

北印度洋风暴潮特征及其对气候信号的响应研究*

谢建斌^{1, 2, 4, 5} 万纬祺^{1, 2, 4, 5} 冯兴如^{1, 2, 3, 4, 5} 尹宝树^{1, 2, 3, 4, 5} 刘亚豪^{1, 2, 3, 4}

(1. 中国科学院海洋研究所 山东青岛 266071; 2. 中国科学院海洋环境与波动重点实验室 山东青岛 266071; 3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 山东青岛 266237; 4. 中国科学院海洋大科学研究中心 山东青岛 266071; 5. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 北印度洋是我国“海上丝绸之路”的重要通道,其每年热带气旋活动引起的风暴潮等严重威胁着船舶航行安全和沿岸国家人民生命财产安全。分析研究北印度洋风暴潮的特征,对我国经济发展及北印度洋沿岸国家防灾减灾具有重要的现实意义。利用美国联合预警中心(the Joint Typhoon Warning Center, JTWC)公布的 1950~2020 年热带气旋资料、美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)公布的 1950~2020 年热带气旋资料与 1950~2020 年的 Niño3.4 指数、夏威夷大学海平面中心(University of Hawaii Sea Level Center, UHSLC)公布的北印度洋每小时的水位数据进行分析,结果表明:(1)北印度洋大于 1 m 的风暴潮主要分布在孟加拉湾北部,少量分布在孟加拉湾其他区域与阿拉伯海;(2)孟加拉湾北部区域的年际最大热带风暴潮(annual maximum tropical cyclone storm surge, AMTSS)与当月 Niño3.4 指数、南方涛动指数(southern oscillation index, SOI)相关性较高、受厄尔尼诺-南方涛动(EI Niño-Southern Oscillation, ENSO)的影响明显;(3)北印度洋 AMTSS 月际分布呈现双峰分布,与热带气旋(tropical cyclone, TC)的月际分布基本一致;(4)La Niña 期间影响孟加拉湾北部的热带气旋在数量与强度方面均超过 El Niño 期间影响孟加拉湾的热带气旋,是 La Niña 期间风暴潮极值大于 El Niño 期间风暴潮极值的重要原因。研究表明,AMTSS 对 ENSO 信号的响应可能为 AMTSS 提供了潜在的可预测性,这对早期预警和减少风暴潮灾害具有重要意义。

关键词 热带气旋; 风暴潮; 厄尔尼诺-南方涛动

中图分类号 P731 doi: 10.11693/hyhz20211200342

北印度洋孟加拉湾海域是世界上风暴潮灾害最严重的区域之一,其中热带气旋引起的风暴潮具有移动速度快,灾害强度大的特点。例如 1970 年的热带气旋“Bhola”引起的风暴潮直接夺去了孟加拉湾沿海约 25 万人(Wahiduzzaman *et al.*, 2020)的生命。北印度洋连接大西洋与太平洋,同时该海域位于我国的“海上丝绸之路”沿线,是我国“海上丝绸之路”的必要通道。因此对北印度洋风暴潮的研究具有十分重要的现实意义。

作为风暴潮产生的主要原因,北印度洋气旋在

起源位置、登陆位置、持续时间、移动轨迹、累积能量和强度等方面都具有独特的特点。在移动轨迹方面,西向和西北向的热带气旋占总气旋数的近一半(韩晓伟等, 2010)。由于地形的影响,孟加拉湾产生的气旋多在孟加拉国和缅甸南部登陆,而阿拉伯海产生的气旋多沿西高止山脉向西北方向运动,最终在巴基斯坦南部登陆(吴风电等, 2011)。另外,热带气旋产生的时间具有明显的年周期变化,呈现双峰分布,在 5~6 和 11~12 月之间频次较高,与海温密切相关。7、8 月北印度洋海水温度降低,热带气旋出现频率环比

* 中科院先导专项经费, XDA19060502 号; 国家重点研发计划, 2016YFC1401500 号。谢建斌, 硕士研究生, E-mail: xiejianbin@qdio.ac.cn

通信作者: 冯兴如, 硕士生导师, 副研究员, E-mail: fengxingru07@qdio.ac.cn

收稿日期: 2021-12-24, 收修改稿日期: 2022-03-09

呈现下降趋势,而 9 月的热带气旋出现频率增加了 20% (Singh *et al.*, 2001)。除了热带气旋的强度,风暴潮受正面登陆的热带气旋影响较大,更与其自身有利的地理位置及海岸地形密不可分(张海燕, 2019)。在热带气旋的空间分布方面,气旋总频数呈现增加趋势,强烈气旋风暴(风速 ≥ 64 节)主要生成在孟加拉湾海域的中东部和阿拉伯海海域的中部海域;(强)气旋风暴(风速范围 34~63 节)主要集中在孟加拉湾海域的西部海域和阿拉伯海海域的东部海域;热带低压(风速 ≤ 33 节)主要集中在孟加拉湾海域的西部和北部海域(梁梅等, 2020)。

鉴于北印度洋热带气旋与海温之间密切的相关程度,而厄尔尼诺-南方涛动(EI Niño-Southern Oscillation, ENSO)等大尺度气候指数作为体现海表温度与气压震荡的重要指标,在此基础上可以假设北印度洋的年际最大热带风暴潮(annual maximum tropical cyclone storm surge, AMTSS)可能表现出与大尺度气候指数相关的年际变化。如要验证该假设成立,需要首先利用可靠的观测记录检验各指数与风暴潮之间的统计关系。前人做过一些类似的研究,例如 Colle 等(2010)通过分析纽约市 1959~2007 年的风暴潮事件,发现在 EI Niño 事件期间发生的弱风暴潮事件多于 La Niña 事件;Oey 等(2016)通过对西北太平洋热带气旋所引起的风暴潮研究发现,其所用的风暴潮变量与 ENSO、太平洋年代际振荡(Pacific Decadal Oscillation,

PDO)之间的联系很弱且在统计上不显著;Feng 等(2021)用中国沿岸 23 个验潮站的水位数据研究 AMTSS 对大尺度海洋信号的响应发现,在中国大陆东南部北部,只有强台风风暴潮事件受到 ENSO 的显著调节,弱风暴潮事件与 ENSO 事件之间没有显著的相关性,等等。

