>。由于受纬度制约、季节调控以及洋流性质的影响, 海表温度变化具有明显的区域性特征<sup>[3]</sup>。中国近海(主要包括渤海、黄海、东海和南海沿岸和外部近岸海

域)作为北太平洋西部的陆缘海, 它与以暖池–黑潮为中心的西太平洋构成了全球海洋最为复杂的大洋–边缘海相互作用系统<sup>[4–5]</sup>, 同时, 其毗邻我国大陆, 在这里大陆–海洋–大气的相互作用(季风环流和洋流)、海洋变率(主要是 ENSO 和 PDO 等)以及海气遥相关等过程交织在一起, 通过低频尺度海陆气互馈影响, 直接与我国大陆东部气候环境变迁紧密关联<sup>[6–8]</sup>。特别是全球变暖背景下, 中国近海已成为我国, 尤其大陆东部及沿海地区有关气候与环境典型变化及成因研究的重点海区之一<sup>[7]</sup>。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次科学评估报告指出<sup>[1]</sup>, 从 1880 年到 2012

收稿日期: 2018–07–22; 修订日期: 2018–10–27。

基金项目: 国家重点研发计划“全球变化及应对”重点专项(2017YFA0604901); 福建省自然科学基金面上项目(2017J01076); 中国清洁发展机制基金项目(2014112)。

作者简介: 齐庆华(1978—), 男, 河北省保定市人, 副研究员, 主要从事海陆气相互作用与气候和环境变化及灾害风险评估与应对研究。  
E-mail: qqh\_2002@163.com

年的100多年时间里,全球陆表平均温度始终处于增长趋势,其中海洋上层尤其是近表层已发生显著变暖,但上升的速率和幅度在时空上有很大的区域性差异。尤其海洋环境热力要素的空间梯度在全球气候变化一致性和气候变化区域响应的非均匀性上很可能起着关键性作用。其中海温梯度则体现为海洋(极地除外)对气候变化区域响应的放大器效用,并与局地关键海洋热动力过程和区域性气候变率密切关联<sup>[6]</sup>。Wu等<sup>[9]</sup>对1900–2008年的8个海表温度和海表气温数据集进行趋势分析,结果显示,20世纪沿着全球西边界流路径(如黑潮、墨西哥湾流等,其邻近区域为海温梯度大值区)海表温度增长率是全球平均海表温度增长率的2~3倍,形成“热斑”现象。受黑潮影响,以中国近海为主体的海区就是最主要的海洋“热斑”<sup>[3]</sup>。特别指出的是,20世纪80年代和90年代是海温上升最快,也是增温幅度更为显著的两个时期,而进入21世纪,全球变暖出现了暂缓现象,在变缓期,中国近海海表温度出现了显著的下降趋势<sup>[10]</sup>。说明中国区域海洋的全球气候变化响应(暂不考虑反馈作用)特征显著,然而其时空差异和局地特征有待进一步分析。

就气候学统计而言,环境要素严重偏离其平均态时,就会发生极端事件<sup>[11]</sup>,这里特别强调极端气候事件的危险性和致灾性。尤其在生态学意义上,海洋极端气候事件是指海洋环境要素对生物生态系统以及人类社会经济活动产生显著影响,进而导致严重的环境和生态灾害。有关海洋极端气候事件的研究起步较晚,近期,全球气候变暖背景下海洋热浪的发生及其历史演变和影响引起了广泛关注。研究表明,随着气候的变暖,全球海洋热浪的频次和强度呈上升趋势<sup>[12–14]</sup>,并对海洋环境和海洋生态系统(如重要鱼类和珊瑚礁等主要生态系统)产生了严重影响<sup>[15–19]</sup>。此外,沿岸和近岸海域海洋热浪和海洋低温寒潮并存<sup>[20]</sup>。然而,由于观测资料(如时空分辨率和均一性等)的限制、极端气候事件本身的复杂性以及与全球变化和区域气候变率等的共同影响(协同和相消)与互馈作用,当前对气候变化下区域性海洋环境要素变化的极端特性、时空演变特征、变化格局与地区差异等的系统认识还十分不足,存在极大的不确定性<sup>[2, 11]</sup>。有关气候变化下区域性海洋关键环境因子的可能影响、致灾性以及危险性分布等也尚待系统开展。鉴于全球变暖背景下,各类极端天气、气候事件均呈现出不同的时空演变特征,人类社会将可能面临更高的灾害风险<sup>[1–2, 11]</sup>。在我国海洋领域,需着手从大的时空尺

度综合分析对比海洋环境关键要素变化的极端特性及其时空演变的局地特征和差异,进而深入理解海洋极端气候事件的时空变化格局和成因,为海洋资源、环境和生态的气候与灾害风险综合评估奠定基础。目前,有关我国近海区域海表温度极端特性、时空格局和气候特征的分析研究还未见报道。值得探究的是,全球气候变化背景下,中国近海海表温度变化的极端特性、空间格局及可能的影响和危险性如何?这一科学问题显然具有重要的科学与实践意义,它既是气候变化研究领域关注的热点科学问题,也是灾害风险定量评估的重要内容。

实践意义上,最为关注的是环境要素值在变化方向上(如极端低或高)的时空累积效应,即时空集中性,主要包括时间的持续性和空间的群发性,加之极端气候事件强度和频次的变化,它们是形成极端事件并被保持的重要特性,也是极端气候事件等致灾因子影响及其危险性和致灾程度的重要因素,由此,构建有针对性的极端气候事件的指数体系是诊断和分析研究极端事件变化、影响(危险性)以及风险评估与应对决策的重要前提。鉴于此,本文拟基于卫星与现场观测融合分析数据,建立中国海海表温度变化极端特性相关的气候指数,从气候变化角度揭示全球变暖背景下中国近海海表温度极端气候事件可能的时空演变特征、规律,并重点分析极端气候事件的变化格局和局地差异,以及对全球变化和区域气候变率的响应特征和作用关系,进而为深入分析研究中国近海海表温度极端特性和极端事件的可能影响与危险性,以及我国有关海岸带和沿海地区全球变化综合风险评估提供重要科学依据,同时也为提升海洋领域防灾减灾和科学应对海洋气候与环境变迁的能力提供科技支撑和服务保障。

## 2 数据和方法

20世纪80年代以来,全球气候经历了变暖的加速期和暂缓期,全球海洋对此的响应较为复杂,区域性差异显著<sup>[1]</sup>。有关全球气候变化下地区性海洋环境要素变化及其极端特性的相关研究具有一定的挑战性,尤其对数据提出了更高要求。本文中为分析气候变化下中国近海海表温度变化的极端特性及其历史演变特征与时空格局,选用了东北亚区域海洋观测系统(NEArgoOS)中分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的日平均海表温度再分析数据。数据充分融合了卫星与现场观测,时间区间为1982年1月1日至2017年12月31日。由于观测资料丰富、分辨率高,并具有很好的

一致性和连续性,该数据在海岸带和沿海地区的海洋气候(如厄尔尼诺等)、海洋生态环境(如污染等)和生物资源(如鱼类等)变化以及海洋灾害的实时监测与预报、数据印证与分析对比等方面得到了较好地应用,为认识海洋、合理开发海洋和保护海洋提供了重要依据<sup>[21-22]</sup>。此外,区域气候及海洋变率指标主要取自中国气象局国家气象信息中心和美国 NOAA 气候预测中心(<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/>)。一般地,获取用于识别极端事件的阈值主要有两种方法。一种是直接给出特定的阈值,也即绝对阈值,如,可以参考环境要素的影响程度给出特定值;而对于具有显著空间差异的环境要素而言,则主要基于概率统计分析计算得到判定阈值,称为相对阈值。本文主要从气候变化角度,分析中国近海海表温度的极端特性,从技术方法和参考意义上考虑,选择相对阈值作为判别依据。就极端事件的概率性而言,它们的数据结构可以用某种最优的概率分布模式(或模型)加以描述<sup>[23]</sup>。在其概率分布的两端尾部大约 10%(或 5%)的小概率事件及其分位数,是环境要素在某一气候基准期(鉴于数据限制并依据世界气象组织建议,本文选为 1982–2011 年共 30 年)变量分布的极值端点,反映了极端气候的统计特征状况。统计学分析表明,样本的经验分布函数(Empirical Distribution Function, EDF)可以作为总体概率分布的一个良好的近似。鉴于其方法简便,且不易受到要素本身和资料的影响,本文基于无参数估计的经验分布函数,拟合海洋环境要素的概率分布,并通过插值获取百分位数,以此确定相对阈值。需指出的是,相对阈值的百分位数大小取决于研究,同时也需要兼顾统计稳定

性<sup>[24]</sup>,一般用于气候变化研究的百分位值不宜取得过于极端。本文未特别说明,确定极端海表温度的百分位值均取为 90%<sup>[25-27]</sup>。

如前所述,建立具有针对性的极端气候事件的指数体系是诊断和归因分析极端气候事件变化、分离量化影响(危险性)以及风险评估和应对决策的重要前提。为重点分析探究全球变化下中国近海海表温度的极端特性和气候特征,本文围绕环境要素的区域性气候平均态、本身特性以及极端性和影响建立相应指数。一般地,极端气候事件(致灾因子)的强度越大、频率越高以及持续的时间越长,发生灾变的可能性越大,其影响以及风险的危险性就越大<sup>[2,11]</sup>。因此,通常采用强度和频率作为极端气候事件的基本要素,并考虑环境要素本身的特性和致灾性来建立相应的指数。世界气象组织提出了有关极端气候指数作为气候变化研究的统一标准<sup>[26]</sup>。参照此定义标准,本文构建了反映海表温度极端特性和影响的相关指标指数,包括海表温度的气候平均状况、强度以及反映时空集中性,如持续性和累积频次等相关的指数,以此较全面分析极端性海温的时空演变规律,并揭示其区域性(一定层面反映极端事件的群发性)特征以及与全球气候变化、区域性海洋和气候变率的关联性。从而为极端海表温度的危险性和致灾性风险分析评估提供依据。极端海表温度相关的气候指数具体参见表 1。

