

文章编号: 2096-1618(2023)02-0200-08

# 维多利亚模态与东北太平洋海洋热浪的联系

林榕茂<sup>1</sup>, 李扬<sup>1</sup>, 丁瑞强<sup>2</sup>

(1. 成都信息工程大学大气科学学院/高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225; 2. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875)

**摘要:**近年来东北太平洋海洋热浪频发,为研究维多利亚模态(VM)对海洋热浪的影响,利用HadISST及OISST海温资料,采用相关分析等方法对东北太平洋海洋热浪与VM之间的联系进行分析和讨论。结果表明,VM与北太平洋东部尤其是东北太平洋的海洋热浪相关非常显著。东北太平洋海洋热浪的不同指数都与VM指数(VMI)关系密切,位相变动及强度变化都较一致,其中发生频次与VMI的相关系数可达0.70。东北太平洋强海洋热浪时期,都伴随强的正VM事件,而且部分时期北太平洋海盆海温呈现类似于VM的空间模态。VM与东北太平洋海洋热浪的密切关系将有助于对东北太平洋海洋热浪进行更深入的研究。

**关键词:**气象学;气象与气候;海洋热浪;维多利亚模态;东北太平洋

**中图分类号:**P467

**文献标志码:**A

**doi:**10.16836/j.cnki.jcuit.2023.02.011

## 0 引言

极端天气气候事件是指在某些地方不经常发生的事件,包括风暴、洪水、极端温度、强降水等,对社会经济造成大量的财产损失<sup>[1-2]</sup>。类似于大气中的高温热浪<sup>[3-4]</sup>,海洋上也存在着一种长期的极端高温事件,称为海洋热浪<sup>[5]</sup>(marine heatwave),近年来越来越受到关注<sup>[6]</sup>。海洋热浪因其高温作用,导致大批海洋生物死亡<sup>[7]</sup>、暖水珊瑚礁白化<sup>[8]</sup>,对海洋生态系统和经济渔业产生巨大影响<sup>[9-10]</sup>。近年来,全球各个海区都监测到了强海洋热浪事件,包括2003年地中海<sup>[11]</sup>、2015年塔斯曼海<sup>[9]</sup>、2016年南大洋<sup>[12]</sup>以及2017年拉布拉多海<sup>[13]</sup>。2020年,超过80%的海洋都曾发生过海洋热浪事件,发生“强”海洋热浪的区域大于“中等”海洋热浪<sup>[14]</sup>。

在2013年冬季,东北太平洋阿拉斯加湾发生了一次史无前例的海洋热浪事件<sup>[15]</sup>。因其规模和影响巨大,Bond在新闻稿中称其为暖斑,该绰号在学术界及新闻媒体得到广泛使用<sup>[15]</sup>。海面温度的极端异常导致了当地的珊瑚白化、初级生产力低下以及有毒的藻华爆发<sup>[16-18]</sup>,使当地的经济渔业包括蛤类、贻贝、蟹类养殖等受到影响<sup>[19-20]</sup>。与暖斑事件有关的干旱使得哥伦比亚河异常增暖,导致洄游的鲑鱼死亡率骤增<sup>[21]</sup>。许多研究指出,此次暖斑事件的成因是东北太平洋上空存在异常的大气高压脊,抑制了海气之间的热通量交换及下层冷水上翻,使暖水一直维持在近海

表面<sup>[15,22]</sup>。

除了局地大气高压脊的作用外,Di Lorenzo等<sup>[23]</sup>研究指出,热带与热带外的相互作用对于北太平洋大气场的多年维持起到关键作用,进而影响暖斑的形成。另外,Tseng等<sup>[24]</sup>认为暖斑是热带及北太平洋海气耦合第二模态变率增强的结果,代表了维多利亚模态(Victoria mode, VM)在东北太平洋的一小部分。VM是北太平洋海表温度EOF分解后的第二模态<sup>[25-26]</sup>。VM作为海洋桥梁将北太平洋涛动与厄尔尼诺-南方涛动联系在一起,通过副热带/热带太平洋的海气耦合过程以及赤道地区的次表层海温异常演变,作为热带外前兆信号对ENSO的预测产生影响<sup>[27]</sup>。Xie等<sup>[28]</sup>研究发现北极平流层臭氧活动先影响NPO,继而影响VM,最后影响到ENSO事件。春季VM对夏季中东太平洋赤道辐合带区域的降水产生影响<sup>[29]</sup>,有助预测夏季至次年夏季西太平洋暖池面积和暖池东边界的位置<sup>[30]</sup>,与夏季西北太平洋上空热带气旋频数也有很好的关系<sup>[31]</sup>,影响热带大气季节内振荡的发展和传播<sup>[32]</sup>,能够提前约一年作为中国华南地区冬季降水的有效预测因子<sup>[33]</sup>。在过去的几十年至近一个世纪内,海洋热浪的发生次数及持续时间在全球范围内都在上升,并且预估在未来也会进一步增加<sup>[34-35]</sup>。海洋热浪对于海洋生物以及海洋生态结构都起到了关键作用<sup>[36]</sup>。VM的变率在近几十年内一直在增强,并且在1980年后超过了第一模态<sup>[25]</sup>。对于东北太平洋的海洋热浪与VM两者的相关研究十分少,因此展开两者的关系研究,利用VM为东北太平洋海洋热浪提供可预测性是尤为必要的。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料

