

1974—2020 年珠江口外海海洋热浪变化趋势分析

唐灵^{1,2}, 聂宇华^{1,2}, 王平^{1,2}, 汤超莲^{1,2}

1. 国家海洋局南海信息中心, 广东 广州 510310;

2. 自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室, 广东 广州 510330

摘要: 基于珠江口大万山海洋站(21°56'N, 113°43'E)观测的 1974—2020 年逐日平均海表温度(sea surface temperature, SST)资料, 参照世界气象组织关于海洋热浪(marine heatwave, MHW)定义、强度分类标准及全球与北半球年平均表面温度资料, 采用相关及对比方法, 分析珠江口海洋热浪的变化趋势, 结果表明: (1)近 47 年来珠江口每年都出现 MHW 事件, 平均每年出现 6.5 次, 最多年 13 次(2020 年), 且每年出现次数呈上升趋势, 平均每次持续时间为 11.7d, 最长 62d; (2)近 47 年来每年珠江口的 MHW 日数呈显著增加趋势, 上升率为 $1.81 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$; (3)此时期各级 MHW 强度的出现日数占总出现日数的比例分别为中度 18.92%, 强烈 53.24%, 严重 24.06%, 极端 3.77%; (4)珠江口 MHW 日数上升及出现极端 MHW 的主要原因可能与全球气候变暖、南海高压增强和季风减弱有关。预估未来珠江口的 MHW 日数还会呈现上升趋势。

关键词: 海洋热浪; 全球变暖; 季风减弱; 珠江口

中图分类号: P732

文献标识码: A

文章编号: 1009-5470(2022)06-0143-08

Trend analysis of marine heatwaves variability in the outer Pearl River estuary from 1974 to 2020

TANG Ling^{1,2}, NIE Yuhua^{1,2}, WANG Ping^{1,2}, TANG Chaolian^{1,2}

1. South China Sea Information Center, State Oceanic Administration, Guangzhou 510310, China;

2. Key Laboratory of Marine Environment Survey Technology and Application, Ministry of Natural Resource, Guangzhou 510330, China

Abstract: Based on the daily mean sea surface temperature (SST) data observed at the Dawanshan Marine Environmental Monitoring Station (DMEMS) in the Pearl River Estuary from 1974 to 2020, the definition of marine heatwaves (MHW) adopted by the World Meteorological Organization, the intensity classification criteria, and the global and northern hemisphere annual mean surface temperature anomaly data, the trends of MHW in the Pearl River Estuary are analyzed using correlation and comparison methods. The results show that: 1) MHW incidents have occurred annually in the Pearl River Estuary in the past 47 years, with an average of 6.5 times per year and up to 13 times in 2020. There is an upward trend in the number of occurrences every year. The average duration is 11.7 days, up to 62 days. 2) MHW days in the Pearl River Estuary have increased significantly in the past 47 years, with an increasing rate of $1.81 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$. 3) During this period, the proportion of MHW days with each level of intensity to all days is: moderate 18.92%, strong 53.24%, severe 24.06% and extreme 3.77%. 4) The main reasons for the increase of MHW days and the occurrence of extreme MHW in the Pearl River Estuary might be global warming, enhanced high pressure and weakened monsoon in the South China Sea. It is estimated that the MHW days in the Pearl River Estuary will increase in the future.

收稿日期: 2022-01-27; 修订日期: 2022-04-20。林强编辑

基金项目: 科技部科技基础资源调查专项课题(2019FY202110)

作者简介: 唐灵(1979—), 男, 湖南省衡阳市人, 工程师, 博士, 主要从事物理海洋相关研究。email: sunnytl969@163.com

通信作者: 唐灵。email: sunnytl969@163.com

Received date: 2022-01-27; Revised date: 2022-04-20. Editor: LIN Qiang

Foundation item: Science and Technology Fundamental Resources Survey Program of Ministry of Science and Technology (2019FY202110)

Corresponding author: TANG Ling, email: sunnytl969@163.com

Key words: marine heatwaves; global warming; weakening of monsoon; Pearl River Estuary

近年来,受全球气候变暖等因素影响,海洋热浪(marine heatwave, MHW)研究迅速发展成为一个重要的研究前沿。前人在研究 2011 年 2—3 月澳大利亚西南海岸的水温变暖事件过程中,首次提出海洋热浪概念(Pearce et al, 2011)。近 30 年来,海洋热浪发生的次数持续增加,其延续时间可达数月,空间范围可延伸至数千千米(自然资源部, 2020)。海洋热浪可导致珊瑚白化现象,并对鱼类和海洋生态系统构成严重威胁(Donovan et al, 2021; Laufkötter et al, 2020)。

海洋热浪通常定义为一个长时间、离散的异常暖水事件。具体来说,如果 SST 连续 5d(含 5d)以上高于 30 年气候基准期内的第 90 个百分位,即为一次海洋热浪事件(Hobday et al, 2016)。海洋热浪强度等级划分(图 1)参考 Hobday 等(2018)的划分方法,本文以 1981—2010 年为气候基准期,以气候基准期 30 年 SST 平均值作为常年气候均值(虚线),以气候基准期的第 90 个百分位值(绿色细线)与常年气候均值之差的 1~4 倍进行等级划分,把海洋热浪分成 I 中度(moderate), II 强烈(strong), III 严重(severe)和 IV 极端(extreme)4 个等级。

