

全球热带气旋破坏力的气候特征

骆方露^{1,2}, 朱敏^{1,2}, 李江南^{1,2}

(1. 中山大学大气科学学院/广东省气候变化与自然灾害研究重点实验室, 广东 珠海 519082; 2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082)

摘要: 利用国际热带气旋最佳路径资料集的历史热带气旋(TC)资料和 Hadley 中心海冰和海表温度资料集的海表温度(SST)数据,对能量耗散指数(PDI)、风破坏力评级指数(WDP)和风暴潮与波浪破坏力评级指数(SDP)进行统计,研究了1949—2019年近70 a来全球海域TC破坏力的时空变化特征。结果发现:全球各海区累积破坏力主要集中在夏秋季节,而北印度洋呈现双峰型分布,活跃在春末夏初和秋季;全球海域中,西太平洋TC累积破坏力最强,北印度洋最小。WDP和SDP平均评级比累积评级的活跃期长;TC频数少但破坏力大,或风破坏力小但风暴潮与波浪破坏力大的月份,容易造成预期之外的破坏。全球各海区PDI的年际变化表现出较为一致的线性增长,且具有明显的周期性变化;WDP和SDP年际变化缓慢,波动不大。除北印度洋,全球各海区PDI、WDP和SDP均与相应区域的平均SST存在较强的正相关关系,TC破坏力将随全球变暖的加剧而显著增大。

关键词: 能量耗散;风破坏力;风暴潮与波浪破坏力;海表温度

中图分类号: P444 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2021)06-0033-15

1 引言

随着全球变暖形势愈发严峻,全球极端天气气候事件及其造成的灾害频率呈现出增加的趋势。热带气旋(Tropical Cyclone, TC)作为一种破坏性极大的全球性气象灾害,其活动与全球平均气温密切相关。多年来,许多国内外研究学者致力于TC的研究,剖析其发生机理和时空变化规律,这对于提高TC预报水平以及减少TC的发生风险和灾害损失具有重要意义。

过去对TC活动趋势的研究主要集中在频数和强度上。Chan等^[1]发现20世纪70年代中期后,西北太平洋TC发生数量呈现增长趋势,而北大西洋的变化趋势恰恰相反,这一结论与Landsea等^[2]一致,上述研究表明全球总TC活动可能保持相对稳定,一个海区TC活动的增加可能是另一个海区活动减

少所补偿产生的。Camargo等^[3]发现在厄尔尼诺年,TC强度比拉尼娜年更大,持续时间也 longer。杨亚新等^[4]指出2006—2015年间TC发生频数呈减小趋势,7—10月是TC发生的活跃期。对于西北太平洋海域2018年8月出现的TC频数异常,张润宇等^[5]研究发现其与850 hPa相对涡度和600 hPa相对湿度之间存在良好的正相关关系,这两个因子正异常的出现,为TC的生成提供了有利条件。较大的垂直切变会直接导致北大西洋热带风暴和飓风频数的减少^[6]。

然而,Landsea等^[2]发现1944—1995年北大西洋出现了强飓风频数减少和TC强度减弱的趋势,但在这期间TC造成的损失却是巨大的,这说明了TC频数和强度若用于评估TC造成的损失,还存在很大的局限性。1969年,土木工程师Saffir提出萨菲尔-辛普森飓风等级(Saffir-Simpson Hurricane Scale,

收稿日期: 2020-09-21; 修回日期: 2021-05-20。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFA0602701); 国家自然科学基金(42075064)。

作者简介: 骆方露(1998-),女,硕士在读,主要从事台风相关研究。E-mail: luoflu@mail2.sysu.edu.cn

通讯作者: 李江南(1968-),男,副教授,博士,主要从事台风暴雨的研究。E-mail: essljn@mail.sysu.edu.cn

SSHS)这个概念,它利用最大持续风速评定飓风强度,后来被广泛应用于飓风预警。Kantha^[7]提出了连续的飓风强度指数(Hurricane Intensity Index, HII)和考虑飓风尺度的飓风危害指数(Hurricane Hazard Index, HHI),通过对比这两个指数和SSHS评定的飓风强度,发现SSHS的评定结果与飓风实际造成的损失相差很大,因为它没有考虑飓风尺度,忽视了强度弱但尺度大的TC可能比强度大但尺度小的TC造成更大破坏的情况。因此,为了更好地描述TC的破坏力,很多研究学者一直尝试开发各种新的影响指数,比如Bell等^[8]提出了累积气旋能量指数(Accumulated Cyclone Energy, ACE),定义为整个TC寿命期间最大风速的平方和;Emanuel^[9]基于能量耗散概念提出了类似ACE的能量耗散指数(Power Dissipation Index, PDI),定义为TC寿命内最大持续风速立方的时间积分;Powell等^[10]基于TC的综合动能(Integrated Kinetic Energy, IKE)提出了风破坏力评级指数(Wind Destructive Potential, WDP)和风暴潮与波浪破坏力评级指数(Storm surge and wave Destructive Potential, SDP),这两个评级指标中纳入了TC的半径信息,充分考虑了尺度在TC破坏力中的贡献。上述指数的提出综合考虑了TC的频数、持续时间和强度,弥补了单独研究频数和强度的局限性^[11]。王功录^[12]对1949—2011年登陆我国TC的ACE进行分析,发现基本呈减弱趋势。1982—2014年西北太平洋TC的ACE年际变化在整体上也呈现缓慢下降的趋势^[13]。屠佳雨等^[14]研究发现,1949—2014年影响海南岛的西北太平洋台风年际总PDI变化趋势表现为缓慢减小。季倩倩^[15]的研究结果表明1979—2018年西北太平洋登陆TC的PDI表现为显著的增长趋势,且在研究时间范围内增大了33%。乔守文等^[16]发现TC频数和平均最大风速的增加促进了累积PDI的增长。

海洋是TC的主要能量来源,更高的海表温度(Sea Surface Temperature, SST)降低了大气稳定性,增加了涡的穿透深度,使得TC能够抵抗垂直风切变继续发展^[17]。一般来说,SST达26.5℃以上是TC发展的必要条件。Emanuel^[18]和Knutson等^[19]预测TC强度将随着全球平均温度的升高而增加。赤道东太平洋SST的年际变化与西北太平洋中、西部台风频数之间有很强的滞后相关关系^[20]。Goldenberg

等^[17]认为1995—2000年以来北大西洋飓风的异常活跃可能是北大西洋SST和垂直风切变的多年代际变化,以及全球变暖导致SST进一步增加的共同作用的结果。Emanuel^[9]发现自20世纪70年代中期以来TC能量耗散明显增加,这是由于TC寿命延长和强度增大所致。TC能量耗散与SST变化之间存在很强的相关关系,但观测到的能量耗散增加仅部分是由SST增加直接引起。

综上所述,前人在TC气候特征方面做了大量的研究工作,其中关于频率和强度的统计研究很多,关于破坏力的相对较少,并且以往的研究多集中于西太平洋和北大西洋,很少涉及到全球范围内的其他海区,影响指数与SST之间的相关关系也较少被提及。因此,本研究旨在应用PDI、WDP和SDP对全球范围内的TC进行统计,分析全球TC破坏力的时间变化和空间分布特征,并探讨各影响指数与SST变化之间的联系。

2 数据和指标的定义

2.1 数据和研究方法

本文使用的TC资料来自国际热带气旋最佳路径资料集(International Best Track Archive for Climate Stewardship, IBTrACS),它集合了来自全球多个区域专业气象中心和其他机构的TC数据集信息,包含间隔3h的TC位置、强度和其他信息。全球海区分为北大西洋(North Atlantic, NA)、东太平洋(East Pacific ocean, EP)、西太平洋(West Pacific ocean, WP)、北印度洋(North India, NI)和南半球海区(Southern Hemisphere, SH, 包含南印度洋、南太平洋和南大西洋),各海区的SST平均范围选自2000—2010年历史TC(≥ 18 m/s)路径覆盖的范围:北大西洋($0^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$, $0^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{W}$)、东太平洋($0^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\sim 180^{\circ}\text{W}$)、西太平洋($0^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\sim 180^{\circ}\text{E}$)、北印度洋($0^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$, $50^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{E}$)、南印度洋($0^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{S}$, $30^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{E}$)、南太平洋($0^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{S}$, $160^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{W}$)和南大西洋($20^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{S}$, $30^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{W}$)^[21]。

SST资料来自Hadley中心海冰和海表温度(Hadley center sea Ice and Sea Surface Temperature, HadISST)资料集^[22],该数据集由全球月平均海温数

据和海冰数据组成,分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$,覆盖范围为 $89.5^{\circ} \text{S} \sim 89.5^{\circ} \text{N}$, $179.5^{\circ} \text{W} \sim 179.5^{\circ} \text{E}$,时间跨度为1870年至今。