选取的月平均海温资料来自英国哈德莱中心的海冰及海表温度数据集<sup>[37]</sup>,格点分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ,时间1980–2020年。为更好地计算海洋热浪相关指数,进一步利用美国国家海洋和大气管理局的最优插值海温高分辨率资料数据集<sup>[38]</sup>,格点分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ,时间为1982–2020年。该数据集在2016年后的版本更新为2.1,减少了全球及印度洋的海温偏差<sup>[39]</sup>。

### 1.2 VM

根据前人的研究<sup>[25, 27, 29]</sup>,对北太平洋( $20.5^{\circ} \text{N} \sim 65.5^{\circ} \text{N}$ ,  $124.5^{\circ} \text{E} \sim 100.5^{\circ} \text{W}$ )的海温距平(去除线性趋势和全球海温平均)进行EOF分解,所得的第二模态即定义为VM。第二模态对应的时间系数定义为维多利亚模态指数(VM index, VMI),用来表示VM随时间的变化特征。

### 1.3 海洋热浪定义及指数计算

根据Hobday等<sup>[40]</sup>的研究,海洋热浪定义为离散的以及长期的异常暖水现象。“离散的”意味着需要有一个明确的开始时间与结束时间。“长期的”意味着一次事件至少需要持续5天以上。“异常暖”则是要求海洋热浪的海表温度距平(sea surface temperature anomaly, SSTa)具有的一定强度,能超过百分位阈值。定量来说,就是要求海表温度至少5天超过了第90百分位的阈值。相对阈值就是将以当天为中心11天的所有年份的每日温度值,计算出对应每一天的第90百分位阈值,再进行31天平滑。当两次连续的海洋热浪事件之间的间隔 $\leq 2$ 天时则被视为一次连续的事件。本文选择的海洋热浪指数包括持续时间、发生频次、平均强度、最大强度、总日数以及总累计强度。其中,持续时间即为单次海洋热浪从开始到结束持续的天数;发生频次为每年发生海洋热浪的次数;平均强度与最大强度则是海洋热浪事件中海温与气候态差值的平均值与最大值;总日数为一年所统计的总海洋热浪的日数;总累计强度为强度对时间的积分,即年总日数乘以年平均强度。

## 2 结果与分析

### 2.1 VM与海洋热浪

#### 2.1.1 VM

图1给出了VM的空间分布以及对应时间系数。

VM主要呈现西南—东北向的偶极子型分布(图1a),正的偶极子中心位于东北太平洋阿拉斯加湾,并向西延伸到白令海西部,向东南延伸至赤道中太平洋,与2014年的暖斑事件时期的海温分布十分类似<sup>[15]</sup>。负的极子中心位于北太平洋中部夏威夷群岛西北处,向西北方向延伸到黑潮流域。通过VMI的时间序列(图1b)以及功率谱图(图1c)可以进一步发现,VMI以年际变化为主,功率谱在5年周期达到峰值(未达到90%的信度水平)。前人研究表明,这种以年际变化为主的特征,能够解释部分太平洋年代际振荡所不能解释的北太平洋气候变率<sup>[25–26]</sup>。

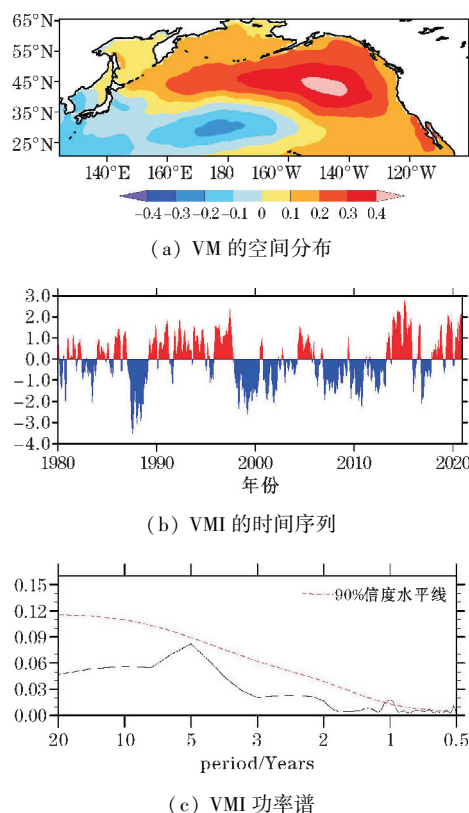


图1 VM对应空间分布、时间序列以及功率谱图

#### 2.1.2 海洋热浪分布

图2为1982–2020年北太平洋海洋热浪的空间分布。北太平洋海洋热浪持续时间的空间分布差异较大,从4天到31天,在空间分布与VM十分类似(图2a),高值中心都是在东北太平洋,并向西北以及赤道方向拓展。北太平洋中部日界线附近也同样是一个相对低值的区域。北太平洋的海洋热浪发生频次在年均 $0.74 \sim 3.56$ 次(图2b),其中在白令海发生次数最多,低纬度地区整体频次更多。海洋热浪发生频次最低的区域位于北太平洋的中部。总日数的分布也同样是与VM类似(图2c),并且东北太平洋的高值中心与北太平洋中部的低值区域更加明显,在东北太平洋可以达到年均60天以上的海洋热浪。平均强度与最大