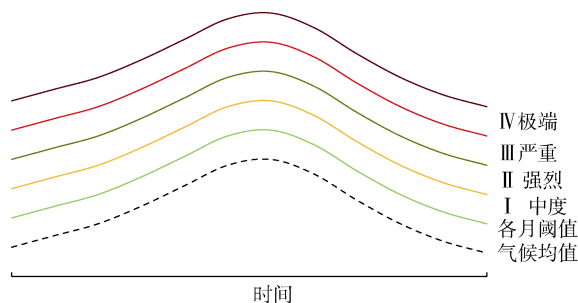


图 1 海洋热浪等级划分示意图(改自 Hobday et al, 2018)
Fig. 1 Categorization schematic for MHW(modified from Hobday et al, 2018)

MHW 强度等级分类自 2019 年开始已为国内外气象、海洋部门所广泛采用。前人通过分析 2019 年中国近海海洋热浪事件特征,给出了各海区的海洋热浪发生频次、发生日数、平均强度与最大强度(王爱梅等, 2021)。全球海洋 1982、2000 和 2016 年各年 MHW 强度的全球分布结果显示,珠江口在 1982 年没有出现 MHW,但 2000 年和 2016 年分别出现了中度和强海洋热浪事件(Hobday et al, 2018)。2019 年度《中国海平面公报》中给出中国海域 1—4 月 SST 距平分布(自然资源部, 2020),显示 2—4 月珠江

口区域 SST 距平偏高,容易发生 MHW 事件。世界气象组织 WMO(World Meteorological Organization) 2019 与 2020 年全球气候状况声明中给出珠江口为 MHW 强烈级海域(WMO, 2020, 2021)。MHW 强度变化趋势研究也日益引起人们关注(缪予晴等, 2021),并对导致海洋热浪的时空分布、物理机制及影响等开展了研究(Hu et al, 2021; Oliver et al, 2021; 胡石建等, 2022)。通过研究多年 MHW 总日数、持续时间、强度与频率等,得出中国沿海 MHW 各项指数均呈显著上升趋势(Yao et al, 2020, 2021)。

在全球变暖的背景下,海洋热浪将在全球大部分海域变得更加频繁、持久和强烈。研究显示,1982—2016 年,全球海洋热浪事件平均发生频率增加为每 10 年 0.45 次,强度增长为每 10 年 0.085°C ,持续时间增长为每 10 年 1.3d。现有研究尚未充分揭示对温度极为敏感但又与人类活动密切相关的近海海域等海洋热浪特征及机制。研究资料主要基于卫星观测海表面温度及少数锚定浮标海洋温度数据,存在卫星表层海温数据误差较大、时间分辨率有限、浮标站点数量较少等问题(胡石建等, 2022)。本文采用大万山海洋站 1974—2020 年观测的逐日 SST 资料,研究了珠江口近 47 年来 MHW 的年际及年代际变化特征。为更准确把握 MHW 变化情况,还对该区域四季 MHW 变化趋势进行了分析,旨在为研究 SST 长期变化与赤潮、珊瑚白化等海洋生态灾害的关系,以及 MHW 变化的气候预估等提供参考。

1 资料和方法

本文所用的大万山海洋站($21^{\circ}56'\text{N}$, $113^{\circ}43'\text{E}$)逐日平均 SST 数据源自自然资源部南海局档案馆。打鼓岭($22^{\circ}32'\text{N}$, $114^{\circ}09'\text{E}$)和上川岛站($21^{\circ}44'\text{N}$, $112^{\circ}46'\text{E}$)气温资料分别取自香港天文台与广东省气象局。全球温度距平资料取自 HadCRUT5 系列(<https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/Temperature/>, 其气候基准值为 1981—2010 年平均)。全球海洋 MHW 出现率资料取自 2019 年美国气象学会年报(<https://doi.org/10.1175/2020BAMSStateoftheClimate.1>)。香港月平均 500hPa 高度资料(1974—2020)来自香港天文台历年年报(<http://www.weather.gov.hk/sc/publica/pubsmo.htm>)。热带气旋资料取自香港天文台热带气旋年报。

中国沿海多个海洋台站 SST 资料 2002 年以前

存在较为严重的均一性问题(李琰 等, 2018), 主要原因是仪器变更、迁站或测站环境发生重大变化。大万山站 SST 测站从未搬迁过, 但测次有过变化。该站的 SST 观测在 2006 年 9 月前为每天 3 次(8、14、20 时); 2006 年 10 月以后为每天 24 个整点时刻的 SST 记录。本文使用 2019 年版《海滨观测规范第 2 部分: 海滨观测》(GB/T14914.2-2019)规定, 以 08 时记录加权的每日 4 次平均 SST 为日平均 SST。据 2010—2019 年资料统计, 大万山站月平均 SST 的 3 次加权与逐时观测的差值在 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ 以内。本文使用的 SST 系 3 次加权法则。

本文通过与附近气象站点具有较好均一性的气温资料进行对比分析来评估大万山站 SST 资料的均一性。任国玉 等(2010)对全国地面气象观测数据质量进行了系统评估, 得出上川岛站是广东沿海气温均一性较好的测站。另外, 香港地区无城市热岛效应、气温资料均一性较好的气象站为建于 1969 年的打鼓岭(TKL)站(Wang et al, 2018)。把大万山站 SST 资料与上川岛、打鼓岭站气温资料进行对比, 经相关分析可得出大万山年平均 SST 与上川岛、打鼓岭站年平均气温呈显著相关性(图 2), 表明本文所用的大万山 SST 序列具有较好的均一