本文中气候变化趋势的分析采用最小二乘法,并使用非参数的 Kendall-tau 方法检验其显著性。另外,文中采用时滞相关分析等方法,以分析探讨中国近海海表温度的变化格局、局地差异,及其对全球和区域

表 1 海表温度极端特性的气候指数

Tab. 1 The climatic index of extremes for sea surface temperature

极端气候事件(指标)	指数类型	指数名称	单位
海表温度	平均状况	海表温度 海表温度较差(极值温差)	℃
	极端特性(强度)	第90%百分位海表温度(极端高阈值)	
		高于第90%百分位海表温度均值(强度)	
		第10%百分位海表温度(极端低阈值)	
		低于第10%百分位海表温度均值(强度)	
	极端特性(持续性)	高于极端高阈值的平均持续日数	日数
		高于极端高阈值的最大持续日数	
		低于极端低阈值的平均持续日数	
		低于极端低阈值的最大持续日数	
	极端特性(累计频次)	极端高海温日数的占比	%
极端低海温日数的占比			

气候变率的响应与反馈作用特征。

### 3 中国近海海表温度的平均状况及气候特征

气候变化下全球洋盆尺度的海表均呈现出显著的变暖<sup>[1]</sup>, 然而, 在全球一致性变暖的背景下, 由于地理环境的差异, 受区域气候变化、变率与关键热动力过程等作用体系调控的不同, 各区域海洋对气候变化的响应具有非均匀性, 特别应关注的是区域性海洋气候变化的方向、速率和幅度差异<sup>[6]</sup>, 而气候意义上, 这均与区域海洋环境要素的平均状况密切相关<sup>[6, 9]</sup>。尽管可以根据不同的标准以多种方式定义极端气候事件, 但清楚理解环境要素的极端特性与气候均值之间的联系对认识极端气候事件(含义)及其变化是非常重要的<sup>[27-28]</sup>。此外, 对平均状况的分析也从一定侧面反映数据的适用性。因此, 本文首先从海表温度平均状况的角度, 简要分析中国近海海表温度的平均分布及气候趋势特征。中国近海海域受季风气候控制, 海表温度呈现鲜明的季节特征。以下分析主要围绕1982-2017年期间年(1-12月)、春季(3-5月)、夏季(6-8月)、秋季(9-11月)和冬季(12月至翌年2月, 年份限于1982-2016年)等不同时期的海表温度及其极端特性的变化和差异展开。由图1可见, 数据再现了中国近海海表温度等值线西南-东北走向的特征, 年和四季平均的气候态具有一致性, 体现出海表温度值南高北低的平均状况, 以及沿岸海表温度低于外部近岸海域的特征。相比于南海, 东海的海表温度变化的季节循环特征更明显(图1左)。中国近海年平均的海表温度近30多年来上升趋势显著, 特别是渤海西部沿岸和长江口附近及以南近岸海域上升趋势最为显著(图1a右)。季节变化上, 中国近海的长江口附近及以南近岸海域海表温度在各季节具有较一致的显著上升趋势, 比较而言, 春季上升幅度较大, 升温幅度最大区域位于长江口及邻近海域, 30多年来线性增幅高达2.60℃。值得指出的是, 中国近海海表温度变化趋势的季节差异主要体现在长江口以南的沿岸海域, 冬、春季节变化趋势以下降为主, 特别是冬季长江口以南的沿岸海域海表温度的下降趋势最为明显, 但显著性较小(图1b右和图1e右), 而夏、秋季节则为较一致的上升趋势。总之, 近30多年来, 除沿岸海域外, 中国近海海表温度上升明显, 特别是长江口以南近岸海域海表温度上升趋势最为显著, 线性升温速率超过0.2℃/(10 a), 这与已往分析结果较为吻合<sup>[10, 29]</sup>。此外, 中国近海的沿岸海域和外部近岸海

域的海表温度呈现出不同的变化趋势, 季节差异明显。这可能与沿岸海域影响要素复杂(如沿岸上升流、河口陆源输入等), 且更易受到全球变化(如1990年代末的气候变暖暂缓)<sup>[10, 20]</sup>和径流等陆地气候变化以及人类活动的影响有关, 同时也与数据时空的分辨率和区间选取不同以及再分析数据对沿岸和近岸海域描述的精细程度和目前的准确性有关。因此, 鉴于沿岸海域环境要素变化及其影响因子的复杂性, 在今后中国近海海洋的环境与气候变迁研究中, 沿岸海域和海岸带更值得深入关注, 尤其应着力提升有关海域的观测研究能力。

为反映中国近海海表温度在不同时期的变化幅度(即一定时期内最大值与最小值之差), 本文引入极值温差的概念。图2显示了年内和四季极值温差的气候态和变化趋势。图2显示, 极值温差和纬度存在一定关系, 高纬度地区在各时期的极值温差较大, 沿岸海域的极值温差大于外部近岸海域。就季节差异而言, 春、秋季节的变化幅度较大, 而夏季和冬季的变化幅度较小(图2左)。近30多年来, 沿岸海域的极值温差主要以增加趋势为主, 而外部近岸海域减小趋势显著。这与气候变暖背景下海表温度的变化趋势和型态不无关系。即海表海水的趋暖会减小极值温差(图2右)。值得提出的是, 我国沿岸海域极值温差增强显著, 特别是冬、春季节(图2b右和图2e右)的增强, 不仅会引起物候的变化<sup>[30]</sup>, 进而可能严重影响生物生态的演替与变迁, 而且, 由于海表温度变化幅度大, 气候变化下体现出不稳定性, 极易引起如赤潮等生态灾害的突发和频发<sup>[8]</sup>。

### 4 中国近海海表温度的极端特性与气候特征

图3为中国近海海表极端高温判别阈值(第90百分位海表温度值)的统计分布, 如前所述, 中国近海海表温度局地差异显著(图1)。而阈值分布与海表温度的气候分布型态具有一致性, 其大小呈现出南高北低的特征(图3左)。鉴于由百分位阈值作为判别依据得到的特定格点的极端气候事件, 具有不同的强度(温度值), 为整体反映极端事件的强度, 本文进一步计算了各格点极端事件的海表温度平均值(定义见表1), 这里给出了各时期中国近海海表极端高温强度的变化趋势(图3右)。从年变化来看, 渤海的西部沿岸和长江口以南海域具有明显增强的趋势, 4个季节的极端高温强度在变化方向和幅度上具有区域性差异。春、夏季中国近海特别是东海海表极