尽管已有上述研究,但北印度洋风暴潮与大尺度气候指数的关系却尚未明确。为了解其中潜在的物理过程,需要进行更深层次的探究。本研究利用北印度洋阿拉伯海与孟加拉湾共 23 个验潮站的水位记录,首先分析北印度洋热带风暴潮的时空分布特征,之后进一步分析了 AMTSS 与大尺度气候指数的关系,并探讨了其相关性的原因。旨在研究风暴潮对气候变化的响应,从而对风暴潮的长期预测提供参考。

1 北印度洋热带风暴潮的时空分布特征

为了探究北印度洋热带气旋风暴潮的分布规律,利用美国联合预警中心(the Joint Typhoon Warning Center, JTWC)公布的 1950~2020 年热带气旋资料、美国国家海洋和大气管理局(NOAA)公布的 1950~2020 年热带气旋资料、夏威夷大学海平面中心(University of Hawaii Sea Level Center, UHSLC)公布的北印度洋各个站点每小时的水位数据(图 1a)分别在风暴潮的时间与空间分布方面进行了探索,并从北印度洋热带气旋的产生及分布方面给出了解释。

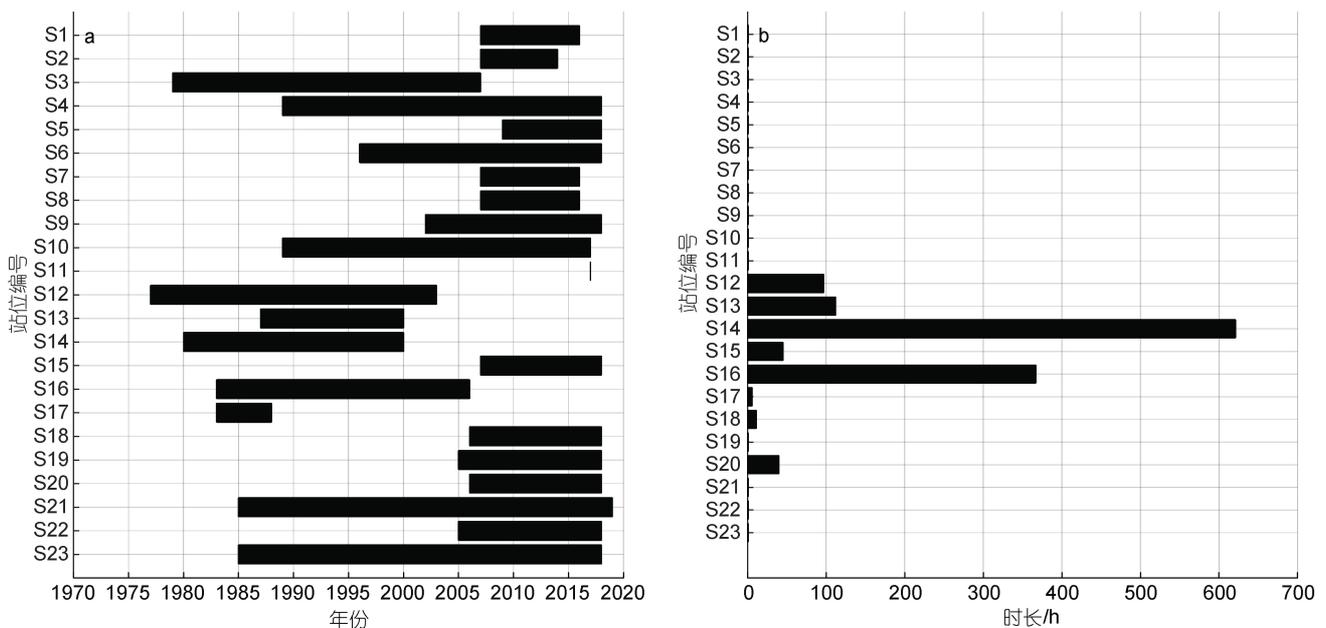


图 1 北印度洋各验潮站每小时潮位数据起止年份(a)以及风暴潮大于 1 m 的总小时数(b)

Fig. 1 The start and end time of hourly tide level data at tide stations (a), and the total hours of storm surge > 1 m at tide stations in the Northern Indian Ocean (b)

1.1 ATMSS 与热带气旋影响位置的相关性

在北印度洋热带气旋与强风暴潮事件的空间分布上, 分别对两者进行统计分析。各站位风暴潮大于 1 m 小时数如图 1b 所示。结果显示, 大于 1 m 的风暴潮事件全部集中在孟加拉湾, 其中绝大部分在孟加拉湾北部发生。

为了对上述结果进行解释, 将各热带气旋轨迹半径 3° 以内设置为气旋有效影响区域, 以此计算 1950~2020 年北印度洋所有热带气旋对该海域的影响

时间(图 2)。研究发现, 孟加拉湾在热带气旋影响时间方面明显高于阿拉伯海; 而在孟加拉湾内, 北部区域受热带气旋影响更大。正是因为热带气旋分布的差异导致了孟加拉湾北部(S12 至 S16 验潮站)风暴潮大于 1 m 时间多于其他站位。

