

doi: 10.6046/zrzyyg.2023072

引用格式: 张春桂, 吴作航, 王婧, 等. 基于 Himawari-8 台湾海峡海温时空变化分析及应用[J]. 自然资源遥感, 2024, 36(4): 175-184. (Zhang C G, Wu Z H, Wang J. et al. Analysis and application of spatiotemporal variation in sea surface temperature in the Taiwan Strait based on Himawari-8 data[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2024, 36(4): 175-184.)

基于 Himawari-8 台湾海峡海温时空变化分析及应用

张春桂^{1,2}, 吴作航^{1,2}, 王婧³, 陈文佳⁴

(1. 福建省气象科学研究所, 福州 350008; 2. 福建省灾害天气重点实验室, 福州 350008; 3. 福建省气象信息中心, 福州 350008; 4. 福建省霞浦县气象局, 宁德 355100)

摘要: 台湾海峡具有重要的战略地位和研究价值, 开展台湾海峡及其周边海域的海洋表面温度 (sea surface temperature, SST) 时空变化研究有助于了解台湾海峡海陆环境与洋流变化, 特别是对于充分了解台湾海峡复杂的海洋锋面系统有重要的意义。以台湾海峡及其周边海域为研究区, 利用 2016—2020 年 Himawari-8 卫星数据, 通过计算获取研究区年平均、季平均、旬平均的 SST 遥感数据, 开展 SST 时空变化研究, 并以此为基础, 研究 SST 与福建内陆降水、福建沿海海雾之间存在的相关关系, 研究结果表明: 台湾海峡及其周边海域年平均 SST 由西北向东南呈带状分布并逐渐升高, 按季节特点可分为等温线近似与岸界平行分布的冬季型及等温线近似均匀分布的夏季型, 旬 SST 资料能更精细地刻画台湾海峡 SST 的时空变化情况; 内陆月降水量与月平均 SST 总体存在较弱的负相关, 但越远离外海海域负相关性越高; SST 与沿海海雾存在着较强的负相关关系, 并且随着 SST 的升高, 海雾发生次数呈现减弱趋势。

关键词: 台湾海峡; SST 时空变化; Himawari-8; 海雾

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2024)04-0175-10

0 引言

海洋与大气的互相影响, 调节着地球水资源循环与能量流动, 对人类活动及生态平衡具有重要作用, 在全球生态可持续发展中具有重要的地位^[1]。海洋热状况的重要指标之一是海洋表面温度 (sea surface temperature, SST), 其不仅可以反映出海表的动力、热力情况^[2-4], 对于黑潮、台风、降水、海洋温度锋和渔业等相关研究^[5-9] 也具有的重要意义。其中, SST 的时空变化研究能直观展示 SST 在大尺度时间、空间上的变化情况, 对研究气候变化、预测未来 SST 走势等方面起到极大的帮助。众多专家学者围绕 SST 时空变化开展了不少的相关研究^[10-12], 龙上敏等^[13] 回顾大量南大洋表层到深层 SST 长期观测结果与模式模拟结果, 对 SST 影响因素、调整机制做出了介绍, 提出使用时间尺度响应的方法研究南大洋 SST 较优的结论; 李扬等^[14] 利用标准化的经验正交函数的无参趋势估计方法, 结合多套海表、次表层 SST 资料, 分析了赤道太平洋次表层 SST、热带

太平洋表层 SST 的变化情况。

SST 的时空变化与内陆降水及沿海海雾的发生亦具有关联。有研究表明, SST 变化对气候具有重要影响^[15-16], 由于海陆热力差异产生的海气相互作用能对大气环流产生明显的影响^[17-18], 使得降水与 SST 的时空变化存在着密切的关系^[19-20], 外力·吾甫尔等^[21] 研究了华南无降水日与 SST 之间的关系, 发现秋季的无降水日与 SST 有明显的线性相关; Hoerling 等^[22] 经过研究 1979—2003 年美国南部日极端降水变化趋势, 发现其与 SST 的变化有明显的关联。而海雾的形成与 SST 也有密切关联^[23-25], 战淑芸等^[26] 发现南海海雾异常变化与大范围 SST 及环流背景异常有关; 张伟等^[27] 通过分析闽南沿海的某次春季海雾过程, 发现 SST、气温和风速是影响海雾发生的主要因素。

随着遥感技术的不断发展, 自 20 世纪就已经开始的卫星遥感 SST 相关研究早已成为主流的方法之一^[28-29]。AVHRR 和 MODIS 等传感器获取的遥感数据是反演 SST 中常用的数据源^[30-34], 近年来我国的风云系列和国外的 Landsat8 等卫星也常用于 SST

收稿日期: 2023-03-21; 修订日期: 2023-07-24

基金项目: 福建省科技厅重点项目“基于遥感和气象的福建空气清新鲜度技术研究”(编号: 2020Y0072) 和福建省气象局青年科技专项项目“基于遥感的台湾海峡海温反演产品真实性检验研究”(编号: 2022Q3) 共同资助。

第一作者: 张春桂(1966-), 男, 正高级工程师, 主要从事气象卫星遥感应用研究。Email: fjywork@163.com。

研究^[35-38],同时卫星数据也大量用于 SST 的时空变化研究^[39-42]。Himawari-8 是 2014 年日本发射的新一代静止卫星,具有高时空分辨率、多波段探测通道、数据量化比特精度高的特点^[43],已经在 SST 研究中得到相关应用^[44]。Himawari-8 的多项优势使得在旬尺度研究 SST 时空变化成为了可能,旬尺度数据较月尺度数据提升了近 3 倍的时间分辨率,十分适用于研究台湾海峡这类具有复杂海洋动力机制的海域。

台湾海峡位于我国福建省与台湾岛之间,是连通东海与南海的重要通道,被称为中国“海上走廊”,具有极其重要的战略地位。台湾海峡处于亚洲东部季风区前沿,大气风动力强劲,同时还受到强劲的海流、潮汐及海洋波浪等动力影响,具有独特的海陆环境,有重要的研究价值^[45]。由于台湾海峡海底地形复杂,在浅滩、东山和平潭等附近海域对浙闽沿岸流、黑潮分支水流和南海暖流都发育有上升流,多变的地形造就了台湾海峡复杂的海洋锋面系统^[46],而通过 Himawari-8 的高时空分辨率 SST 变化特征分析,有利于提高对台湾海峡复杂海洋动力机制的了解和认识。

目前,基于 Himawari-8 数据对台湾海峡旬 SST 变化的研究尚少,更鲜有将其应用于分析与内陆降水、沿海海雾之间的关系,故本文选取台湾海峡及其周边海域为主要研究区,以 Himawari-8 的年、季节、旬 SST 合成数据开展研究区 2016—2020 年近 5 a 的 SST 时空变化研究,并以此为基础,探究台湾海峡典型区域 SST 时空变化与福建省各地市降水量及福建省沿海海雾之间的关系。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