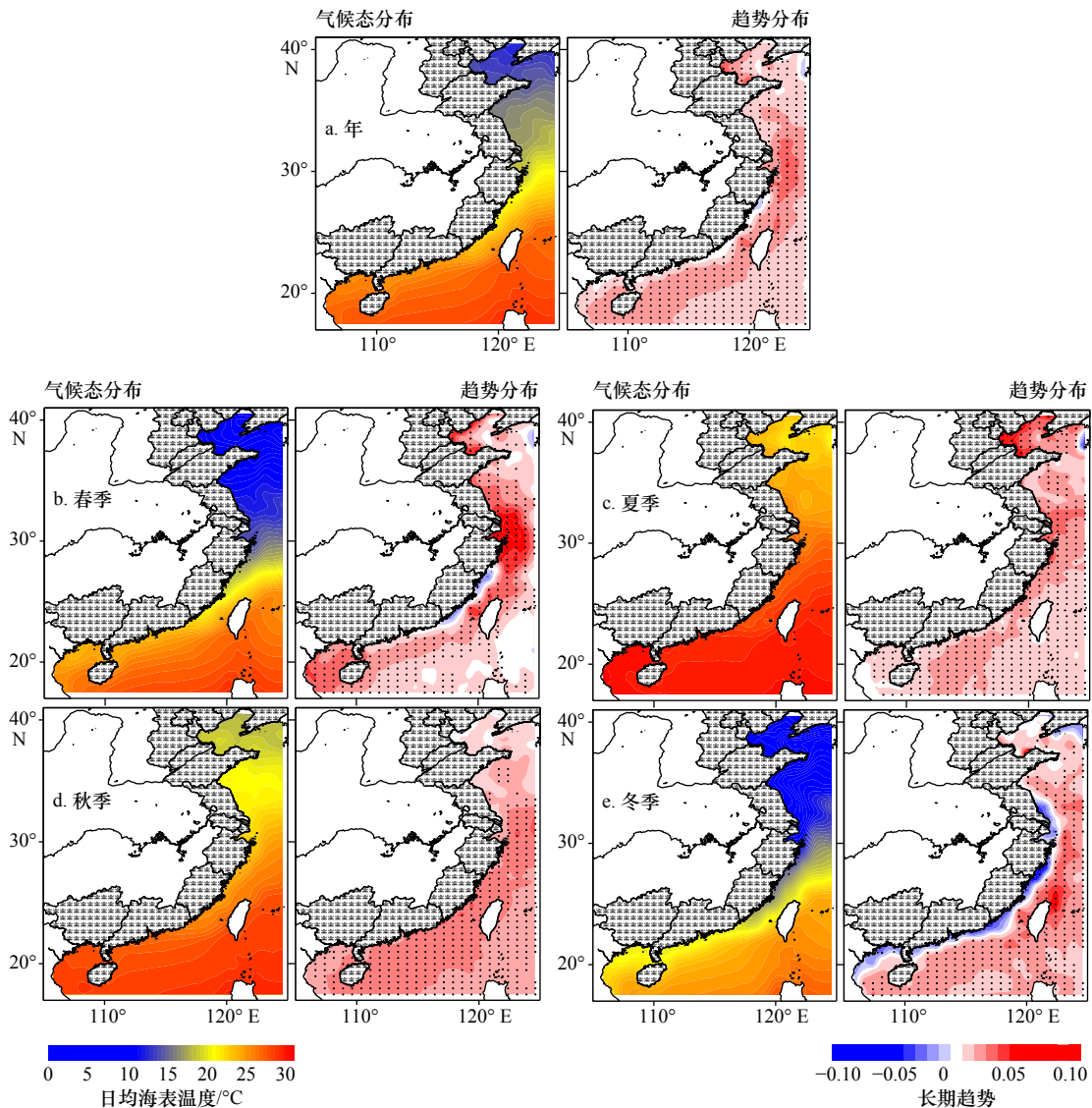


图1 中国近海日均海表温度气候态(1982–2011年)分布(左)及长期(1982–2017年)变化趋势(右,圆点为超过90%显著性检验的区域)

Fig. 1 Climatic status (1982–2011) distribution (left) of daily mean sea surface temperature in coastal China seas and corresponding long-term (1982–2017) trends (right, the dots for stations with more than 90% significance)

端高温的强度呈现出较一致的增加趋势,大值区位于渤海西部沿岸、长江口以东海面。秋季海表极端高温的强度趋势较弱,其大致以长江口为界,呈现出反位相的变化趋势。冬季海表极端高温强度的趋势变化显著区主要位于长江口以南,且长江口及附近的沿岸海域呈减弱趋势,而外部近海区域则呈增加趋势。总之,在全球变暖背景下,中国近海海表温度极端高值的强度以显著增加为主要特征,尤以春季的变化幅度最大。同时,强度的变化具有一定的区域性差异,春季长江口以北的东海极端高温的强度显著增加,而其他季节强度显著增加的区域位于长江口附近海域及长江口以南的外部近岸海域。此外,冬季长江口附近沿岸海域极端高温强度的减弱趋势明显。

中国近海海表极端低温的判别阈值(第10百分位海表温度值)统计分布与海表温度的气候分布型态同样具有一致性,阈值的大小呈现南高北低的特点(图4左)。中国近海海表极端低温强度的变化以减弱(温度增加,极端低温的强度降低,反之亦然)趋势为主,其变化的季节差异明显。海表极端低温强度在夏季显著减弱的幅度最大,主要位于长江口及以北的东海海域。冬、春季节,海表极端低温减弱的显著区主要位于长江口附近及以南的外部近岸海域,而沿岸海域增强的趋势明显。秋季海表极端低温减弱趋势较小,显著区主要位于黄海、东海和南海北部。中国近海极端低温强度的变化均与全球变化区域响应下海洋表层温度的局地气候变化密切相关(图1)。

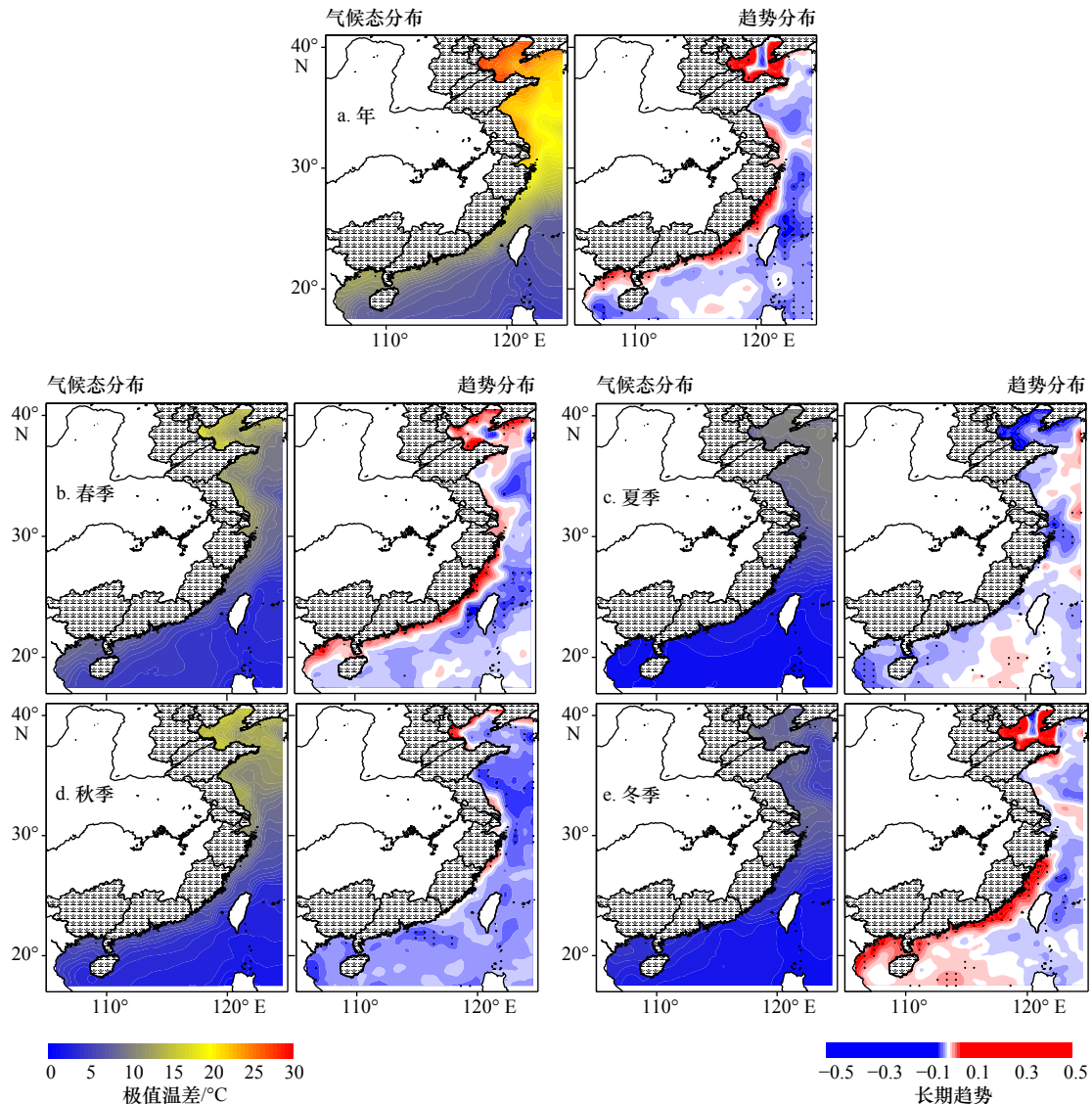


图2 中国近海海表极值温差气候态(1982–2011年)分布(左)及长期(1982–2017年)变化趋势(右,圆点为超过90%显著性检验的区域)

Fig. 2 Climatic status (1982–2011) distribution (left) of sea surface extreme temperature difference in the coastal China seas and corresponding long-term (1982–2017) trends (right, the dots for stations with more than 90% significance)

综上所述,中国近海海表温度极值或极端值与其平均状况(气候均值)密切相关,两者的分布形态和变化趋势具有一致性。中国近海海表极端温度不同季节的时空差异明显。近30多年来,沿岸海域与外部近岸海域极端海表温度强度的气候趋势呈反位相变化。尤其长江口及以南沿岸的极端低温在冬、春季节强度的增强,可能会对海岸带和沿海的生态系统(如红树林)等产生一定影响。

持续性是极端事件危险性和致灾的重要特性。为反映中国近海海表极端温度的持续性,分别计算了中国近海海表极端海温年内的平均和最大持续天数。图5显示,年内海表极端高温的平均持续天数和最大持续天数呈现出北高南低,沿岸大于外部近海

域的特点。渤海和南海西北部海表极端高温的平均持续天数具有减少的趋势。而长江口以北的黄海、东海海域海表极端高温的平均持续天数以增加为主。海表极端高温的年最大持续天数变化趋势总体不明显,其中渤海和南海北部减少趋势较大,而黄海、东海部分海域增加趋势较显著。这里需要指出的是,气候变化背景下,黄海、东海海域海表极端高温平均持续天数和最大持续天数的增加可能会对该海域生物生态系统和渔业资源造成较大影响<sup>[18]</sup>,相关分析有待进一步深入。