1.2 北印度洋 AMTSS 月际分布特征

北印度洋 23 个验潮站共统计到 341 次年际最大热带风暴潮值。基于该数据统计了 AMTSS 发生时间的月际分布特征, 结果见图 3。结果显示, 北印度洋

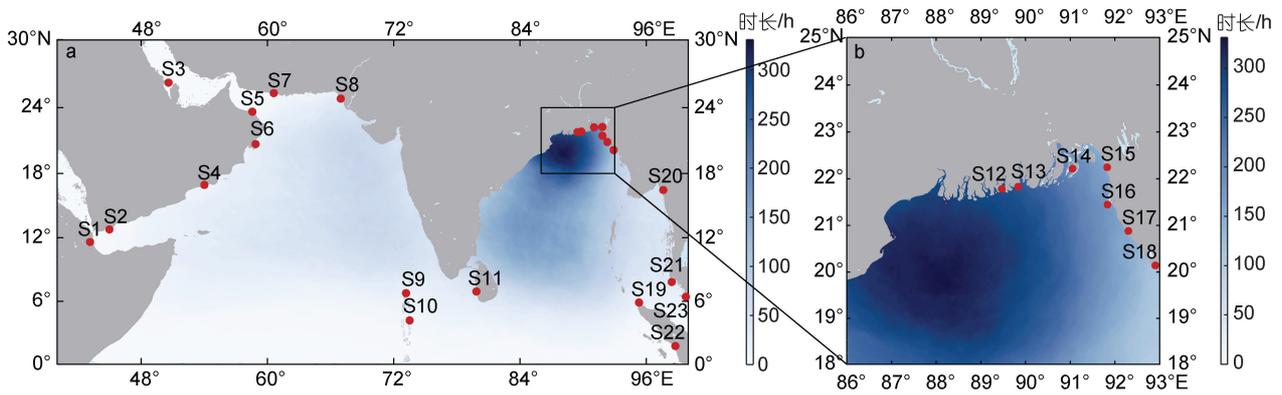


图 2 北印度洋(a)和孟加拉湾(b)各验潮站站位分布及编号及热带气旋对 2 个海域影响时长

Fig.2 Distribution and numbering of tide stations in the Northern Indian Ocean and duration of tropical cyclones' influence on the Northern Indian Ocean (a) and distribution of tidal stations in the northern Bay of Bengal and the duration of numbered tropical cyclones on the sea area (b)

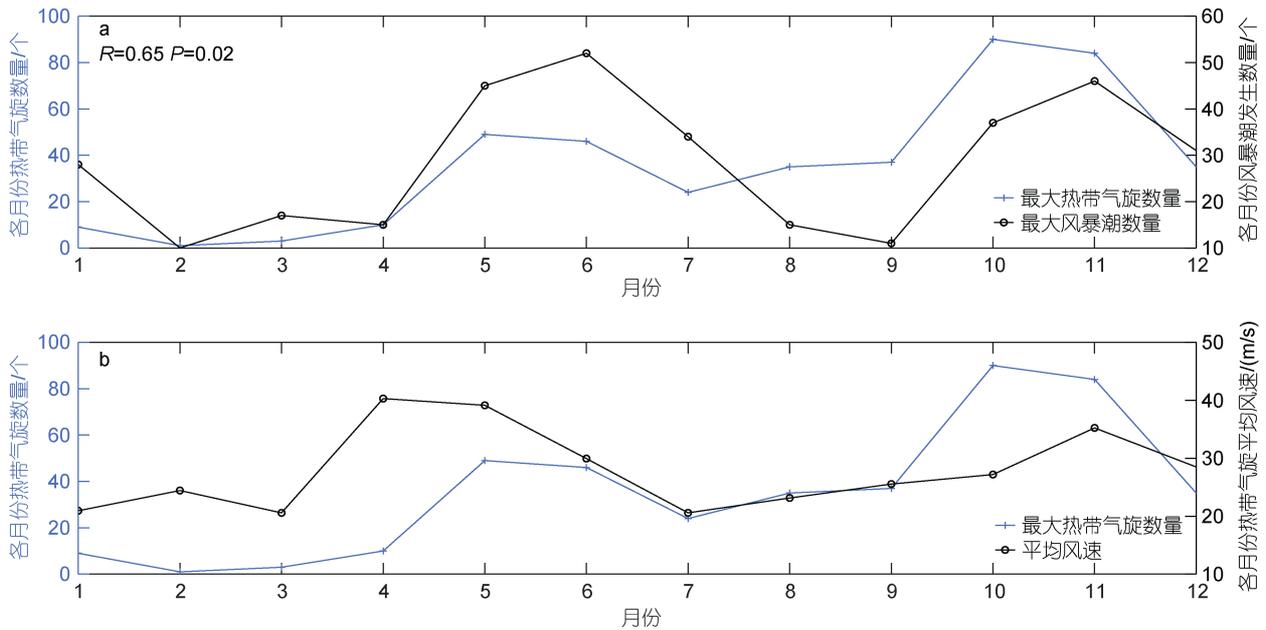


图 3 北印度洋热带气旋形成时间月际分布与年际最大热带风暴潮发生时间月际分布(a)以及北印度洋热带气旋形成时间月际分布与各月热带气旋强度分布(b)

Fig.3 Monthly distribution of tropical cyclone formation time and annual maximum tropical cyclone storm surge (AMTSS) occurrence time in the Northern Indian Ocean (a), and monthly distribution of tropical cyclone formation time and tropical cyclone intensity distribution in the Northern Indian Ocean (b)

注: R 为相关系数, P 为显著水平

风暴潮发生时间多集中在5~6月与11~12月、1月,其他月份也有少量分布。由风暴潮发生频次的月际分布特征(图3a)可见,11~12月、1月风暴潮发生频次最多,占全年总频次的30.79%;5~6月风暴潮发生频次占全年总频次的28.45%。其他月份AMTSS发生的比重明显减小,各在2.9%~10%。

为解释风暴潮的这种月际分布特征,统计了北印度洋热带气旋个数的月际变化,从图3a可以看出,热带气旋出现频次的月际分布与AMTSS发生月份的分布呈现正相关,相关系数 R 达到0.65,显著性为98%。陈联寿(2010)研究表明,海水表面温度(sea surface temperature, SST) ≥ 26.5 °C是热带气旋生成所需的条件。根据梁梅等(2020)的研究,4~5月北印度洋海域海表温度有利于热带气旋的生成。7~9月高温区相对偏南,整个北印度洋海域海表温度较5~6月低。11月整个北印度洋的海表温度再次升高,对热带气旋的生成起到促进作用。这可能是北印度洋的热带气旋与风暴潮均呈现双峰型结构的分布的原因之一。

为了进一步理解AMTSS强度与热带气旋强度的关系,通过对热带气旋强度的月际分布分析(图3b)发现,4~6月生成的热带气旋平均最大风速分别为40.29、39.13、29.94 m/s;10~12月生成的热带气旋月平均最大风速分别为37.18、35.23、28.5 m/s。由于4~6月生成的热带气旋的强度普遍大于10~12月生成的热带气旋的强度,因此,虽然5~6月生成的热带气旋相比11~12月、1月较少,但风暴潮极值出现在5~6月的频次较高。

