

李畅,姜霞,沈新勇.阿拉伯海热带气旋生成特征分析[J].海洋气象学报,2021,41(4):62-72.
LI Chang, JIANG Xia, SHEN Xinyong. Characteristics of tropical cyclones genesis in the Arabian Sea [J]. Journal of Marine Meteorology, 2021, 41(4): 62-72. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2021.04.006. (in Chinese)

阿拉伯海热带气旋生成特征分析

李畅^{1,2}, 姜霞², 沈新勇^{1,3}

(1.南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心,江苏南京 210044;2.中国海洋大学海洋与大气学院,山东青岛 266100;3.南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海),广东珠海 519082)

摘要: 利用印度气象局 (India Meteorological Department, IMD)、国际气候管理最佳路径档案库 (International Best Track Archive for Climate Stewardship, IBTrACS) 提供的 1982—2020 年阿拉伯海热带气旋路径资料,美国国家环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 再分析资料,对近 39 a 阿拉伯海热带气旋源地和路径特征、活跃区域、频数及气旋累积能量 (accumulated cyclone energy, ACE) 指数的季节特征和年际变化特征进行分析,并结合环境因素,说明其物理成因。结果表明:阿拉伯海热带气旋多发于 $10^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$, $65^{\circ}\sim 75^{\circ}\text{E}$ 海域,5—6 月、9—12 月发生频数较高且强度较强,1—4 月、7—8 月发生频数较低且气旋近中心最大风速均小于 35 kn; 频数的季节变化主要受控于垂直风切变要素;阿拉伯海热带气旋发生频数和 ACE 近年有上升趋势,年际变化主要受控于海面温度 (sea surface temperature, SST) 和 850 hPa 相对湿度要素。

关键词: 热带气旋; 阿拉伯海; 特征分析; 气旋累积能量

中图分类号: P444 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2021)04-0062-11

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2021.04.006

Characteristics of tropical cyclones genesis in the Arabian Sea

LI Chang^{1,2}, JIANG Xia², SHEN Xinyong^{1,3}

(1. Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education / Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change / Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China)

Abstract Based on the track data of tropical cyclones in the Arabian Sea from 1982 to 2020 provided by the India Meteorological Department (IMD) and the International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS), and the reanalysis data provided by the National Centers for Environmental Prediction (NCEP), the source and track characteristics, active area, seasonal and interannual variation characteristics of frequency and accumulated cyclone energy (ACE) index of tropical cyclones in the Arabian Sea in recent 39 years are analyzed, and the physical causes are explained in combination with environmental factors. The results show that tropical cyclones in the Arabian Sea mostly occur in the sea area of $10^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$, $65^{\circ}\sim 75^{\circ}\text{E}$. The frequency and intensity of tropical cyclones are high from May to

收稿日期:2021-07-20; 修订日期:2021-10-22

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFC1510400);国家自然科学基金项目(41930967,41975054,41790471);中国科学院战略性先导科技专项(XDA20100304)

通信作者:李畅,男,硕士研究生,现从事台风与中小尺度气象研究, coldew0927@163.com。

June and September to December. In contrast, from January to April and July to August, the frequency of tropical cyclones is low, and the maximum wind speed near the center of cyclones is less than 35 kn. It is found that the seasonal variation of frequency of tropical cyclones is mainly controlled by vertical wind shear, while interannual variation is mainly controlled by sea surface temperature (SST) and 850 hPa relative humidity. The occurrence frequency and ACE of tropical cyclones in the Arabian Sea are increasing in recent years.

Key words tropical cyclone; Arabian Sea; characteristic analysis; accumulated cyclone energy

引言

阿拉伯海是位于印度洋西北部的边缘海,与东侧的孟加拉湾一起占据了北印度洋绝大部分面积。阿拉伯海是亚洲东部及南部地区与欧洲、非洲之间航运的重要途径地,是世界石油运输的心脏地带,也是海上丝绸之路的关键节点^[1]。热带气旋(tropical cyclone, TC)灾害会对该地的海上运输造成很大威胁,也会对周边地区的生产活动造成严重损害^[2]。目前绝大多数对阿拉伯海 TC 的研究都包含于对北印度洋 TC 的研究之内。李培等^[3]统计了北印度洋气象船舶资料,发现北印度洋 TC 生成源地集中在 $5^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$ 海域,且生成月份集中在 5、10、11 月,具有双峰型特征。SINGH et al.^[4]在统计 1877—1998 年 TC 资料中发现北印度洋强度 ≥ 48 kn 的 TC 活动逐渐变得频繁。梁梅等^[5]在对 1990—2018 年资料的统计中也发现北印度洋 TC 频数呈现增加趋势。吴风电和罗坚^[6]在对 1977—2008 年 TC 资料的统计中应用小波分析,发现北印度洋 TC 频数变化表现出 2~4 a 和 4~8 a 的周期,并且解释了热带辐合带、热带大气季节内振荡对北印度洋 TC 活动的影响。韩晓伟等^[7]认为北印度洋 TC 频数季节变化与海面温度(sea surface temperature, SST)、南亚夏季风有关。张霏等^[8]认为垂直风切变和相对涡度的季节变化是造成 TC 频数季节变化呈现双峰型特征的关键因素,且低垂直风切变、正的相对涡度、较高海面温度、较大相对湿度利于 TC 生成。在上述研究中对阿拉伯海 TC 的研究内容主要有:SINGH et al.^[4]发现 5—6 月和 11 月阿拉伯海 TC 的频数变化具有 13 a 和 10 a 的周期,梁梅等^[5]、吴风电和罗坚^[6]认为强 TC 主要发源于阿拉伯海中部和东部海域。韩晓伟等^[7]发现阿拉伯海 TC 多西向移动,主要生成区域为 $5^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $65^{\circ}\sim 75^{\circ}\text{E}$ 。张霏等^[8]发现阿拉伯海 TC 总数占北印度洋的 29.6%,路径多为西行,且频数呈显著增加趋势。此外,还有学者对阿拉伯海 TC 个例进行分

析。焦艳等^[9]利用卫星资料等数据对 2010 年阿拉伯海特强气旋风暴“PHET”进行了个例分析,指出特强气旋风暴“PHET”对流旺盛,“暖心”结构显著。NAIR et al.^[10]对 2017 年阿拉伯海特强气旋风暴“Ockhi”的降水及卷入的气溶胶进行了分析。

近年,阿拉伯海多次出现破坏性强的气旋灾害。如 2020 年 11 月,特强气旋风暴“Gati”最大风速达到了我国超强台风级强度^[11],并以近巅峰强度登陆索马里,成为 1982 年以来登陆索马里最强的 TC。2021 年 5 月,特强气旋风暴“Tauktae”在印度西北部登陆,不仅在当地造成伤亡,还在西藏南部造成强降水。与孟加拉湾相比,阿拉伯海 TC 的生成与活动有许多不同的特征,如阿拉伯海 TC 生成数量更少^[5,7-8],路径更倾向西行和西北行^[5],TC 频数双峰型结构中双峰的强度和强弱配置不同^[8]。因此,有必要对阿拉伯海 TC 的活动特征和支撑阿拉伯海 TC 活动的环境因素进行单独研究。本文将从 SST、850 hPa 相对湿度、850~200 hPa 垂直风切变、850 hPa 相对涡度等环境条件入手,详细探讨阿拉伯海 TC 活动特征的影响因子。BELL et al.^[12]在 2000 年构造了气旋累积能量(accumulated cyclone energy, ACE)指数概念,王功录等^[13]和索朗仓决等^[14]分别使用该指数对西北太平洋和孟加拉湾 TC 进行分析,但目前对阿拉伯海 TC 的 ACE 时空特征关注较少。故本文也将统计阿拉伯海 TC 中 ACE 的季节变化和年际变化。