为分析指数的年际变化序列,本文采用一元线性回归的统计学方法,对回归系数进行t检验,并计算皮尔逊相关系数。文中对部分时间序列作了功率谱分析。此外,在对去除了线性趋势的全球海表温度异常(Sea Surface Temperature Anomaly, SSTA)进行统计分析时,利用了经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF)分解,并计算特征值误差范围对主分量进行显著性检验^[23]。

2.2 指标定义

2.2.1 能量耗散指数

本文将应用Emanuel^[9]定义的TC能量总耗散指数PDI,计算公式如下:

$$PDI \equiv \int_0^{\tau} V_{MS}^3 dt \quad (1)$$

式中, V_{MS} 是最大持续风速(单位:m/s); τ 是TC寿命(单位:s);PDI单位: m^3/s^2 。

对于PDI各大海区的统计时间分别是:北大西洋、东太平洋和西太平洋为1949—2019年,北印度洋和南半球为1969—2019年(见表1)。

2.2.2 破坏力指数

Powell等^[10]提出用IKE作为破坏力的指标,证明了IKE与风破坏力以及风暴潮与波浪破坏力之间的相关性,并由此提出了评定两种破坏力的连续评级方法——WDP和SDP,分别从风荷载和海表应力的物理基础上传递破坏力。

本文将应用WDP和SDP指数对全球TC进行分级。方法是通过Powell等^[10]提供的公式,使用IBTrACS中风半径和最大风速数据进行计算。

WDP的计算公式如下:

当TC的最大风速 $< 55 \text{ m/s}$ 时:

$$WDP_{<4} = 0.047 + 0.015R_{33} - 5.98 \times 10^{-5} (R_{33} - 119.74)^2 + 0.008R_{\max} \quad (2)$$

当TC的最大风速 $\geq 55 \text{ m/s}$ 时:

$$WDP_{>4} = -0.778 + 0.078V_{MS} + 0.008R_{33} - 9.01 \times 10^{-5} (R_{33} - 100.79)^2 \quad (3)$$

SDP的计算公式如下:

$$SDP = 0.959 + 0.009R_{18} - 8.88 \times 10^{-6} (R_{18} - 305.98)^2 + 0.005R_{33} - 1.04 \times 10^{-4} (R_{33} - 113.15)^2 \quad (4)$$

式中, R_{18} 、 R_{33} 和 R_{\max} 分别是TC风速达到 18 m/s 、 33 m/s 和最大风速时的风半径(单位:km); V_{MS} 是最大持续风速(单位:m/s)。

由于风半径数据自2004年后才有完整记录,对各大海区的WDP和SDP的分级统计时间为2004—2019年(见表1)。

3 全球TC破坏力的时空变化特征

3.1 破坏力的月际变化特征

统计结果表明(见图1),北大西洋、东太平洋和西太平洋的PDI均呈现显著的单峰分布,主要集中在

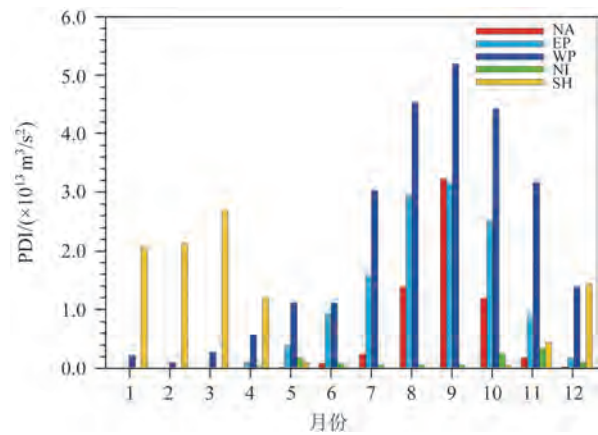


图1 全球海域累积PDI的月际分布

表1 全球各海区指数的统计时间

指数	海区				
	NA	EP	WP	NI	SH
PDI	1949—2019	1949—2019	1949—2019	1969—2019	1969—2019
WDP	2004—2019	2004—2019	2004—2019	2004—2019	2004—2019
SDP	2004—2019	2004—2019	2004—2019	2004—2019	2004—2019

在8—10月,峰值均出现在9月。北印度洋TC生成数量少,且大多较弱、寿命短,PDI数值相较其他海区要小得多,分布呈双峰型,主要集中在5—6月和10—11月,峰值分别在5月和11月。北半球月均累积PDI最大的海区为西太平洋,其次为东太平洋和北大西洋,北印度洋最小。南半球海区的PDI主要集中在1—3月,峰值出现在3月。

图2展示了全球海域WDP和SDP累积评级的月际分布。由图可见,北大西洋、东太平洋、西太平

洋和南半球的WDP和SDP均表现为显著的单峰型结构。北大西洋WDP和SDP的活跃期为8—10月,峰值均出现在9月。东太平洋WDP和SDP主要集中在7—10月,峰值出现在8月。西太平洋WDP和SDP活跃在7—10月,峰值在9月。南半球的WDP和SDP主要集中在夏秋季,即1—3月,峰值出现在3月。与其他海区不同,北印度洋WDP和SDP呈双峰型分布,主要集中在4—5月和10—11月,峰值分别为5月和10月。

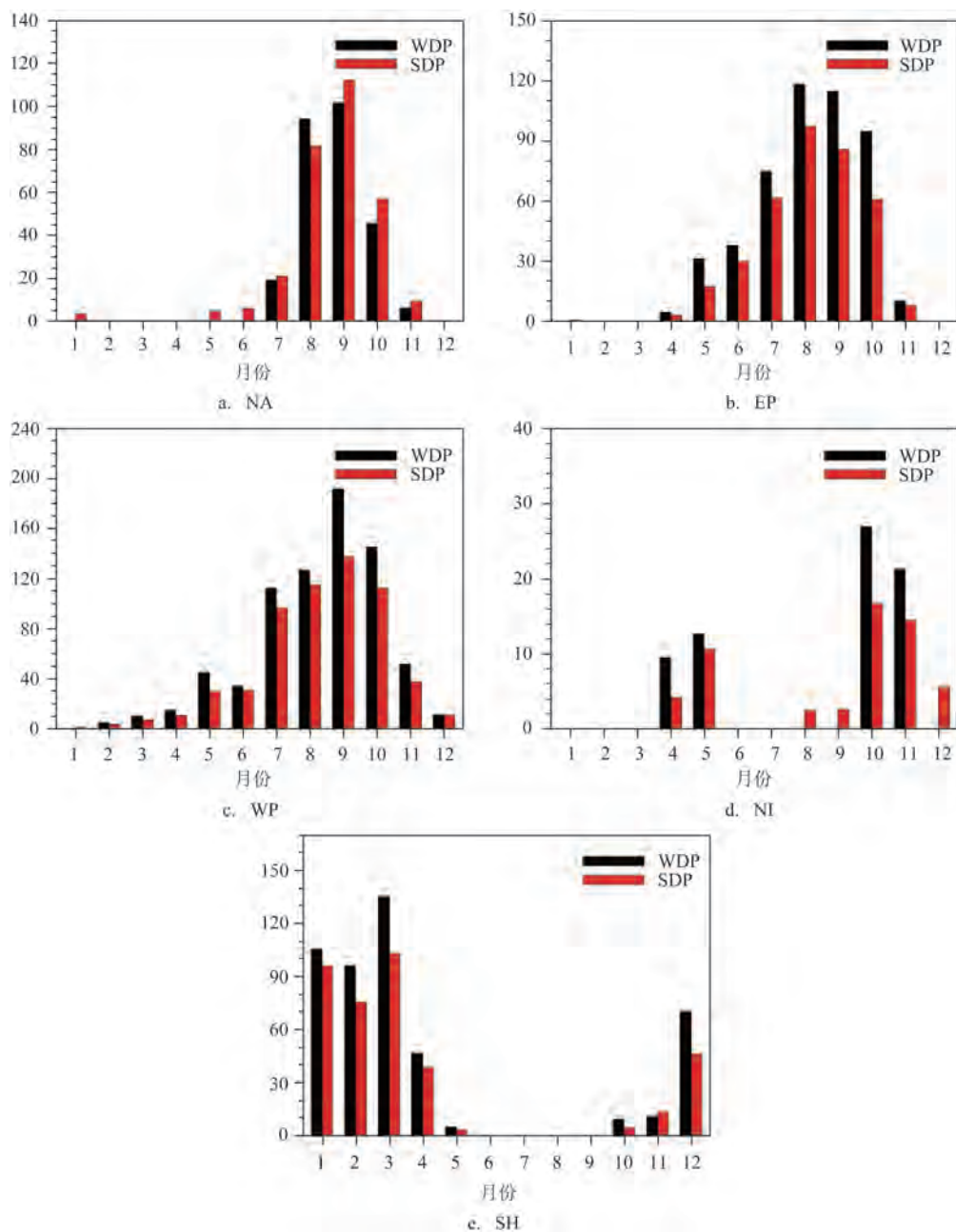


图2 2004—2019年全球海域WDP和SDP累积评级的月际分布

上述结果表明,北大西洋、东太平洋、西太平洋和南半球的PDI、WDP和SDP均活跃在夏秋季节,北半球海区主要集中在7—10月,峰值出现在8—9月,南半球季节与北半球相反,破坏力主要集中在1—3月,峰值出现在3月。与其他海区不同,北印度洋表现出特殊的双峰型结构,主要集中在4—6月和10—11月,峰值分别出现在5月和10—11月。梁梅等^[24]在对北印度洋TC的频数特征进行统计时也发