性。本文所采用的 MHW 定义及分级标准与 WMO 报告相同(图 1)。

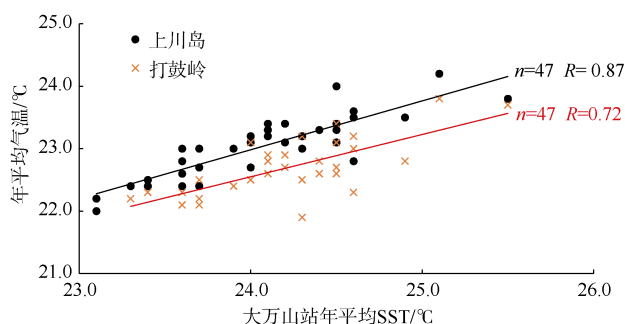


图 2 大万山海洋站年平均 SST 与邻近气象站年平均气温相关性

Fig. 2 Correlation between the annual mean SST at the Dawanshan Marine Environmental Monitoring Station (DMEMS) and the annual mean temperature of adjacent meteorological stations

2 结果与分析

2.1 1974—2020 年珠江口 MHW 年际及年代际变化趋势

2.1.1 MHW 年际变化趋势

1974—2020 年珠江口大万山站每年 MHW 总日数及各级 MHW 的逐年变化趋势如图 3 所示。

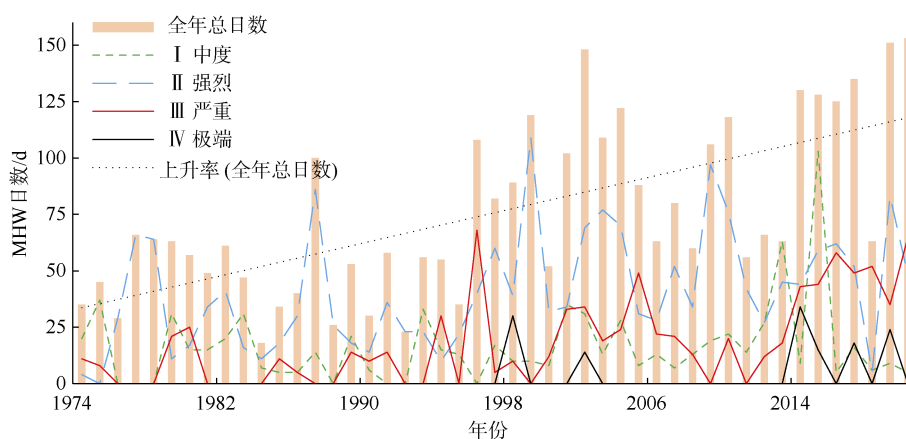


图 3 1974—2020 年珠江口各级 MHW 日数变化趋势

Fig. 3 Variation trend of MHW days at all levels in the Pearl River Estuary from 1974 to 2020

分析图 3 中资料关系得出:

- 1) 珠江口每年 MHW 总日数呈上升趋势, 上升率为 $1.83\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$ ($n=47$, $R=0.67$, $P<0.01$);
- 2) 此时期珠江口各级 MHW 出现日数比例为中度 18.92%, 强烈 53.24%, 严重 24.06%, 极端 3.77%;
- 3) 1982—2020 年珠江口平均每年 MHW 发生率为 22%, 高于同期全球海洋 MHW 平均发生率约 1 倍。

2.1.2 MHW 年代际变化趋势

近 40 年来珠江口 MHW 日数存在显著的年代际变化, 并且与全球气候变暖密切相关。表 1 给出大万山海洋站近 40 年来 MHW 总日数及各级 MHW 日数的年代际变化, 同时给出全球、北半球地面温度距平的年际变化。表 1 表明, 近 40 年来珠江口的 MHW 日数年代际变化呈显著上升趋势, 由 1980s 的 10 年 42.2d 上升至 2010s 的 10 年 108d。

表 1 珠江口海洋热浪年代际变化
Tab. 1 Interdecadal variation of MHW in Pearl River Estuary

年代际	MHW 日数	MHW 强度等级日数				全球温度距平/℃	北半球温度距平/℃
		中度	强	严重	极端		
1981—1990	42.2	12.4	29.4	0.4	0.0	−0.16	−0.27
1991—2000	67.5	11.4	39.2	13.9	3.0	−0.04	−0.03
2001—2010	100.0	18.9	56.8	23.5	1.4	0.21	0.30
2011—2020	108.0	14.7	46.0	38.2	9.1	0.41	0.56

注: 温度距平数据取自 HadCRUT5, 以 1981—2010 年平均 SST 为气候均值

2.2 1974—2020 年珠江口四季 MHW 变化趋势

2.2.1 冬季 MHW 变化趋势

珠江口冬季(上年 12 月与当年 1、2 月)各月 SST 月均值为 20.17~17.27℃。1974—2020 年大万山站各级 MHW 日数的变化趋势如图 4 所示。统计图 4 中资料得出: (1)各级 MHW 出现日数的比例为中度 18.7%, 强烈 41.6%, 严重 30.8%, 极端 8.9%; (2)近 47 年冬季的 MHW 日数呈上升趋势, 上升率为