1 研究区域、资料与方法

本文的研究区域为 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$, $45^{\circ}\sim 80^{\circ}\text{E}$ 内的海域和沿海的陆地区域,包含阿拉伯海及其邻近地区。研究使用了印度气象局(India Meteorological Department, IMD)公布的 1982—2020 年 Best Track 资料集、国际气候管理最佳路径档案库(International Best Track Archive for Climate Stewardship, IBTrACS)包含的美国联合台风预警中心(Joint Typhoon Warning Center, JTWC)的 JTWC

Best Track 资料集^[15]。张霏等^[8]比较了 IMD 与 JTWC 的资料,得出 JTWC 资料记录时间较长,但记录的低压(D)与深低压(DD)数量显著少于 IMD 资料;IMD 资料中 TC 路径多为折线,与通常光滑的 TC 路径不符,但详细记录了低压及深低压信息的结论。因此,在对 TC 路径、源地、移动方向的研究中采用 JTWC 资料,以规避 IMD 资料在 TC 定位上的缺陷;在对 TC 数量、强度的研究中采用 IMD 资料,使对热带低压信息的统计更为完整。使用美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)包含的 NCEP GODAS^[16]、NCEP/NCAR Reanalysis^[17]、NOAA OI SST V2 High Resolution Dataset、NCEP Daily Global Analyses 数据集(以上资料由美国国家海洋和大气管理局/海洋和大气研究办公室/地球系统研究实验室的物理科学实验室,网站 <https://psl.noaa.gov/data/gridded/>

提供)对各环境因子进行研究。对于 TC 频数、强 TC 频数、ACE 的研究,采用绘制时间序列图的方法,并用拟合等统计方法分析。对于登陆地及发源地空间分布的研究,采用绘制二维空间格点图的方式,并通过合成的方法与月平均 SST 场、850 hPa 相对湿度场、850~200 hPa 垂直风切变场、850 hPa 相对涡度场(仅计算其垂直分量)进行对比分析,以期较为全面地展示阿拉伯海 TC 的活动特征。850~200 hPa 垂直风切变的计算公式为

$$V = \sqrt{(u_{200} - u_{850})^2 + (v_{200} - v_{850})^2} \quad (1)$$

其中 u_{850} 、 u_{200} 、 v_{850} 、 v_{200} 分别是各格点在 850 hPa 或 200 hPa 高度的经向或纬向风速^[18]。

2 阿拉伯海热带气旋的空间分布特征

2.1 路径特征

图 1a 为由 1982—2020 年 JTWC Best Track 资

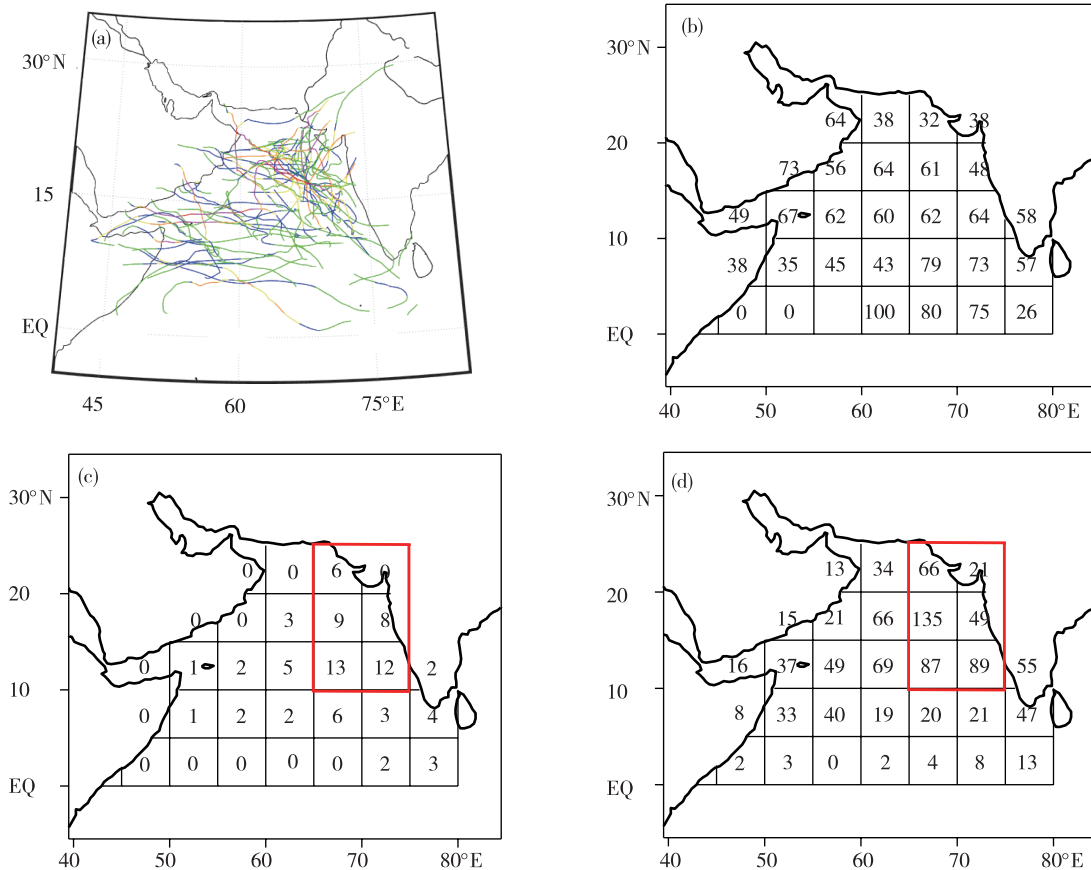


图 1 阿拉伯海热带气旋总路径(a;绿线表示低压与深低压,蓝线表示气旋风暴,黄线表示强气旋风暴,紫线表示特强气旋风暴,红线表示超级气旋风暴)、阿拉伯海各区域热带气旋西北行概率(b;单位:%)、阿拉伯海热带气旋源地分布(c;单位:个)和阿拉伯海热带气旋活跃时间分布(d;单位:d)

Fig.1 Tracks of all tropical cyclones in Arabian Sea (a; green lines represent depression and deep depression, blue lines represent cyclonic storm, yellow lines represent severe cyclonic storm, purple lines represent very severe cyclonic storm, red lines represent super cyclonic storm), and probability of tropical cyclones traveling northwest in the Arabian Sea (b; units: %), source distribution of tropical cyclones in the Arabian Sea (c; units: pcs), active time distribution of tropical cyclones in the Arabian Sea (d; units: d)

料绘制的阿拉伯海 TC 总路径图。从图中可以看出,阿拉伯海 TC 呈东多西少、北多南少的整体布局。阿拉伯海东北部海域 TC 路径最密集,TC 强度也最大;西南部、西北部海域 TC 路径分布较稀疏,但也出现过强 TC;东南部海域 TC 少、强度低。阿拉伯海附属的边缘海及海湾中,亚丁湾有 TC 分布,波斯湾和红海无 TC 生成或进入的记录。阿拉伯海 TC 的移动路径以西北行为主,各区域 TC 西北行概率如图 1b(数据来自 JTWC Best Track 资料集,每个区块定义为 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 格距)。西南部海域的 TC 多向西行登陆阿拉伯半岛或东非,东北部海域的 TC 也偶有东北行登陆南亚次大陆的个例。阿拉伯海 TC 登陆频繁的海岸线有:印度河入海口至肯帕德湾沿岸,阿拉伯半岛东南侧沿岸,索马里东北侧沿岸、索科特拉岛沿岸。

2.2 源地分布

图 1c 为由 1982—2020 年 JTWC Best Track 资料绘制的阿拉伯海 TC 源地分布图,图中数字代表发源在该区域的 TC 数量,每个区块定义为 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 格距。从图中可以看出,阿拉伯海东北侧 ($10^{\circ} \sim 20^{\circ} \text{N}$, $65^{\circ} \sim 75^{\circ} \text{E}$) 海域是阿拉伯海 TC 的主要发源地。利