中国近海年内海表极端低温的平均和最大持续天数的气候态分布(图6)同样具有北部大于南部海域,沿岸大于外部海域的特点。趋势变化上,两者均

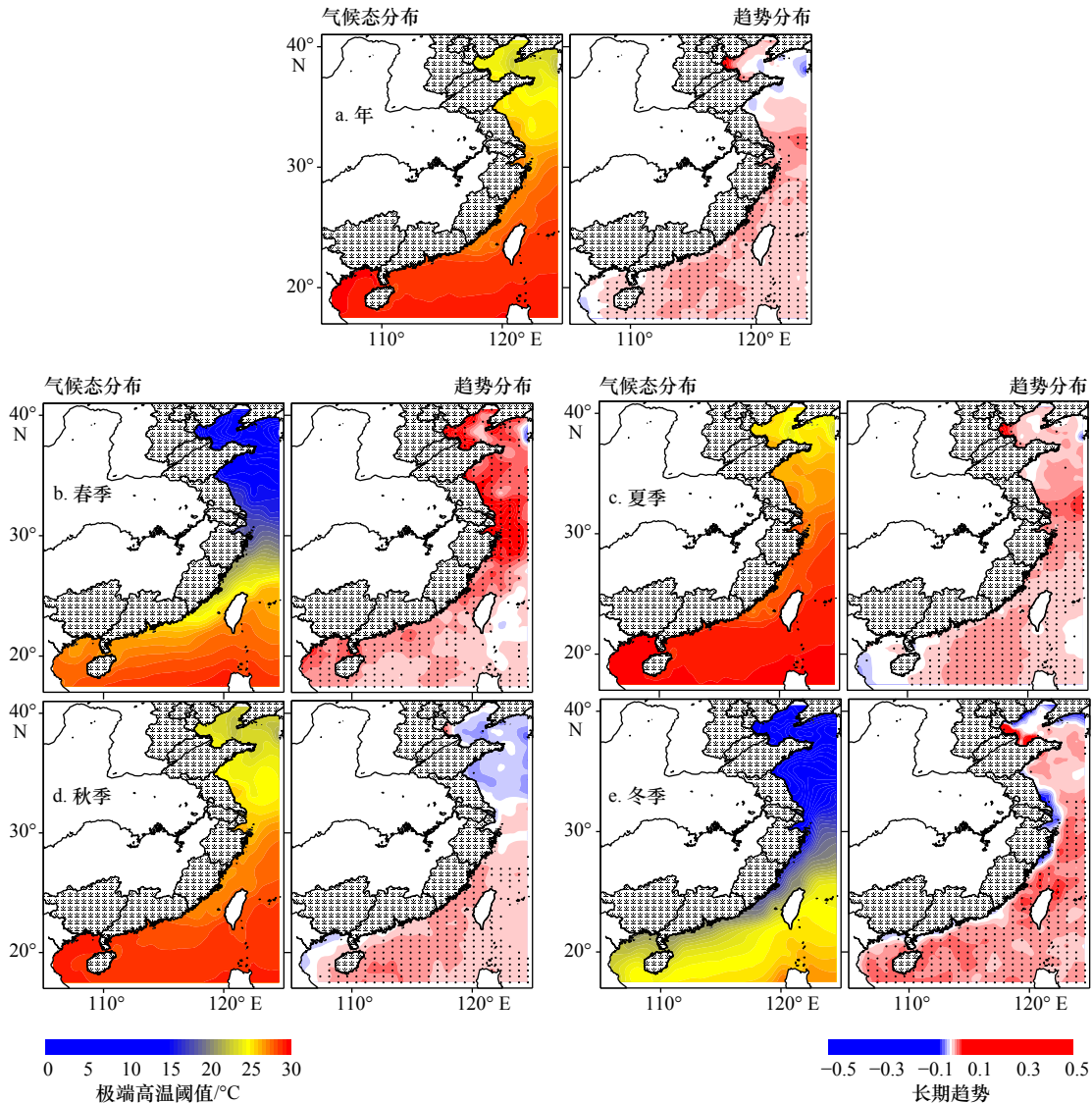


图3 中国近海海表极端高温阈值统计(基准期为1982–2011年)分布(左)及极端事件强度的长期(1982–2017年)变化趋势(右,圆点为超过90%显著性检验的站点)

Fig. 3 Threshold statistics of the extremes (base period: 1982–2011) distribution (left) of sea surface extreme high temperature in the coastal China seas and long-term (1982–2017) trends of the extremes intensity (right, the dots for stations with more than 90% significance)

以显著增加为主,显著区域见于黄海、东海以及南海的中北部海域。而海表极端低温的持续性增加也会对沿海生态系统(如红树林等)产生较大影响<sup>[20]</sup>,相关研究仍有待系统深入。

总之,中国近海海表极端温度的持续天数存在北部海域大于南部海域,沿岸大于外部近岸海域的特点。海表极端温度的持续天数变化趋势存在明显的区域性差异,其中极端高温持续性天数的变化趋势自北向南呈现减少–增加–减少的型态,而极端低温的持续性仍呈现为全海域较为一致的增强趋势。极端海表低温持续性可能受气候变暖暂缓及相关气候变率的影响较大<sup>[10]</sup>。

## 5 中国近海海表极端温度频次变化及与区域气候变率的关联性

极端事件的频次变化是极端事件发生、演变及其影响和致灾性的重要基础指标。本文以中国近海海表极端温度事件的累积频次变化表征极端海表温度的发生发展特征,图7给出了极端高温季节内累积频次的日数占比气候态分布,由图可见,各个季节中国近海海表温度极端高值日数占比的高值区主要位于长江口及以南海域(图7左),受气候变暖影响,极端高温的比例呈显著增加趋势(图7右)。同时,极端高温日数占比高的区域,其显著变化的趋势幅度也较大。

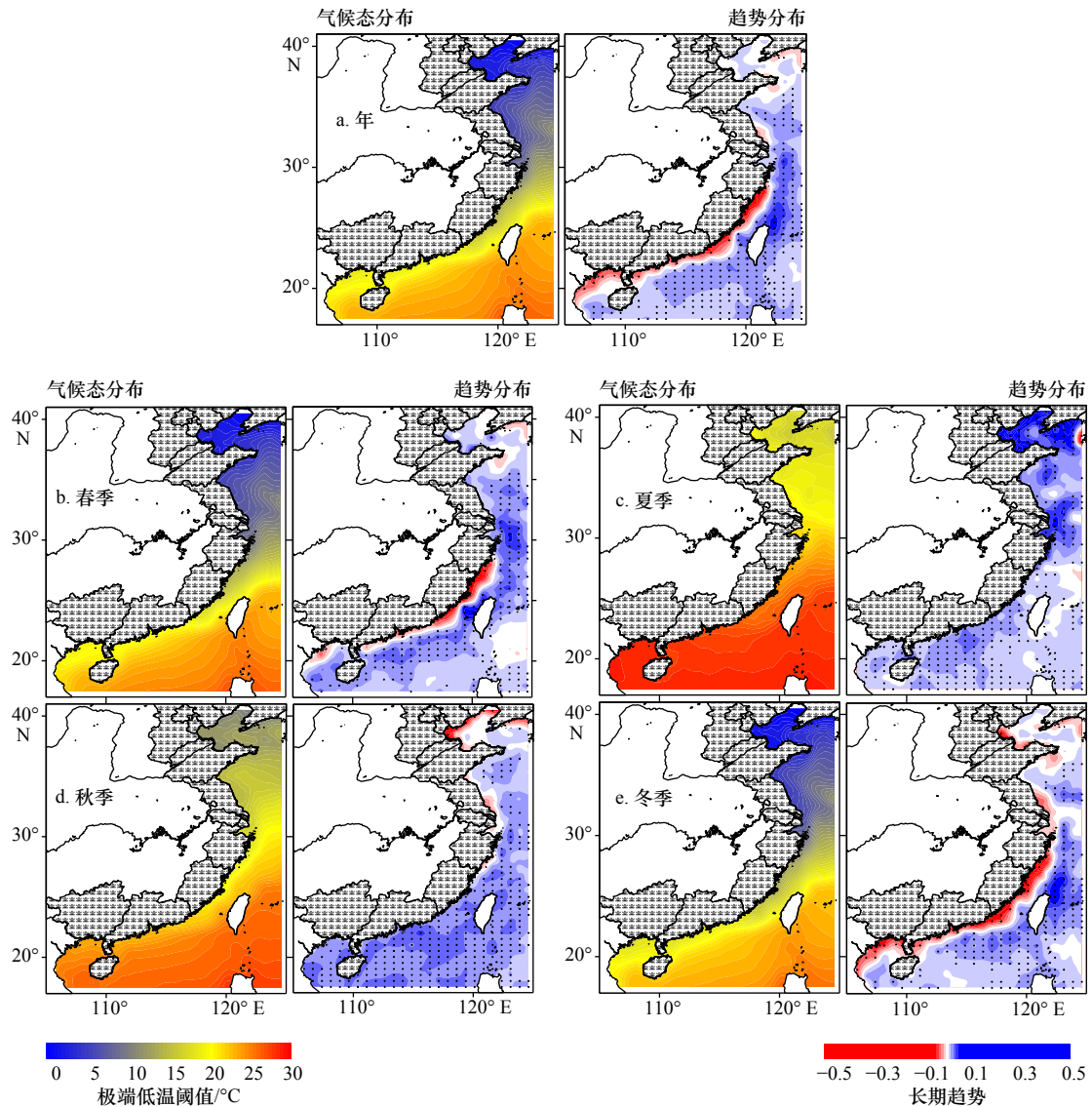


图4 中国近海海表极端低温阈值气候态(基准期为1982–2011年)分布(左)及极端事件强度的长期(1982–2017年)变化趋势(右,圆点为超过90%显著性检验的站点)

Fig. 4 Threshold statistics of the extremes (base period: 1982–2011) distribution (left) of sea surface extreme low temperature in the coastal China seas and long-term (1982–2017) trends of the extremes intensity (right, the dots for stations with more than 90% significance)