强度的分布是基本一致的(图 2e、f),区别在于平均强度的整体数值大小比最大强度低。平均和最大强度最大值都位于日本以东黑潮延伸体区域,可达到3℃左右,并向日界线延伸。总累计强度的分布特征则是结合了时间与强度(图 2d),在黑潮延伸体及东北太平洋

分别有一个大值中心。东北太平洋的海洋热浪因其持续时间长,发生频次不低,因此总日数也多。加上此处的海洋热浪强度也不低,总累计强度也大,值得更进一步的研究。

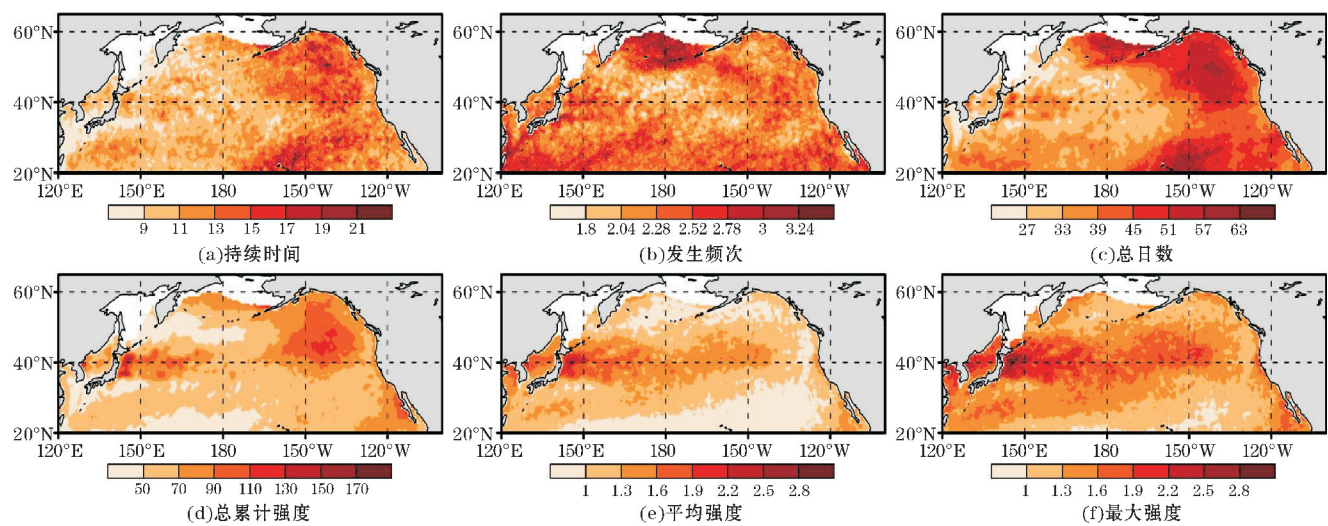


图2 北太平洋海洋热浪指数分布(白色填充区为受季节性海冰影响的区域)

进一步计算 1982–2020 年 VMI 与北太平洋海洋热浪的相关系数,其空间分布如图 3 所示。整体呈现为一个类似于 VM 的空间模态分布,即相关高的区域从白令海向东拓展到东北太平洋,并向赤道方向拓展。负相关的区域位于北太平洋中部,并向西南方向延伸至菲律宾以东区域。不同海洋热浪指数的正相关中心位置有所不同,其中发生频次、总日数和总累计强度正相关中心都位于东北太平洋,通过显著性检验( $\alpha =$

0.01)的相关高值区域也更广,并且在负相关中心也能通过显著性检验(图 3b、c、d)。持续时间的正相关中心位于副热带,接近下加利福尼亚半岛沿岸,但在负相关中心没有过检验(图 3a)。而平均强度与最大强度的正相关中心则呈现为沿海岸的带状分布(图 3e、f),虽然两者分布类似,但在负相关中心,最大强度通过显著性检验的区域面积不如平均强度广。