用相同资料统计 TC 在各区块中的停留时间,发现阿拉伯海 TC 活跃范围也位于阿拉伯海东北侧 ($10^{\circ} \sim 25^{\circ} \text{N}$, $65^{\circ} \sim 75^{\circ} \text{E}$) (图 1d),故阿拉伯海 TC 的主要发源地也是阿拉伯海 TC 影响最频繁的区域。相较于东北侧,阿拉伯海西北侧海域生成 TC 较少,与同纬度地区差异甚大。亦有 TC 从孟加拉湾移动至阿拉伯海,此处不作统计。

由以上统计得出, $10^{\circ} \sim 25^{\circ} \text{N}$, $65^{\circ} \sim 75^{\circ} \text{E}$ (图 1c、d 红框区域) 区域为阿拉伯海 TC 最活跃区域。在本文以下的分析中,将重点关注此区域。

3 阿拉伯海热带气旋的时间分布特征

3.1 季节分布特征

由 1982—2020 年 IMD Best Track 资料统计阿拉伯海 TC 频数的季节分布(图 2a)可以看出,阿拉伯海 TC 频数呈现“双峰”特征,即 TC 频数在一年中有 6、11 月两个峰值。TC 最多发的时间段为 11 月,在 39 a 中共产生了 30 个 TC。其次是 6 月和 10 月,各产生了 29 个 TC。1—4 月阿拉伯海生成 TC 的数量较少。值得注意的是,与西北太平洋不同,7—8 月是阿拉伯海 TC 的非活跃期,生成 TC 较少。

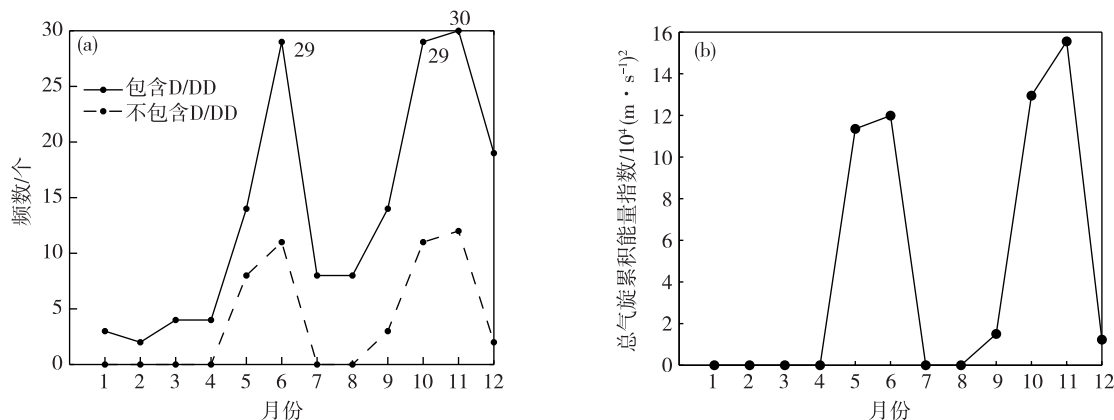


图2 阿拉伯海热带气旋频数(a)和ACE(b)的季节变化

Fig.2 Seasonal variation of frequency (a) and ACE (b) of tropical cyclones in the Arabian Sea

气旋累积能量指数 (I_{ACE}), 定义为近中心最大风速 $\geq 35 \text{ kn}$ 的 TC, 当其风速 $\geq 35 \text{ kn}$ 时, 每 6 h (即一个发报时次) 对近中心最大风速作平方运算, 再进行求和^[13], 即

$$I_{ACE} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n U_i^2 \quad (2)$$

式中 $j=1, \dots, m$ 为 TC 个数, $i=1, \dots, n$ 为一个 TC 近中心最大风速 $\geq 35 \text{ kn}$ 的发报数, U_i 为近中心最大风速。绘制 I_{ACE} 季节变化图(图 2b), 发现虽然阿拉伯海在每个月都有可能生成 TC, 但强 TC 只存在于

5、6、10、11 月。9、12 月虽然 TC 频数较高, 但大多数被记录的 TC 都是低压或深低压。1—4 月、7—8 月则无强度 $\geq 35 \text{ kn}$ 的 TC 生成。

由以上统计, 根据 TC 的活跃情况, 将一年分为 4 个时期来研究阿拉伯海 TC 的各类特征(表 1), 即冬季期(1—4 月)、季风前期(5—6 月)、季风期(7—8 月)、季风后期(9—12 月)。其中冬季期、季风期阿拉伯海出现 TC 数量少, 平均每月出现 TC 数量只有 0.08、0.21 个。而在季风前期和季风后期, 阿拉伯海 TC 数量偏多, 平均每月阿拉伯海出现 TC 数量

为 0.55、0.59 个,且强度 ≥ 35 kn 的 TC 只在这两个时期出现。

表 1 阿拉伯海热带气旋频数的季节循环

Table 1 Seasonal cycle of frequency of tropical cyclone in the Arabian Sea

时期	月均频数/个	≥ 35 kn 月均频数/个
冬季期(1—4月)	0.08	0
季风前期(5—6月)	0.55	0.24
季风期(7—8月)	0.21	0
季风后期(9—12月)	0.59	0.18

3.2 年际变化特征

由 1982—2020 年 IMD Best Track 资料统计阿拉伯海 TC 频数的逐年变化(图 3a)可以发现,39 a

内阿拉伯海 TC 频数的变化大,且近年有增多趋势。峰值年为 2019 年,共生成 8 个 TC。年平均生成数为 2.23 个。2004、2015、2019、2020 年阿拉伯海 TC 生成数量均达到 5 个及以上,属于数量偏多年份。其中 2004、2015、2020 年有 2 个 TC 在季风前期生成,3 个 TC 在季风后期生成;2019 年有 1 个 TC 在季风前期生成,7 个 TC 在季风后期生成。1987、1991、2000、2017 年,阿拉伯海无 TC 生成。

将 TC 频数和强度数据换算为 ACE 指数(图 3b),可以发现阿拉伯海 TC 的 ACE 数值年际变化更明显。有很多年份全年没有 ACE 值,也有如 2015、2019 年这样的 ACE 高值年。此外,阿拉伯海 TC 的 ACE 近年来上升趋势明显,造成这种变化的原因还需进一步研究。

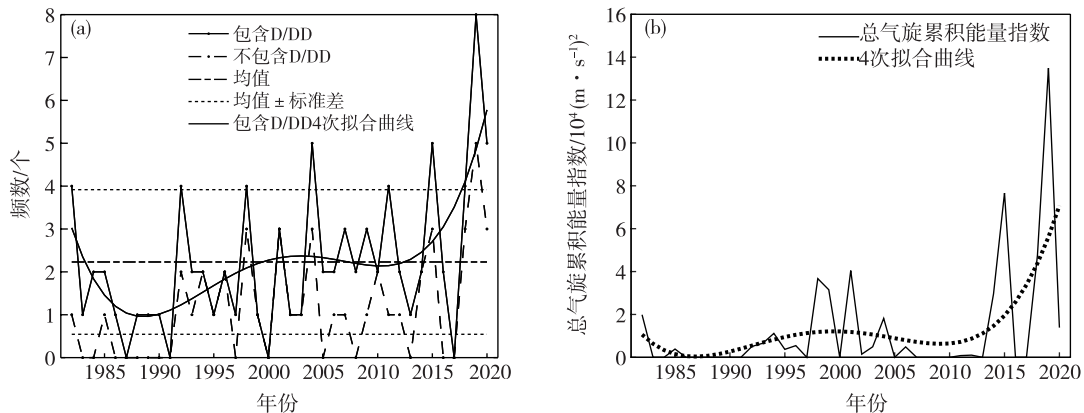


图 3 阿拉伯海热带气旋频数(a)和 ACE(b)的年际变化

Fig.3 Interannual variation of frequency (a) and ACE (b) of tropical cyclones in the Arabian Sea