0.53d·a^{−1}(*n*=47, *R*=0.44, *P*<0.01)。

2.2.2 春季 MHW 变化趋势

珠江口春季(3—5 月)各月 SST 月均值在 20.36~27.46℃之间, 各级 MHW 日数的变化趋势为图 5 所示。统计图 5 中资料得出: (1)各级 MHW 出现日数的比例为中度 33.7%, 强烈 56.4%, 严重 9.9%, 极端 0; (2)近 47 年冬季的 MHW 日数呈上升趋势, 上升率为 0.31d·a^{−1}(*n*=47, *R*=0.29, *P*<0.01)。

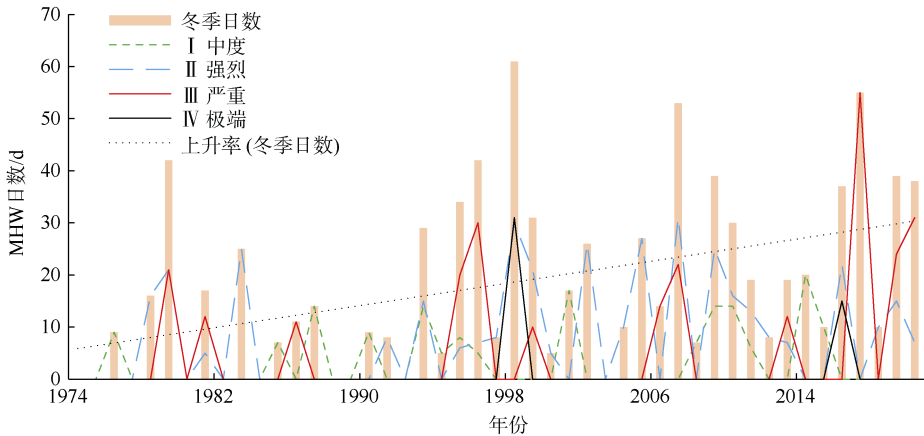


图 4 1974—2020 逐年冬季珠江口各级 MHW 日数变化趋势
Fig. 4 Variation trend of MHW days at all levels in Pearl River Estuary in winter from 1974 to 2020

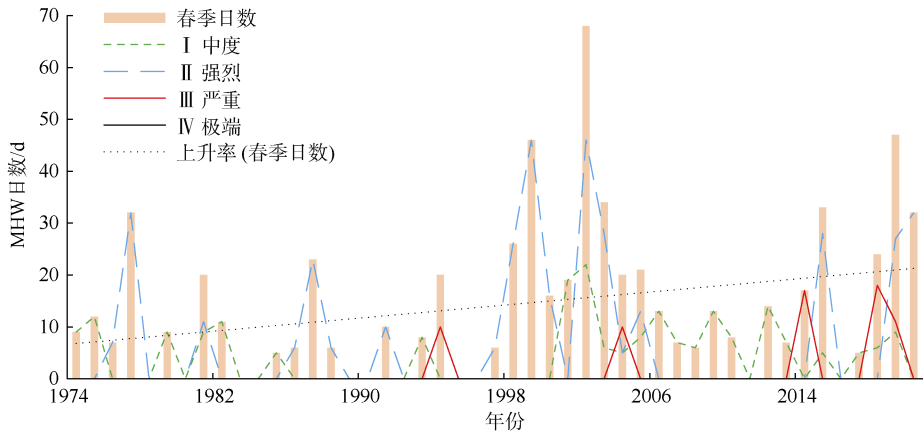


图 5 1974—2020 逐年春季珠江口各级 MHW 日数变化趋势
Fig. 5 Variation trend of MHW days at all levels in the Pearl River Estuary in spring from 1974 to 2020

2.2.3 夏季 MHW 变化趋势

珠江口夏季(6—8 月)各月 SST 月均值在 29.12~29.86℃ 之间, 历史上有过月均值为 31.46℃ (2016 年 6 月)。1974—2020 年大万山站各级 MHW 的变化趋势如图 6 所示。统计图 6 中资料得出: (1) 各级 MHW 出现日数的比例为中度 13.1%, 强烈 50.7%, 严重 33.4%, 极端 2.8%; (2) 近 47 年夏季的 MHW 日数呈显著上升趋势, 上升率为 0.45d·a⁻¹ (n=47, R=0.46, P<0.01)。

2.2.4 秋季 MHW 变化趋势

珠江口秋季(9—11 月)各月 SST 月平均值在 24.82~29.28℃ 之间, 各级 MHW 日数的变化趋势为图 7 所示。统计图 7 中资料得出: (1) 各级 MHW 出现日数的比例为中度 19.1%, 强烈 63.2%, 严重 11.4%, 极端 6.3%; (2) 近 47 年冬季的 MHW 日数呈上升趋势, 上升率为 0.57d·a⁻¹ (n=47, R=0.51, P<0.01)。