现类似结果,即在该海区,春末夏初和秋季是最有利于TC发生发展的时期;此外,作者还发现双峰型结构的成因是两个高峰期时,北印度洋SST较高,且正值冬、夏季风转换期间,因此为TC的生成和发展提供了有利条件。

由WDP和SDP平均评级的月际变化可知(见图3),北大西洋的WDP和SDP表现为单峰型分布,主要集中在7—11月,峰值分别出现在9月和10月,

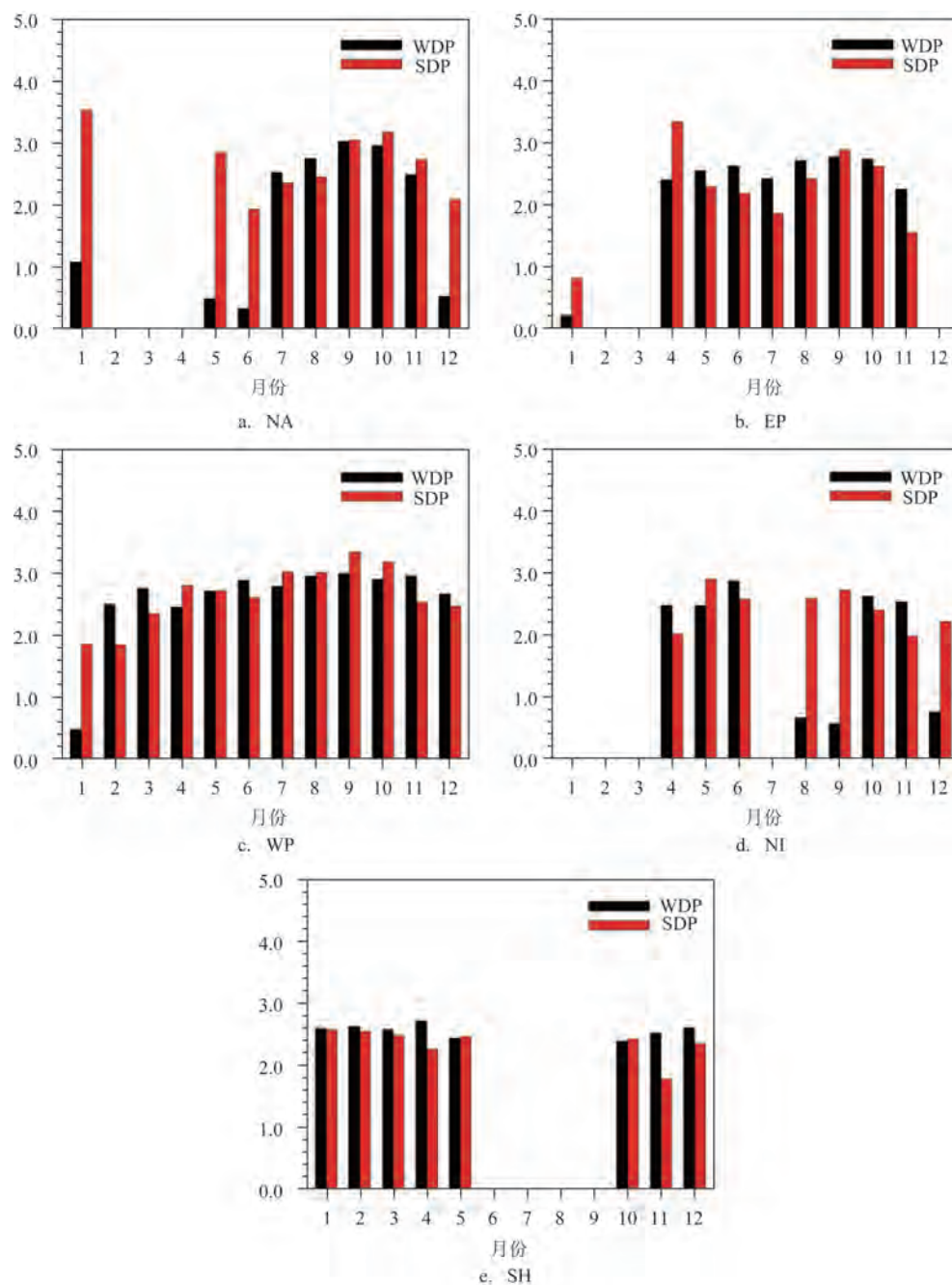


图3 2004—2019年全球海域WDP和SDP平均评级的月际分布

SDP的全年最大值出现在1月。据美国国家飓风中心(National Hurricane Center, NHC)整理的历史TC信息可知,2016年大西洋飓风季相当活跃,TC的活动强度高于1981—2010年的平均水平,1月出现的异常值正是由发生于该年的飓风“Alex”造成的,它贡献了全年最高的SDP值。此外,SDP在5月也存在一个异常高值。与11月相比,在研究时间范围内,5月产生了5个热带风暴级的TC,11月产生了5个热带风暴和4个飓风,但5月和11月的平均SDP值相差不大,分别为2.85和2.73。这说明在某些TC生成数量较少且强度较弱的月份,也可能具有较强的风暴潮破坏力,若仅对频数或强度进行单一的统计研究,则难以准确预估TC造成的影响。在东太平洋,WDP和SDP呈现双峰型分布,前者峰值分别出现在6月和9月,后者分别在4月和9月。考虑SDP在4月出现的异常高值,它是由2004年的超强台风“Sudal”产生的,与飓风“Alex”相似,台风“Sudal”作为研究时间范围内唯一在4月产生的TC,造成了SDP的最大值;不同的是,它的强度和破坏程度都比飓风“Alex”大得多。台风“Sudal”在其生命史中共造成了约1 400万美元的损失,其中遭受损失最大的区域是密克罗尼西亚联邦雅蒲州。台风“Sudal”经过雅蒲州时,给岛上带来狂风暴雨,摧毁大量建筑物,岛上的供水、供电和通讯系统遭到重创。沿岸受巨浪和风暴潮影响,船只沉没,海堤被破坏,风暴潮还造成海水入侵,地下水被污染,灾难性地摧毁岛上的农作物。对比飓风“Alex”和台风“Sudal”的WDP和SDP,可以发现两者的SDP相差不大,但台风“Sudal”的WDP比飓风“Alex”高一倍多,这说明强烈的风破坏力是导致台风“Sudal”造成的影响大于飓风“Alex”的关键原因。西太平洋的WDP没有显著峰值,除1月以外,其他月份的WDP值都比较高;SDP表现为单峰型分布,峰值出现在9月,且全年均呈现较活跃的状态。北印度洋的WDP和SDP呈现双峰型分布,前者峰值分别出现在6月和10月,后者在5月和9月。在南半球,WDP和SDP除6—9月外均处于较活跃的状态,无显著峰值。

由上述分析可知,全球各海区WDP和SDP平均评级与累积评级的月际分布特征具有显著差异。相较而言,平均WDP和SDP具有更长的活跃期,这

是受到了TC频数月际变化的影响。平均WDP和SDP会凸显出频数小但破坏力大的月份,这解释了一些累积评级较低的月份在平均评级中反而较高的现象,也强调了仅使用频数来评估TC的局限性。此外,还有一些风破坏力较小的月份,风暴潮与波浪破坏力却不低,如北大西洋的1月、5—6月和12月,西太平洋的1月,北印度洋的8—9月和12月,这些月份生成的TC在以风力为标准的传统分级方式中评级较低,但实际造成的破坏会高于其所获得的评级,从而产生超出预期的损失,为TC预警和防灾政策的制定带来相当大的阻力。

3.2 破坏力的年际变化特征

由图4可知,北大西洋PDI整体呈上升趋势,上升速率为 $7.28 \times 10^{12} \text{ m}^3/(\text{s}^2 \cdot \text{a})$,在96%的置信水平上显著;其年际分布表现为一个相对平稳阶段和一个起伏阶段,分别是1949—1965年和1966—2019年,其中,1972—1994年为最不活跃的时期;对时间序列作功率谱分析(见图5a),发现北大西洋的PDI具有显著的3 a左右的周期。从长期趋势上看,东太平洋的PDI显示出上升趋势,上升速率为 $1.92 \times 10^{10} \text{ m}^3/(\text{s}^2 \cdot \text{a})$,在99%的置信水平上显著;从年际分布上看,它具有明显的波浪式起伏变化特征,这主要表现在两个起伏阶段,分别是1949—1977年和1978—2010年,此外,自2011年至今,它又表现出上升趋势;在该海区,PDI具有显著的2 a左右的周期(见图5b)。西太平洋的PDI未显示出显著的线性变化趋势,其年际分布大致呈现为两个起伏阶段,分别是1949—1977年和1978年至今,它具有显著的3 a左右周期和35 a左右的年代际周期(图略)。北印度洋PDI呈现上升趋势,上升速率为 $2.97 \times 10^9 \text{ m}^3/(\text{s}^2 \cdot \text{a})$,在92%的置信水平上显著;该海区PDI的年际变化趋势大致表现为,1993—2009年为减弱期,1969—1992年和2009年至今为增长期,由图5d可知,该海区PDI具有显著的7 a左右周期。在南半球海区,PDI整体呈现为上升趋势,上升速率为 $4.63 \times 10^{10} \text{ m}^3/(\text{s}^2 \cdot \text{a})$,在99%的置信水平上显著,其年际分布表现为单峰型结构,1969—1996年为增长期,1997年至今为减弱期,图5e显示该海区PDI具有显著的3 a左右周期。