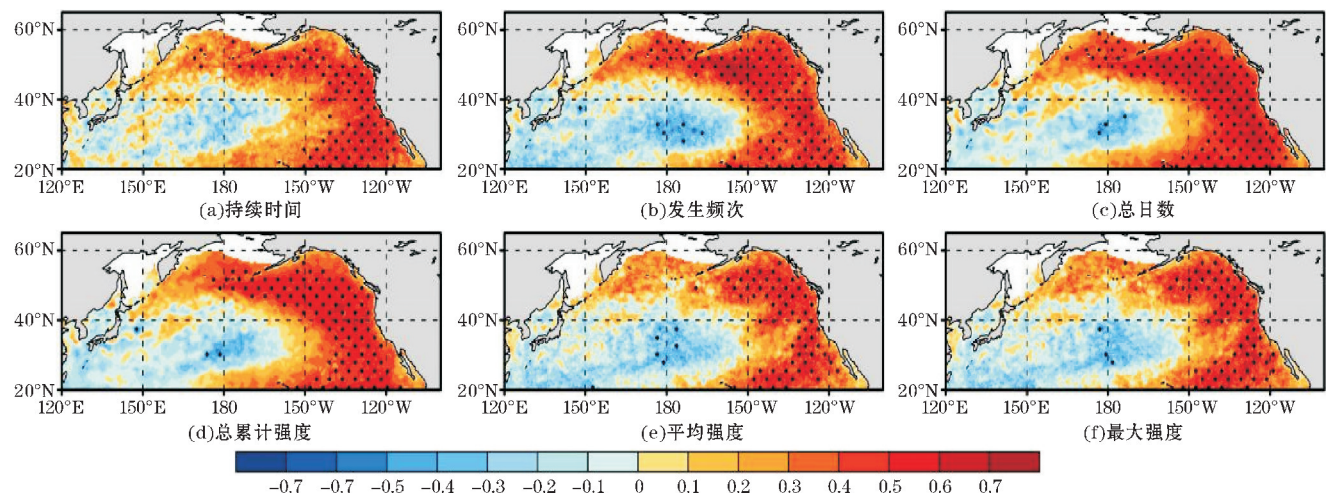


图3 海洋热浪指数与 VMI 相关系数空间分布(白色填充区为受季节性海冰影响的区域,打点区域表示通过 99% 信度检验)

2.2 东北太平洋海洋热浪与 VM

2.2.1 海洋热浪指数

为进一步探索 VM 和东北太平洋海洋热浪之间的

关系,参照前人选取的关键区(40°N~50°N,135°W~150°W)<sup>[15]</sup>,该区域曾发生了历史上最为极端的海洋热浪之一,将该区域命名为“暖斑区域”并用此区域来代表东北太平洋。图 4 展示了 1982–2020 年暖斑区域

年均海洋热浪指数与 VMI 的关系。东北太平洋平均持续时间为14.6天,与 VMI 的相关虽然是几个指数中最低的(0.59),但整体的位相转变与 VMI 较为契合,而两个指数的强度在时间序列的后期 2000–2020 年有较好的对应(图 4a)。总日数年平均为53.3天,与 VMI 的关系也与持续时间大致类似,不过它与 VMI 的相关比持续时间长,其原因可能是几次峰值两者对应得更好,如 2015 年前后(图 4c)。平均强度年平均可达1.25 °C,与 VMI 的关系在 2000 年前较为密切,位相变化与强度都十分一致,但在时间序列的后期(2010 年)两者出现了反位相(图 4e)。最大强度年平均为 1.56 °C,变化与平均强度十分类似,与 VMI 的相关系

数也同样是0.61,区别在于最大强度的指数较平均强度高约 25% (图 4f)。发生频次年平均为2.35次,与 VMI 的相关是几个指数之中最高的(0.70),与 VMI 的强度以及位相转变是最为契合的(图 4b)。总累计强度年平均为104.41 °C·d,在整体变化上也是与 VMI 较为一致,尤其是在 2010 年后(图 4d)。综上可得, VMI 和暖斑区域海洋热浪各个指数的变化都能有很好的-致性,特别是在几次峰值的转变发生时间(1986 年,2000 年,2014 年,2017 年)。此外,它们与 VMI 的相关系数为0.59~0.70,都在 99% 的置信水平下通过了显著性检验。这表明,VMI 在一定程度上可以作为暖斑区域海洋热浪变化的指标。

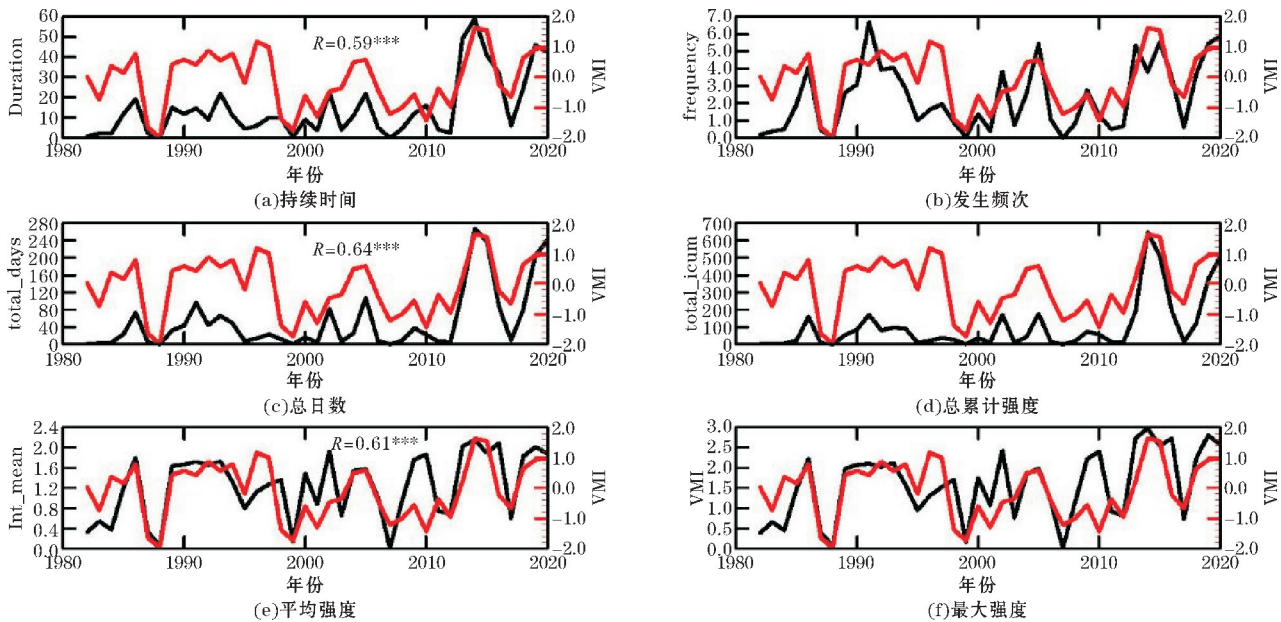


图 4 暖斑区域不同海洋热浪指数与 VMI 时间系数的时间序列(黑色实线为海洋热浪指数,红色实线为 VMI)