极端低温事件季节内累积频次的日数占比气候态分布显示(图8左), 全海域极端低温日数占比趋势变化以显著减弱为主。同时, 冬、春季节长江口以南海区变化趋势在沿岸和外部近岸海域呈明显的反位相变化。其中, 沿岸极端低温日数所占比例呈明显增加趋势, 外部近岸海域极端低温日数所占比例则以显著的下降趋势为主。

就中国近海海表极端温度的累积频次而言, 各季节极端高温累积频次占比在全海域呈较为一致的上升趋势。近30多年来, 极端高温在长江口附近海域、台湾海峡邻近海域以及南海北部(如北部湾等)海域各时期的累积频次(日数)占比较大, 增加趋势显著。

极端低温累积频次则以显著的减小趋势为主。此外, 冬、春季节在长江口以南沿岸海域极端低温累积频次占比的上升趋势明显。

以上对中国近海海表温度的极端特性等进行了分析, 就平均状况和气候特征而言, 它们与海表温度本身的气候分布和变化趋势的型态具有较好的一致性, 可见气候变化背景下, 海洋环境要素本身及其均值(或总量)、方差、极值、较差和统计分布等的平均状况(受区域气候变化、变率与关键热动力过程调控)与趋势特征(方向、速度、幅度及相关的稳定度)是海洋极端气候事件赖以形成和发展的重要气候背景, 决定了极端气候事件的性质和极端特性(强度、

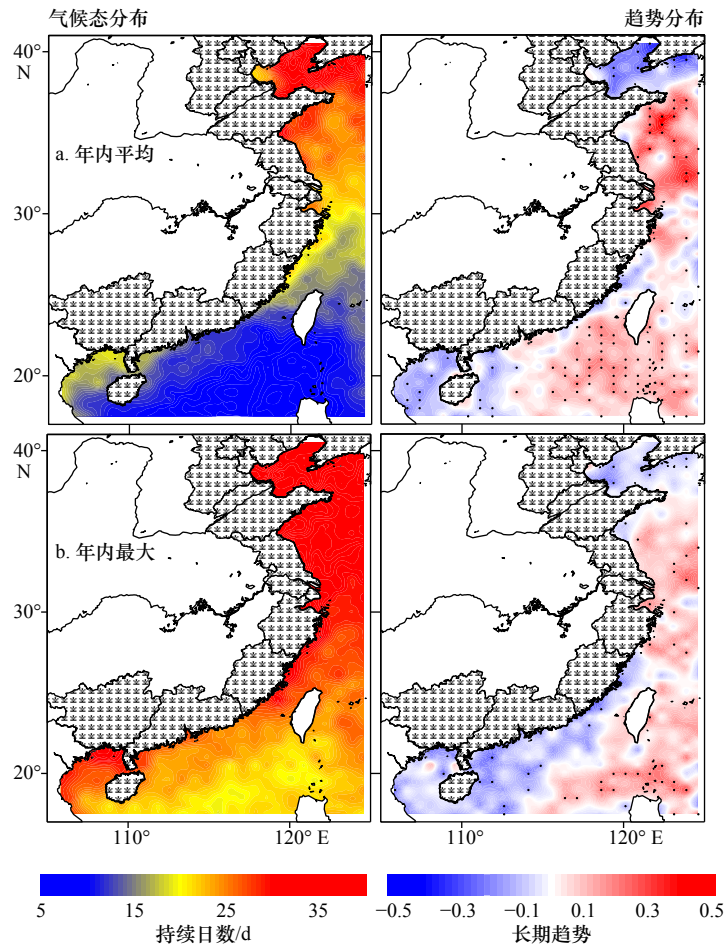


图5 中国近海海表温度极端高值年内平均(a)和最大(b)持续日数气候态(1982–2011年)分布(左图)及长期(1982–2017年)变化趋势(右图,圆点为超过90%显著性检验的站点)

Fig. 5 Climatic status (1982–2011) distribution (left) of annual mean (a) and maximum (b) consecutive days of sea surface high temperature extremes in the coastal China seas and corresponding long-term (1982–2017) trends (right, the dots for stations with more than 90% significance)

频次、持续、急转、密集和群发等)演化的时空格局。应特别在时空格局差异对比时予以考虑,以增强可比性。中国近海海洋气候背景的变迁与全球和区域性的气候变率密切相关。就方法而言,相关分析是探究事物间相关关系,进一步揭示关联性、互馈作用、影响途径及其内在机制机理的重要前提<sup>[6]</sup>。为简要探讨中国近海海表极端温度发生发展与区域性气候变率的相关特征和作用关系。从而为中国近海海表温度极端事件的变化与成因提供依据,在计算中国近海海表极端高温和极端低温的年内累积频次日数占比的基础上,将其与区域性的气候变化变率作时滞相关分析。如前所述,由于中国近海所处的复杂地理环境,区域性海洋变率以及海气遥相关等过程与近海环境的变化关系密切。这里相关气候变率指标指数主要选取厄尔尼诺–南方涛动(ENSO)、太平洋年代际振荡(PDO)和北极涛动(AO)等。ENSO是热带太

平洋地区海–气系统年际气候变率的最强信号,而PDO则是一种年代际时间尺度上的气候变率强信号,它是叠加在长期气候趋势变化上的一种扰动,影响ENSO事件的频率和强度,直接造成太平洋及其周边地区气候的年代际变化<sup>[5]</sup>。在PDO暖位相时,ENSO的暖事件厄尔尼诺得到增强,而冷事件拉尼娜受到抑制。由于ENSO暖事件期间,影响我国近海的黑潮等西边界暖流减弱,暖水向中东太平洋发展<sup>[3–4]</sup>,包括中国近海海域的西太平洋海表温度因而处于负异常状态。相关分析表明(图9a,图9b),PDO暖位相时,在ENSO暖事件期间,中国近岸及受源区黑潮暖流严重影响的东海海域极易形成极端低温事件<sup>[3]</sup>,且PDO的影响更广泛;AO是北半球热带外大气低频变率的主要模态,当北极涛动处于正位相时,北极地区受低气压系统支配,极地范围内的冷空气受到限制,使其难以向南扩展,有利于近海海表温度异常升高,

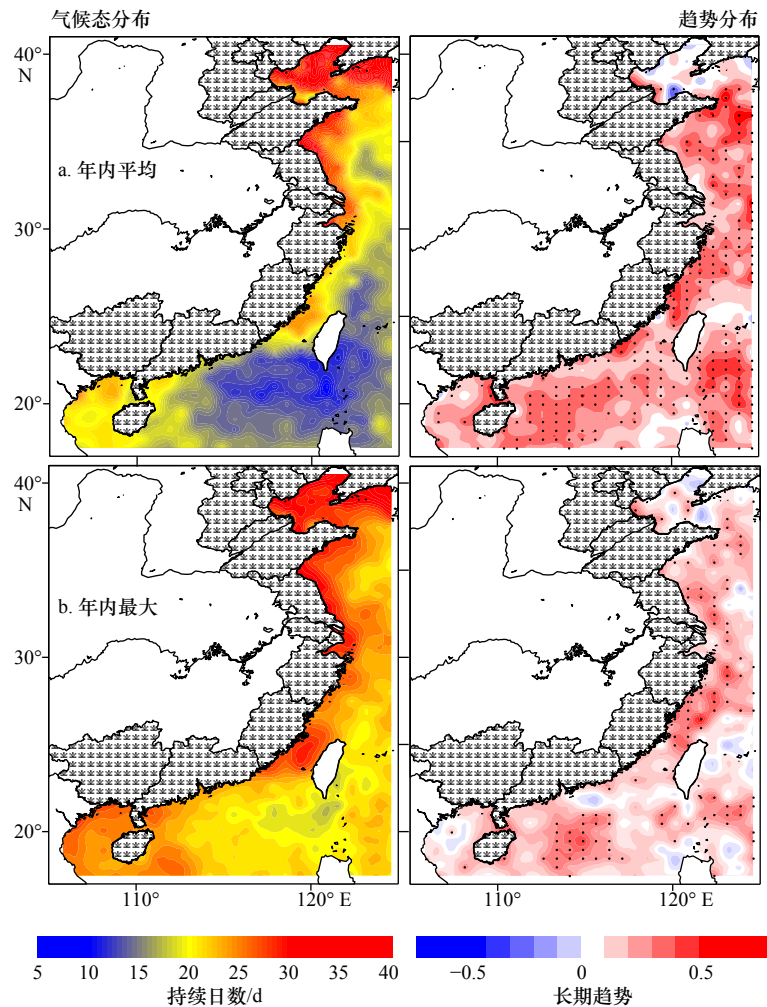


图6 中国近海海表温度极端低值年内平均(a)和最大(b)持续日数气候态(1982–2011年)分布(左图)及长期(1982–2017年)变化趋势(右图,圆点为超过90%显著性检验的站点)

Fig. 6 Climatic status (1982–2011) distribution (left) of annual mean (a) and maximum (b) consecutive days of sea surface low temperature extremes in the coastal China seas and corresponding long-term (1982–2017) trends (right, the dots for stations with more than 90% significance)

进而易引起中国近海海域的极端高温事件。反之,冷空气南下,可严重影响我国东部气温,并易于造成中国近海尤其沿岸海域极端低温事件频发(图9c)。以上更为深入细致的机制机理将另文报道。

## 6 结语

极端气候事件的形成和演变机制机理是极其复杂的。一方面极端气候事件发生发展的驱动因素尤其是多尺度作用体系(如要素本身梯度分布和相互配置)复杂,另一方面在于其发生发展的制约和调控过程机制(如环流形势、涡旋传播和破碎及波流相互作用等非线性过程或混沌效应等)产生的不确定性(涉及极端事件的突发和可预报性等)。目前主要从统计学意义上研究其演变特征和规律。本文基于最新的日平均再分析数据,参照国际极端气候事件定义标