下面对平均WDP的年际变化进行分析(见图

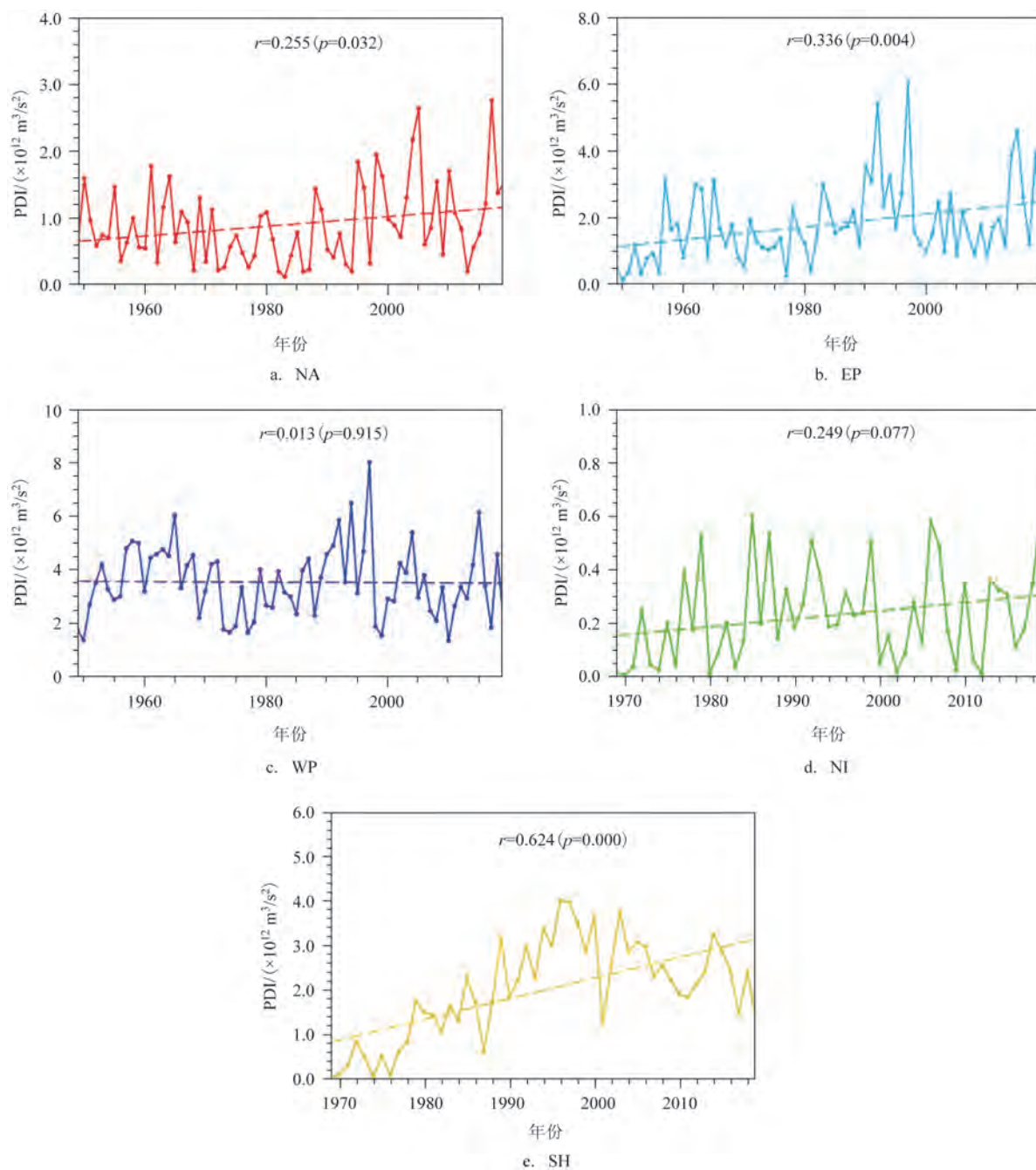


图4 全球海域累积PDI的年际分布(虚线为线性趋势拟合)

6)。北大西洋WDP呈现出不显著的上升趋势,上升速率约为0.024/a,其中,2006年、2012年和2013年是16 a间最不活跃的年份。东太平洋WDP未显示出明显的线性变化趋势,但WDP值总体保持在一个较高水平。西太平洋的WDP显示出缓慢的上升趋势,上升速率为0.02/a,在96%的置信水平上显著。北印度洋WDP整体上呈显著下降趋势,下降

速率约为-0.12/a,在93%的置信水平上显著。WDP最大值出现在2004年,由当年第25号台风“梅花”产生。值得注意的是,2004年出现的异常高值和近4 a出现的异常低活跃现象是线性变化趋势呈现为快速下降的主要原因,因此,若在更长的时间尺度上进行研究,可能会得到不同的结论。南半球海区WDP整体上呈现缓慢上升趋势,上升速率约为

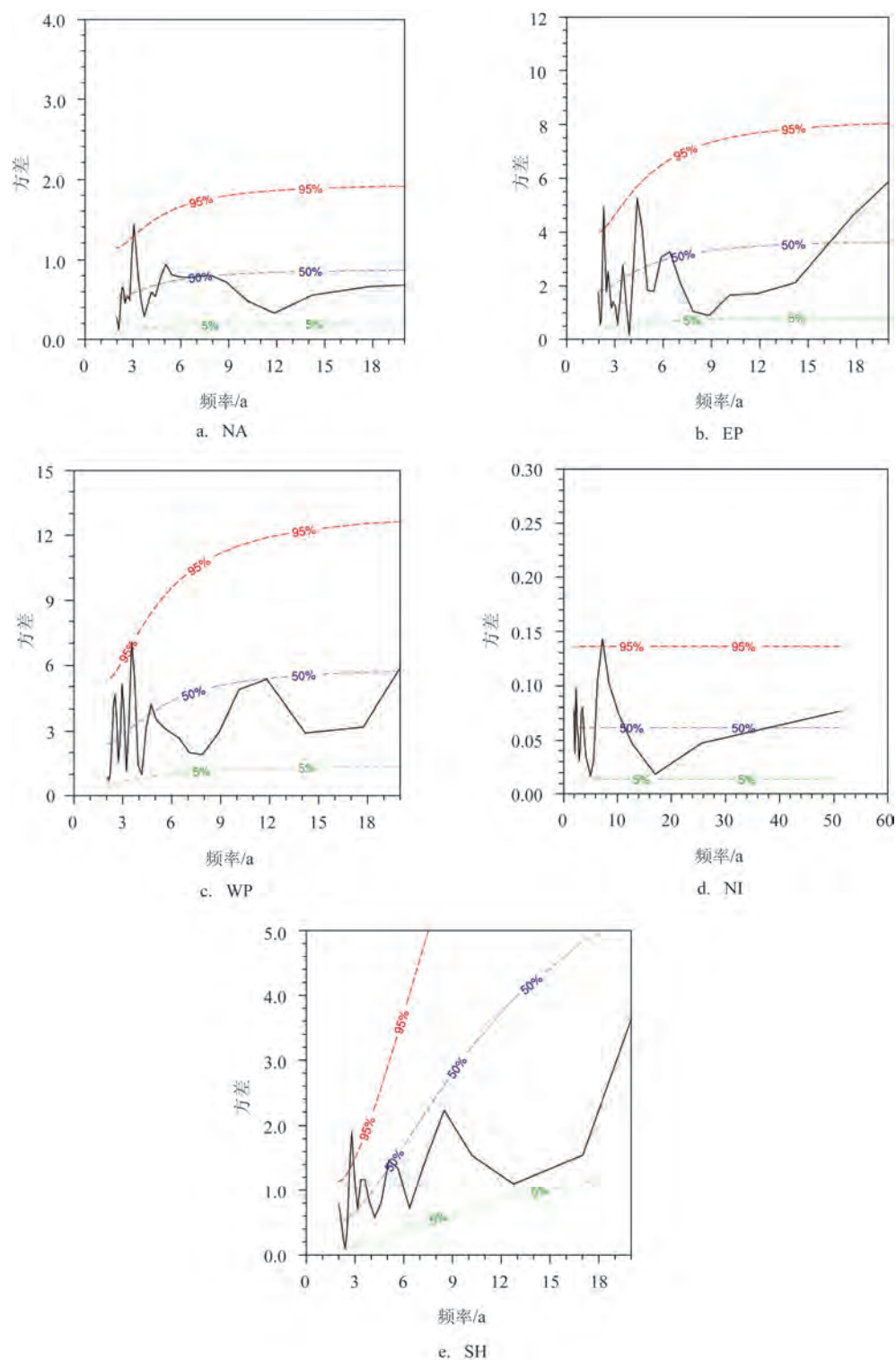


图5 全球海域累积PDI的功率谱分析(红线:95%的置信水平,蓝线:50%的置信水平,绿线:5%的置信水平)