简而言之,5~6月与11~12月、1月是北印度洋风

暴潮频发期,且5~6月风暴潮的强度更强。这主要取决于北印度洋产生的热带气旋的强度。

2 AMTSS 对大尺度信号的响应

大尺度海洋信号是全球气候预测中的重要影响因素,其中ENSO(EI Niño-Southern Oscillation)、IOD(Indian Ocean Dipole)、NAO(North Atlantic Oscillation)、ONI(Ocean Niño Index)等是全球范围内年际、年代际气候变化的显著信号,对全球气候具有重要影响(Santoso *et al.*, 2012; 吕学珠等, 2012; 冯兴如等, 2018; Sinha *et al.*, 2020; Saha *et al.*, 2021)。利用NCAR网站(<https://climatedataguide.ucar.edu/data-type/climate-indices>)各研究机构发布的大尺度气候指数数据,分析北印度洋AMTSS与大尺度气候指数的关系,对于风暴潮的长期预测具有参考价值。

2.1 AMTSS 对 ENSO 信号的响应

一些研究人员通过研究ENSO事件对热带气旋频率的影响(Kuleshov *et al.*, 2008; Ramsay *et al.*, 2008),发现热带气旋的年频率相对涡度和垂直切变密切相关。为了研究ENSO对AMTSS的影响,对北印度洋各个验潮站AMTSS及AMTSS出现月份的Niño3.4值进行相关性分析(图4a, 图5)。

由图4可知,北印度洋AMTSS与Niño3.4指数具有显著相关性,阿拉伯海验潮站的AMTSS与对应月份的Niño3.4指数大多呈正相关,而孟加拉湾验潮站的AMTSS与对应月份的Niño3.4指数大多呈负相关。在阿拉伯海海域与孟加拉湾海域各选取相关系数较高的三个验潮站,相关系数为分别达到0.79、0.38、

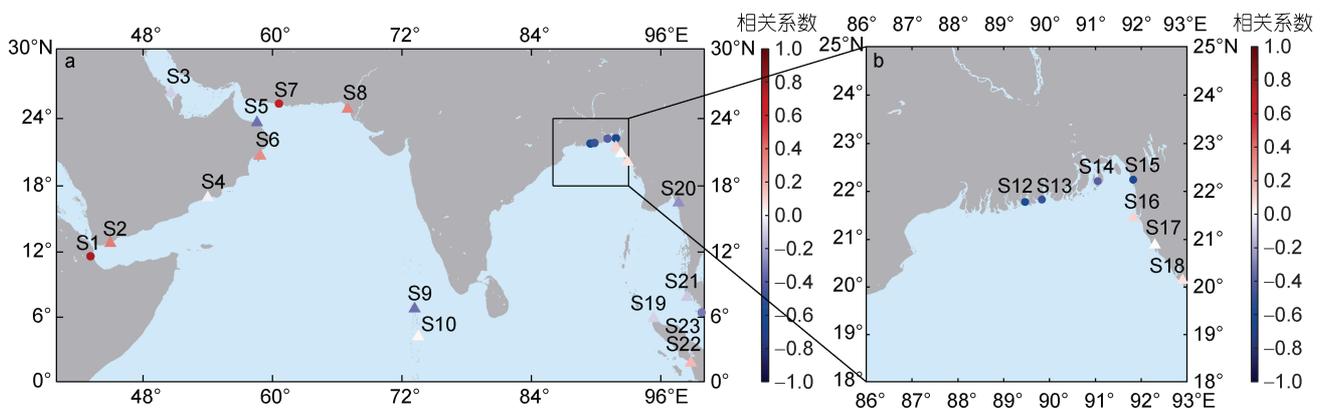


图4 北印度洋(a)和孟加拉湾北部(b)各验潮站AMTSS与Niño3.4指数相关性 with 显著性

Fig.4 Correlation and significance between AMTSS and Niño3.4 index of tide stations in the northern Indian Ocean (a) and in the northern Bay of Bengal (b)

注: 圆形为显著性大于90%, 三角形为显著性小于90%

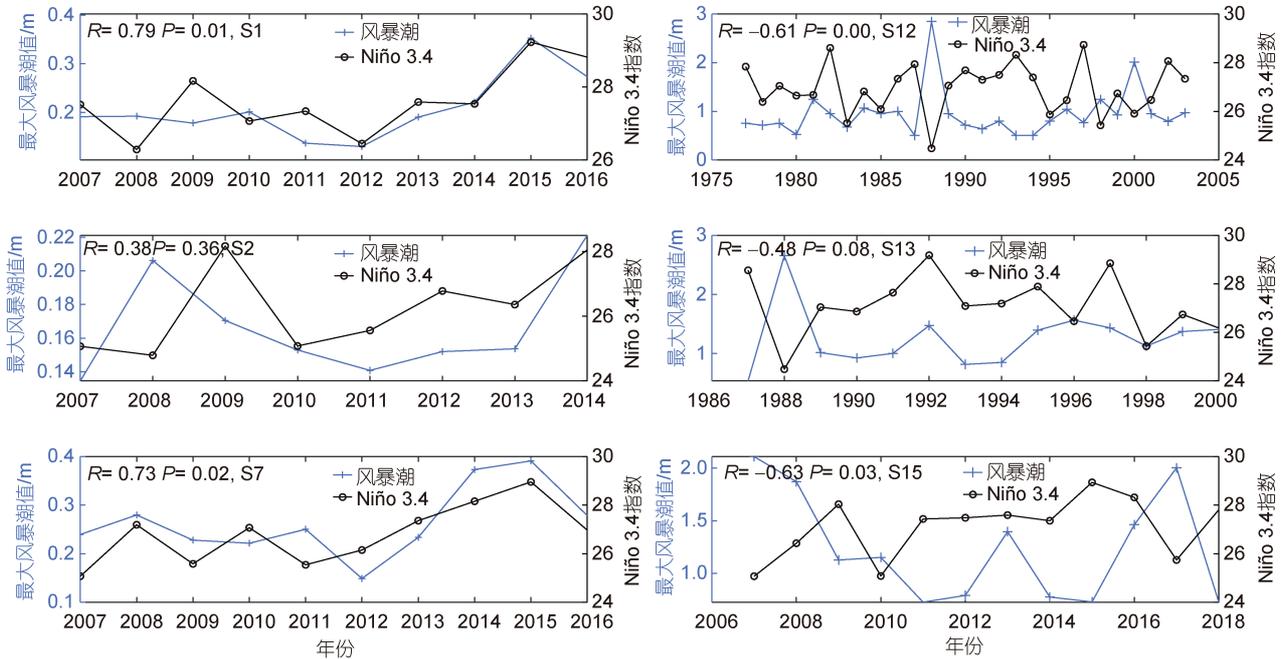


图 5 北印度洋部分验潮站 AMTSS 与当月 Niño3.4 指数对比及其相关性

Fig.5 Comparison and correlation between AMTSS of tide stations in the Northern Indian Ocean and Niño3.4 index of the same month
注: R 为相关系数, P 为显著水平