2.2.2 东北太平洋强海洋热浪与 VM

为进一步分析东北太平洋海洋热浪在 VM 尤其是强 VM 事件下受到的影响,对 1982–2020 年符合标准的海洋热浪事件次数进行统计(图 5)。VM 强度的判断依据于它大于标准差的倍数。1982–2020 年 VMI 的标准差为1.15,并根据 VMI 与此的大小对比来

进一步区分强 VM 事件。首先是单次持续时间超过 60 天,有 10 次海洋热浪符合这一条件,其中持续时间最长的 3 次事件依次为 316、262、117 天。这 3 次事件的累计强度、最大强度也同样是最大的 3 次。同时,在这 10 次事件中,有 9 个事件同期 VMI 大于0.75 倍标准差,而有 6 个事件同期 VMI 大于 1 倍标准差。上述结果表明当暖斑区域发生长时间强度高的海洋热浪时,VMI 的强信号很有可能也会同时出现。

2.2.3 海洋热浪时期的海温序列与 VMI

为更加清楚地展示暖斑区域海洋热浪和 VMI 之间的联系,选择了此区域 4 个最长的海洋热浪和同时期的 VMI 指数进行对比(图 6)。因注重研究海温的距平即偏离于气候态的值,先将 SST 与阈值都同时减去了气候态值(黑色线,绿色线),后文以 SSTa 和阈值来代称。首先看事件 1(图 6a),它是暖斑区域有史以来时间最长、累计强度最大的一次海洋热浪,持续时间为 316 天,累计强度为635 °C·d。这次海洋热浪首先在

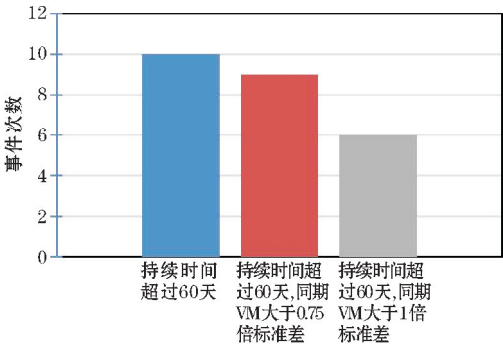


图 5 暖斑区域海洋热浪统计图



2014 年冬季达到峰值,然后在下半年两次达到峰值。同时期的 VMI 也同样显示出类似的三峰型。值得注意的是在 2014 年 7 月 4 日时,SSTA 是低于阈值的,但由于低于阈值的时间 $\leq 2$ 天,因此认为这一天前后的海洋热浪是连续的单次事件。对于事件 2(图 6b),此次海洋热浪持续了 262 天,累计强度为 478  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 。SSTA 与 VMI 的序列都呈现为不对称的双峰结构,区别在于 VMI 在前面一个峰强度大,而 SSTA 则是在后面的峰值。事件 3 的 SSTA 呈现为整体近似于单峰,而 VMI 也是七月达到峰值的单峰型结构(图 6c)。图 6(d)可以看出事件 4 的 SSTA 具有明显的双峰结构,而同期的 VMI 也是同样双峰,后续的增强可能与之后其他强海洋热浪事件有关。综上所述,暖斑区域强的海洋热浪总是伴随着强的 VM 出现。