0.019/a,在94%的置信水平上显著。

图7a显示,北大西洋平均SDP的时间序列没有明显的线性变化趋势,但呈现出明显的年际变化,

在2019年SDP达到最大值3.04。东太平洋SDP存在明显的下降趋势,下降速率约为 $-0.031/a$,在93%的置信水平上显著。近16 a来,西太平洋的

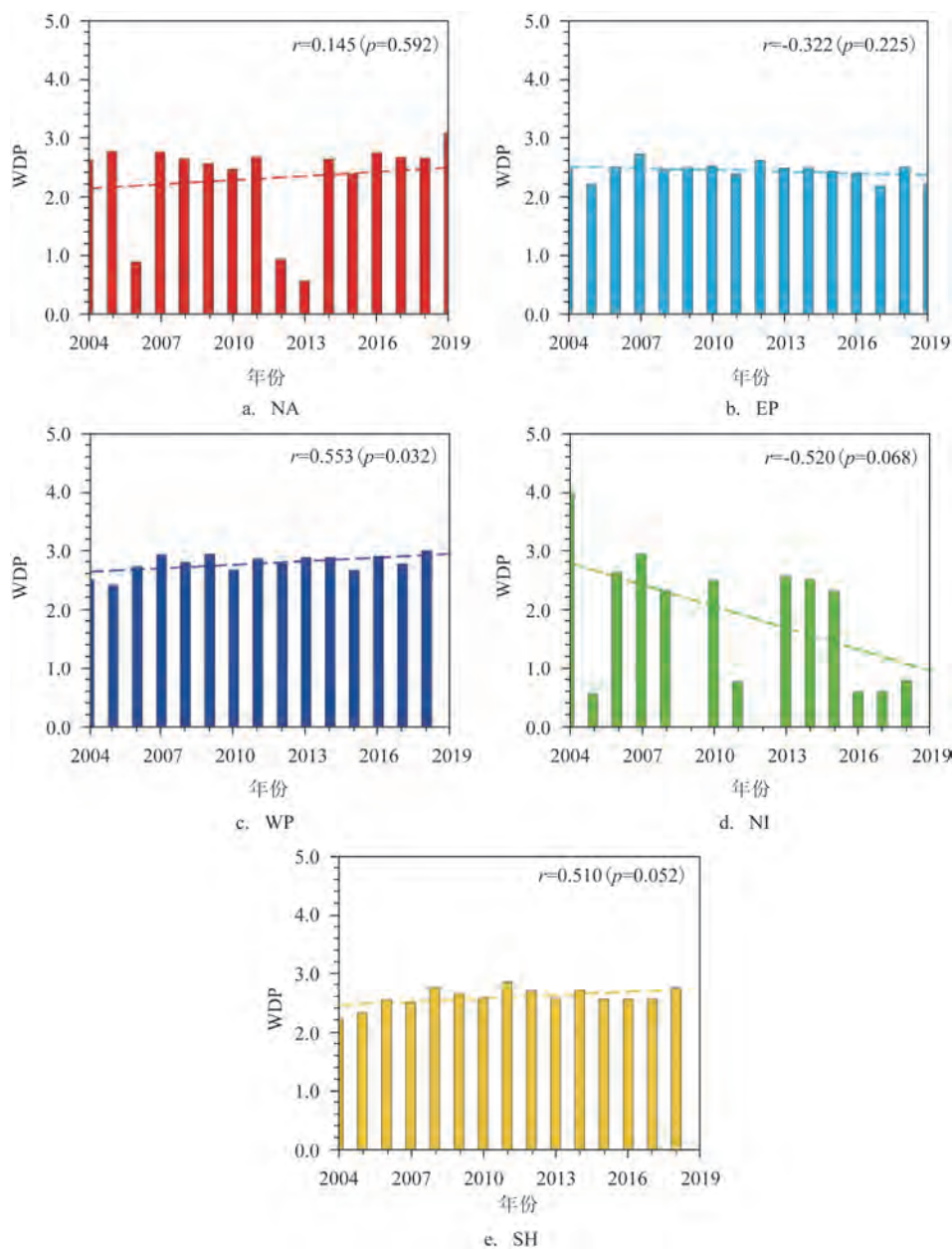


图6 2004—2019年全球海域WDP平均评级的年际分布(柱形数据为各海区年际平均WDP,虚线为线性趋势拟合)

SDP呈现显著的上升趋势,上升速率为0.029/a,在98%的置信水平上显著。在2011年以前,SDP存在起伏变化,2005—2007年为增长期,2008—2010年为减弱期;在此之后,SDP基本保持稳定的增长趋势。从长期趋势上看,北印度洋SDP的年际变化表现为缓慢的下降趋势,下降速率为-0.016/a,但未通过90%置信度检验。北印度洋的年际分布大致呈现为先减少后增加的U字型变化,2005—2010年为减弱期,2013年至今为增长期。南半球

海区的SDP整体表现为上升趋势,上升速率为0.039/a,在94%的置信水平上显著。南半球的SDP在2011年以前大致经历了一段增长期,此后维持减弱趋势到2016年,直至近3a又开始呈现增长趋势。

综上所述,全球各海区PDI年际变化显示出明显的波动性变化特征,除西太平洋外均呈现显著的线性增长趋势。此外,PDI年际分布还具有显著的周期,北大西洋和南半球存在3a左右的振荡周期,

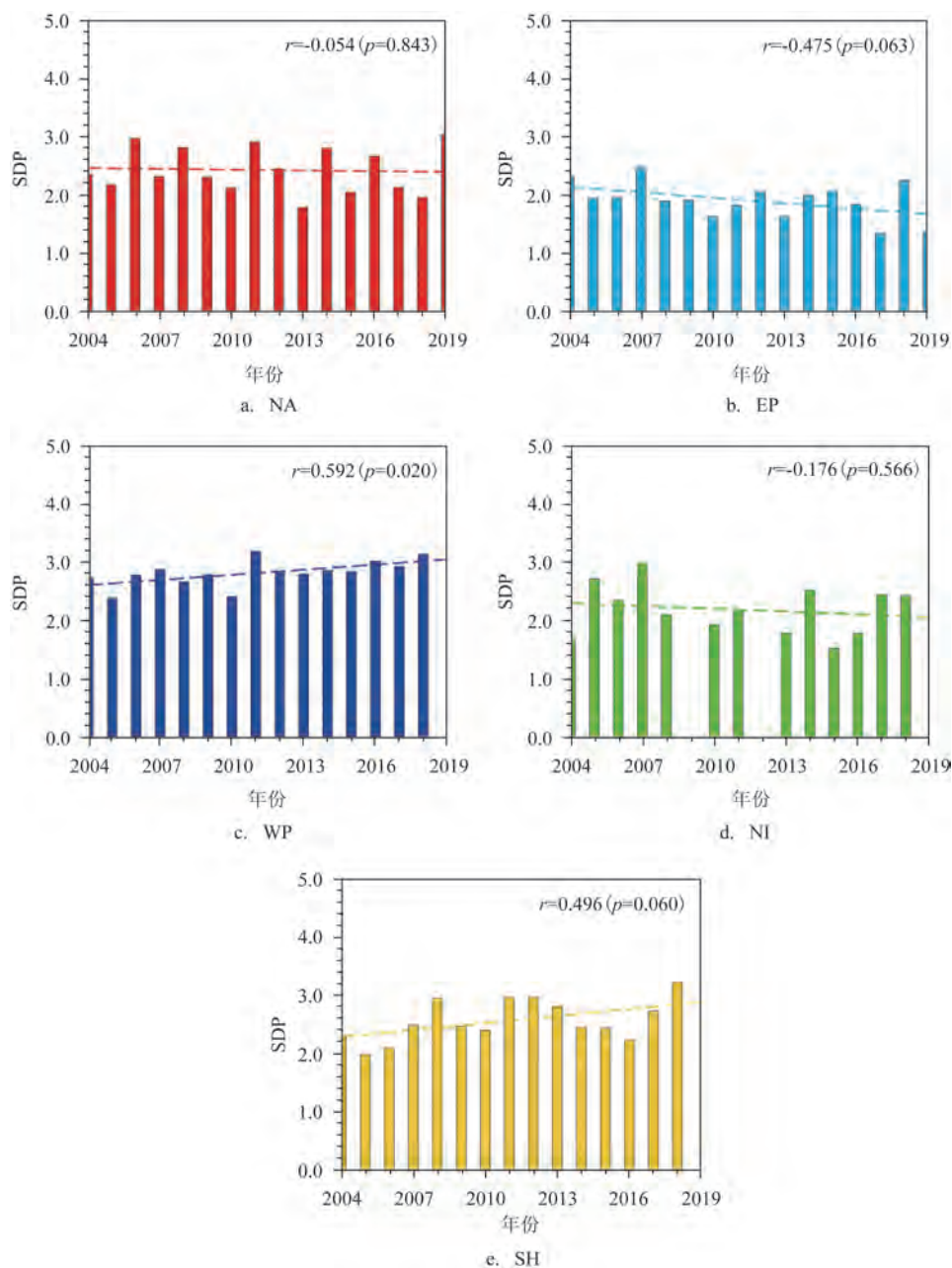


图7 2004—2019年全球海域SDP平均评级的年际分布(柱形数据为各海区年际平均SDP,虚线为线性趋势拟合)