4 成因简析

4.1 影响 TC 空间分布、季节分布特征的因素

与阿拉伯海 TC 频数的双峰型特征类似,阿拉伯海 SST 场、湿度场、垂直风切变场、相对涡度场在一年中都呈现双峰型季节循环特征。冬季期(图 4—7 中 a、b),阿拉伯海西北侧 SST 低,不适宜 TC 的生成与发展;而阿拉伯海东侧有暖表面流,并且阿拉伯海东侧沿岸地区海水深度浅,故该地产生 SST 暖舌,使该地海水热力条件能支持 TC 生成和发展。3、4 月,阿拉伯海西南侧的 SST 暖舌温度也增加到 26°C 以上,达到 TC 生成、发展所需条件^[19]。冬季期平均 500 hPa 高度场显示,阿拉伯海北侧为西风急流区,副热带高压位于阿拉伯半岛南侧和东非。北侧的西风急流会造成极大的垂直风切变,其平均强度大于 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,不利于 TC 生成、发展^[20]。

在 850 hPa 高度层,阿拉伯海大部分区域有负相对涡度,且风向上游为北非、阿拉伯半岛等干旱半干旱气候区,相对湿度低,亦不适合 TC 发展。仅在阿拉伯海东南侧大气较为湿润,且垂直风切变小,SST 合适。因此,冬季期阿拉伯海 TC 活动少,仅有的适宜 TC 活动的区域为东南侧低纬度地区。

在季风前期(图 4—7 中 c),阿拉伯海 SST 达到一年中的极大期。此时除了东非近海有极少区域由于离岸流有冷舌外,所有区域 SST 都适合 TC 生成和发展。在 850 hPa 高度层,有大面积正相对涡度区,为 TC 生成提供了有利的动力条件^[21];湿度条件上,阿拉伯海西北侧大气干燥,不适宜 TC 活动,其他区域平均相对湿度均大于 50%。由于 5、6 月阿拉伯海季风已经局部爆发,阿拉伯海南侧受季风控制,有大片中高垂直风切变区域,TC 活动受抑制。其中索马里以东地区为低空急流轴所控制地区,是

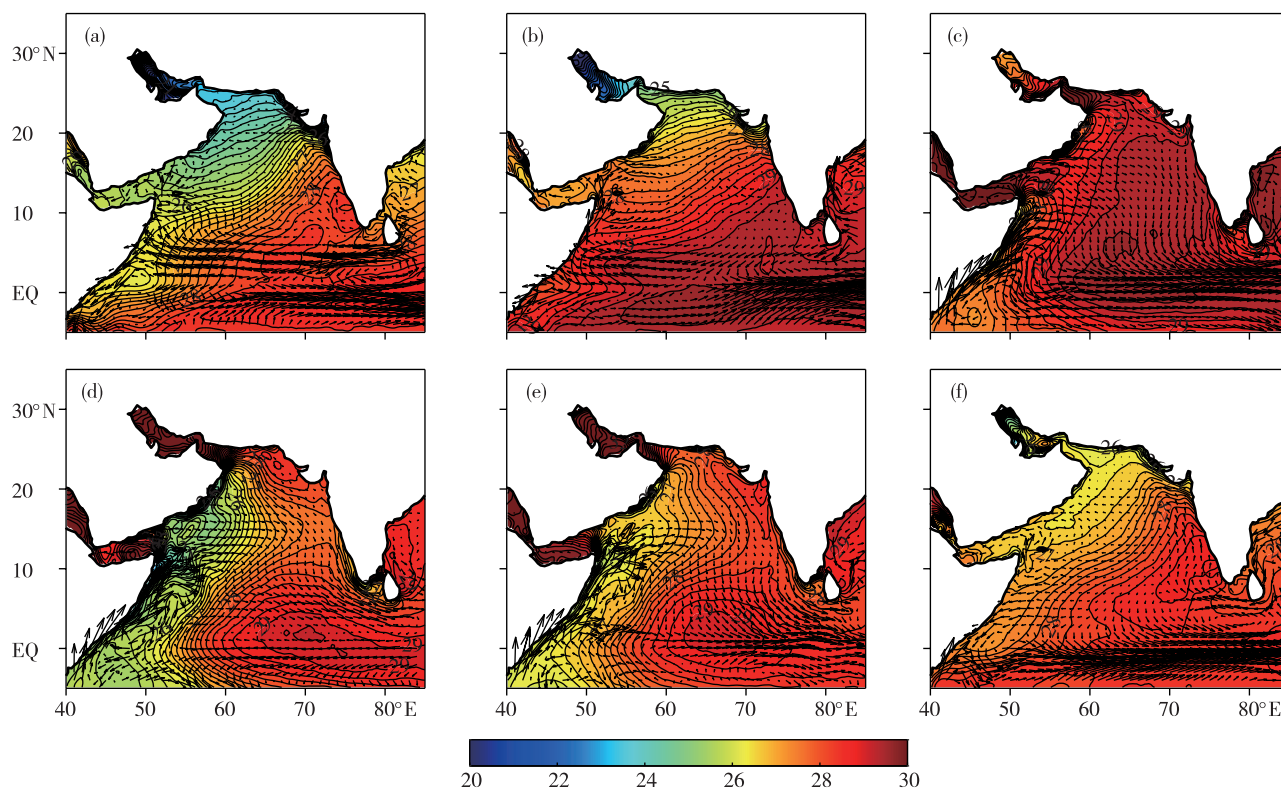


图4 阿拉伯海 SST(色阶,单位:°C)和海表面流(箭头)的季节分布(a. 1—2月,b. 3—4月,c. 5—6月,d. 7—8月,e. 9—10月,f. 11—12月)

Fig.4 Seasonal fields of SST (color scale, units: °C) and sea surface current (arrow) in the Arabian Sea (a. from January to February, b. from March to April, c. from May to June, d. from July to August, e. from September to October, f. from November to December)

垂直风切变高值中心。因此,在季风前期只有阿拉伯海东北侧海域适合 TC 活动。

在季风期(图4—7中d),阿拉伯海850 hPa高度西风分量普遍大于 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,此时西侧由于强离岸流影响,SST降低,不再适合TC生成和发展。阿拉伯海东侧海域也同时出现冷舌。全海域水汽条件由于季风爆发全面转好。由于季风带来低层的西南急流,阿拉伯海南侧出现大片负相对涡度区,全阿拉伯海海域出现大片强垂直风切变区。垂直风切变的大小会影响TC的能量累积机制,能在TC生成、发展过程中起到决定性的作用,故在季风期阿拉伯海少TC生成,无强TC活动。

在季风后期(图4—7中e、f),阿拉伯海SST条件恢复,东侧的暖舌也重新出现。850 hPa水汽条件略变差,但仍优于冬季期和季风前期;相对涡度条件转好。垂直风切变降低,9—10月的北侧海域和11—12月的南侧海域都为垂直风切变低值区。因此,此时期阿拉伯海大部分海区都适合TC生成和发展。TC数据的统计结果也显示此时期为一年中阿拉伯海TC最活跃的时期。