综上, 1974—2020 年大万山海洋站四季海洋热浪参数见表 2。

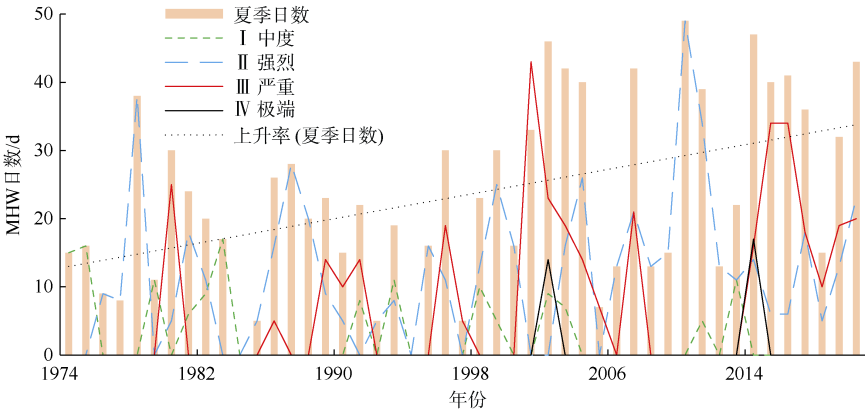


图 6 1974—2020 逐年夏季珠江口各级 MHW 日数变化趋势
Fig. 6 Variation trend of MHW days at all levels in the Pearl River Estuary in summer from 1974 to 2020

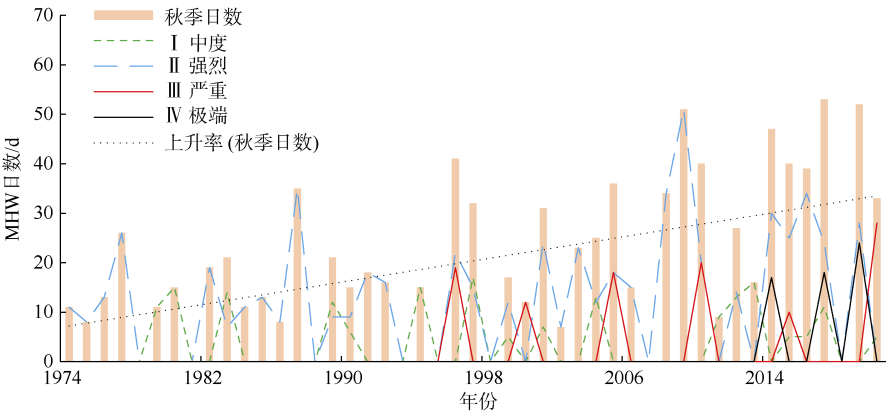


图 7 1974—2020 逐年秋季珠江口各级 MHW 日数变化趋势
Fig. 7 Variation trend of MHW days at all levels in the Pearl River Estuary in autumn from 1974 to 2020

表 2 1974—2020 年大万山海洋站四季海洋热浪参数比较
Tab. 2 Comparison of MHW parameters at DMEMS in four seasons from 1974 to 2020

季节	MHW		各级强度比例/%				最大强度	MHW 日数上升率/(d·a ⁻¹)
	平均次数/季	平均日数/次	中度	强烈	严重	极端		
冬	1.38	17.2	18.7	41.6	30.8	8.9	4.44*	0.53
春	1.25	14.2	33.7	56.4	9.85	0.0	3.00	0.31
夏	2.38	23.0	13.1	50.7	33.4	2.8	2.61	0.45
秋	1.72	20.2	19.1	63.2	11.4	6.3	2.46	0.57
全年	6.73	74.6	18.9	53.2	24.1	3.8	4.44	1.83

注: *受超强 ENSO 事件影响, 1998 年 1 月全月处于 MHW 中

2.3 珠江口海洋热浪增多、增强的主要影响因素

由前人有关珠江口 SST 变化特征分析(汤超莲等, 2004, 2007; 邓松等, 2005; 郑兆勇等, 2010; 程泽梅等, 2016)、2016、2020 年广东气候公报(广东省气候中心, 2016, 2020)及 2019、2020 年中国海平面公报(自然资源部, 2020, 2021)可知: 近 47 年来珠江口海洋热浪增多、增强的主要原因可能是受全球气候变暖、南海高压增强和冬、夏季风偏弱的影响。

图 8 为 1974—2020 年大万山站每年 MHW 日数与全球地面温度变化的对应关系, 显示二者呈显著正相关($n=47$, $R=0.71$, $P<0.01$)。

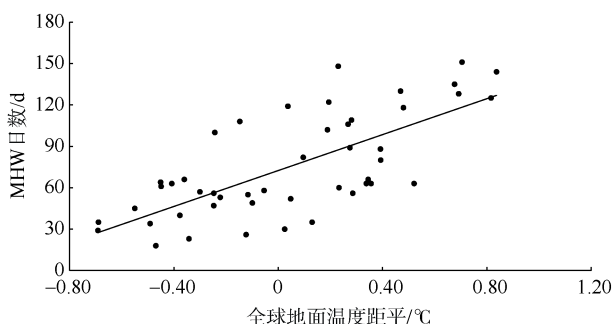


图 8 1974—2020 年每年珠江口海洋 MHW 日数与全球地面温度距平对应关系

Fig. 8 Correspondence between the MHW days in the Pearl River Estuary and the global surface temperature anomaly from 1974 to 2020

图 9 为珠江口 MHW 日数与该地区上空南海高压变化的对应关系。珠江口上空南海高压的强弱变化用香港天文台实测的 500hPa 位势高度表示。图 9 表明 1974—2020 年每年夏季珠江口 MHW 日数与 500hPa 高度呈显著正相关关系($n=47$, $R=0.40$, $P<0.01$)。