0.73、-0.61、-0.48、-0.63, 显著性分别达到 99%、65%、99%、100%、92%、98% (图 5)。也就是说, 孟加拉湾北部在 La Niña 事件期间更容易有较强的 AMTSS 出现。以 S12 验潮站为例, 在 1988 年 La Niña 事件与 1997 年超级 EI Niño 事件期间, AMTSS 分别为 294.7 和 77 cm, 具有明显差异。

由于热带气旋登陆位置的不确定性, 采用整个孟加拉湾北部验潮站的最大风暴潮值来计算与 Niño3.4 指数的相关性, 以此规避热带气旋登陆位置的随机性带来的误差。结果显示, 孟加拉湾北部 AMTSS 与 Niño3.4 指数的相关性达到-0.6, 显著性达到 100% (图 6)。这进一步说明 ENSO 事件对孟加拉

湾北部风暴潮的影响是比较显著的。

为进一步了解孟加拉湾北部 AMTSS 与 Niño3.4 指数呈负相关的原因, 选取 JTWC 提供的热带气旋资料(图 7)进行数量统计、NCAR 网站的 ONI 指数, 作为 EI Niño、La Niña 事件判别标准(图 8), 进行更深入的探究。图 7 所示区域在 EI Niño 事件、正常年份与 La Niña 事件期间每月平均生成 0.323 0、0.303 3、0.380 9 个热带气旋, 所产生的热带气旋最大风速分别为 23.73、25.33、26.68 m/s。La Niña 期间产生的热带气旋数量与最大风速分别比 EI Niño 期间多 17.8%、12.43%, 与以往的研究结论一致(Nath *et al*, 2015; Wahiduzzaman *et al*, 2019)。在登陆位置方面,

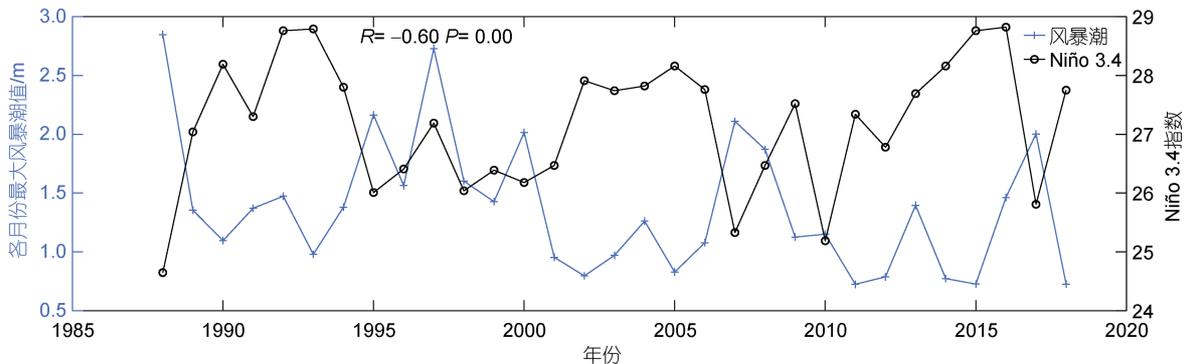


图 6 孟加拉湾北部年最大风暴潮值与当月 Niño3.4 指数对比及其相关性

Fig.6 Comparison and correlation between annual maximum storm surge value and Niño3.4 index in the northern Bay of Bengal

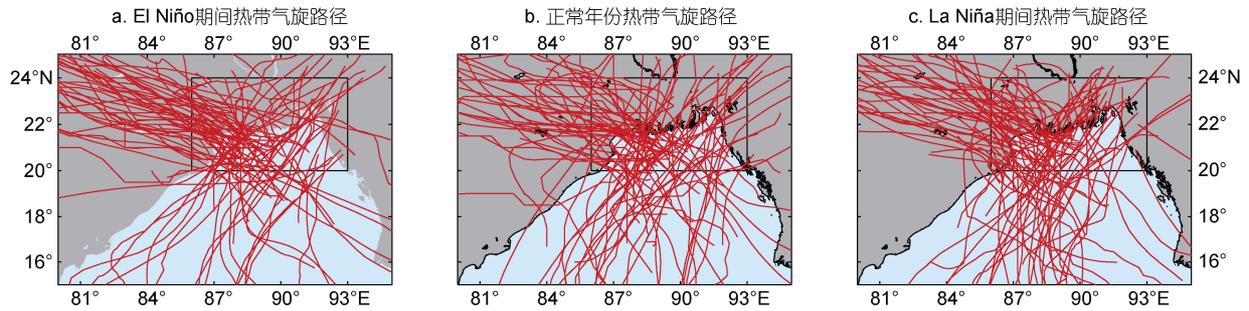


图 7 不同气候模式期间经过孟加拉湾北部热带气旋路径

Fig. 7 Tracks of tropical cyclones over northern Bay of Bengal during different climatological years

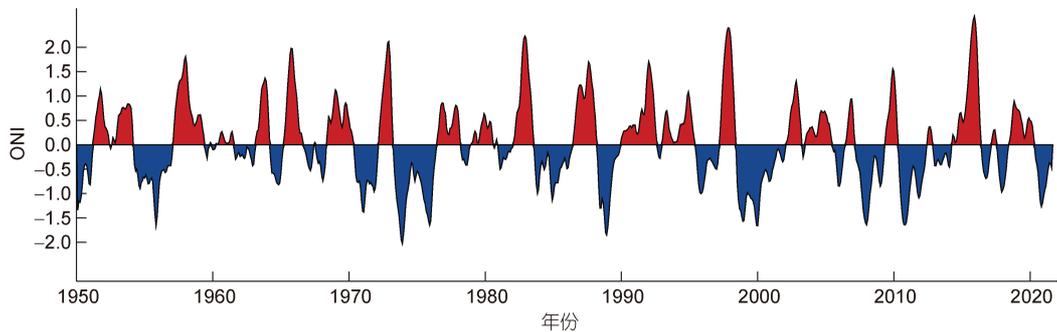


图 8 1950~2021 年海洋尼诺指数 (Ocean Niño Index, ONI)分布

Fig. 8 ONI distribution from 1950 to 2021

注: $0.5 < \text{ONI} \leq 1$ 为弱 El Niño 事件, $1 < \text{ONI} \leq 1.5$ 为中等 El Niño 事件, $\text{ONI} \geq 1.5$ 为强 El Niño 事件; $-1 \leq \text{ONI} < -0.5$ 为弱 La Niña 事件, $-1.5 \leq \text{ONI} < -1$ 为中等 La Niña 事件, $\text{ONI} < -1.5$ 为强 La Niña 事件