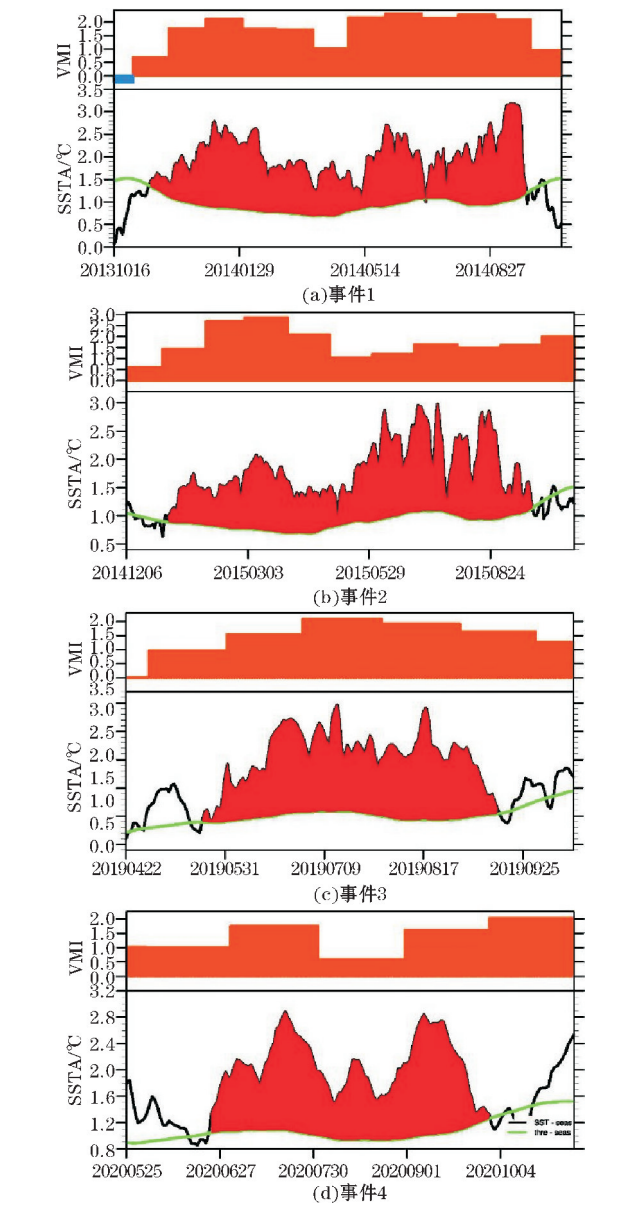


图 6 暖斑区域四次持续时间最长的海洋热浪及同期的 VMI 时间序列 (底部红色填充为海洋热浪,顶部橙色柱状图为 VMI,黑色实线为 SST 减去气候态值,绿色实线为阈值减去气候态值)

2.2.4 东北太平洋海洋热浪海温演变

图 7 为暖斑区域两个最长的海洋热浪发生时,北太平洋海温演变的空间变化图。事件 1 时期,北太平洋的海温演变的空间变化图。事件 1 时期,北太平洋的 SSTA 在 2013 年晚冬呈现出类似于 VM 的空间分布(图 7a),即 SST 暖异常中心位于东北太平洋,冷异常中心位于北太平洋中部。随后暖异常分南北两极分别向赤道及向极地发展(图 7b),其中向极一支的暖中心延伸至白令海以东,而向赤道一支则在下加利福尼亚半岛沿岸形成第二个暖中心。日界线附近与日本周边海域的两个冷异常中心通过黑潮延伸体联系在一起,此时冷暖异常的分布大致与刚开始时是类似的。接着白令海的暖异迅速加强(图 7c),并进一步向西延伸至鄂霍次克海。下加利福尼亚半岛的暖中心也有所加强,同

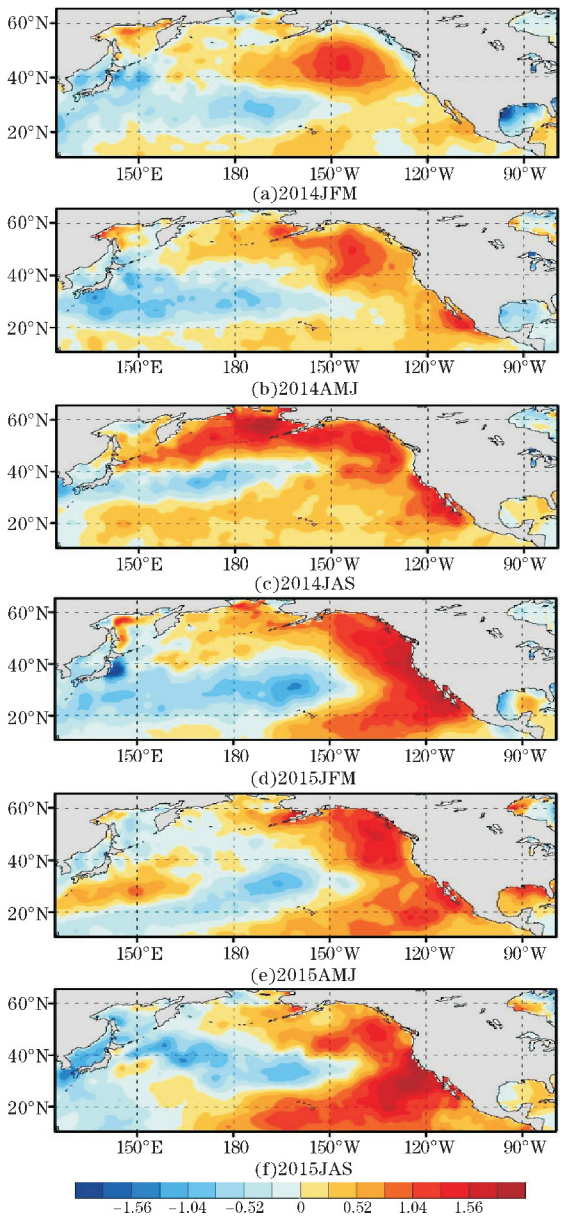


图 7 暖斑区域两次最长海洋热浪时期所对应的北太平洋海温距平随时间的演变图

时30 °N暖异常区域大大增多。冷异常中心则是强度有所减弱,并少许西撤。事件2时期北太平洋的SSTA演变(图7(d~f))并不像事件1,而是全程基本维持着“ARC”状或称“PDO”状,暖异常维持在北美大陆沿岸,冷异常位置可达150 °W。虽然暖斑区域的海洋热浪与VM关系密切,但并不是每一个海洋热浪事件时期北太平洋的SSTA都呈现类似于VM的空间分布。