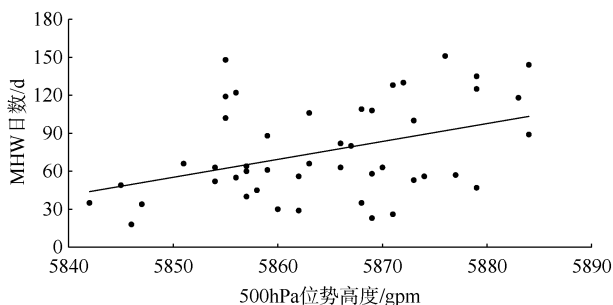


图 9 1974—2020 年每年夏季珠江口 MHW 日数与香港 500hPa 高度的对应关系

Fig. 9 Correspondence between MHW days in the Pearl River Estuary and the geopotential height of 500hPa in Hong Kong during the summer from 1974 to 2020

值得注意的是冬季风影响时期是否有强寒潮过境, 将对冬、春月份 MHW 的变化产生重大的影响, 且冬季由东亚冬季风异常导致的 SST 异常可持续至夏季(梁巧倩等, 2006)。通过典型暖年(2016、2020)MHW 差异分析可加深认识。

2.4 典型暖年珠江口 MHW 差异原因分析

根据 WMO(World Meteorological Organization) 2020 年报, 2016 与 2020 年为全球近百年来最暖年与第二暖年(WMO, 2021)。这两年珠江口的 MHW 变化存在两处明显差异: 一是 2016 年 2—5 月连续 4 个月没有出现热浪; 二是热浪日数 2016 年比 2020 年少 30d(表 3)。根据前人(汤超莲等, 2006; 程泽梅等, 2016)对珠江口 SST 变化原因的分析结果, 估计造成这种差异的主要原因如下。

1) 2016 年 1 月 23 日开始受到百年一遇强寒潮过境影响(何俊杰等, 2016), 这次寒潮引起的降温一直影响到西沙海域(周宇, 2017)。1 月 24 日香港天文台地面气压 1034.6hPa, 为近百年来最高纪录(香港天文台, 2016a)。大万山 1 月 23—26 日各天的日平均气温低于 9°C , 24 日最低气温 2.7°C , 为近 47 年来最低纪录。2—3 月仍有寒潮与强冷空气过境, 导致香港天文台 2—3 月的平均气温较气候基准值低 $1.3\sim 1.6^{\circ}\text{C}$ (香港天文台, 2016b, 2016c); 大万山站月平均 SST 较气候基准值低 $0.6\sim 1.2^{\circ}\text{C}$, 并持续影响到 5 月份, 故连续 4 个月没有 MHW 出现(表 3)。

2) 南海高压影响: 表 3 中 5—11 月有南海高压控制的月份都出现 MHW, 日数在 7~23d 之间(仅 2016 年 5 月是例外); 没有南海高压控制的月份未出现 MHW, 仅 2020 年 11 月份例外, 原因是该月 8—12 日, 热带气旋“艾陶”(Eta)及“环高”(Vamco)横过南海, 受热带气旋外围云带影响, 珠江口日均 SST 下降; 16—30 日, 又受到寒潮影响, 珠江口日均 SST 再次下降 1°C 。2020 年为冬季风与冷空气势力偏弱年(广东省气候中心, 2020), 因此, 这两年 1 月下旬至 4 月份的逐日 SST 及 MHW 变化截然不同(图 10), 2016 年 2—5 各月没有出现热浪。

3 结论

本文利用珠江口大万山海洋站观测的 1974—2020 年 SST 资料、全球温度距平资料、香港实测 500hPa 资料、国际通用海洋热浪(MHW)分级标准和相关文献资料, 分析近 47 年来珠江口 MHW 变化趋势和特征, 结果如下。

表 3 大万山海洋站 2016 和 2020 年逐月水文气象参数比较
Tab. 3 Comparison of monthly hydrometeorological parameters at DMEMS in 2016 and 2020

年份	项目	月份												年
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
2016	热浪日数/d	20	0	0	0	0	17	23	0	0	16	23	24	123
	月 SST 距平/℃	0.6	-1.2	-1.2	-0.6	-0.2	1.4	0.8	-1.3	0.1	0.7	1.4	-0.3	0.6
	500hPa 高度	5820	5840	5826	5856	5881	5892	5885	5859	5879	5887	5887	5858	5864
2020	热浪日数/d	31	9	10	0	22	19	24	0	19	14	0	7	153
	月 SST 距平/℃	1.7	1.4	1.8	0.5	1.8	1.4	1.1	0.3	1.4	-0.1	-0.26	0.72	0.9
	500hPa 高度	5830	5841	5844	5855	5884	5888	5891	5872	5893	5910	5893	5856	5872