逆时针旋转的热带气旋更多的在孟加拉湾北部偏西的位置登陆, 而该区域存在许多河口以及半封闭式海湾(图 2b), 特殊的地形导致了海水在河口与海湾内聚集, 带来了更强的风暴潮, 这可能部分解释了孟加拉湾北部地区普遍存在的 AMTSS 与 Niño3.4 的负相关性。

我们在统计风暴潮极值与 Niño3.4 指数的相关性时发现, 孟加拉湾北部 S12 至 S15 验潮站的 AMTSS 与 Niño3.4 的相关性较显著, 而其他站则不显著。出现这个现象的原因可能是: (1) 风暴潮的形成比较复杂, 除了受热带气旋强度影响外, 还受地形以及站位与热带气旋路径间相对位置的影响; (2) 部分热带气旋过程中, 有些站位数据缺失, 这也会对统计结果造成影响。

2.2 AMTSS 和 SOI、IOD、NAO 指数相关性分析

之前的一些研究表明, 印度洋环境气候与 SOI、IOD、NAO 也有不同程度的联系。例如, Goswami 等(2006)通过 NAO 建立了北大西洋和印度夏季风之间的联系; Li 等(2015)研究发现负 IOD 主要影响东南印度洋热带气旋数量的增加与减少; Sinha 等(2020)通过研究 SOI 与印度洋风速的关系发现, 印度西海岸南部

的风速与 SOI 呈负相关。考虑到 SOI、IOD、NAO 对印度洋气候的较大影响, 因此, 本节还统计研究了这三种信号与北印度洋 AMTSS 的关系。

通过对 AMTSS 与 SOI 指数进行相关性分析发现, 位于孟加拉湾北部的 S12、S13、S14、S15 验潮站的 AMTSS 都与 SOI 指数有很强的相关性(图 9)。相关系数为分别达到 0.68、0.47、0.55、0.59、显著性分别达到 100%、91%、99%、96%。SOI 指数与 Niño3.4 指数均同孟加拉湾北部的 AMTSS 有极强的相关性和极好的显著性, 而风暴潮主要由热带气旋引起, 这也反映出 ENSO 对孟加拉湾气候有较大的影响, 进而影响到热带气旋和风暴潮的产生及强度。在与 Niño3.4 系数有较好正相关性的 S1、S2、S7 验潮站, AMTSS 与 SOI 的相关性不高, 这可能与两片海域的地理位置以及东、西高止山脉阻碍了 ENSO 信号的纬向传播有关。

在统计 IOD 与 AMTSS 的相关性(图 10a)时发现 S18、S23 验潮站与 IOD 的相关性都具有 95% 以上的显著性(图 10a); 在 S16、S17 站位处, AMTSS 与 NAO 指数的有较强的负相关(图 10b), 相关性分别为 -0.8141 、 -0.5233 , 显著性分别为 99%、91%。说明 IOD、NAO 信号对研究区的风暴潮有一定影响。

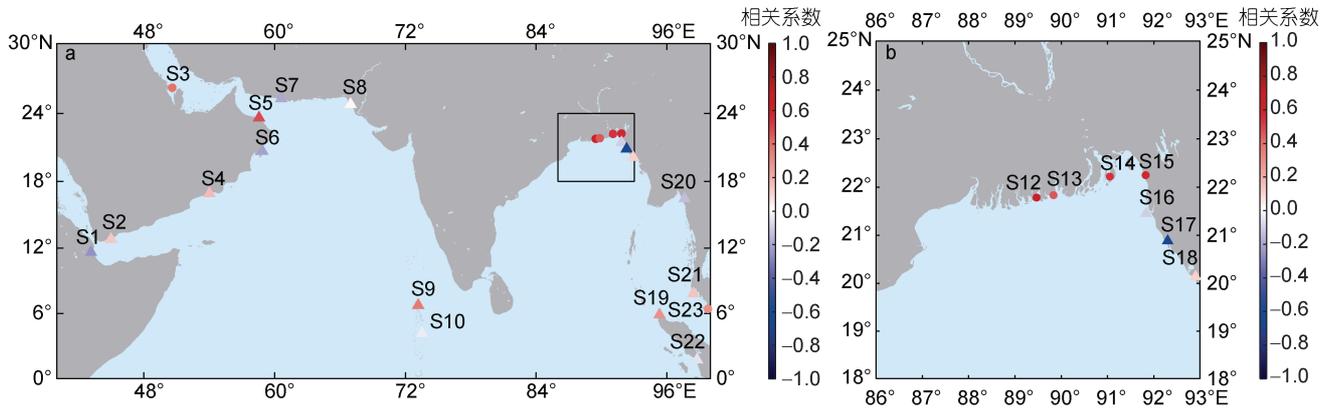


图 9 北印度洋(a)与孟加拉湾北部(b)各验潮站 AMTSS 与 SOI 指数相关性与显著性

Fig.9 Correlation and significance between AMTSS and SOI index of tide stations in the northern Indian Ocean (a)and in the northern Bay of Bengal (b)