东太平洋显示出2 a左右的年际变化周期,北印度洋表现出7 a左右的变化周期,西太平洋则具有3 a左右的年际变化周期和35 a左右的年代际变化周期。平均WDP和SDP变化缓慢,基本围绕2级浮动,且全球海域变化趋势不一致:WDP在西太平洋和南半球表现为上升趋势,在北印度洋为下降趋势,其余海区无明显变化趋势;SDP在西太平洋和南半球呈上升趋势,在东太平洋为下降趋势,其余海区变化趋势不显著。

4 SST变化对TC破坏力的影响

4.1 全球SST的时空分布及变化特征

图8对去趋势的SSTA进行EOF分解,从而分析近70 a来全球SST的时空变化特征。EOF分解结果显示,第一模态的解释方差为21.92%,且根据North等^[23]的显著性检验方法,该模态是显著的。

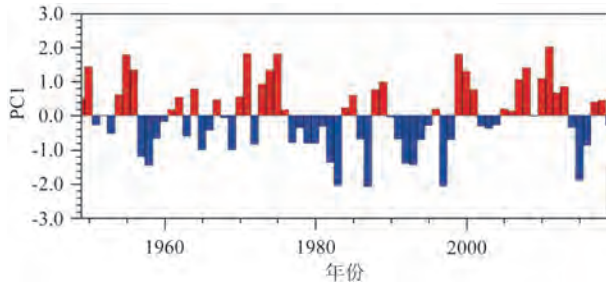


图8 1949—2019年全球SSTA的EOF分解第一模态的时间系数

EOF1的空间分布显示(图略),太平洋海区赤道中东太平洋表现为负异常,且存在全球海区负异常的高值中心。南北太平洋的中纬度海区呈现正异常,全球海区正异常的高值中心位于北太平洋。印度洋海区的异常情况与赤道中东太平洋的一致,呈现负异常。北大西洋整体上表现为正异常。

分析该模态的时间系数,发现其在1977—1998年间以负异常为主,1976年之前及1999年以后以正异常为主,即在前一时段,全球SSTA的分布与EOF1是反位相的,而在后两个时段则表现为同位相。对时间系数进行功率谱分析的结果显示(见图9),它具有显著的3~5 a变化周期,中心周期为5 a。

4.2 破坏力与SST变化的相关关系

由PDI与SST相关系数的年际变化可知(见图10),在研究时间范围内,PDI与北大西洋、东太平洋、西太平洋和南半球海区SST均呈现显著的正相关关系(通过95%置信度检验),这说明东太平洋的PDI在1977—1998年随着SST的升高表现为增长的趋势,而在1976年以前及1999年以后随SST的下降呈现减小的趋势。其余3个海区的变化情况类似,1977—1998年PDI随SST的降低而减小,其余时段则随SST的升高而增大。北印度洋PDI与SST相关系数的年际变化大致可分为两个阶段,1969—1989年为负相关,1990年以后为正相关。这说明北印度洋PDI在1976年以前随着SST的下降呈现增大趋势,1977—1989年间PDI随着SST的升高呈减小趋势,1990—1998年PDI随SST升高而增大,1999年至今PDI随SST下降而减小。综合PDI与SST的显著正相关性说明,在全球变暖的背景下,TC能量耗散会随着SST的升高而增大,从而产生更

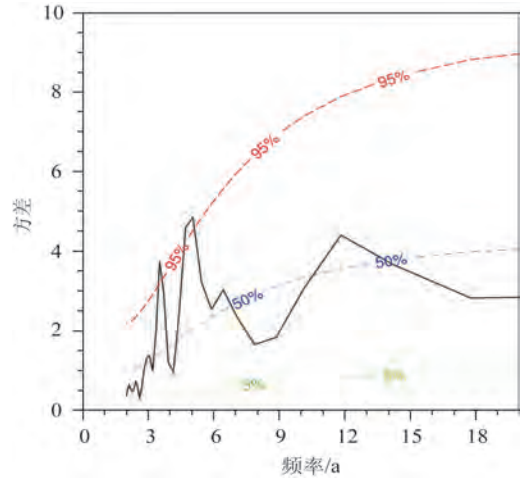


图9 PC1的功率谱分析(红线表示95%的置信水平)

大的破坏力。这与Emanuel^[9]的研究结果一致。

由图11可知,除北印度洋外,其余各海区WDP与SST整体上均呈显著正相关。这说明在东太平洋,WDP随着SST的降低而减小,而在北大西洋、西太平洋和南半球,WDP随SST的升高呈现增大趋势。在北印度洋,由于每年生成TC的数量很少,导致图中缺少大量相关系数的数据,因此不具备进行长期趋势分析的条件。在该海区,最大相关系数出现在2017年,为-0.99,在95%的置信水平上显著。

图12展示了SDP与SST相关系数的年际分布。由图可知,北大西洋的SDP与SST在2014年以前主要呈现为显著正相关,自2014年起呈现显著负相关。根据全球SST的时空分布可知,2014年前北大西洋大部分海区表现为增温,SDP随着SST的升高而增大,2014年后北大西洋主要表现为降温,SDP随着SST的降低而增大。在东太平洋、西太平洋和南半球海区,SDP整体上与SST均表现为显著的正相关关系。在东太平洋,2004—2014年间SST呈现负异常,则SDP随SST的降低而减小,而2014年至今主要表现为正异常,随着SST的升高,SDP呈现增大趋势。与东太平洋恰恰相反,西太平洋的SST在2004—2014年呈现正异常,2014年至今呈现负异常,因此,在前一时段,SDP随SST的升高而增大,后一时段,SDP随SST的下降而减小。南半球海区的变化情况与西太平洋大致相同。北印度洋的情况如前文所述,由于有效数据量少,不进行长期趋势分析。该海区的最大相关系数出现在2017年,为-0.94,在95%的置信水平上显著。