注: 500hPa 高度≥5880 表示该月为南海高压控制

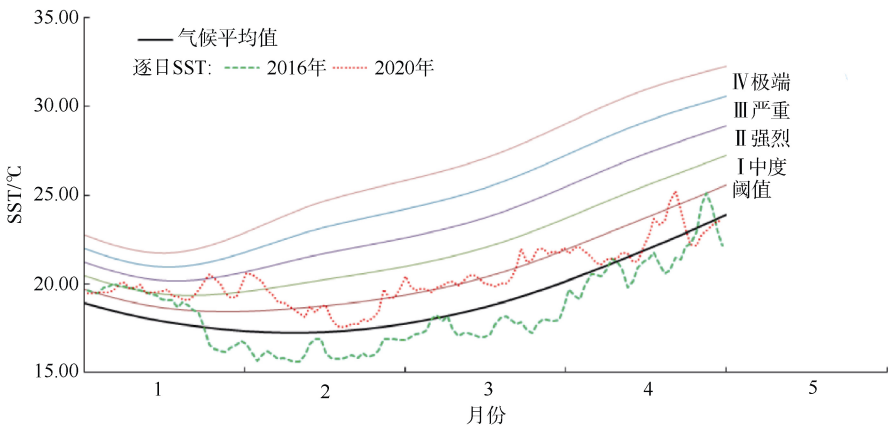


图 10 大万山站 2016 和 2020 年 1—4 月逐日 SST 变化
Fig. 10 Daily SST at the Dawanshan Marine Environmental Monitoring Station (DMEMS) from January to April of 2016 and 2020

1) 珠江口全年各月均可出现 MHW, 季平均 MHW 次数及持续时间以夏季最多(2.38 次·a⁻¹)、最长(23d·次⁻¹)。
2) 近 47 年来, 珠江口全年及各季的 MHW 日数都呈显著上升趋势, 上升率为全年 1.83d·a⁻¹, 冬季 0.53d·a⁻¹, 春季 0.31d·a⁻¹, 夏季 0.45d·a⁻¹, 秋季 0.57d·a⁻¹。

3) 近 47 年珠江口出现的 MHW 按强度划分, 各季都以强烈(strong)级所占比例最大, 年平均占 53.2%; 其次是严重(severe)级, 年平均占 24.1%; 极端(extreme)级极少出现, 仅占 3.8%。
4) 珠江口 MHW 日数增多的主要原因可能与全球气候变暖、南海高压增强与东亚季风减弱有关。

参考文献 References

程泽梅, 汤超莲, 蔡兵, 等, 2016. 1960-2013 年华南沿海海洋站 SST 变化及其影响因子[J]. 热带地理, 36(6): 906-914.
CHENG ZEMEI, TANG CHAOLIAN, CAI BING, et al, 2016. Influencing factors of SST variation along the South China Coast during 1960-2013[J]. Tropical Geography, 36(6): 906-914 (in Chinese with English abstract).
邓松, 汤超莲, 游大伟, 2005. 1998 年冬春季粤港赤潮爆发海区异常高 SST 成因分析[J]. 海洋通报, 24(4): 17-21. DENG SONG, TANG CHAOLIAN, YOU DAWEI, et al, 2005. Analysis of abnormally high SST in the red tide sea areas of Guangdong and Hong Kong in the winter-spring of 1998[J]. Marine Science Bulletin, 24(4): 17-21 (in Chinese with English abstract).
广东省气候中心, 2016. 广东省气候影响评价[R]. 广州: 广东省气候中心(in Chinese).
广东省气候中心, 2020. 广东省气候公报[R]. 广州: 广东省气候中心(in Chinese).
何俊杰, 何宇恒, 2016. 2016 年 1 月下旬强烈寒潮对香港的影响和预报方法[C]//第 33 届中国气象学会年会 S1 灾害天气监测、分析与预报. 西安: 中国气象学会: 510(in Chinese).
胡石建, 李诗翰, 2022. 海洋热浪研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 37(1): 51-64. HU SHIJIAN, LI SHIHAN, 2022. Progress and prospect of marine heatwave study[J]. Advances in Earth Science, 37(1): 51-64 (in Chinese with English abstract).
李琰, 王国松, 范文静, 等, 2018. 中国沿海海表温度均一性检验和订正[J]. 海洋学报, 40(1): 17-28. LI YAN, WANG GUOSONG, FAN WENJING, et al, 2018. The homogeneity study of the sea surface temperature data along the coast of the China Seas[J]. Haiyang Xuebao, 40(1): 17-28 (in Chinese).