将阿拉伯海及邻近区域($0^\circ \sim 30^\circ \text{N}, 45^\circ \sim 80^\circ \text{E}$)的四个要素进行定量分析(图8a、b),阿拉伯海850 hPa相对湿度和垂直风切变在冬季期、季风期达到峰值,季风前期和季风后期较小。SST和850 hPa相对涡度则相反,在季风前期和季风后期达到峰值,冬季期、季风期较小。本文在对SST、垂直风切变、相对涡度的分析上与张霏等^[8]类似,但张霏等^[8]使用600 hPa层相对湿度数据并未分析出阿拉伯海低层相对湿度季节变化具有“双峰”型结构,文中使用850 hPa数据可见“双峰”型结构。综合以上结论,得出影响阿拉伯海TC季节分布的主要因素是垂直风切变。冬季的垂直风切变主要由温带西风急流造成,夏季的垂直风切变主要由南亚夏季风造成。另外,SST、850 hPa相对湿度及相对涡度也会影响阿拉伯海TC季节分布和空间分布。

4.2 影响TC频数年际变化的因素

统计1982—2020年TC频数与TC活跃区域($10^\circ \sim 25^\circ \text{N}, 65^\circ \sim 75^\circ \text{E}$)、活跃时间(季风前期、季风后期)的各环境因素情况,计算得到TC频数与SST之间的相关系数为0.364,与850~200 hPa垂直风

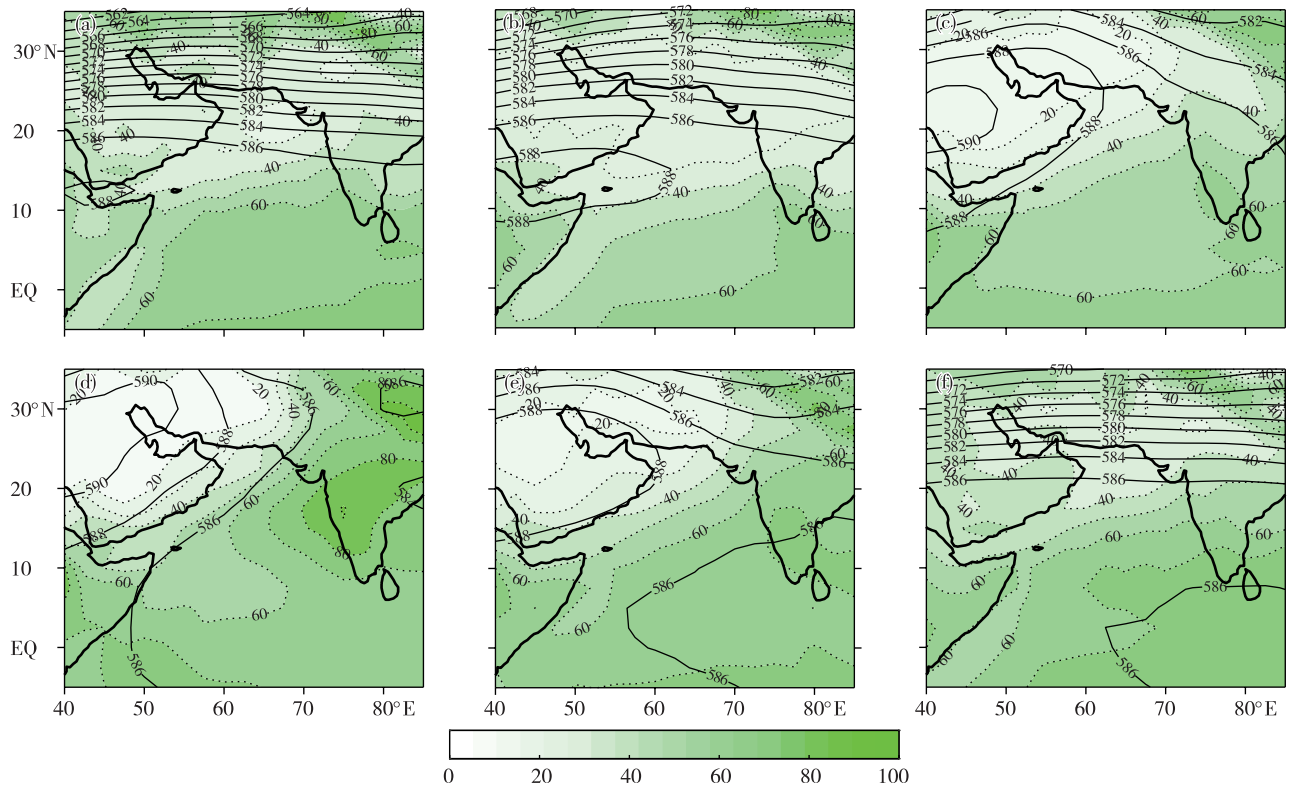


图5 阿拉伯海 500 hPa 位势高度(等值线,单位:dagpm)和 850 hPa 相对湿度(色阶,单位:%)季节分布(a. 1—2月,b. 3—4月,c. 5—6月,d. 7—8月,e. 9—10月,f. 11—12月)

Fig.5 The same as Fig.4, but for geopotential height at 500 hPa (contour, units: dagpm) and relative humidity at 850 hPa (color scale, units: %)

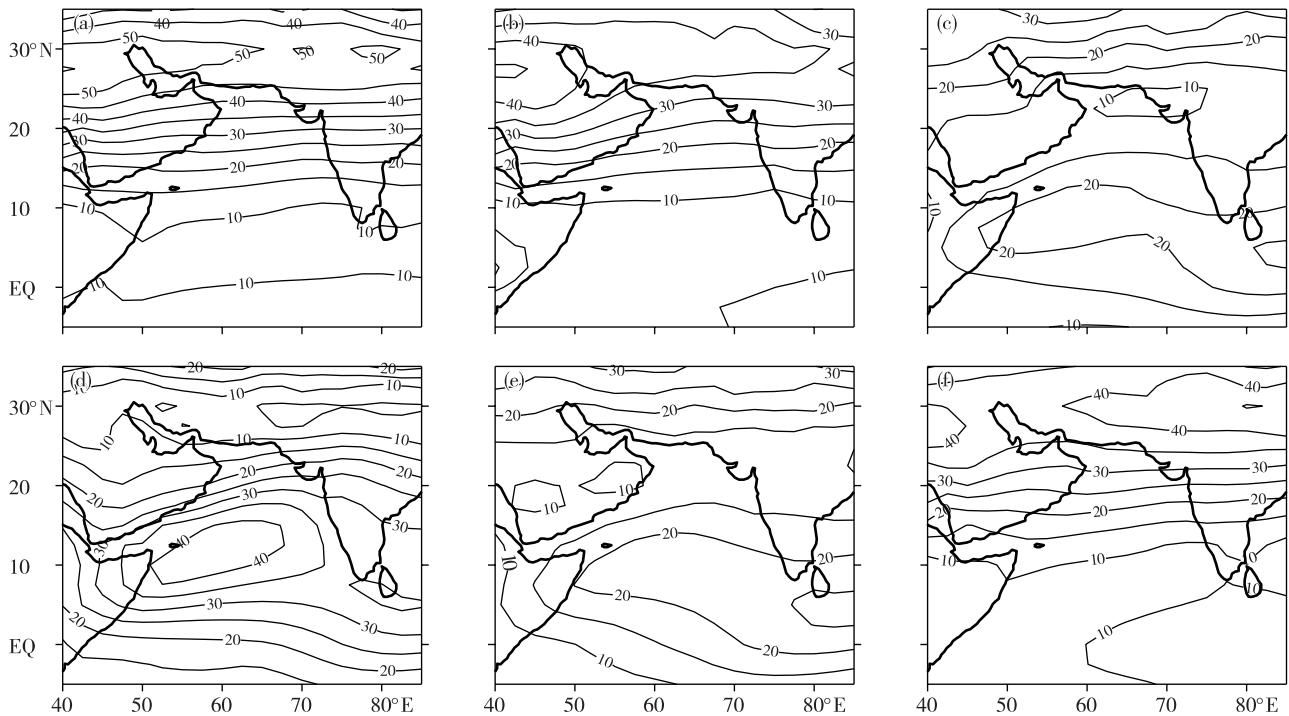


图6 阿拉伯海 850~200 hPa 垂直风切变(等值线,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)季节分布(a. 1—2月,b. 3—4月,c. 5—6月,d. 7—8月,e. 9—10月,f. 11—12月)