研究区为我国台湾海峡及其周边海域,地理位置为 E115.5°~125.5°,N19.5°~28.5°。以国家地理信息公共服务平台——天地图 (<https://www.tianditu.gov.cn/>) 提供的矢量地图作为底图,分别选取 13 个点代表研究区不同位置,点位的坐标与代表区域见表 1。点位的选择参考先前研究者方法^[43],选择了海峡北部中心(点 1)、海峡中部中心(点 4)、海峡南部中心(点 7)以及台湾岛东面海域(点 13),并做出改进。首先,为了对比海峡两岸沿海 SST 情况,分别选择了 3 组沿海区域点,为海峡北部福建沿海与台湾沿海(点 2 与点 3)、海峡中部福建沿海与台湾沿海(点 5 与点 6)以及海峡南部福建沿海与台湾沿海(点 8 与点 9);其次,为了解来自北方的沿岸

寒流对海峡 SST 的影响情况,选择了海峡北部福建宁德沿海(点 10);最后,为了更好地了解台湾海峡 SST 变化情况与周边海域的关系,选择了海峡北部周边海域、南部周边海域(点 11 和点 12)。以期通过选择上述 13 个区域代表点位,研究台湾海峡及其周边海域的 SST 时空变化情况。

表 1 研究区 13 个区域代表点的地理位置及代表区域
Tab.1 Geographical locations and representative regions of 13 regional representative points in the study area

点位	经度 E/(°)	纬度 N/(°)	代表区域
1	120.298 03	25.118 80	台湾海峡北部中心
2	119.950 80	25.521 64	台湾海峡北部福建沿海
3	121.019 79	25.164 87	台湾海峡北部台湾沿海
4	119.637 70	24.350 97	台湾海峡中部中心
5	118.962 02	24.750 24	台湾海峡中部福建沿海
6	120.221 25	24.043 84	台湾海峡中部台湾沿海
7	118.915 95	23.414 23	台湾海峡南部中心及澎湖列岛
8	118.102 05	24.074 56	台湾海峡南部福建沿海
9	120.098 40	22.769 25	台湾海峡南部台湾沿海
10	121.987 25	27.038 36	台湾海峡北部福建宁德沿海
11	123.998 95	26.193 76	台湾海峡北部周边海域
12	117.472 43	21.556 09	台湾海峡南部周边海域
13	123.599 68	22.538 90	台湾岛东面海域(外海)

1.2 数据源

本研究采用日本宇宙航空研究开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)发布的 2016—2020 年 Himawari-8 卫星 L3 级 SST 产品作为基础数据源,L3 SST 产品为时间分辨率为 1 h 的 SST 平均值。与基于极轨卫星的 SST 劈窗反演算法不同,L3 SST 产品采用准物理算法,利用 CH₁₁(8.6 μm),CH₁₃(10.4 μm)和 CH₁₄(11.2 μm)3 个红外观测数据求解参数化的红外辐射传输方程,从而以较高精度反演得到 SST^[47]。

2 研究方法

首先对 Himawari-8 卫星 L3 级 SST 产品的地理范围(85°E~155°W,60°N~60°S)进行切割,得到研究区的地理范围。由于台湾海峡地处亚热带海洋上,被云覆盖几率相对比较大,为了保证生成各种 SST 平均产品的精度,在合成之前对逐时 SST 遥感反演数值进行包括剔除异常数据、在一定时空范围内根据 SST 均方差进行一致性检验等质量控制,以进一步提高产品的可信度。为了得到 SST 的日平均、旬平均、月平均、季节平均和年平均等相关产品,本研究在 L3 级 SST 产品的基础上进行进一步处理,通过公式逐时次合成不同时间尺度的 SST 数据集,并通过 ENVI 遥感处理软件采用 Bicubic 最优插值

方法重新采样投影为空间分辨率为 1 km 的 SST 产品。计算公式为：

$$\overline{SST} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N SST_i , \quad (1)$$

式中： $\overline{SST}$ 为日平均、旬平均、月平均、季节平均和年平均等 SST 产品； SST_i 为逐时 SST 数值； N 为生成日、旬、月、季节和年平均产品所需要的逐时 SST 数值个数。

3 台湾海峡及其周边海域 SST 时空变化特征分析

3.1 年平均 SST 空间分布特征

2016—2020 年研究区年平均 SST 分布及 13 个区域代表点的年平均 SST 值如图 1 和图 2 所示。由图 1 和图 2 可知,研究区年平均 SST 沿海岸线由西北向东南呈带状分布且逐渐升高,最低值在海峡北部福建沿海一带,其中福建宁德沿海年平均 SST 仅有 10.87 ℃,高值区位于海峡南部低纬度区域与台湾岛东面区域,以台湾岛—澎湖列岛为界,整体 SST 明显较高,最高值出现在台湾岛东南向的太平洋海区,典型区域 SST 年平均值为 24.35 ℃。同时,海峡两岸 SST 差距明显,福建沿海年均 SST 均低于台湾沿海,平均温差为 5.94 ℃,其中海峡北部两岸温差为 3.96 ℃,中部海域两岸温差为 4.51 ℃,而海峡南部温差达到了 9.35 ℃。

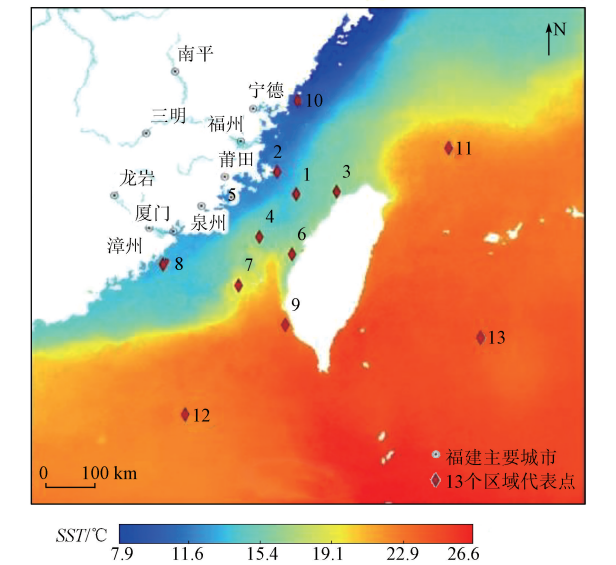


图 1 2016—2020 年研究区年平均 SST 分布及 13 个区域代表点位置

Fig.1 Distribution of annual mean SST from 2016 to 2020 in study area and locations of 13 regional representative point

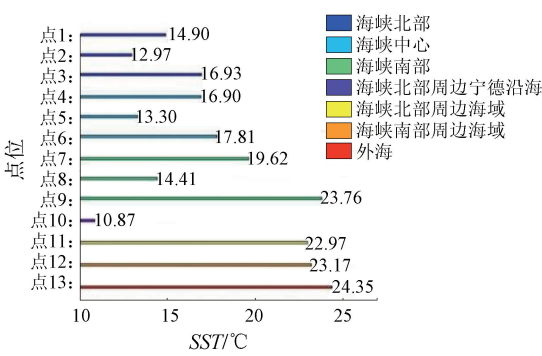


图 2 2016—2020 年研究区不同点位的年平均 SST 值
Fig.2 Annual mean SST at different points location from 2016 to 2020 in study area