### 3 结论与讨论

利用1982–2020年HadISST及OISST海温资料,对北太平洋海洋热浪的空间分布及东北太平洋海洋热浪与VM之间的关系进行了研究,主要有以下结论:

(1)北太平洋年均海洋热浪持续时间长的区域位于东北太平洋及夏威夷群岛,年均发生频次高的区域位于白令海及北太平洋西部,年均总日数的分布与持续时间类似。年均平均强度和最大强度在黑潮延伸体区最大。年均总累计强度则是东北太平洋与黑潮延伸体各有一个大值中心。海洋热浪指数与VM的整体都呈现为正相关区域位于白令海至东北太平洋再向赤道方向延伸,而负相关则是位于北太平洋中部,并向西南方向延伸。所选指数中,发生频次、总日数和总累计强度与VM相关高的区域较多。

(2)东北太平洋海洋热浪持续时间等指数与VMI的相关在0.59~0.70,都能通过 $\alpha=0.01$ 的显著性检验。其中持续时间、总日数和总累计强度与VMI在时间段的后半期(2000年后),两两之间的强度及位相转变配合得较契合。平均强度和最大强度则是在前期(2000年前),与VMI的关系更为密切。而发生频次则是整体与VMI关系最好的(相关性为0.70)。

(3)东北太平洋发生过10次持续时间超过60天的强海洋热浪,10次事件同期的VMI都处于正位相。其中有9次事件同期的VMI大于0.75倍标准差,有6次事件的同期VMI大于1倍标准差。当东北太平洋发生长时间强度高的海洋热浪时,很有可能伴随着VMI强信号出现。持续时间最长的4次事件的海温与VMI对比,结果表明VMI与海洋热浪时期的海温变化较契合,峰值出现时间也较一致。持续时间最长的海洋热浪发生时,北太平洋的海温距平呈现为VM型,暖异常中心位于东北太平洋,冷异常中心位于北太平洋中部。

海洋热浪是海表温度异常的现象,成因除了海温模态外,还与大气阻塞、海洋平流、海气热通量交换、海洋开尔文波等多种因素有关,而本文仅讨论了东北太平洋海洋热浪与VM的关系。另外除了统计方法外,

两者之间的物理过程还需要更进一步的模式模拟验证。

### 参考文献:

- [1] Stocker T. Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge university press, 2014.
- [2] 任福民,高辉,刘绿柳,等. 极端天气气候事件监测与预测研究进展及其应用综述[J]. 气象, 2014, 40: 860–874.
- [3] 叶殿秀,尹继福,陈正洪,等. 1961—2010年我国夏季高温热浪的时空变化特征[J]. 气候变化研究进展, 2013, 9(1): 15–20.
- [4] 徐金芳,邓振镛,陈敏. 中国高温热浪危害特征的研究综述[J]. 干旱气象, 2009, 27: 163–167.
- [5] Pearce A, Jackson G, Moore J, et al. The “marine heat wave” off Western Australia during the summer of 2010/11[J]. 2011(2).
- [6] Hobday A J, Oliver E C, Gupta A S, et al. Categorizing and naming marine heatwaves[J]. Oceanography, 2018, 31(2): 162–173.
- [7] Cavole L M, Demko A M, Diner R E, et al. Biological impacts of the 2013–2015 warm-water anomaly in the Northeast Pacific: winners, losers, and the future[J]. Oceanography, 2016, 29(2): 273–285.
- [8] 蔡榕硕,郭海峡,牛文涛. 全球变化背景下暖水珊瑚礁生态系统的适应性与修复研究[J]. 应用海洋学学报, 2021, 40: 12–25.
- [9] Oliver E C, Benthuisen J A, Bindoff N L, et al. The unprecedented 2015/16 Tasman Sea marine heatwave [J]. Nature communications, 2017, 8(1): 1–12.
- [10] Smith K E, Burrows M T, Hobday A J, et al. Socioeconomic impacts of marine heatwaves: Global issues and opportunities[J]. Science, 2021, 374: 3593.
- [11] Olita A, Sorgente R, Natale S, et al. Effects of the 2003 European heatwave on the Central Mediterranean Sea: surface fluxes and the dynamical response[J]. Ocean Science, 2007, 3(2): 273–289.
- [12] Meehl G A, Arblaster J M, Chung C T, et al. Sustained ocean changes contributed to sudden Antarctic sea ice retreat in late 2016 [J]. Nature