Fig.6 The same as Fig.4, but for vertical wind shear between 850 hPa and 200 hPa (contour, units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

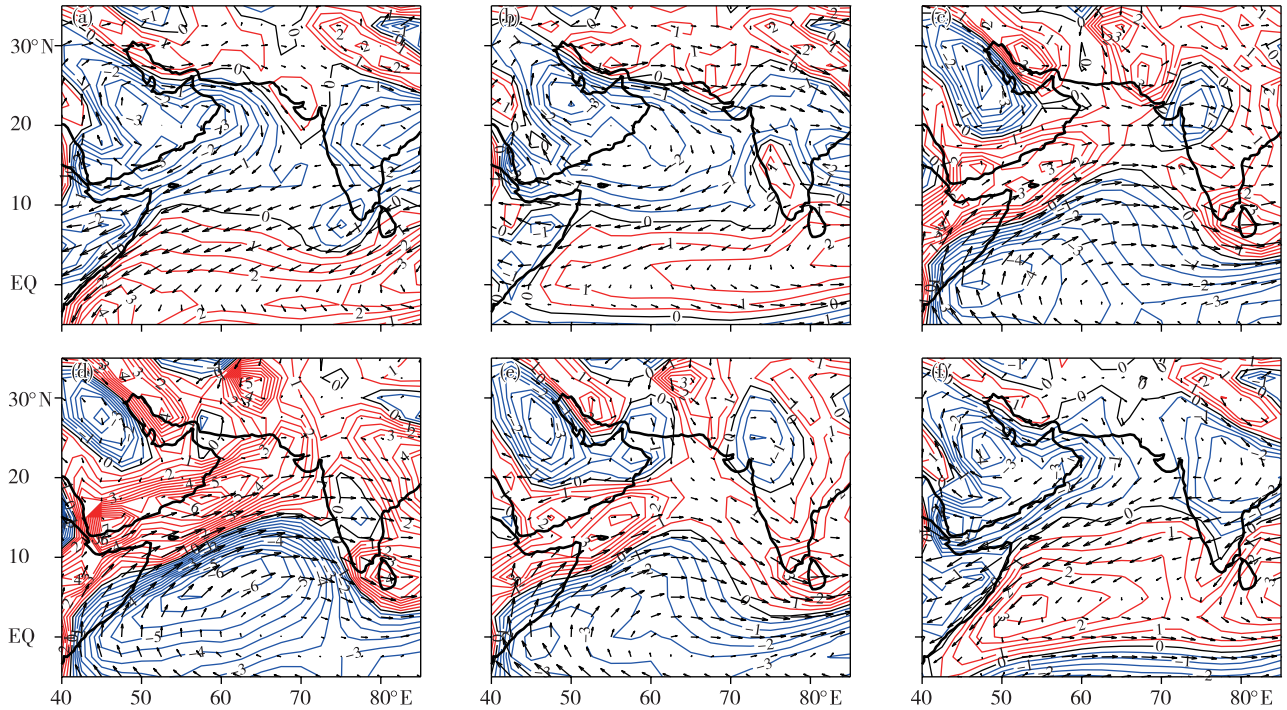


图 7 阿拉伯海 850 hPa 相对涡度(等值线,单位: $10^{-6} s^{-1}$;红色线表示正相对涡度,蓝色线表示负相对涡度)、850 hPa 风场(箭头,单位: $m \cdot s^{-1}$)季节分布(a. 1—2月,b. 3—4月,c. 5—6月,d. 7—8月,e. 9—10月,f. 11—12月)

Fig.7 The same as Fig.4, but for relative vorticity at 850 hPa (contour, units: $10^{-6} s^{-1}$; the red contours represent positive relative vorticity and the blue contours represent negative relative vorticity) and wind field at 850 hPa (arrow, units: $m \cdot s^{-1}$)

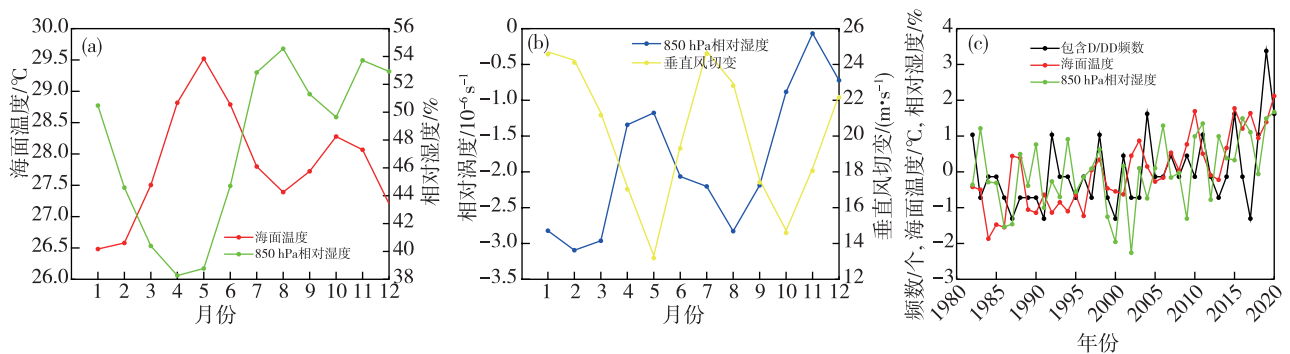


图 8 阿拉伯海各环境因素季节变化(a,b)和热带气旋频数与 $10^{\circ} \sim 25^{\circ} N, 65^{\circ} \sim 75^{\circ} E$ 区域 SST、850 hPa 相对湿度的年际变化(c;各数据已标准化处理)

Fig.8 Seasonal variation of environmental factors in the Arabian Sea (a/b), interannual variation of tropical cyclone frequency, regional mean SST and relative humidity at 850 hPa in area of $10^{\circ} \sim 25^{\circ} N, 65^{\circ} \sim 75^{\circ} E$ (c; all data have been standardized)

切变之间的相关系数为 -0.112 , 与 850 hPa 相对湿度之间的相关系数为 0.354 , 与 850 hPa 相对涡度之间的相关系数为 0.144 。经检验,TC 频数与 SST 和与 850 hPa 相对湿度之间的相关系数通过显著性水平 $\alpha=0.05$ 的显著性检验,与 850~200 hPa 垂直风切变、850 hPa 相对涡度之间的相关系数未通过检验。即 TC 频数的年际变化与 SST、相对湿度有正相

关系,三者年际变化如图 8c。TC 频数的年际变化与 850~200 hPa 垂直风切变、850 hPa 相对涡度之间的相关性不显著。从图 8c 中也能看出,阿拉伯海 SST 有缓慢上升趋势。SST 和相对湿度升高可以给 TC 生成和发展提供更多潜热能,这可能是阿拉伯海年 TC 频数出现上升趋势的原因之一。

4.3 TC 频数异常年环境因素分析

由资料统计结果可知,阿拉伯海 TC 频数年差异大。其中 2004、2015、2019、2020 年 TC 频数异常偏多,1987、1991、2000、2017 年无 TC 生成。现将 8 个 TC 频数异常年分为低频数年(1987、1991、2000、2017 年)和高频数年(2004、2015、2019、2020 年)两组,对其 SST、850 hPa 相对湿度、850~200 hPa 垂直风切变、850 hPa 相对涡度要素作合成分析,所得结果如图 9—12 所示。由于季风前期和季风后期两个时期内产生 TC 的频数占全年的 82%,产生风速 ≥ 35 kn 的 TC 频数占全年的 100%,且所选 4 个 TC 高频数年所有 TC 都产生于这两个时期,故此处只对