一般而言,SST 受太阳辐射的影响,将呈现出由低纬至高纬逐渐递减的分布态势,但是由于洋流、海区孤立程度、海岸带形态的差异、以及海洋动力因子、气象因子等因素的影响,局部地区的等温线会出现较大幅度的变动^[48],这也是台湾海峡及其周边海域的 SST 空间分布相对复杂的原因。台湾海峡主要为黑潮与闽浙沿岸流所控制,并受到季风影响。温度低的闽浙沿岸流在冬季随季风自北而下,使得福建省沿海 SST 较低,在研究区以福建宁德沿海表现特别明显。黑潮对台湾海峡的影响分 2 支,黑潮主流流经台湾东岸,SST 温度梯度方向与黑潮的流动方向一致;黑潮支流沿台湾西南流向澎湖列岛,使得等温线向北突起。许多研究表明^[49-52],中纬度大气环流主导着没有受明显冷暖洋流影响的海域,这种主导作用是通过改变海气之间的热通量交换来实现的。通过对北半球 500 hPa 平均高度场分布特征的分析得知,东亚地区冬季高度场呈北低南高,即北部的阿留申低压和南部强度较小的副热带高压;夏季中低纬海洋上空高度场升幅明显并且范围扩大,其中以北太平洋副热带高压增强最为显著^[53]。冬夏季大气总体热分布特征表明,副热带高压的维持,其伴随的下沉绝热增温作用间接加热洋面^[54],并且副高的平均位置与洋面高温范围相对应。综合上述以及海陆热力性质差异、海陆平均温度差异及海峡地形特征,研究区年平均 SST 呈现图 1 的分布特点。

3.2 SST 的季节变化特征

根据季节划分方法结合台湾海峡的实际情况,将研究区季节划分为:春季 3—5 月、夏季 6—8 月、秋季 9—11 月、冬季 12—次年 2 月。按照上述标准进行台湾海峡及其周边海域的 2016—2020 年季节平均 SST 时空变化分析,结果如图 3 和图 4 所示。整体而言,秋季时台湾海峡及其周边海域的 SST 最高,夏季次之,而春季、冬季较低。

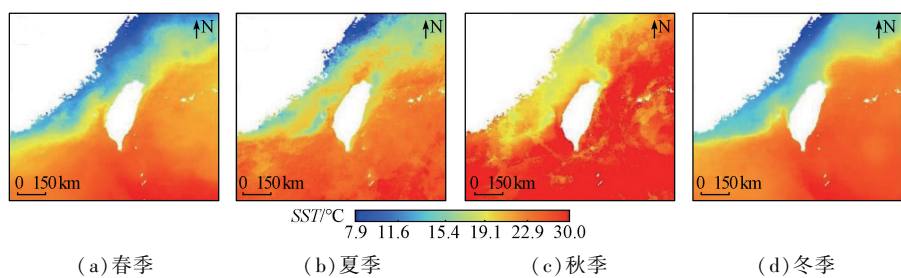


图 3 台湾海峡及其周边海域 SST 季节变化空间分布

Fig.3 Spatial distribution of SST seasonal variation of Taiwan Strait and its surrounding water

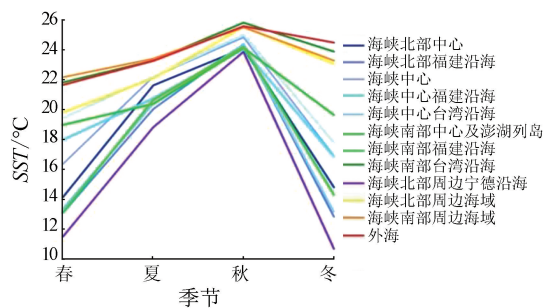


图 4 台湾海峡及其周边海域典型区域平均 SST 季节变化

Fig.4 Seasonal variation of mean SST in typical regions of Taiwan Strait and its surrounding water

冬春 2 季台湾海峡及其周边海域 SST 等温线分布呈东北—西南走向,温度由内陆沿海至外海自西北向东南逐渐升高。春季 SST 在 11~22℃ 之间,冬季 SST 在 10~24℃ 之间,高值区集中在海峡南部周边海域及外海区域,低值区位于福建沿海及浙江沿海一带。冬季沿岸区域受到闽浙沿岸流的影响呈现出较低的温度,而外海区域由于受到黑潮影响,SST 等温线几乎平行岸界。而春季随着上层海水的逐渐升温及偏北风的减弱,冬季型温度逐渐开始向夏季型过渡。夏季不同海面区域呈现出不同温度,高值集中在研究区南部,为 23℃ 左右,低值区域为福建宁德、浙江沿海一带。总体上 SST 高于 20℃,仅福建宁德沿海及浙江沿海 SST 较低,为 18℃ 左右。夏季太阳辐射增强,研究区海域 SST 升高,温差缩小,SST 的分布已经无法明显反应黑潮的影响,而福建北部及浙江南部沿海出现的低温带可能与东海沿岸的上升流有关。秋季台湾海峡周边海域 SST 达到了 25℃ 以上,台湾海峡及内陆沿海区域也达到了 23℃ 以上。9 月福建省仍受副热带高压影响,气温、SST 均维持较高水平。10—11 月副高南撤东退,福建省及海峡地区逐渐受冷涡东移渗透南下的冷空气影响,陆面、海表气温开始降低,受海气耦合作用,SST 滞后降低,逐渐由夏季型转为冬季型。

3.3 SST 的旬变化特征

通常较广泛使用的月均 SST 数据虽可以反映出 SST 的变化情况,但旬数据提高了时间分辨率,能更

细致地表现出 SST 的时空变化情况。图 5 和图 6 给出了台湾海峡及其周边海域的逐旬变化情况,从整体上看与月变化情况相似,依旧呈现自西北向东南的带状分布。1 月上旬福建省沿岸温度较低,福建省北部沿海、浙江沿海一带呈现最低值。1 月中旬 SST 分布以维持为主,较上月无明显变化。1 月下旬 SST 出现上升,高温区域往西北方向推进,沿岸低温退往浙江沿海一带。2 月上旬 SST 整体下降,恢复到 1 月中旬水平。2 月中下旬台湾海峡及福建浙江沿海一带 SST 持续降低,但海峡中心澎湖列岛周围 SST 持续上升,并略往北边扩大。3 月上旬开始,福建北部沿海及浙江沿海的 SST 低值区开始略有向西北后撤趋势,同时,也开始向东北方向延伸。4 月上旬至下旬,研究区北部低值区范围南扩,使台湾岛东部外海 SST 略有降低,但海峡内部 SST 略有提高。至 5 月上旬,研究区整体 SST 均偏低。5 月中旬 SST 开始回升,到 5 月下旬整个内陆沿海 SST 均有不同程度的降低,但福建北部沿海的低值区开始升温。6 月上旬至中旬,研究区北部低值区开始反弹,但到 6 月下旬时已经北退。7 月上旬 SST 略有降低,7 月中旬 SST 回升,但在西南处出现小范围低值区。7 月下旬 SST 继续上升,仅台湾海峡南部出现小范围低值区。待到 8 月上旬,全研究区 SST 均达到高值。而 8 月中旬由于台风影响,海峡南部周边海域出现低值区,以福建南部沿海至广东沿海为最低值,研究区其余区域 SST 也略有降低。至 8 月下旬,台风活动仍较为活跃,低值区范围出现在台湾岛西南方向,周边区域 SST 重新回到高位。9 月上旬时,低值区消退,研究区整体 SST 出现东西向高于南北向的情况。9 月中旬北部低值区开始出现,研究区 SST 呈现东南向的中间高两边低的情况。而 9 月下旬整体 SST 提升,低值区退往浙江沿海。到了 10 月上旬,低值区范围突然扩大,但到 10 月中旬后范围逐渐缩小直至稳定。此后直至 12 月下旬,研究区 SST 无太大区域性变化,仅有不同程度的温度变化,总体又恢复了自北至南逐渐升高的带状分布。