- Communications, 2019, 10(1): 1–9.
- [13] Pershing A J, Alexander M A, Hernandez C M, et al. Slow adaptation in the face of rapid warming leads to collapse of the Gulf of Maine cod fishery [J]. *Science*, 2015, 350(6262): 809–812.
- [14] 翟建青, 代潭龙, 王国复. 2020 年全球气候特征及重大天气气候事件[J]. *气象*, 2021, 47: 471–477.
- [15] Bond N A, Cronin M F, Freeland H, et al. Causes and impacts of the 2014 warm anomaly in the NE Pacific[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(9): 3414–3420.
- [16] McCabe R M, Hickey B M, Kudela R M, et al. An unprecedented coastwide toxic algal bloom linked to anomalous ocean conditions [J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(19): 10366–10376.
- [17] Peterson W T, Fisher J L, Strub P T, et al. The pelagic ecosystem in the Northern California Current off Oregon during the 2014–2016 warm anomalies within the context of the past 20 years [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, 122(9): 7267–7290.
- [18] Witze A. Corals worldwide hit by bleaching [J]. *Nature News*, 2015(1).
- [19] Cheung W W, Frölicher T L. Marine heatwaves exacerbate climate change impacts for fisheries in the northeast Pacific [J]. *Scientific reports*, 2020, 10(1): 1–10.
- [20] Siedlecki S, Bjorkstedt E, Feely R, et al. Impact of the Blob on the Northeast Pacific Ocean biogeochemistry and ecosystems [J]. *US Clivar Var*, 2016, 14: 7–12.
- [21] Peterson W, Bond N, Robert M. The blob (part three): Going, going, gone? [J]. *PICES Press*, 2016, 24(1): 46.
- [22] Hartmann D L. Pacific sea surface temperature and the winter of 2014 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(6): 1894–1902.
- [23] Lorenzo Di E, Mantua N. Multi-year persistence of the 2014/15 North Pacific marine heatwave [J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11): 1042–1047.
- [24] Tseng Y-H, Ding R, Huang X-m. The warm Blob in the northeast Pacific—the bridge leading to the 2015/16 El Niño [J]. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(5): 054019.
- [25] Bond N, Overland J, Spillane M, et al. Recent shifts in the state of the North Pacific [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(23).
- [26] Di Lorenzo E, Schneider N, Cobb K M, et al. North Pacific Gyre Oscillation links ocean climate and ecosystem change [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(8).
- [27] Ding R, Li J, Tseng Y h, et al. The Victoria mode in the North Pacific linking extratropical sea level pressure variations to ENSO [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(1): 27–45.
- [28] Xie F, Li J, Tian W, et al. A connection from Arctic stratospheric ozone to El Niño-Southern oscillation [J]. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(12): 124026.
- [29] Ding R, Li J, Tseng Y h, et al. Influence of the North Pacific Victoria mode on the Pacific ITCZ summer precipitation [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(3): 964–979.
- [30] 史良, 丁瑞强, 巢婧华. 北太平洋维多利亚模态对西太平洋暖池面积和东边界的影响研究 [J]. *海洋预报*, 2020, 37: 31–43.
- [31] Pu X, Chen Q, Zhong Q, et al. Influence of the North Pacific Victoria mode on western North Pacific tropical cyclone genesis [J]. *Climate Dynamics*, 2019, 52(1): 245–256.
- [32] Wen T, Chen Q, Li J, et al. Influence of the North Pacific Victoria Mode on the Madden-Julian Oscillation [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2020, 515.
- [33] Zou Q, Ding R, Li J, et al. Is the North Pacific victoria mode a predictor of winter rainfall over South China? [J]. *Journal of Climate*, 2020, 33(20): 8833–8847.
- [34] Frölicher T L, Fischer E M, Gruber N. Marine heatwaves under global warming [J]. *Nature*, 2018, 560(7718): 360–364.
- [35] Oliver E C, Donat M G, Burrows M T, et al. Longer and more frequent marine heatwaves over the past century [J]. *Nature communications*, 2018, 9(1): 1–12.
- [36] 余荣, 翟盘茂. 海洋和冰冻圈变化有关的极端事件, 突变及其影响与风险 [J]. *气候变化研究进展*, 2020, 16: 194.
- [37] Rayner N, Parker D E, Horton E, et al. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and

- night marine air temperature since the late nineteenth century [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(D14).
- [38] Reynolds R W, Smith T M, Liu C, et al. Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature [J]. *Journal of climate*, 2007, 20(22):5473–5496.
- [39] Huang B, Liu C, Banzon V, et al. Improvements of the daily optimum interpolation sea surface temperature (DOISST) version 2.1 [J]. *Journal of Climate*, 2021, 34(8):2923–2939.
- [40] 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.

## Relationship between Victoria Mode and Northeast Pacific Marine Heatwave

LIN Rongmao<sup>1</sup>, LI Yang<sup>1</sup>, DING Ruiqiang<sup>2</sup>

(1. Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Marine heatwaves have been observed frequently in the Northeast (NE) Pacific in recent years. In order to study the influence of Victorian Mode (VM) on the marine heatwaves, the relationship between the NE Pacific Marine Heatwave and the VM was analyzed and discussed by using correlation analysis and other methods based on HadISST and OISST data sets. The results show that VM is significantly associated with marine heatwaves in the eastern North Pacific, especially in the NE Pacific. The different properties of the NE Pacific marine heatwaves are closely related to the VM index (VMI), and the changes in phase and intensity are consistent, among which the correlation coefficient between occurrence frequency and VMI can reach to 0.70. The periods of prolonged marine heatwaves in the NE Pacific are accompanied by strong positive VM events, and for some periods, the North Pacific basin SSTs can exhibit spatial patterns similar to VM. The close relationship between VM and the NE Pacific marine heatwaves will contribute to further study on the NE Pacific marine heatwaves.

**Keywords:** meteorology; meteorology and climate; marine heatwave; Victoria Mode; Northeast Pacific