注: 圆形表示显著性大于 90%, 三角形表示显著性小于 90%

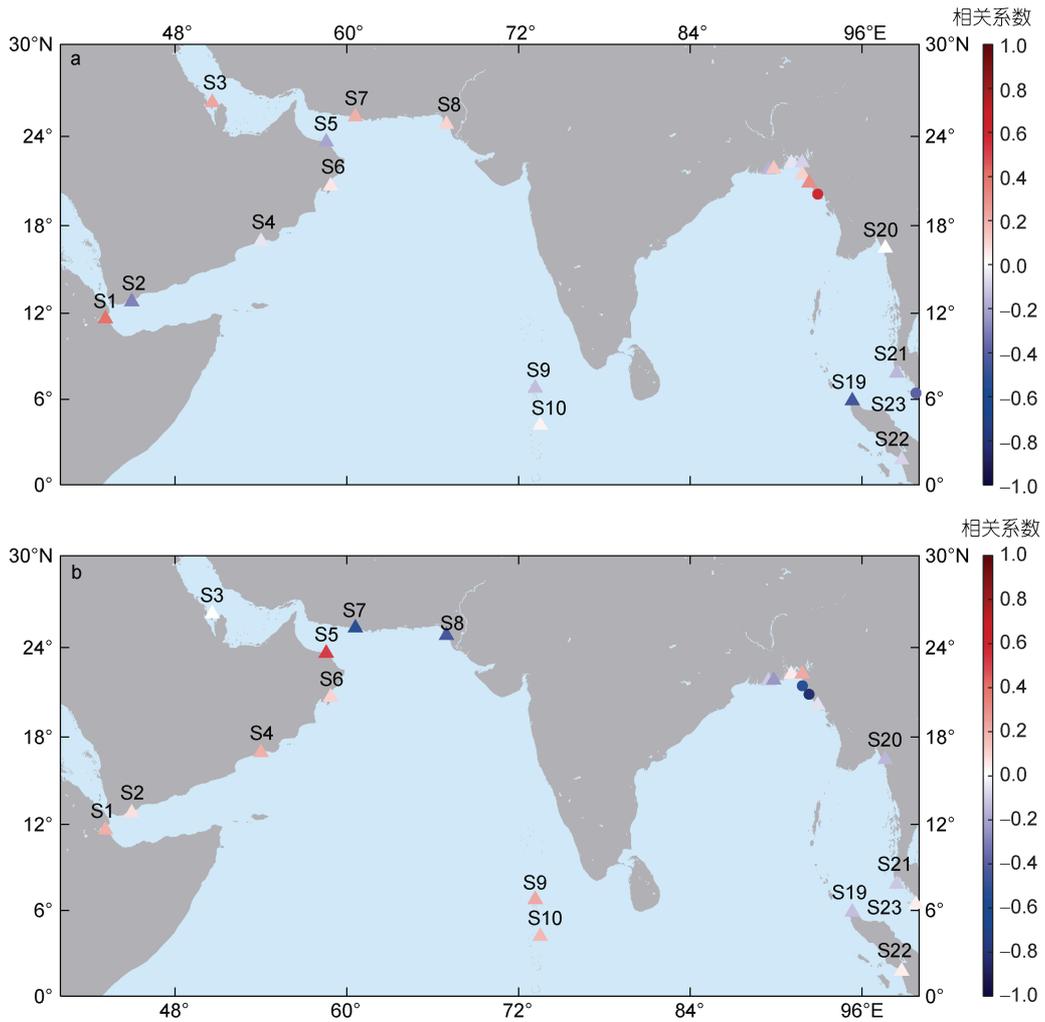


图 10 北印度洋各验潮站 AMTSS 与 IOD 指数(a)和 NAO 指数(b)的相关性与显著性

Fig.10 Correlation and significance between AMTSS and IOD index (a) or NAO index (b) of tide survey stations in the northern Indian Ocean

注: 圆形表示显著性大于 90%, 三角形表示显著性小于 90%

3 结论

本文利用北印度洋沿岸 23 个验潮站小时序列的水位资料及 1950~2020 年的热带气旋资料, 统计分析北印度洋热带气旋风暴潮的时空分布特征与北印度洋 AMTSS 对 Niño3.4、PDO、IOD 等信号的响应。结果表明: 在北印度洋区域, 孟加拉湾海域相较于阿拉伯海海域受热带气旋影响更频繁。在孟加拉湾内, 热带气旋的影响区域多集中在偏西、偏北海域, 逆时针旋转的热带气旋以及众多的河口、海湾也导致位于孟加拉湾北部的地区受风暴潮影响最为严重; 北印度洋 AMTSS 多发生在每年 5~6 月与 11~12 月、1 月, 两者分别占总 AMTSS 的 28.45%, 30.79%, 但 4~6 月生成的热带气旋的平均强度大于其他月份。较高的出现频次及热带气旋强度是 5~6 月 AMTSS 的出现频次更高的重要原因; 北印度洋 AMTSS 与 Niño3.4、SOI 相关性较高并具有极高的显著性, 其中孟加拉湾北部 S12 至 S15 验潮站位置的 AMTSS 与 Niño3.4、SOI 指数的显著性均达到 90% 以上, 但 Niño3.4 指数与阿拉伯海 AMTSS 多与呈正相关、与孟加拉湾 AMTSS 多呈负相关, 可能与两片海域的地理位置以及东、西高止山脉阻碍了 ENSO 信号的纬向传播有关。AMTSS 也受到 IOD、PDO 信号的影响, 但影响不大。

目前对 ENSO 的预报可以提前几个月(Zhou *et al.*, 2009), 这对提高风暴潮的概率预测相当有用, 并为预警、预防和缓解措施的准备提供宝贵的时间窗口, 但 ENSO 只是调节热带气旋和风暴潮的众多过程之一, 若要更详尽地了解 ENSO 对风暴潮的影响, 在未来的研究中, 用可靠的数值模拟来获得更多更详尽的风暴潮数据, 从而进一步了解风暴潮对 ENSO 信号的响应。