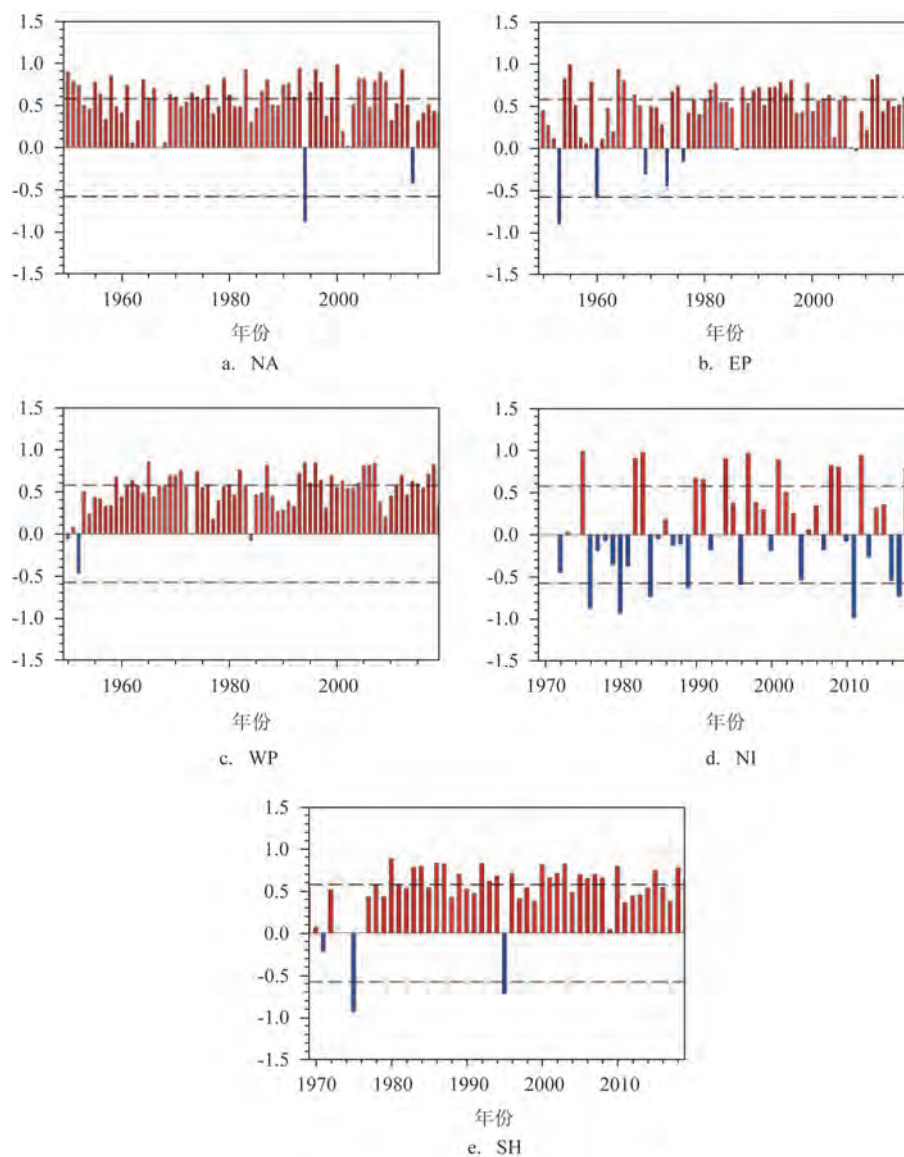


图10 全球海域累积PDI与SST相关系数的年际分布(虚线为0.05置信水平)

通过上述对各指数与SST的相关分析可知,尽管在16 a间有少数年份显示出显著负相关,以及北大西洋SDP在2014年由正相关转变为负相关,但整体上指数与SST之间仍呈现为普遍的显著正相关。这种相关性说明,在全球变暖的背景下,TC的破坏力会随着SST的升高而增大。此外,在全球海域中,北印度洋的情况较为特殊,该海区的PDI与SST在1969—1989年为负相关,1990年以后转变为正相关,而WDP和SDP由于相关系数的有效数据量少,无法进行长时间趋势分析,两个指数与SST的最大相关系数均为负,出现在2017年。

5 结论和讨论

本文基于IBTrACS的历史TC资料和HadISST数据集的SST数据,对1949—2019年全球海域TC的能量耗散指数PDI、风破坏力评级指数WDP和风暴潮与波浪破坏力评级指数SDP进行统计,揭示了近70 a TC破坏力的时空变化规律,并进一步研究了各指数与全球SST变化之间的相关关系,得到的主要结论如下:

(1)北大西洋、东太平洋和西太平洋的累积能

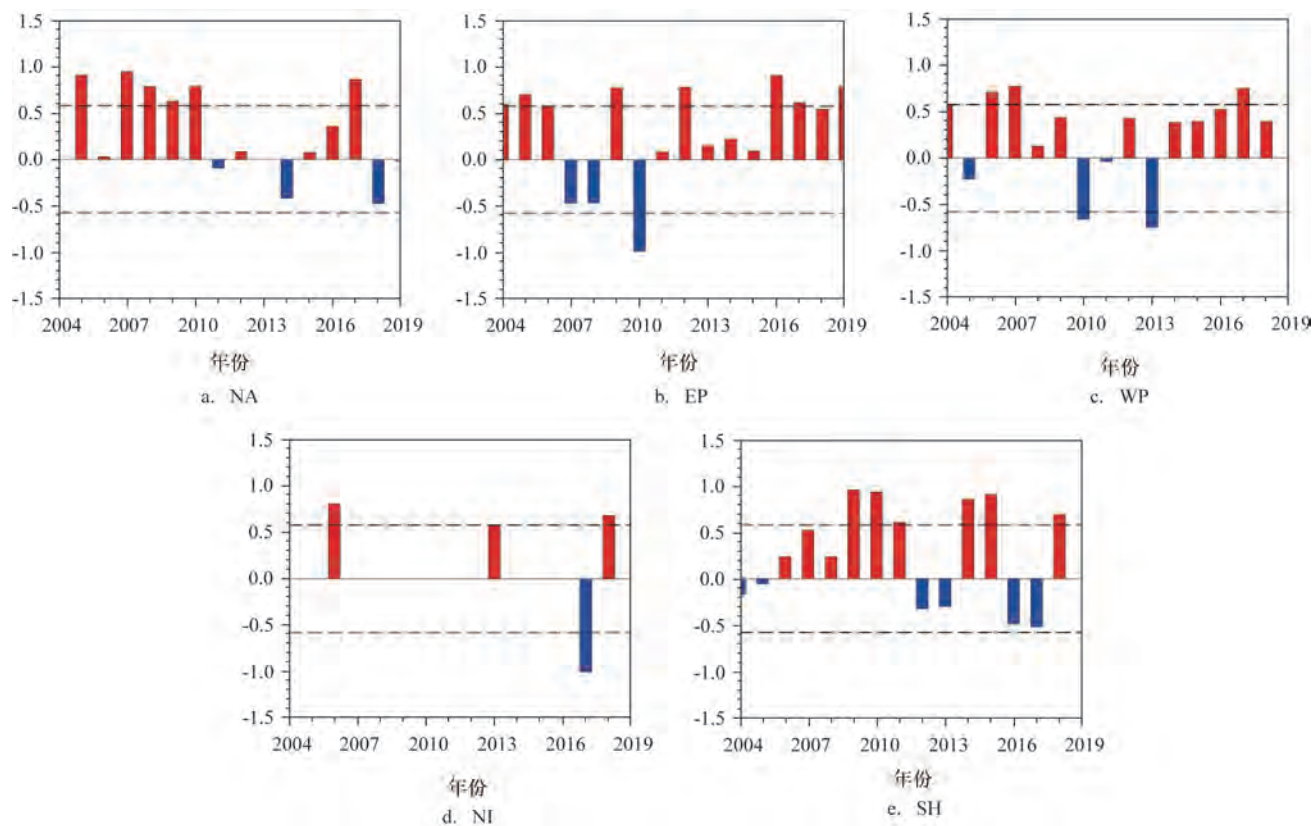


图 11 2004—2019 年全球海域平均 WDP 与 SST 相关系数的年际分布(虚线为 0.05 置信水平)

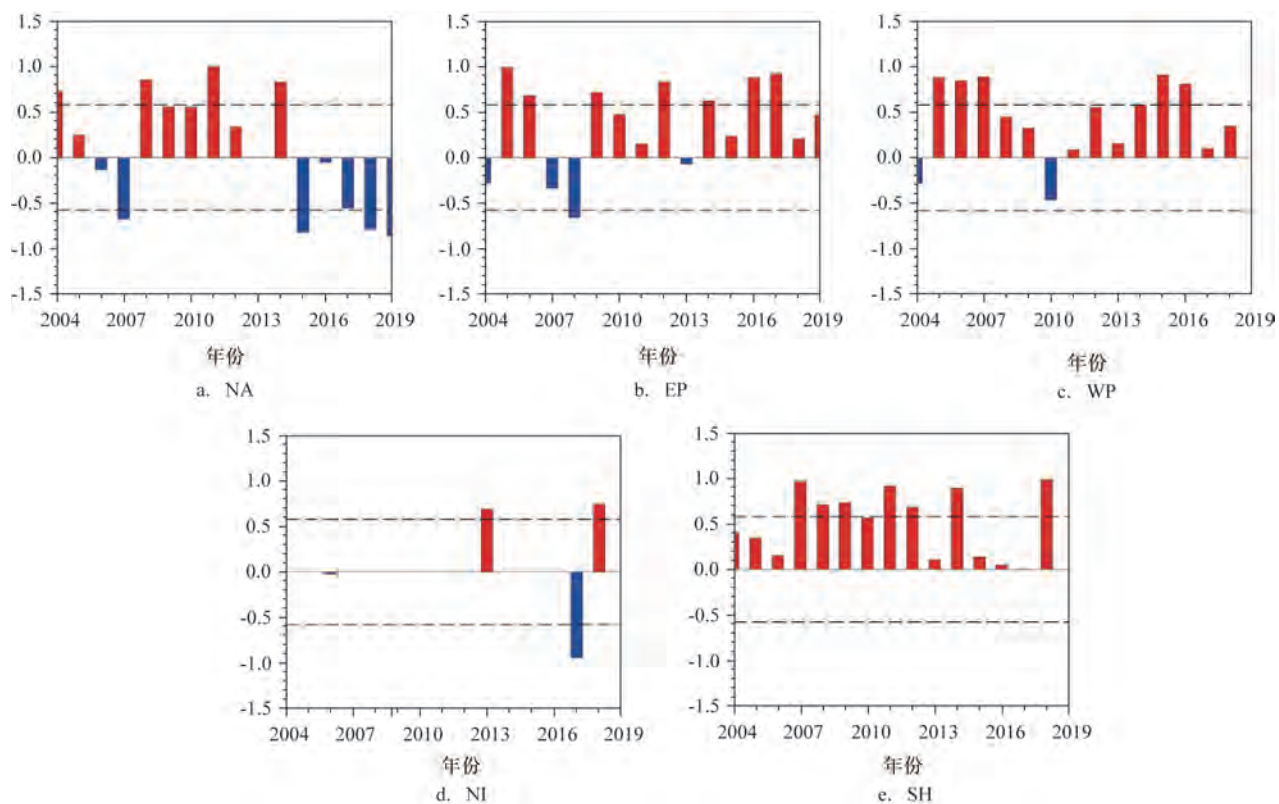


图 12 2004—2019 年全球海域平均 SDP 与 SST 相关系数的年际分布(虚线为 0.05 置信水平)