这两个时期的环境要素进行分析。

图 9 为 SST 月平均场,其中对于红框中的 TC 活跃区域,低频数年季风前期 SST 月平均比高频数年低 0.356 $^{\circ}\text{C}$,低频数年季风后期 SST 月平均比高频数年低 0.267 $^{\circ}\text{C}$ 。可以看出,高频数年 SST 总体高于低频数年,SST > 29.5 $^{\circ}\text{C}$ 的暖水区范围也大于低频数年。在高频数年的季风前期,阿拉伯海 SST 暖中心更偏北,TC 频发区域($10^{\circ} \sim 25^{\circ}\text{N}$, $65^{\circ} \sim 75^{\circ}\text{E}$, 图中红框区域,下同)也都被 > 29.5 $^{\circ}\text{C}$ 的暖水覆盖。在季风后期,高频数年在 TC 频发区域内的 SST 暖舌强度也强于低频数年。

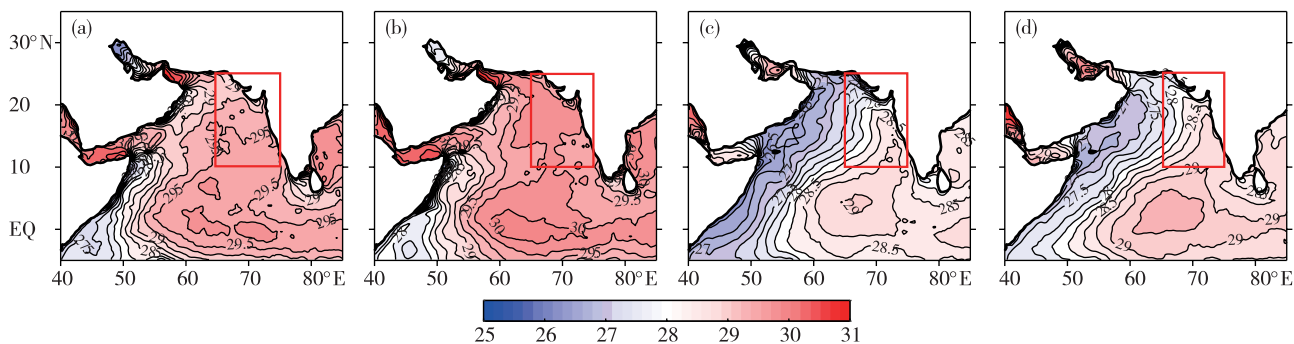


图 9 阿拉伯海 TC 频数异常年月平均 SST 合成场(色阶,单位: $^{\circ}\text{C}$) (a. 低频数年季风前期, b. 高频数年季风前期, c. 低频数年季风后期, d. 高频数年季风后期; 红色框代表 TC 活跃区域)

Fig.9 Composites of monthly mean SST (color scale, units: $^{\circ}\text{C}$) during abnormal TC frequency years in the Arabian Sea (a. pre-monsoon of low frequency years, b. pre-monsoon of high frequency years, c. post-monsoon of low frequency years, d. post-monsoon of high frequency years; the red boxes represent the area of TC activity)

图 10 为 850 hPa 相对湿度场,其中对于红框中的 TC 活跃区域,低频数年季风前期相对湿度月平均比高频数年低 3.571% ,低频数年季风后期相对湿度月平均比高频数年低 1.214% 。可以发现,在 TC 频发区域,高频数年相对湿度略高于低频数年,并且在季风前期差距较大。

图 11 为垂直风切变场,其中对于红框中的 TC 活跃区域,低频数年季风前期垂直风切变月平均比高频数年高 1.535 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,低频数年季风后期垂直风切变月平均比高频数年高 0.064 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。可以发现,在 TC 频发区域,高频数年与低频数年 850~200 hPa 垂直风切变差异不大。

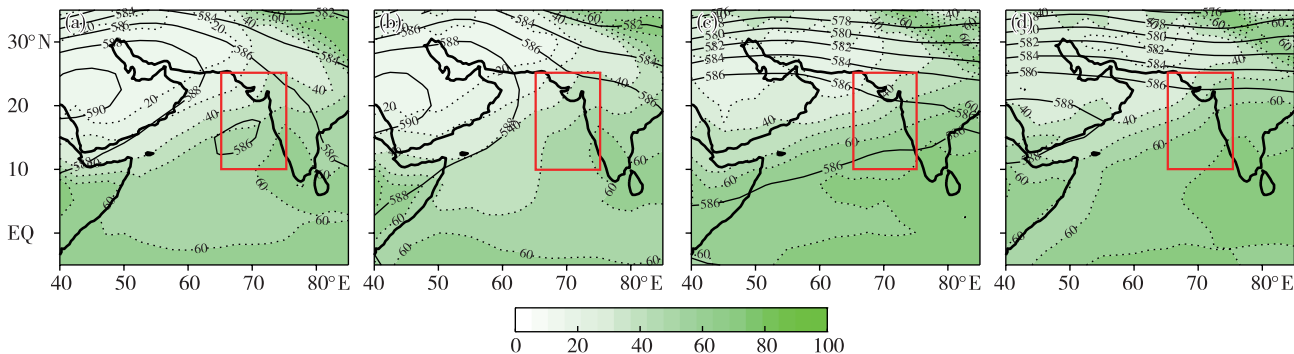


图 10 阿拉伯海 TC 频数异常年月平均 500 hPa 位势高度(等值线,单位: dagpm)和 850 hPa 相对湿度(色阶,单位: $\%$) (a. 低频数年季风前期, b. 高频数年季风前期, c. 低频数年季风后期, d. 高频数年季风后期; 红色框代表 TC 活跃区域)

Fig.10 The same as Fig.9, but for geopotential height at 500 hPa (contour, units: dagpm) and relative humidity at 850 hPa (color scale, units: $\%$)

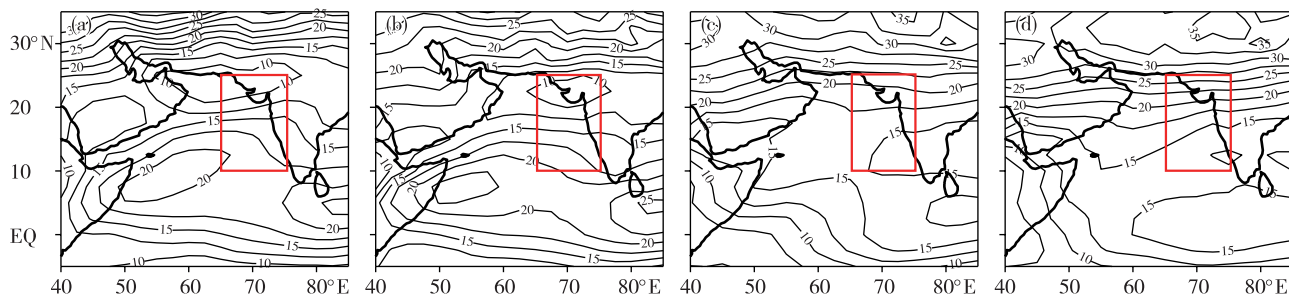


图 11 阿拉伯海 TC 频数异常年月平均 850~200 hPa 垂直风切变(等值线,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; a.低频数年季风前期, b.高频数年季风前期, c.低频数年季风后期, d.高频数年季风后期;红色框代表 TC 活跃区域)

Fig.11 The same as Fig.9, but for vertical wind shear between 850 hPa and 200 hPa (contour, units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

图 12 为 850 hPa 相对涡度场,其中对于红框中的 TC 活跃区域,低频数年季风前期相对涡度月平均比高频数年低 $1.5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$,低频数年季风后期相对涡度月平均比高频数年低 $2.0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 。综上,阿拉伯海在 SST、相对湿度高值年 TC 生成数量可能会