参 考 文 献

- 冯兴如, 杨德周, 尹宝树, 等, 2018. 中国浙江和福建海域台风浪变化特征和趋势[J]. 海洋与湖沼, 49(2): 233-241, doi: 10.11693/hyhz20180200036.
- 吕学珠, 刘玉光, 李轶斐, 等, 2012. 孟加拉湾海平面异常的年际变化及其对 ENSO 的响应[J]. 海洋与湖沼, 43(6): 1076-1082, doi: 10.11693/hyhz201206007007.
- 吴风电, 罗坚, 2011. 1977-2008 年北印度洋热带气旋统计特征分析[J]. 气象与环境科学, 34(3): 7-13, doi: 10.3969/j.issn.1673-7148.2011.03.002.
- 张海燕, 2019. 南海区台风风暴潮时空分布特征[J]. 海洋预报, 36(6): 1-8, doi: 10.11737/j.issn.1003-0239.2019.06.001.
- 陈联寿, 2010. 热带气象灾害及其研究进展[J]. 气象, 36(7): 101-110, doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2010.07.017.
- 梁梅, 林卉娇, 徐建军, 等, 2020. 1990-2018 年北印度洋热带气旋统计特征[J]. 广东海洋大学学报, 40(4): 51-59, doi: 10.3969/j.issn.1673-9159.2020.04.008.
- 韩晓伟, 周林, 梅勇, 等, 2010. 1975~2008 年北印度洋热带气旋特征分析[J]. 海洋预报, 27(6): 5-11, doi: 10.11737/j.issn.1003-0239.2010.06.002.
- COLLE B A, ROJOWSKY K, BUONAITO F, 2010. New York City storm surges: climatology and an analysis of the wind and cyclone evolution [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 49(1): 85-100, doi: 10.1175/2009JAMC2189.1.
- FENG X R, LI M J, LI Y L, *et al.*, 2021. Typhoon storm surge in the southeast Chinese mainland modulated by ENSO [J]. Scientific Reports, 11(1): 10137, doi: 10.1038/s41598-021-89507-7.
- GOSWAMI B N, MADHUSOODANAN M S, NEEMA C P, *et al.*, 2006. A physical mechanism for North Atlantic SST influence on the Indian summer monsoon [J]. Geophysical Research Letters, 33(2): L02706, doi: 10.1029/2005GL024803.
- KULESHOV Y, QI L, FAWCETT R, *et al.*, 2008. On tropical cyclone activity in the Southern Hemisphere: trends and the ENSO connection [J]. Geophysical Research Letters, 35(14): L14S08, doi: 10.1029/2007GL032983.
- LI Z, YU W D, LI K P, *et al.*, 2015. Modulation of interannual variability of tropical cyclone activity over Southeast Indian Ocean by negative IOD phase [J]. Dynamics of Atmospheres and Oceans, 72: 62-69, doi: 10.1016/j.dynatmoce.2015.10.006.
- NATH S, KOTAL S D, KUNDU P K, 2015. Application of fuzzy clustering technique for analysis of North Indian Ocean tropical cyclone tracks [J]. Tropical Cyclone Research and Review, 4(3/4): 110-123.
- OEY L Y, CHOU S, 2016. Evidence of rising and poleward shift of storm surge in western North Pacific in recent decades [J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 121(7): 5181-5192, doi: 10.1002/2016JC011777.
- RAMSAY H A, LESLIE L M, LAMB P J, *et al.*, 2008. Interannual variability of tropical cyclones in the Australian region: role of large-scale environment [J]. Journal of Climate, 21(5): 1083-1103, doi: 10.1175/2007JCLI1970.1.
- SAHA K, GUHA A, BANIK T, 2021. Indian summer monsoon variability over North-East India: impact of ENSO and IOD [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 221: 105705, doi: 10.1016/j.jastp.2021.105705.
- SANTOSO A, ENGLAND M H, CAI W, 2012. Impact of indo-pacific feedback interactions on ENSO dynamics diagnosed using ensemble climate simulations [J]. Journal of Climate, 25(21): 7743-7763, doi: 10.1175/JCLI-D-11-00287.1.
- SINGH O P, KHAN T M A, RAHMAN M S, 2001. Has the frequency of intense tropical cyclones increased in the north Indian Ocean? [J]. Current Science, 80(4): 575-580.
- SINHA M, JHA S, CHAKRABORTY P, 2020. Indian Ocean wind speed variability and global teleconnection patterns [J]. Oceanologia, 62(2): 126-138, doi: 10.1016/j.oceano.2019.10.002.
- WAHIDUZZAMAN M, YEASMIN A, 2019. Statistical forecasting of tropical cyclone landfall activities over the North Indian Ocean rim countries [J]. Atmospheric Research,

227: 89-100, doi: 10.1016/j.atmosres.2019.04.034.

WAHIDUZZAMAN M, YEASMIN A, LUO J J, 2020. Seasonal movement prediction of tropical cyclone over the North Indian Ocean by using atmospheric climate variables in statistical models [J]. *Atmospheric Research*, 245: 105089,

doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105089.

ZHOU X B, TANG Y M, DENG Z W, 2009. Assimilation of historical SST data for long-term ENSO retrospective forecasts [J]. *Ocean Modelling*, 30(2/3): 143-154, doi: 10.1016/j.ocemod.2009.06.015.

CHARACTERISTICS OF STORM SURGE IN THE NORTHERN INDIAN OCEAN AND ITS RESPONSE TO CLIMATE SIGNALS

XIE Jian-Bin^{1, 2, 4, 5}, WAN Wei-Qi^{1, 2, 4, 5}, FENG Xing-Ru^{1, 2, 3, 4, 5}, YIN Bao-Shu^{1, 2, 3, 4, 5}, LIU Ya-Hao^{1, 2, 3, 4}
(1. *Institute of Oceanology, Chinese Academy of Science, Qingdao 266071, China*; 2. *Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China*; 3. *Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China*; 4. *Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China*; 5. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract The northern Indian Ocean is an important passage of China's "Maritime Silk Road". The annual storm surge caused by tropical cyclones is a serious threat to the safety of navigation of ships and people's lives and property in coastal countries. In this study, tropical cyclone data from 1950 to 2020 published by the United States Joint Warning Center (JTWC), tropical cyclone data from 1950 to 2020 published by the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Nino3.4 index from 1950 to 2020, and North Sea Level data published by the University of Hawaii Sea Level Center (UHSLC) were used. Analyses of hourly water level data in the Indian Ocean shows that: (1) the storm surge of more than 1m in the northern Indian Ocean is mainly distributed in the northern part of the Bay of Bengal, and a small amount is distributed in other parts of the Bay of Bengal and the Arabian Sea. (2) The annual maximum tropical storm surge (AMTSS) in the northern part of the Bay of Bengal has a high correlation with Nino3.4 index and SOI index, and is obviously influenced by ENSO. (3) The monthly distribution of AMTSS in the northern Indian Ocean shows a bimodal distribution, which is basically consistent with the monthly distribution of tropical cyclones (TC). (4) The number and intensity of tropical cyclones affecting the northern Bay of Bengal during La Niña are greater than those affecting the Bay of Bengal during El Niño. It is an important reason that the extreme value of storm surge during La Niña is greater than that during El Niño. It is suggested that AMTSS response to ENSO signals may provide potential predictability for AMTSS, which is important for early warning and storm surge mitigation.

Key words tropical cyclone; storm surge; ENSO