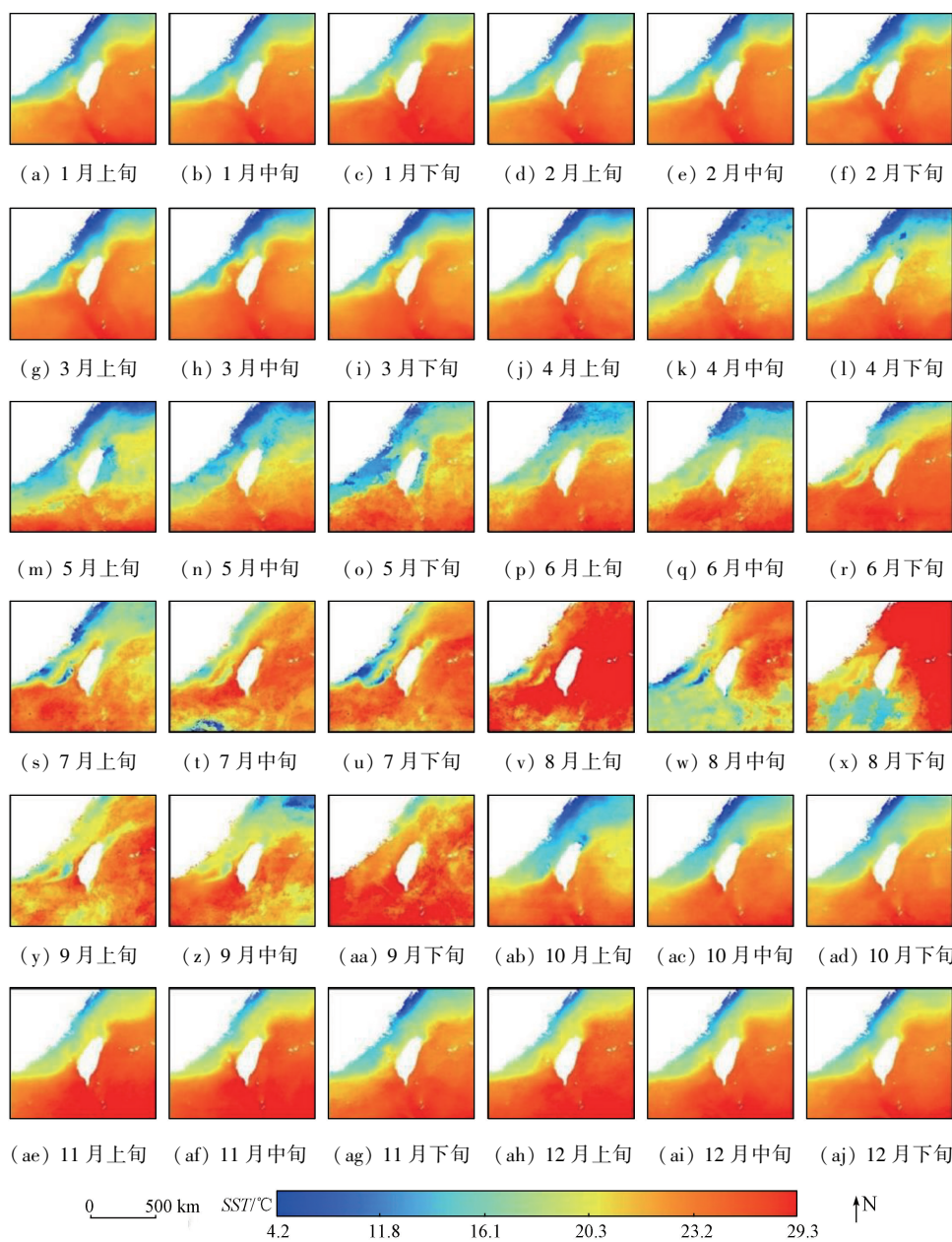


图 5 台湾海峡及其周边海域 SST 逐旬变化空间分布

Fig.5 Spatial distribution of SST change by ten days of Taiwan Strait and its surrounding water

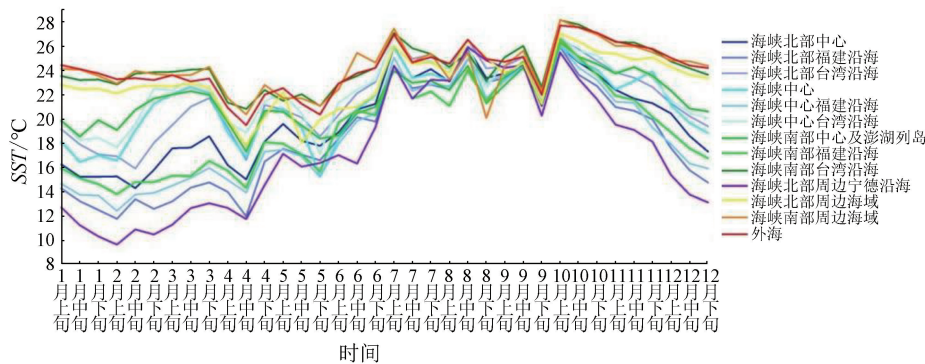


图 6 台湾海峡及其周边海域典型区域平均 SST 逐旬变化

Fig.6 Ten days variation of mean SST in typical regions of Taiwan Strait and its surrounding water

从图 6 中可以看出,全年 SST 变化最显著的典型区域为内陆沿海一带,其中以福建宁德沿海为最典型。7 月上旬—10 月中旬为研究区 SST 较高时期,但呈现出波动的状态。而 2 月下旬—3 月下旬,

台湾海峡内部出现了短时间的小高值区,这在海峡台湾沿海、海峡中线区域尤为明显。4月中旬及5月下旬各区域 SST 都出现了明显的谷值,以4月中旬为甚,但不同的区域 SST 降低的程度不尽相同。

4 SST 在气象中的初步应用

4.1 月尺度 SST 与福建内陆降水的相关性分析

使用斯皮尔曼相关系数对福建省 70 个国家观测站的月降水量数据与已选择的 13 个典型区域的月 SST 数据进行相关分析,结果表明福建省内陆的降水与 SST 总体上存在着较弱的相关关系,以负相关为主。选取相关系数较好的 8 个观测站(位置如图 7 所示)与 8 个典型区域绘制相关系数(图 8)。从图 8 可以看出,光泽站与 5 个典型区域的相关性较高,但均不超过-0.45(相关性的绝对值大于 0.26 的数据均能通过显著性检验)。二者相关程度不高的原因可能与本研究基于月尺度角度所使用的数据

有一定关系,观测站与相关海域间的距离尺度为中小尺度系统,而月累计降水量已无法从局地 SST 加热作用上去考虑对中小尺度系统的影响,其统计值已覆盖了扰动项。而月平均 SST 也无法展示 SST 的波动情况,便无法精确针对单次过程的影响进行分析,仅能从宏观上展现台湾海峡 SST 与福建省内陆降水之间的联系,便弱化了二者的相关性。