准,从技术方法层面和气候变化研究角度,通过极端气候指数的构建,围绕近30多年来中国近海海表温度的平均状况、极值特征和极端特性,统计分析了气候变化下中国近海海表极端温度的变化格局、气候演变特征,并初步探讨了其与区域气候变率可能的作用关系,得到的主要结论如下:

(1)除沿岸海域外,近30多年来中国近海海表总体升温明显,特别是渤海西部沿海、长江口附近及以南近岸海域升温趋势最为显著,线性升温速率超过 $0.2^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ ,这可能会增加海洋热浪事件的发生频次。各季节海表温度趋势变化的格局具有一致性,以升温为主,且冬、春季上升幅度较大,升温幅度最大区域主要位于长江口及邻近海域,近30多年来的线性增幅高达 $2.60^{\circ}\text{C}$ 。此外,中国近海的沿岸海域和外部近岸海域的海表温度呈现出不同的变化趋势,季节

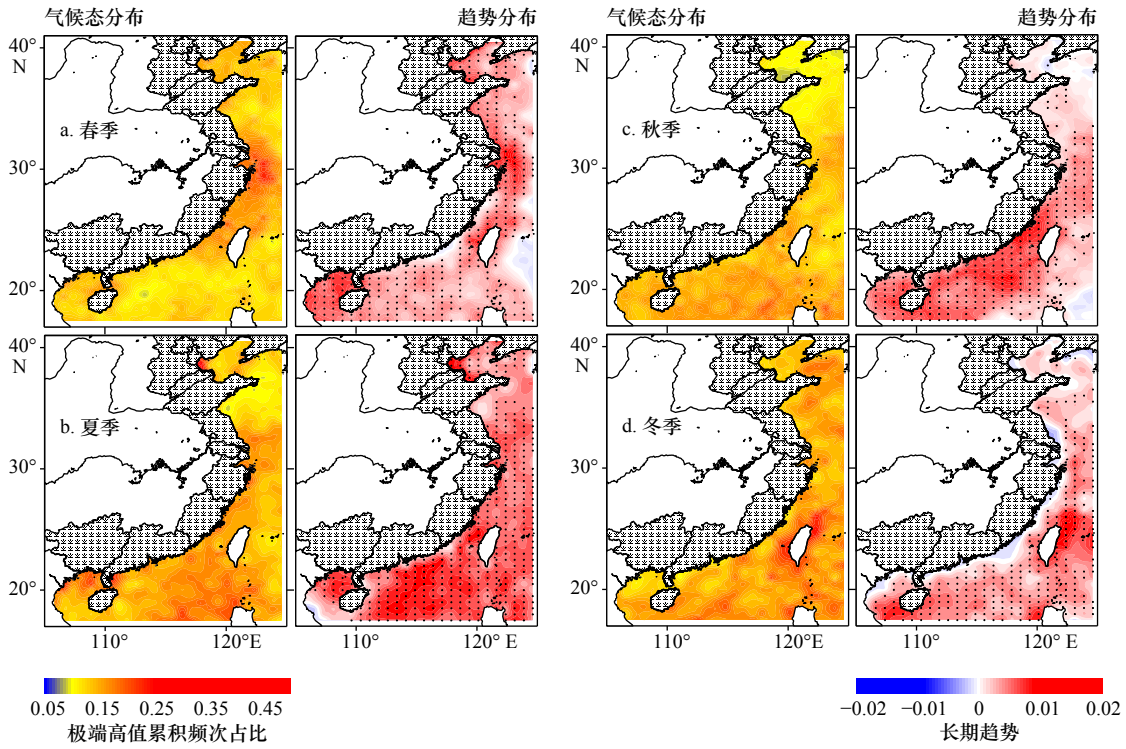


图 7 中国近海海表温度极端高值季节内累积频次占比气候态(1982–2011 年)分布(左图)及长期(1982–2017 年)变化趋势(右图, 圆点为超过 90% 显著性检验的区域)

Fig. 7 Climatic status (1982–2011) distribution (left) of seasonal fraction above extreme high temperature in the coastal China seas and corresponding long-term (1982–2017) trends (right, the dots for stations with more than 90% significance)

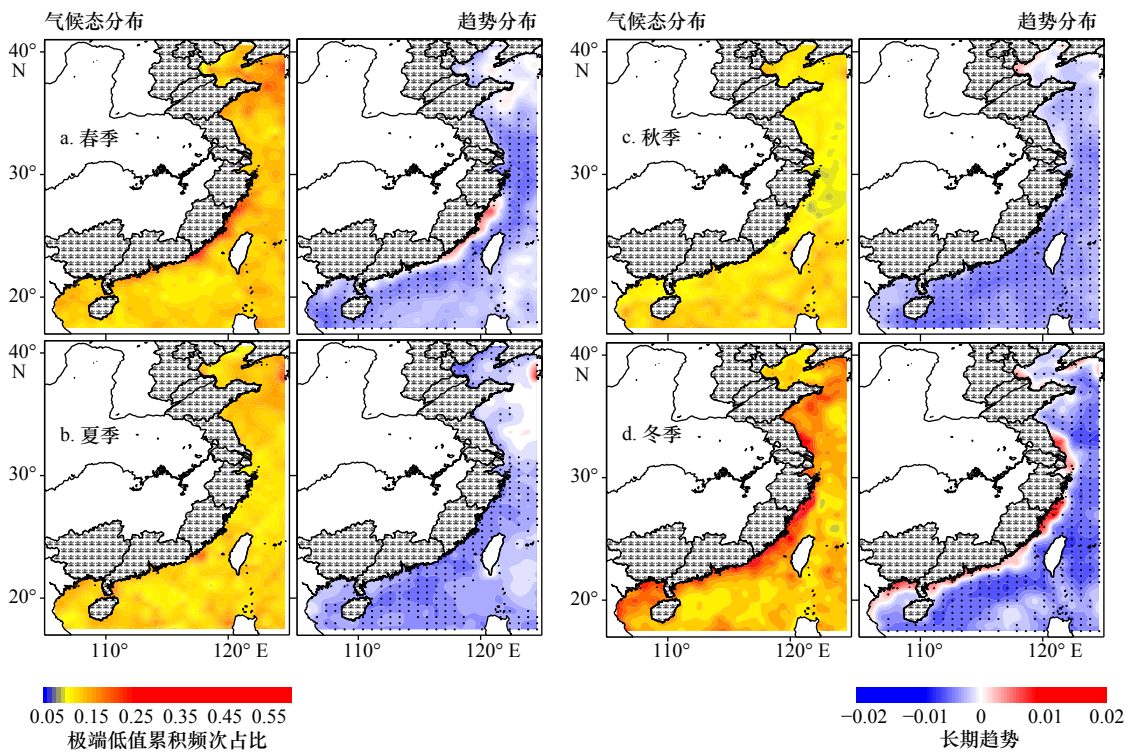


图 8 中国近海海表温度极端高值季节内累积频次占比气候态(1982–2011 年)分布(左图)及长期(1982–2017 年)变化趋势(右图, 圆点为超过 90% 显著性检验的区域)

Fig. 8 Climatic status (1982–2011) distribution (left) of seasonal fraction above extreme low temperature in the coastal China seas and corresponding long-term (1982–2017) trends (right, the dots for stations with more than 90% significance)

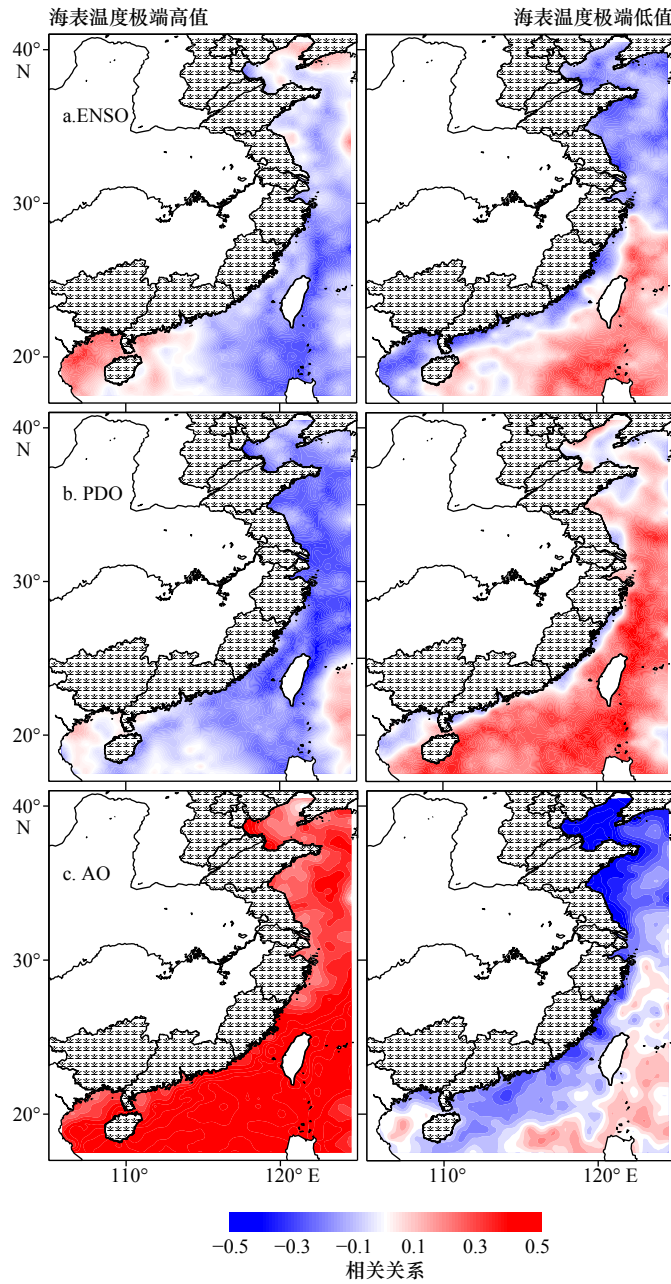


图9 中国近海海表温度极端高值(左)和极端低值(右)年内日数占比与区域气候变率的相关性分布 (彩色区域超过90%的显著性检验)