异常偏多,这与 4.2 节所得结论一致。相对涡度要素与 TC 频数之间的相关系数虽然未能通过显著性检验,但通过合成分析可以发现,阿拉伯海 TC 高频数年 TC 频发区域的相对涡度较低频数年高,说明该环境要素对 TC 频数异常年仍有指示意义。

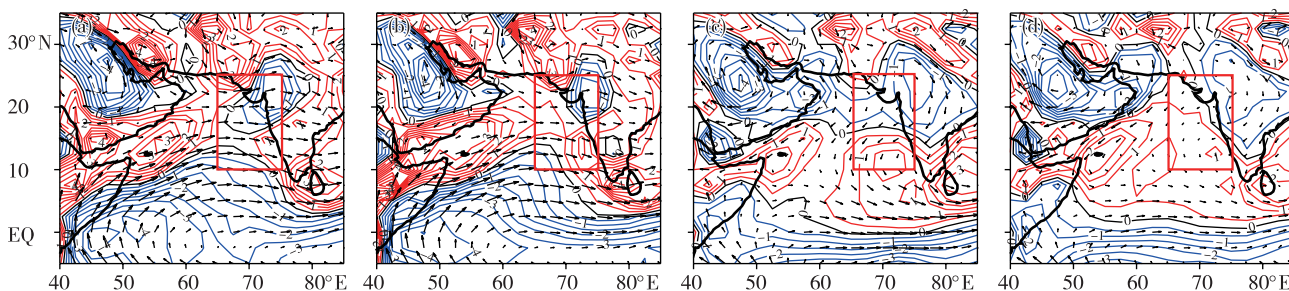


图 12 阿拉伯海 TC 频数异常年月平均 850 hPa 相对涡度(等值线,单位: 10^{-6} s^{-1} ;红色线表示正相对涡度,蓝色线表示负相对涡度)和 850 hPa 风场(箭头,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) (a.低频数年季风前期, b.高频数年季风前期, c.低频数年季风后期, d.高频数年季风后期;红色框代表 TC 活跃区域)

Fig.12 The same as Fig.9, but for relative vorticity at 850 hPa (contour, units: 10^{-6} s^{-1} ; the red contours represent positive relative vorticity and the blue contours represent negative relative vorticity) and wind field at 850 hPa (arrow, units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

5 结论

本文统计了 1982—2020 年阿拉伯海 TC 的路径、移动方向、生成源地、活跃区域、频数的季节分布与年际变化特征,并结合 SST、850 hPa 相对湿度、850~200 hPa 垂直风切变、850 hPa 相对涡度 4 个环境条件,分析了影响阿拉伯海 TC 生成及活动特征的要素,得出以下结论:

1)阿拉伯海 TC 活跃区域主要位于阿拉伯海东北和西南海域,其中阿拉伯海东北部 $10^{\circ} \sim 25^{\circ} \text{ N}$, $65^{\circ} \sim 75^{\circ} \text{ E}$ 海域 TC 活动最频繁。阿拉伯海 TC 的移动路径以西北行为主。

2)阿拉伯海 TC 频数及总 ACE 具有“双峰”型季节特征。冬季温带西风急流和季风期南亚夏季

风会造成强垂直风切变,使 TC 难以生成,这是造成“双峰”型季节特征的主要因素。位于阿拉伯海东部的 SST 暖舌和高相对湿度区导致阿拉伯海 TC 分布东多西少。

3)阿拉伯海 TC 频数和总 ACE 在近年有上升趋势。阿拉伯海 TC 频数年际变化与 SST 和 850 hPa 相对湿度因素相关性较高。TC 频数异常偏多的年份,阿拉伯海 SST、850 hPa 相对湿度和相对涡度要素偏高。

本文分析了阿拉伯海 TC 频数与 SST 相关的结论,而印度洋偶极子、印度洋海盆一致模等海温模态会在年际尺度上对阿拉伯海 SST 起调控作用^[22]。这些模态对阿拉伯海 TC 活动特征的影响有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 邓明仔,何清,阿力木·阿巴斯,等.巴基斯坦瓜达尔港气象要素特征分析[J].海洋气象学报,2020,40(4):124-132.
- [2] 陈联寿.热带气象灾害及其研究进展[J].气象,2010,36(7):101-110.
- [3] 李培,张弦,俞慕耕.北印度洋气候特点分析[J].海洋预报,2003,20(3):25-30.
- [4] SINGH O P, ALI KHAN T M, RAHMAN MD S. Changes in the frequency of tropical cyclones over the north Indian Ocean [J]. Meteor Atmos phys, 2000, 75(1/2):11-20.
- [5] 梁梅,林卉娇,徐建军,等.1990—2018年北印度洋热带气旋统计特征[J].广东海洋大学学报,2020,40(4):51-59.
- [6] 吴风电,罗坚.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,2011,34(3):7-13.
- [7] 韩晓伟,周林,梅勇,等.1975~2008年北印度洋热带气旋特征分析[J].海洋预报,2010,27(6):5-11.
- [8] 张霏,吴立广,任福民,等.孟加拉湾和阿拉伯海热带气旋活动双峰型差异及可能成因[J].热带气象学报,2016,32(3):399-406.
- [9] 焦艳,傅聃,王帅,等.阿拉伯海热带风暴“PHET”的研究 I:观测分析[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2013,43(3):15-24.
- [10] NAIR A, DAS S S, THOMAS A, et al. Role of cyclone “Ockhi” in the re-distribution of aerosols and its impact on the precipitation over the Arabian Sea[J]. Atmos Res, 2020,235: 104797.
- [11] 孙舒悦,尹尽勇,张增海,等.2020年秋季海洋天气评述[J].海洋气象学报,2021,41(1):19-29.
- [12] BELL G D, HALPERT M S, SCHNELL R C, et al. Climate assessment for 1999[J]. Bull Amer Meteor Soc, 2000,81(6):S1-S50.
- [13] 王功录,赵海,马俊禄.西北太平洋热带气旋累积气旋能量时空特征分析[J].安徽农业科学,2013,41(6):2650-2654.
- [14] 索朗仓决,益西拉姆,丹增德庆. ENSO 对孟加拉湾热带气旋生成的影响[J].西藏科技,2020(1):41-46.
- [15] KNAPP K R, KRUK M C, LEVINSON D H, et al. The international best track archive for climate stewardship (IBTrACS): Unifying tropical cyclone best track data [J]. Bull Amer Meteor Soc,2010,91(3):363-376.
- [16] BEHRINGER D, XUE Y. Evaluation of the global ocean data assimilation system at NCEP: The Pacific Ocean [C]. Eighth symposium on integrated observing and assimilation systems for atmosphere, oceans, and land surface, AMS 84th annual meeting. Washington State Convention and Trade Center, Seattle, Washington,2004.
- [17] KALNAY E, KANAMITSU M, KISTLER R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull Amer Meteor Soc,1996,77(3):437-472.
- [18] 白莉娜,何敏,王元,等.西北太平洋风速垂直切变异常对热带气旋活动年际变化的影响[J].气象学报,2010,68(6):877-884.
- [19] 刘贝,周倩莹,付东洋.海面温度对南海台风强度的影响[J].广东海洋大学学报,2019,39(1):97-104.
- [20] 冯乾,张庆红.西北太平洋 2001—2014 年热带气旋结构变化的环境垂直风切变和水汽场统计[J].北京大学学报(自然科学版),2018,54(4):713-720.
- [21] 孔蕴淇,范伶俐,李俊杰.两类厄尔尼诺事件对登陆中国热带气旋的影响[J].海洋气象学报,2020,40(4):77-88.
- [22] 顾伟宗,陈丽娟,伯忠凯.印度洋海面温度对黄淮地区夏季降水影响的年代际变化研究[J].海洋气象学报,2020,40(4):89-96.