4.2 旬尺度 SST 与福建沿海海雾相关性分析

4.2.1 海雾旬际变化情况

运用台湾海峡 16 个浮标站(图 7)采集的 2016—2019 年 4 a 的能见度每小时数据,分别将能见度大于 10 000 m 与能见度小于 10 000 m 定义为晴空与有雾^[55],统计 4 a 间逐旬有海雾产生的时数并计算均值,获得旬尺度海雾累计时次数据,并制作旬尺度海雾累计时数情况(图 9),获得海雾在各旬发生的频次差异。由图 9 可知,台湾海峡海雾主要发生时间为冬、春季,3 月上旬—6 月中旬为海雾高发期,11 月中旬—次年 2 月中旬也有较多不同程度的海雾发生,而夏秋季海雾发生次数较少,且不同位置海雾发生的情况略有差异。

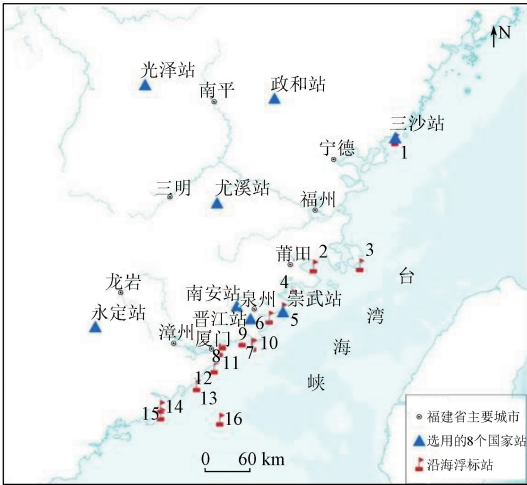


图 7 福建省 8 个国家气象观测站及浮标站位置

Fig.7 Location of eight national meteorological observatories and the buoy station in Fujian Province

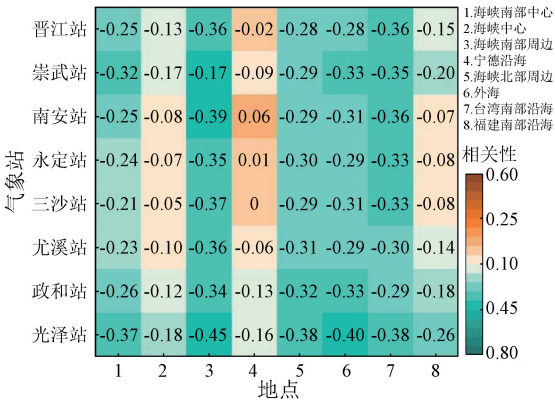


图 8 较优结果的 SST 与降水相关性

Fig.8 Correlation between SST and precipitation with better results

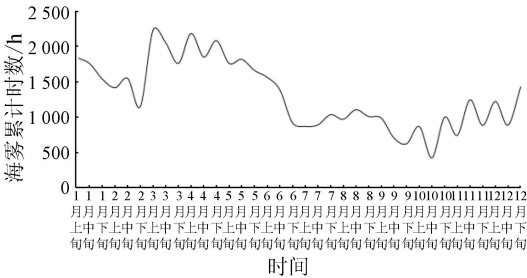


图 9 福建沿海 16 个浮标站 4 a 旬际海雾累计时数

Fig.9 Accumulative hours of sea fog every 10 days during four years at 16 buoy stations along the coast of Fujian

4.2.2 SST 与海雾相关性分析

海雾的发生与消散不仅与气象条件有关,也与下垫面的 SST 热状况紧密相关^[25]。为探寻 SST 变化对海雾发生的影响,采取定量分析与定性分析结合的方法进行研究。将浮标站所在位置的旬平均 SST 与海雾旬累计时次进行斯皮尔曼相关性分析,如表 2 所示,各浮标处 SST 与海雾均呈现出显著的较强负相关性。选取相关系数最高的 12 号浮标站数据(-0.781)进行曲线拟合,结果如图 10 所示,拟合曲线的 R^2 为 0.703 7。通过上述定量分析结果及对比台湾海峡 SST 旬变化情况(图 5)与海雾的旬变化情况,可知福建沿海海雾主要在 SST 为 10~25℃ 之间时生成,且随着 SST 的升高,海雾在一定程度上呈现减弱趋势。海洋能够影响空气温湿属性,所以海流与 SST 对海雾的生成与消失起到了显著作用。太平洋海雾主要为平流冷却雾,其雾区与海流关系

较为密切,尤其近岸海区,海雾常常出现在冷海流或冷暖海流交汇处^[56]。由上文 SST 的时空变化可知,冬、春季台湾海峡主要受闽浙沿岸流与黑潮支流支配,海峡西岸 SST 较低,而东岸 SST 较高,存在冷海流与冷暖海流的交汇,有利于海雾的形成。且春季湿润的偏南气流与频繁南下的弱冷空气也进一步促进了海雾的发生。而随着夏秋季节的来临,沿岸流改向,逐渐升高的台湾海峡 SST 对海雾的生成起到了负面影响,造成了海雾在夏、秋季节的明显减弱。

表 2 16 个浮标站 SST 与海雾相关性统计

Tab.2 Correlation statistics of SST and sea fog at 16 buoy stations			
浮标站编号	相关系数	浮标站编号	相关系数
1	-0.651	9	-0.600
2	-0.662	10	-0.645
3	-0.669	11	-0.569
4	-0.404	12	-0.781
5	-0.592	13	-0.579
6	-0.721	14	-0.739
7	-0.511	15	-0.614
8	-0.578	16	-0.696

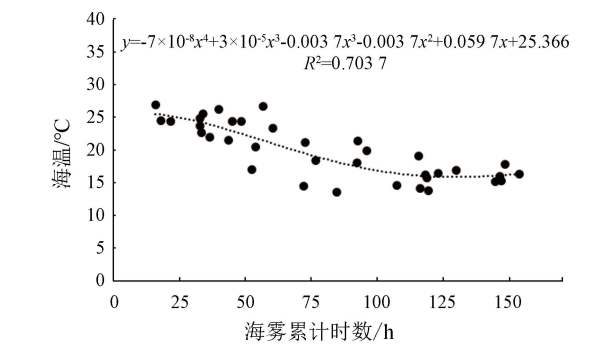


图 10 12 号浮标 SST 与海雾相关性拟合
Fig.10 Correlation fitting between SST of buoy No.12 and sea fog

5 结论

本文利用 2016—2020 年 Himawari-8 卫星 SST 产品作为基础数据源,以台湾海峡及其周边海域为研究区,开展了研究区 SST 的年尺度、季节尺度、旬尺度的 SST 时空变化分析,并结合地面气象站与海洋浮标站采集的数据,实现了 SST 产品的初步气象应用,探究了不同尺度的 SST 与内陆降水、沿海海雾之间的关系,并得出以下结论:

1)受黑潮支流与闽浙沿岸流及季风影响,台湾海峡及其周边海域年平均 SST 沿海岸线由西北向东南呈带状分布逐渐升高,同时 SST 也随着纬度的升高而逐渐降低;海峡两岸 SST 差距明显,海峡西岸整体 SST 较东岸低,平均温差为 5.94 ℃。