Fig. 9 Correlation matrix between annual fraction of cumulative frequency of sea surface extreme high (left) and low (right) temperature in the coastal China seas and regional climate variabilities with significance exceeding 90%

a.厄尔尼诺-南方涛动; b.太平洋年代际振荡; c.北极涛动  
a. ENSO; b. PDO; c. AO

差异明显。主要体现在冬、春季长江口及以南的沿岸海域海表温度的变化趋势以下降为主。这可能与沿岸海域更易受到全球变化(如20世纪90年代末的气候变暖暂缓)和径流等陆地气候变化异常以及人类活动的影响有关。

(2) 极值温差(一定时期内最大值与最小值之差)和纬度存在一定关系,高纬度海域的极值温差较大,同时沿岸大于外部近岸海域。季节差异上,春、秋季

的变化幅度较大,而夏季和冬季的变化幅度较小。近30多年来,沿岸海域的极值温差主要以加大为主,而外部近岸海域以减小为主。这与海表温度长期的变化趋势和型态不无关系。我国沿岸海域冬春季极值温差显著增大,可能会引起物候的变化,进而严重影响生物生态的迁移与演替,且气候变化下海表温度不稳定性增强,极易引起如赤潮等生态灾害的突发和频发。

(3) 中国近海海表极端温度的年内平均持续天数和最大持续天数呈现出北高南低, 沿岸大于外部近岸海域的特点。其中, 极端高温的年内平均持续天数变化趋势的区域性特征明显, 而最大持续天数变化趋势整体不明显。其中, 长江口以北的黄海、东海海域海表极端高温的平均持续天数和最大持续天数增加显著, 可能对该海域生物生态系统尤其是渔业资源产生较大影响; 极端低温的平均和最大持续持续天数趋势变化均以显著增加为主。这很可能与同期全球气候变暖暂缓以及相关的区域气候变率影响有关。

(4) 全球变暖背景下, 海表极端高温的强度以增加为主, 尤以春季幅度最大。显著区域主要位于长江口以北的近海海域, 其他季节主要见于长江口附近及以南的外部近岸海域; 海表极端低温强度的变化以减弱趋势为主, 另外, 在冬、春季节长江口以南沿岸海域海表极端低温强度增加明显; 极端高温在南海北部(如北部湾等)以及长江口和台湾海峡邻近海域累积频次呈较为一致的上升趋势, 极易引起极端海洋热浪事件, 可能对生态系统(如南海珊瑚礁)产生较大影响; 极端低温累积频次以显著降低为主。而长江口及以南沿岸的极端低温强度和频次在冬、春季节明显增强, 可能会对海岸带和沿海的生态系统(如红树林等)产生一定影响。此外, 在太平洋年代际振荡(PDO)暖位相期间, ENSO 暖事件得到增强, 进而易引起中国近海海表极端低温的频发; 而当北极涛动(AO)正位相时, 限制了极区冷空气向南扩展, 气候变暖背景下中国近海海表

的极端高温事件则趋于增加, 其危险性增强。

作为尝试, 本文首次探究了全球变化下中国近海海表温度这一关键环境因子变化的极端特性及其气候特征。这是分析评估我国海洋领域气候变化影响、海洋极端气候事件等致灾因子危险性、海洋生物生态等承灾体脆弱性以及综合风险评估与应对(适应和减缓)的重要前提。需指出的是, 本文得到与相关研究较为一致的结果<sup>[10, 29]</sup>。然而, 鉴于数据资料的限制(如数据分辨率、均一化以及海洋观测数据匮乏和已有数据共享等问题)是我国海洋极端气候事件变化、危险性影响和灾害风险分析评估的最主要难点之一, 特别是目前再分析数据对我国沿岸和近岸海域描述精细化程度和准确性较弱。有关研究仍有待通过丰富的观测分析、对比验证以及模式模拟等综合手段进一步的深入和系统化。此外, 从分子、细胞、个体、种群、群落与生态系统等不同层次, 以及物质、能量的循环和迁移转化等不同角度, 人们对海洋典型生态系统生物多样性分布、形成、维持和演化机制等开展了广泛深入的研究, 积累了丰富的科学事实和依据<sup>[7]</sup>。然而, 海洋环境要素气候变迁调控、制约生物生态系统变化、演替(如群落组成、种群迁移变化等)的极端条件(阈值)具有多元性和动态性, 其间的内在关联异常复杂, 因此, 基于环境要素变化的极端特性以及不同领域、学科、层次和尺度等的适用性, 结合其对生物生态系统结构和功能的作用关系以及产生致灾性的阈值条件(图 10), 通过数据观测和

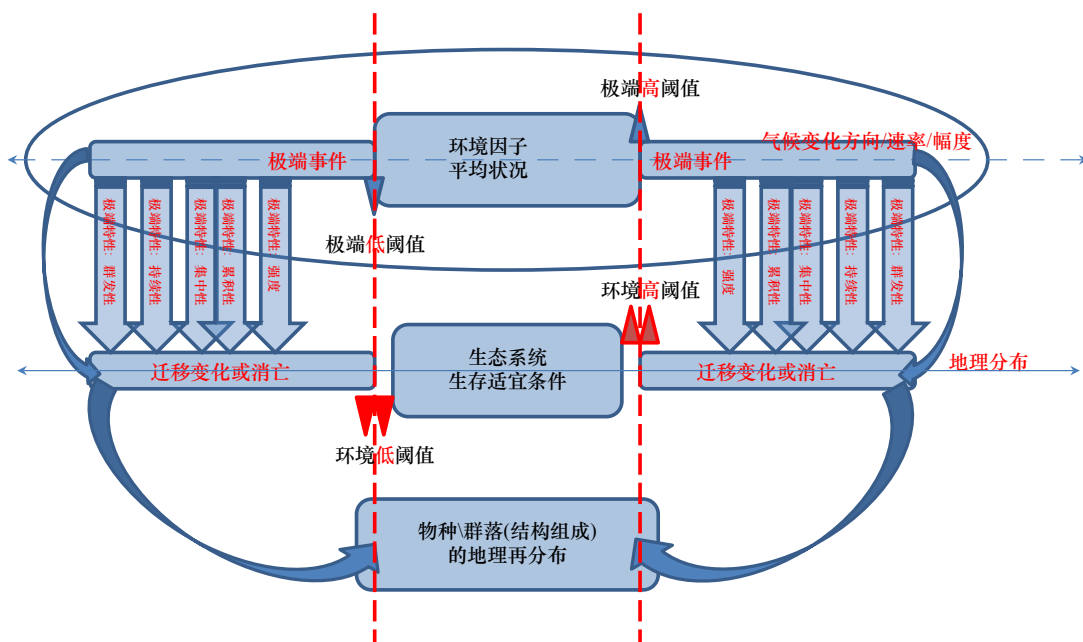


图 10 全球变化下区域海洋环境要素变化的极端特性及影响示意图

Fig. 10 Schematic diagram on the climatic extremes of regional marine environmental factors and its impacts under global change

模式分析对比以及情景预估等, 深入分析探求环境因子极端变化主要影响、危险性和关键风险则是今后研究的重点<sup>[31]</sup>, 相关研究的进一步开展可提高我国海洋领域科学应对气候变化的能力和防范海洋极端气候事件等致灾因子灾害风险的水平, 为我国海洋特别

是海岸带和沿海地区全球变化综合风险评估提供重要科学依据和技术支撑。这对我国近海渔业等海洋资源开发、环境保护与管理, 海洋经济可持续发展和生态文明建设, 以及国家海洋治理和海洋强国战略的实施同样具有重要参考价值。