- with English abstract).
- 梁巧倩, 简茂球, 彭勇刚, 等, 2006. 东亚冬季风异常对西北太平洋海温的影响[J]. 热带海洋学报, 25(6): 1–7. LIANG QIAOQIAN, JIAN MAOQIU, PENG YONGGANG, et al, 2006. Impacts of East Asian winter monsoon on sea surface temperature in northwestern Pacific[J]. Journal of Tropical Oceanography, 25(6): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- 缪予晴, 徐海明, 刘佳伟, 2021. 西北太平洋夏季海洋热浪的变化特征及海气关系[J]. 热带海洋学报, 40(1): 31–43. MIAO YUQING, XU HAIMING, LIU JIAWEI, 2021. Variation of summer marine heatwaves in the Northwest Pacific and associated air-sea interaction[J]. Journal of Tropical Oceanography, 40(1): 31–43 (in Chinese with English abstract).
- 任国玉, 张爱英, 初子莹, 等, 2010. 我国地面气温参考站点遴选的依据、原则和方法[J]. 气象科技, 38(1): 78–85. REN GUOYU, ZHANG AIYING, CHU ZIYING, et al, 2010. Principles and procedures for selecting reference surface air temperature stations in China[J]. Meteorological Science and Technology, 38(1): 78–85 (in Chinese with English abstract).
- 汤超莲, 游大伟, 邓松, 等, 2004. 珠江口赤潮多发性海表水温变化特征[C]//中国赤潮研究与防治(一)—中国海洋学会赤潮研究与防治学术研讨会论文集. 广州: 中国海洋学会: 97–103(in Chinese).
- 汤超莲, 郑兆勇, 游大伟, 等, 2006. 珠江口近 30a 的 SST 变化特征分析[J]. 台湾海峡, 25(1): 96–101. TANG CHAOLIAN, ZHENG ZHAOYONG, YOU DAWEI, et al, 2006. Analysis of SST variation in recent 30 years in the Zhujiang River estuary[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 25(1): 96–101 (in Chinese with English abstract).
- 汤超莲, 游大伟, 邓松, 等, 2007. 20 世纪 2 次最强 El Nino 事件珠江口 SST 变化的差异[J]. 广东气象, 29(2): 11–13. TANG CHAOLIAN, YOU DAWEI, DENG SONG, et al, 2007. Analysis on the difference of SST variations during two strongest El Nino events of 20th century in Pearl River Estuary[J]. Guangdong Meteorology, 29(2): 11–13 (in Chinese with English abstract).
- 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. WANG AIMEI, WANG HUI, FAN WENJING, et al, 2021. Study on characteristics of marine heatwave in the China offshore in 2019[J]. Haiyang Xuebao, 43(6): 35–44 (in Chinese with English abstract).
- 香港天文台. 2016 年 1 月天气回顾[EB/OL]. (2016a-02-02)[2022-01-26]. <https://www.hko.gov.hk/sc/wxinfo/pastwx/mws2016/mws201601.htm>.
- 香港天文台. 2016 年 2 月天气回顾[EB/OL]. (2016b-03-02)[2022-01-26]. <https://www.hko.gov.hk/sc/wxinfo/pastwx/mws2016/mws201602.htm>.
- 香港天文台. 2016 年 3 月天气回顾[EB/OL]. (2016c-04-05)[2022-01-26]. <https://www.hko.gov.hk/sc/wxinfo/pastwx/mws2016/mws201603.htm>.
- 郑兆勇, 周雄, 江四义, 等, 2010. 近 50 年华南沿海 SST 热事件变化的时空特征[J]. 热带海洋学报, 29(4): 14–19. ZHENG ZHAOYONG, ZHOU XIONG, JIANG SIYI, et al, 2010. Spatial and temporal variations of high sea-surface temperature events during 1960–2009 in the coastal waters off South China[J]. Journal of Tropical Oceanography, 29(4): 14–19 (in Chinese with English abstract).
- 周宇, 2017. 南海西沙一次冷空气强风分析[J]. 海洋预报, 34(4): 58–65. ZHOU YU, 2017. Analysis on gale weather process accompanied by severe cold air on Xisha islands of South China Sea[J]. Marine Forecasts, 34(4): 58–65 (in Chinese with English abstract).
- 自然资源部, [2020-05-21]. 2019 年中国海平面公报[EB/OL]. 北京: 自然资源部. <http://www.nmdis.org.cn/hygb/zghpmbg/2019nzghpmbg>.
- 自然资源部, [2021-04-28]. 2020 年中国海平面公报[EB/OL]. 北京: 自然资源部. <http://www.nmdis.org.cn/hygb/zghpmbg/2020nzghpmbg>.
- DONOVAN M K, BURKEPILE D E, KRATOCHWILL C, et al, 2021. Local conditions magnify coral loss after marine heatwaves[J]. Science, 372(6545): 977–980.
- HOBDAI A J, ALEXANDER L V, PERKINS S E, et al, 2016. A hierarchical approach to defining marine heatwaves[J]. Progress in Oceanography, 141: 227–238.
- HOBDAI A J, OLIVER E C J, GUPTA A S, et al, 2018. Categorizing and naming marine heatwaves[J]. Oceanography, 31(2): 162–173.
- HU SHIJIAN, LI SHIHAN, ZHANG YING, et al, 2021. Observed strong subsurface marine heatwaves in the tropical western Pacific Ocean[J]. Environmental Research Letters, 16(10): 104024.
- WMO, 2020. WMO statement on the state of the global climate in 2019[R]. Geneva: WMO.
- WMO, 2021. State of the global climate 2020[R]. Geneva: WMO.
- LAUFKÖTTER C, ZSCHEISCHLER J, FRÖLICHER T L, 2020. High-impact marine heatwaves attributable to human-induced global warming[J]. Science, 369(6511): 1621–1625.
- OLIVER E C J, BENTHUYSEN J A, DARMARAKI S, et al, 2021. Marine heatwaves[J]. Annual Review of Marine Science, 13: 313–342.
- PEARCE A, LENANTON R, JACKSON G, et al, 2011. The “marine heat wave” off Western Australia during the summer of 2010/11[R]. Western Australia: Department of Fisheries: 139–156.
- WANG KAI, LI YUGUO, LUO ZHIWEI, et al, 2018. Harmonic analysis of 130-year hourly air temperature in Hong Kong: detecting urban warming from the perspective of annual and daily cycles[J]. Climate Dynamics, 51(1–2): 613–625.
- YAO YULONG, WANG JUNJIE, YIN JIANJUN, et al, 2020. Marine heatwaves in China’s marginal seas and adjacent offshore waters: Past, present, and future[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 125(3): e2019JC015801.
- YAO YULONG, WANG CHUNZAI, 2021. Variations in summer marine heatwaves in the South China Sea[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 126(10): e2021JC017792.