2)台湾海峡及其周边海域的 SST 分布主要有冬季型与夏季型。冬季 SST 层次分明,沿岸区域受闽浙沿岸流的影响 SST 较低,由于同时也受到黑潮的影响,SST 等温线近乎平行岸界。夏季太阳辐射增强,研究区海域 SST 升高,温差缩小,总体 SST 高于 20 ℃。而由于副热带高压影响,10 月后 SST 方逐渐由夏季型转为冬季型。

3)旬 SST 资料提高了时间分辨率,能更精细地刻画台湾海峡 SST 的时空变化情况,全年旬 SST 变化最显著的是福建宁德沿海一带海域,2 月下旬—3 月下旬在海峡台湾中线区域出现短时间高值区,7 月上旬—10 月中旬为研究区 SST 较高时期,但呈现出波动的状态。

4)福建省内陆月降水量与月平均 SST 总体只存在着较弱的负相关,但台湾海峡南部周边和北部周边以及台湾岛东部外海海域,这些与福建内陆相对较远的区域,如南平地区的光泽站,月平均 SST 和月降水量基本都有相对较高的负相关。

5)SST 是影响海雾生成的重要因子之一,受到沿岸流与黑潮支流影响,福建沿海的海雾与其下垫面的 SST 之间存在着较强的负相关关系。而福建沿海海雾主要在 SST 为 10~25 ℃ 之间时生成,且随着 SST 的升高,海雾的发生次数在一定程度上呈现减弱趋势。

参考文献 (References) :

[1] 章梦娟.1871—2010 年南海及毗邻西太海域表层海温的时空分布及差异特征[D].上海:上海师范大学,2021.
Zhang M J.Temporal and spatial distribution and differences of surface temperature in the south China sea and the adjacent west Pacific Ocean from 1871 to 2010 [D].Shanghai: Shanghai Normal University, 2021.

[2] 赵 鹤,颜卫华,吴统文,等.影响春季热带太平洋地区海温变化的动力热力作用分析[J].大气科学,2020,44(3):519-532.
Zhao H,Jie W H,Wu T W,et al.Analysis of the influence of dynamic and thermal effects on sea temperature in the tropical Pacific Ocean during spring[J].Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2020,44(3):519-532.

[3] McPhaden M J,Hayes S P.On the variability of winds,sea surface temperature,and surface layer heat content in the western equatorial Pacific[J].Journal of Geophysical Research: Oceans, 1991,96(s1):3331-3342.

[4] Springer S R,McPhaden M J,Busalacchi A J.Oceanic heat content variability in the tropical Pacific during the 1982 - 1983 El Niño [J].Journal of Geophysical Research: Oceans, 1990,95(c12):22089-22101.

[5] 易香妤,董文杰,李劭怡,等.中国东海黑潮海温变化特征及成因分析[J].海洋预报,2021,38(3):38-51.
Yi X Y,Dong W J,Li S Y,et al.The characteristics of sea temperature variation in the Kuroshio area in the East China Sea and its

- causes[J]. Marine Forecasts, 2021, 38(3): 38–51.
- [6] 许金镜. 西太平洋赤道附近海温与中国东南沿海台风关系的初步分析[J]. 台湾海峡, 1998, 17(3): 278–281.
- Xu J J. Primary analysis of relation between SST of West-Pacific near Equator and typhoon along southeast China[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 1998, 17(3): 278–281.
- [7] 徐振宸. 北半球陆地降水的年代际变率及其与海表温度的联系[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2020.
- Xu Z C. Decadal variability of land precipitation in northern hemisphere and its relationship with the sea surface temperature[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2020.
- [8] 刘泽. 中国近海锋面时空特征研究及现场观测分析[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2012.
- Liu Z. The spatio-temporal variability of oceanic fronts offshore China seas and analysis of marine observations[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [9] 张学敏, 商少平, 张彩云, 等. 闽南—台湾浅滩渔场海表温度对鲈鲶鱼类群聚资源年际变动的影响初探[J]. 海洋通报, 2005(4): 91–96.
- Zhang X M, Shang S P, Zhang C Y, et al. Potential influence of sea surface temperature on the interannual fluctuation of the catch and the distribution of chub mackerel and round scad in the Minnan-Taiwan bank fishing ground, China[J]. Marine Science Bulletin, 2005(4): 91–96.
- [10] 张秀芝, 裴越芳, 吴迅英. 近百年中国近海海温变化[J]. 气候与环境研究, 2005(4): 799–807.
- Zhang X Z, Qiu Y F, Wu X Y. The long-term change for sea surface temperature in the last 100 years in the offshore sea of China[J]. Climatic and Environmental Research, 2005(4): 799–807.
- [11] 鲍家勇, 赵月旭. 基于 Floyd 算法的海温时间序列分割[J]. 数理统计与管理, 2019, 38(2): 326–333.
- Bao J Y, Zhao Y X. Sea surface temperature time series segmentation based on Floyd algorithm[J]. Journal of Applied Statistics and Management, 2019, 38(2): 326–333.
- [12] 王平, 毛克彪, 孟飞, 等. 中国东海海表温度时空演化分析[J]. 国土资源遥感, 2020, 32(4): 227–235. doi: 10.6046/gtzyyg. 2020.04.28.
- Wang P, Mao K B, Meng F, et al. Spatiotemporal evolution of sea surface temperature in the East China Sea[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2020, 32(4): 227–235. doi: 10.6046/gtzyyg. 2020.04.28.
- [13] 龙上敏, 刘秦玉, 郑小童, 等. 南大洋海温长期变化研究进展[J]. 地球科学进展, 2020, 35(9): 962–977.
- Long S M, Liu Q Y, Zheng X T, et al. Research progress of long-term ocean temperature changes in the southern ocean[J]. Advances in Earth Science, 2020, 35(9): 962–977.
- [14] 李扬, 陈权亮, 蔡宏珂, 等. 全球变暖背景下热带太平洋海温长期趋势研究[J]. 气候与环境研究, 2019, 24(6): 723–734.
- Li Y, Chen Q L, Cai H K, et al. Long term trend of tropical Pacific temperature under global warming[J]. Climatic and Environmental Research, 2019, 24(6): 723–734.
- [15] 卢静荣, 张济世. 海陆温差指数与我国华北地区降水的相关性分析[J]. 人民长江, 2018, 49(19): 46–52.
- Lu J R, Zhang J S. Correlation analysis between sea-land temperature difference index and precipitation in North China[J]. Yangtze River, 2018, 49(19): 46–52.
- [16] Wang D X, Liu Q Y, Xie Q, et al. Progress of regional oceanography study associated with western boundary current in the South China Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(11): 1205–1215.
- [17] Hung R H, Gu L, Zhou L T, et al. Impact of the thermal state of the tropical Western Pacific on onset date and process of the South China Sea summer monsoon[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2006, 23(6): 909–924.
- [18] 徐保梁. 全球及区域陆地降水的多时间尺度变化特征及其与海温的联系[D]. 北京: 中国科学院大学(大气物理研究所), 2016.
- Xu B L. Multi-timescale variation characteristics of global and regional precipitation and their relationship with Sea Surface[D]. Beijing: Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [19] Mohino E, Janicot S, Badar J. Sahel rainfall and decadal to multi-decadal sea surface temperature variability[J]. Climate Dynamics, 2011, 37(3): 419–440.
- [20] Giannini A, Saravanan R, Chang P. Oceanic forcing of Sahel rainfall on interannual to interdecadal time scales[J]. Science, 2003, 302(5647): 1027–1030.
- [21] 外力·吾甫尔, 严佩文, 黄丹青. 华南地区秋季无降水日的变化特征及其与海温的联系[J]. 热带气象学报, 2020, 36(1): 108–114.
- Wufuer W L, Yan P W, Huang D Q. Features of the autumn non-rainfall frequency over South China and the associated ocean conditions[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2020, 36(1): 108–114.
- [22] Hoerling M, Eischeid J, Perlwitz J, et al. Characterizing recent trends in U.S. heavy precipitation[J]. Journal of Climate, 2016, 29(7): 2313–2332.
- [23] 相士堂. 黄海北部海温与海雾的关系及海雾长期预报[J]. 海洋通报, 1985, 4(3): 13–18.
- Xiang S T. Relationship between the sea-condition and the sea fog, and the corresponding long-range forecast of sea fog in the northern Yellow Sea[J]. Marine Science Bulletin, 1985, 4(3): 13–18.
- [24] 黄惠谔, 韩美, 潘宁, 等. 福建一次春季海雾的边界层特征及其成因分析[J]. 海峡科学, 2019(3): 12–15, 25.
- Huang H R, Han M, Pan N, et al. Characteristics of the boundary layer of a spring sea fog in Fujian and its cause analysis[J]. Straits Science, 2019(3): 12–15, 25.
- [25] Huang H J, Liu H N, Huang J, et al. Atmospheric boundary layer structure and turbulence during sea fog on the southern China coast[J]. Monthly Weather Review, 2015, 143(5): 1907–1923.
- [26] 战淑芸, 林玉英. 华南沿海海雾的气候特征及其与赤道东太平洋海温的关系[J]. 海洋预报, 1988, 5(1): 23–32.
- Zhan S Y, Lin Y Y. Climatic features of the sea fog along the South China coast and its relation to the eastern equatorial Pacific SST[J]. Marine Forecasts, 1988, 5(1): 23–32.
- [27] 张伟, 陈德花, 胡雅君, 等. 闽南沿海一次春季海雾过程微物理特征分析[J]. 气象, 2021, 47(2): 157–169.
- Zhang W, Chen D H, Hu Y J, et al. Microphysical structure analysis of a spring sea fog event in southern coastal area of Fujian[J]. Meteorological Monthly, 2021, 47(2): 157–169.
- [28] 张春桂. 福建省近海区域海面表层温度的卫星遥感应用研究[J]. 国土资源遥感, 1999(1): 29–32. doi: 10.6046/gtzyyg. 1999. 01.06.