#### 参考文献:

- [1] Hartmann D L, Klein Tank A M G, Rusticucci M, et al. IPCC, Climate Change 2013: the Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge, United Kingdom, New York, USA: Cambridge University Press, 2013.
- [2] Field C B, Barros V, Stocker T F, et al. IPCC, 2012: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation[M]. Cambridge, UK, New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2012.
- [3] 齐庆华, 蔡榕硕, 张启龙. 台湾以东黑潮经向热输送变异及可能的气候效应[J]. 海洋学报, 2012, 34(5): 31-38.  
Qi Qinghua, Cai Rongshuo, Zhang Qilong. Heat transport variability of the Kuroshio east of Taiwan and its possible climatic effect[J]. Haiyang Xuebao, 2012, 34(5): 31-38.
- [4] 齐庆华, 蔡榕硕. 西太平洋暖池水体振荡与赤道中东太平洋海表温度异常的关联性初探[J]. 海洋科学, 2015, 39(9): 77-85.  
Qi Qinghua, Cai Rongshuo. The relationship between the oscillation of western Pacific warm pool and sea surface temperature anomalies in equatorial central and eastern Pacific[J]. Marine Sciences, 2015, 39(9): 77-85.
- [5] 齐庆华, 蔡榕硕. 南海海表温时空演变与南海夏季风爆发早晚相关性初探[J]. 海洋学报, 2014, 36(3): 94-103.  
Qi Qinghua, Cai Rongshuo. The relation between the spatial-temporal evolution of SST in the South China Sea and the earlier or later onset of the South China Sea summer monsoon[J]. Haiyang Xuebao, 2014, 36(3): 94-103.
- [6] 齐庆华, 蔡榕硕. 21世纪海上丝绸之路海表温度异常与气候变率的相关性初探[J]. 海洋开发与管理, 2017, 34(4): 41-49.  
Qi Qinghua, Cai Rongshuo. Spatio-temporal change of sea surface temperature anomalies in seas of 21st century maritime silk road and its net correlation to climate variability[J]. Ocean Development and Management, 2017, 34(4): 41-49.
- [7] 齐庆华, 蔡榕硕. 中国大陆东部相对湿度变化与海陆热力差异的关联性初探[J]. 高原气象, 2017, 36(6): 1587-1594.  
Qi Qinghua, Cai Rongshuo. The variation of relative humidity in the east of Chinese mainland and its association with sea-land thermal contrast[J]. Plateau Meteorology, 2017, 36(6): 1587-1594.
- [8] Cai Rongshuo, Tan Hongjian, Qi Qinghua. Impacts of and adaptation to inter-decadal marine climate change in coastal China seas[J]. International Journal of Climatology, 2016, 36(11): 3770-3780.
- [9] Wu Lixin, Cai Wenju, Zhang Liping, et al. Enhanced warming over the global subtropical western boundary currents[J]. Nature Climate Change, 2012, 2(3): 161-166.
- [10] 谭红建, 蔡榕硕, 黄荣辉. 中国近海海表温度对气候变暖及暂缓的显著响应[J]. 气候变化研究进展, 2016, 12(6): 500-507.  
Tan Hongjian, Cai Rongshuo, Huang Ronghui. Enhanced responses of sea surface temperature over offshore China to global warming and hiatus[J]. Climate Change Research, 2016, 12(6): 500-507.
- [11] 秦大河. 中国极端天气气候事件和灾害风险管理与适应国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社, 2015.  
Qin Dahe. China National Assessment Report on Risk Management and Adaptation of Climate Extremes and Disasters[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [12] Hobday A J, Alexander L V, Perkins S E, et al. A hierarchical approach to defining marine heatwaves[J]. Progress in Oceanography, 2016, 141: 227-238.
- [13] Zinke J, Hoell A, Lough J M, et al. Coral record of southeast Indian Ocean marine heatwaves with intensified Western Pacific temperature gradient[J]. Nature Communications, 2015, 6: 8562.
- [14] Oliver E C J, Donat M G, Burrows M T, et al. Longer and more frequent marine heatwaves over the past century[J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 1324.
- [15] Benthuisen J A, Oliver E C J, Feng Ming, et al. Extreme marine warming across tropical Australia during Austral summer 2015-2016[J]. Journal of Geophysical Research, 2018, 123(2): 1301-1326.
- [16] Short J, Foster T, Falter J, et al. Crustose coralline algal growth, calcification and mortality following a marine heatwave in Western Australia[J]. Continental Shelf Research, 2015, 106: 38-44.
- [17] Peck L S, Webb K E, Bailey D M. Extreme sensitivity of biological function to temperature in Antarctic marine species[J]. Functional Ecology, 2004, 18(5): 625-630.
- [18] Caputi N, Kangas M, Denham A, et al. Management adaptation of invertebrate fisheries to an extreme marine heat wave event at a global warming hot spot[J]. Ecology and Evolution, 2016, 6(11): 3583-3593.
- [19] Tuckett C A, de Bettignies T, Fromont J, et al. Expansion of corals on temperate reefs: direct and indirect effects of marine heatwaves[J]. Coral Reefs, 2017, 36(3): 947-956.

- [20] Schlegel R W, Oliver E C J, Wernberg T, et al. Nearshore and offshore co-occurrence of marine heatwaves and cold-spells[J]. *Progress in Oceanography*, 2017, 151: 189–205.
- [21] Kurihara Y, Sakurai T, Kuragano T. Global daily sea surface temperature analysis using data from satellite microwave radiometer, satellite infrared radiometer and in-situ observations[J]. *Weather Service Bulletin*, 2006, 73(S): S1–S18.
- [22] 范海燕, 滕军, 管磊, 等. NOAA/AVHRR卫星海表温度在西北太平洋的印证及分析[J]. *海洋预报*, 2009, 26(2): 7–14.  
Fan Haiyan, Teng Jun, Guan Lei, et al. Validation of sea surface temperature from NOAA/AVHRR in the Northwest Pacific[J]. *Marine Forecasts*, 2009, 26(2): 7–14.
- [23] 丁裕国, 江志红. 极端气候研究方法导论(诊断及模拟与预测)[M]. 北京: 气象出版社, 2009.  
Ding Yuguo, Jiang Zhihong. Introduction to Extreme Climate Research Methods (Diagnosis and Simulation and Prediction)[M]. Beijing: Meteorological Press, 2009.
- [24] Yan Z, Jones P D, Davies T D, et al. Trends of extreme temperatures in Europe and China based on daily observations[J]. *Climatic Change*, 2002, 53(1/3): 355–392.
- [25] Karl T R, Nicholls N, Ghazi A. Clivar/GCOS/WMO workshop on indices and indicators for climate extremes workshop summary[J]. *Climatic Change*, 1999, 42(1): 3–7.
- [26] Peterson T C. Climate change indices[J]. *WMO Bulletin*, 2005, 54(2): 83–86.
- [27] Jones P D, Horton E B, Folland C K, et al. The use of indices to identify changes in climatic extremes[J]. *Climatic Change*, 1999, 42(1): 131–149.
- [28] 钱维宏, 符娇兰, 张玮玮, 等. 近40年中国平均气候与极值气候变化的概述[J]. *地球科学进展*, 2007, 22(7): 673–684.  
Qian Weihong, Fu Jiaolan, Zhang Weiwei, et al. Changes in mean climate and extreme climate in China during the last 40 years[J]. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(7): 673–684.
- [29] 李琰, 范文静, 骆敬新, 等. 2017年中国近海海温和气温气候特征分析[J]. *海洋通报*, 2018, 37(3): 296–302.  
Li Yan, Fan Wenjing, Luo Jingxin, et al. Climatic characteristics of sea surface temperature and air temperature over the China seas in 2017[J]. *Marine Science Bulletin*, 2018, 37(3): 296–302.
- [30] 蔡榕硕, 付迪. 全球变暖背景下中国东部气候变迁及其对物候的影响[J]. *大气科学*, 2018, 42(4): 729–740.  
Cai Rongshuo, Fu Di. The pace of climate change and its impacts on phenology in eastern China[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2018, 42(4): 729–740.
- [31] 齐庆华. 基于国家海洋治理和全球气候变化的我国海洋灾害防治[J]. *海洋开发与管理*, 2019, 36(2): 17–23.  
Qi Qinghua. Marine disaster prevention in China based on national marine governance and global climate change[J]. *Ocean Development and Management*, 2019, 36(2): 17–23.

## Analysis on climate characteristics of sea surface temperature extremes in coastal China seas

Qi Qinghua<sup>1</sup>, Cai Rongshuo<sup>1</sup>

(1. Marine Environmental Management and Sustainable Development Research Center, Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** Based on the daily reanalysis from 1982 to 2017, this paper focuses on the analysis of the extreme characteristics, historical evolution, spatial pattern and possible impacts of sea surface temperature (SST) in coastal China seas (CCS), and discusses the correlation with global change and regional climate variability. The SST in the CCS overall increased significantly in recent more than 30 years, especially in the spring near the Changjiang River Estuary and offshore areas south of it with the warming rate up to 0.2 °C/(10 a). Nevertheless the response of nearshore waters to the global warming hiatus is likely to be more pronounced. The extreme high (low) temperature intensity is mainly enhanced (weakened), especially in spring (summer). The increase of extreme temperature difference in the nearshore area in spring can easily lead to frequent ecological disasters such as biological migration and red tide. The consecutive days of extreme events in the northern sea areas are longer than in the south. The consecutive days of extreme high temperature in the Yellow Sea and East China Sea increased significantly, which may have a potential impact on fishery resources. Mostly due to the global warming hiatus, the consecutive days of extreme

low temperature is also increased significantly. The cumulative frequency of extreme high temperature near the Changjiang River Estuary, the Taiwan Strait and the northern part of the South China Sea (SCS) increased significantly. In the future, extreme marine heat waves are likely increase continuously, which will have a greater impact on the coral reefs in the SCS and so on. The cumulative frequency of extreme low temperature is mainly reduced. The extreme low temperature along the Changjiang River Estuary and the southern nearshore sea areas increased obviously in winter and spring, which may have some influence on mangrove. During the warm phase of the Pacific decadal oscillation (PDO), the ENSO warm event is enhanced, which is likely to cause the frequent occurrence of extreme low temperature in the CCS. In addition, as the Arctic oscillation (AO) is in positive phase, the cold air in the polar region is restricted to expand southward, and the frequency of extreme high temperature in the CCS surface tends to increase, which enhances the disaster risk.

**Key words:** extreme climate events; marine heat wave; marine ecosystem; hazard inducing environment; regional climate variability; global climate change