量耗散、风破坏力和风暴潮与波浪破坏力主要集中在7—10月,峰值在8—9月,南半球海区集中在1—3月,峰值在3月。北印度洋的累积破坏力呈现双峰型分布,活跃期为4—6月和10—11月,峰值分别在5月和10—11月。在北半球海域中,破坏力月际累积最大的是西太平洋,其次为东太平洋和北大西洋,北印度洋为全球海域最小。

(2)全球各海区WDP和SDP平均评级与累积评级的月际分布特征不同,平均评级具有更长的活跃期,这是因为平均评级凸显了TC生成数量少但破坏力大的月份。此外,还有一些月份风破坏力小,但风暴潮与波浪破坏力大,这说明若仅用频数或强度进行评级,易造成预期之外的破坏。

(3)从年际变化的长期趋势上看,全球各海区累积PDI除西太平洋均表现为显著的线性增长趋势。从年际分布上看,各海区PDI显示出明显的周期性变化,北大西洋和南半球存在3 a左右的变化周期,东太平洋为2 a,北印度洋为7 a,西太平洋具有3 a左右的年际变化周期和35 a左右的年代际变化周期。平均WDP和SDP年际变化缓慢,波动不大,且未在全球各海区表现出较为一致的变化趋势。

(4)TC破坏力变化与其生成海域的SST之间具有密切联系。PDI与北大西洋、东太平洋、西太平洋和南半球SST表现为显著的强相关,北印度洋在1990年由负相关转变为了正相关。WDP和SDP在全球海域普遍表现为正相关。该结论表明,TC破坏力将在全球变暖的背景下显示出显著增长的趋势。

另外值得注意的是,在对指数进行年际变化分析时,只有PDI在全球海域中表现出了较为一致的上升趋势,而WDP和SDP在各海区的年际变化情况是相当不一致的。以前的TC资料忽略了TC的非对称性结构,风半径值自2003年起才开始由对称转为按象限记录,且过去用于计算WDP和SDP的 R_{33} 观测记录也比较少^[25],故本文对WDP和SDP的研究时间范围选择了有完整记录的2004—2019年,但时间范围的缩短意味着统计结果在长时间线性趋势上的代表性较差,与实际情况之间可能存在较大的误差。对TC影响指数的研究结果也显示,国内外对ACE开展的统计工作最多,关于PDI的研究在近几年开始呈现发展态势,而关于WDP和SDP的研究始终很少,风半径数据的缺失在一定程度上解释了这一趋

势的产生原因。因此,未来关于WDP和SDP统计分析的研究发展,亟需多年历史风半径数据的支持。

致谢:感谢江苏省气候变化协同创新中心对本研究的资助。

参考文献:

- [1] Chan J C L, Shi J E. Long-term trends and interannual variability in tropical cyclone activity over the western North Pacific[J]. *Geophysical Research Letters*, 1996, 23(20): 2765-2767.
- [2] Landsea C W, Nicholls N, Gray W M, et al. Downward trends in the frequency of intense at Atlantic hurricanes during the past five decades[J]. *Geophysical Research Letters*, 1996, 23(13): 1697-1700.
- [3] Camargo S J, Sobel A H. Western North Pacific tropical cyclone intensity and ENSO[J]. *Journal of Climate*, 2005, 18(15): 2996-3006.
- [4] 杨亚新, 夏剑东. 西北太平洋热带气旋活动特征[J]. *中国航海*, 2019, 42(2): 114-119.
- [5] 张润宇, 凌铁军, 李响, 等. 2018年8月西北太平洋热带气旋频数异常的成因分析[J]. *海洋预报*, 2020, 37(2): 1-10.
- [6] Pielke Jr R A, Landsea C N. La Niña, El Niño, and Atlantic hurricane damages in the United States[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1999, 80(10): 2027-2034.
- [7] Kantha L. Time to replace the Saffir-Simpson hurricane scale?[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2006, 87(1): 3-6.
- [8] Bell G D, Halpert M S, Schnell R C, et al. Climate assessment for 1999[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2000, 81(6): S1-S50.
- [9] Emanuel K. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years[J]. *Nature*, 2005, 436(7051): 686-688.
- [10] Powell M D, Reinhold T A. Tropical cyclone destructive potential by integrated kinetic energy[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2007, 88(4): 513-526.
- [11] 王琳, 李倩瑜, 唐立娜. 热带气旋潜在影响力指数的改进及其应用——以14号热带气旋“莫兰蒂”为例[J]. *自然灾害学报*, 2018, 27(5): 151-157.
- [12] 王功录. 西北太平洋热带气旋累积能量(ACE)时空特征分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [13] 陈志伟. 西太热带气旋的气候特征及对海洋热状态响应机理的研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2019.
- [14] 屠佳雨, 高抒, 周亮, 等. 海南岛东部台风重现期及其时空分布特征[J]. *第四纪研究*, 2016, 36(1): 184-195.
- [15] 季倩倩. 近40年西北太平洋登陆热带气旋强度变化特征研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2020.
- [16] 乔守文, 边志刚, 隋意, 等. 1980-2015年间北部湾海域热带气旋的变化及特征分析[J]. *广西科学*, 2019, 26(6): 663-668.
- [17] Goldenberg S B, Landsea C W, Mestas-Nuñez A M, et al. The

- recent increase in Atlantic hurricane activity: causes and implications[J]. *Science*, 2001, 293(5529): 474-479.
- [18] Emanuel K A. The dependence of hurricane intensity on climate [J]. *Nature*, 1987, 326(6112): 483-485.
- [19] Knutson T R, Tuleya R E. Impact of CO₂-induced warming on simulated hurricane intensity and precipitation: sensitivity to the choice of climate model and convective parameterization[J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(18): 3477-3495.
- [20] 董克勤, 齐树芬. 赤道东太平洋海温与西太平洋台风频数年际变化的关系[J]. *海洋学报*, 1990, 12(4): 505-509.
- [21] Schreck C J, Knapp K R, Kossin J P. The impact of best track discrepancies on global tropical cyclone climatologies using IBTrACS[J]. *Monthly Weather Review*, 2014, 142(10): 3881-3899.
- [22] Rayner N A, Parker D E, Horton E B, 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): 4407.
- [23] North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions[J]. *Monthly Weather Review*, 1982, 110(7): 699-706.
- [24] 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.
- [25] Stark C, Ritchie E A, Tyo J S. Modelling tropical cyclone wind radii in the Australian region using the deviation angle variance technique[C]//IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Yokohama: IEEE, 2019: 9342-9345.

Global climatic characteristics of the destructive potential of tropical cyclones

LUO Fang-lu^{1,2}, ZHU Min^{1,2}, LI Jiang-nan^{1,2}

(1. School of Atmospheric Sciences, Key Laboratory of Climate Change and Natural Disaster Research, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519082 China; 2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082 China)

Abstract: The historical tropical cyclone (TC) data from the International Best Track Archive for Climate Stewardship and the Sea Surface Temperature (SST) data from Hadley Center Sea Ice and Sea Surface Temperature dataset are employed to make statistics on the Power Dissipation Index (PDI), Wind Destructive Potential (WDP) and Storm Surge and Wave Destructive Potential (SDP) for studying the temporal and spatial variability of destructive potential of TCs in global seas from 1949 to 2019. The main conclusions are as follows: The accumulated PDI, WDP and SDP are mainly concentrated in summer and autumn, except for the North Indian Ocean (NI), which presents a bimodal distribution and is active in late spring and early summer and autumn. The accumulated destructive potential of TCs is the strongest in the Western Pacific and the smallest in NI. The average WDP and SDP have a longer active period than accumulated ratings. The months with low frequencies but high destructive potential of TCs or low wind destructive potential but high storm surge and wave destructive potential are prone to cause unexpected damage. The interannual variability of PDI in global seas show relatively consistent linear growth, and there are obvious periodic variation. However, WDP and SDP vary slowly with little fluctuation. Except for NI, PDI, WDP and SDP in global seas have strong positive correlations with the average SST of the corresponding regions, so the destructive potential of TCs will increase significantly with the intensification of global warming.

Key words: power dissipation index; wind destructive potential; storm surge and wave destructive potential; sea surface temperature