- Zhang C G.Study on the utilization of satellite remote sensing for sea surface temperature of coastal area in Fujian province[J].Remote Sensing for Land and Resources, 1999(1): 29-32. doi: 10.6046/gtzyyg.1999.01.06.
- [29] 刘百桥,王 华,王 宏.用 AVHRR 资料计算月平均海水表层温度场[J].海洋通报,1995,14(6): 24-28.
- Liu B Q, Wang H, Wang H.Calculation of monthly mean sea surface layer temperature field with AVHRR data[J].Marine Science Bulletin, 1995, 14(6): 24-28.
- [30] 孙凤琴,张彩云,商少平,等.西北太平洋部分海域 AVHRR、TMI 与 MODIS 遥感海表层温度的初步验证[J].厦门大学学报(自然科学版),2007,46(s1): 1-5.
- Sun F Q, Zhang C Y, Shang S P, et al. Primary validation of AVHRR/MODIS/TMI SST for part of the Northwest Pacific[J]. Journal of Xiamen University(Natural Science), 2007, 46(s1): 1-5.
- [31] 王其茂,林明森,郭茂华.HY-1 卫星海温反演的误差分析[J].海洋科学进展,2006,24(3): 355-359.
- Wang Q M, Lin M S, Guo M H.Error analysis of sea surface temperature retrieved from the HY-1 satellite data[J].Advances in Marine Science, 2006, 24(3): 355-359.
- [32] 方立新,陈 戈,方朝阳,等.基于 AVHRR/SST 的西太平洋暖池近期变化研究[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2004(1): 103-108.
- Fang L X, Chen G, Fang C Y, et al. An investigation of recent western pacific warm pool variabilities based on AVHRR/SST[J].Periodical of Ocean University of China, 2004(1): 103-108.
- [33] 陈子通.静止气象卫星反演海温及其分析技术方法的研究[J].热带气象学报,2001,17(3): 235-241.
- Chen Z T.Study on SST with GMS observation and the method of analysis technique[J].Journal of Tropical Meteorology, 2001, 17(3): 235-241.
- [34] 张春桂,张 星,曾银东,等.台湾海峡海表面温度的遥感反演及精度检验[J].海洋学报,2008,30(2): 153-160.
- Zhang C G, Zhang X, Zeng Y D, et al. Retrieval and validation of sea surface temperature in the Taiwan Strait using MODIS data[J].Acta Oceanologica Sinica, 2008, 30(2): 153-160.
- [35] 王素娟,崔 鹏,张 鹏,等.FY-3 卫星 VIRR 海表温度产品进展[J].上海航天,2017,34(4): 79-84.
- Wang S J, Cui P, Zhang P, et al. Progress of VIRR sea surface temperature product of FY-3 satellite[J].Aerospace Shanghai, 2017, 34(4): 79-84.
- [36] 廖志宏.FY-3C 卫星数据的海表温度融合与重构研究[D].北京:中国科学院大学(中国科学院遥感与数字地球研究所), 2017.
- Liao Z H.Sea surface temperature reconstruction for FY-3C satellite data[D]. Beijing: Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [37] 段广拓,陈劲松,张彦南,等.基于 Landsat8 卫星热红外影像反演珠江口海表温度[J].应用海洋学学报,2018,37(3): 348-355.
- Duan G T, Chen J S, Zhang Y N, et al. SST retrieving of the Pearl River Estuary by thermal infrared images from Landsat8 satellite[J].Journal of Applied Oceanography, 2018, 37(3): 348-355.
- [38] 于 杰,李永振,陈丕茂,等.利用 Landsat TM6 数据反演大亚湾海水表层温度[J].国土资源遥感,2009,21(3): 24-29. doi: 10.6046/gtzyyg.2009.03.05.
- Yu J, Li Y Z, Chen P M, et al. SST retrieving of DAYA Bay from Landsat TM6[J].remote sensing for land and resources, 2009, 21(3): 24-29. doi: 10.6046/gtzyyg.2009.03.05.
- [39] 王 洁,王 杰,许佳峰,等.长江口邻近海域海表温度变化特征分析[J].海洋科学进展,2020,38(4): 624-634.
- Wang J, Wang J, Xu J F, et al. Characteristics of the sea surface temperature variation in adjacent area of the Yangtze River Estuary[J].Advances in Marine Science, 2020, 38(4): 624-634.
- [40] 张 雷,任国玉,宝乐尔其木格,等.基于卫星观测的南海表层温度气候学特征及长期变化[J].气候变化研究进展,2017, 13(3): 189-197.
- Zhang L, Ren G Y, Baoleerqimuge, et al. Climatology and change of the South China sea surface temperature based on satellite observations[J].Climate Change Research, 2017, 13(3): 189-197.
- [41] 贾丹丹,陈正华,张 威,等.南海珊瑚礁区 34 年卫星遥感海表温度变化的时空特征分析[J].海洋学报,2018,40(3): 112-120.
- Jia D D, Chen Z H, Zhang W, et al. Analysis of temporal and spatial characteristics of sea surface temperature variations over the past 34 years in coral reef areas of the South China Sea[J].Haiyang Xuebao, 2018, 40(3): 112-120.
- [42] 郑贵洲,熊良超,廖艳雯,等.利用 MODIS 数据反演南海南部海表温度及时空变化分析[J].遥感技术与应用,2020,35(1): 132-140.
- Zheng G Z, Xiong L C, Liao Y W, et al. Sea surface temperature inversion of the Southern South China Sea from MODIS and temporal and spatial variation analysis[J].Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(1): 132-140.
- [43] 李恺霖,张春桂,王 宏,等.基于葵花-8 卫星的东南沿海气溶胶时空分布及其变化[J].应用海洋学学报,2019,38(3): 318-328.
- Li K L, Zhang C G, Wang H, et al. Spatial and temporal distribution and variation of aerosol optical depth in coastal southeast China based on Himawari-8 satellite[J].Journal of Applied Oceanography, 2019, 38(3): 318-328.
- [44] 周 旋,叶小敏,周江涛,等.基于 Himawari-8 卫星的逐时次海表温度融合[J].海洋学报,2021,43(1): 137-146.
- Zhou X, Ye X M, Zhou J T, et al. Hourly sea surface temperature fusion based on Himawari-8 satellite[J].Haiyang Xuebao, 2021, 43(1): 137-146.
- [45] 胡 毅,陈 坚,许 江.台湾海峡的海洋沉积环境研究进展[J].海洋通报,2011,30(5): 595-600.
- Hu Y, Chen J, Xu J. Progress in the marine sedimentary environment research for the Taiwan Strait[J].Marine Science Bulletin, 2011, 30(5): 595-600.
- [46] 黄韦良,林传兰,楼琇林,等.台湾海峡及其邻近海域海面温度锋的卫星遥感观测[J].海洋学报,2006,28(4): 49-55.
- Huang W G, Lin C L, Lou X L, et al. Satellite observations of the thermal front in the Taiwan Strait and its adjacent seas[J].Haiyang Xuebao, 2006, 28(4): 49-55.
- [47] Kurihara Y, Murakami H, Kachi M. Sea surface temperature from the new Japanese geostationary meteorological Himawari-8 satellite[J].Geophysical Research Letters, 2016, 43(3): 1234-1240.
- [48] 张 晨.近 140 年东海及毗邻的西北太平洋海域表层海温时空分布特征分析[D].上海:上海师范大学,2019.

Zhang C. Analysis of the spatiotemporal distribution characteristics of surface sea surface temperature in the East China Sea and adjacent Northwest Pacific waters in the past 140 years [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2019.

[49] Deser C, Timlin M S. Atmosphere-ocean interaction on weekly timescales in the North Atlantic and Pacific [J]. *Journal of Climate*, 1997, 10(3): 393-408.

[50] Kushnir Y, Robinson W A, Bladé I, et al. Atmospheric GCM response to extratropical SST anomalies: Synthesis and evaluation [J]. *Journal of Climate*, 2002, 15(16): 2233-2256.

[51] Tanimoto Y, Nakamura H, Kagimoto T, et al. An active role of extratropical sea surface temperature anomalies in determining anomalous turbulent heat flux [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2003, 108(c10): 3304.

[52] 陈宏莉, 徐海明, 马 静, 等. 月内尺度上与冬季北太平洋大范围海温暖异常相联系的海气相互作用特征 [J]. *大气科学*, 2022, 46(2): 293-308.

Chen H L, Xu H M, Ma J, et al. Characteristics of Air-sea interaction associated with large-scale sea surface temperature warm anomalies over the North Pacific in winter on submonthly timescales [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2022, 46(2): 293-308.

[53] 曾红玲, 高新全, 戴新刚. 近 20 年全球冬、夏季海平面气压场和 500 hPa 高度场年代际变化特征分析 [J]. *高原气象*, 2002(1): 66-73.

Zeng H L, Gao X Q, Dai X G. Analyses on interdecadal change characteristics of global winter and summer sea surface pressure field and 500 hPa height field in recent twenty years [J]. *Plateau Meteorology*, 2002, 21(1): 66-73.

[54] 吴国雄, 刘屹岷, 宇婧婧, 等. 海陆分布对海气相互作用的调控和副热带高压的形成 [J]. *大气科学*, 2008, 32(4): 720-740.

Wu G X, Liu Y M, Yu J J, et al. Modulation of land-sea distribution on air-sea interaction and formation of subtropical anticyclones [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(4): 720-740.

[55] 张春桂, 蔡义勇, 张加春. MODIS 遥感数据在我国台湾海峡海雾监测中的应用 [J]. *应用气象学报*, 2009, 20(1): 8-16.

Zhang C G, Cai Y Y, Zhang J C. The application of monitoring sea fog in Taiwan Strait using MODIS remote sensing data [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2009, 20(1): 8-16.

[56] 王彬华. 海雾 [M]. 北京: 海洋出版社, 1983.

Wang B H. Sea fog [M]. Beijing: China Ocean Press, 1983.

Analysis and application of spatiotemporal variation in sea surface temperature in the Taiwan Strait based on Himawari-8 data

ZHANG Chungui^{1,2}, WU Zuohang^{1,2}, WANG Jing³, CHEN Wenjia⁴

(1. Fujian Institute of Meteorological Sciences, Fuzhou 350008, China; 2. Fujian Key Laboratory of Severe Weather, Fuzhou 350008, China; 3. Fujian Meteorological Information Center, Fuzhou 350008, China; 4. Xiapu Meteorological Bureau, Ningde 355100, China)

Abstract: The Taiwan Strait holds a significant strategic position and great value for research. Investigating the spatiotemporal variations in sea surface temperature (SST) in the Taiwan Strait and its surrounding sea areas helps enhance the understanding of the marine-continental environmental interactions and changes in ocean currents in this region. Such investigation is particularly significant for comprehensively understanding the complex marine frontal systems within the Taiwan Strait. This study investigated the Taiwan Strait and its surrounding sea areas. Using 2016—2020 Himawari-8 satellite data, this study determined the annual, seasonal, and ten-day averages of SST remote sensing data. Based on these data, this study examined spatiotemporal variations in the SST and, accordingly, explored correlations between SST and inland precipitation and coastal fog in Fujian. The results indicate that the annual mean SST in the Taiwan Strait and surrounding sea areas exhibited a zonal distribution, increasing gradually from northwest to southeast. Seasonally, the SST exhibited two distribution patterns: a winter pattern, with isotherms approximately parallel to the coast, and a summer pattern, with isotherms more uniformly distributed. The ten-day SST data allowed for more fine-scale characterization of the spatiotemporal variations in the SST of the Taiwan Strait. The inland monthly precipitation generally exhibited a weak negative correlation with monthly mean SST, with this correlation strengthening with an increase in the distance from open sea areas. Additionally, a strong negative correlation was observed between the SST and coastal fog, with the coastal fog occurrence number trending downward with increasing SST.

Keywords: Taiwan Strait; SST spatiotemporal variation; Himawari-8; sea fog

(责任编辑: 陈 庆)