

西北太平洋台风数目与海洋热含量的年代际关系分析*

刘钦燕^{1,2}, 周文²

(1. 中国科学院南海海洋研究所热带海洋环境动力学重点实验室, 广东 广州 510301; 2. 香港城市大学能源及环境学院佳达亚太气候研究中心, 香港 00852)

摘要: 采用 Joint Typhoon Warning Center 提供的 1945—2003 年热带气旋数据对西北太平洋地区(5°—30°N, 121°E—180°)的台风活动进行统计分析, 结果表明西北太平洋的台风活动具有明显的年代际特征。台风数目在 1958—1968 年表现为高值, 在 1970—1980 年表现为低值, 在 1985—1995 年又表现为高值; 并且在 1958—1968 年这一时段台风的年生成数要多于 1985—1995 年期间的台风生成数。利用 Scripps 海洋研究所环境分析中心提供的同期上 400m 热含量和 11 个标准层海温数据分析发现, 台风活动与海洋热力变化存在一定的联系。就年代际变化而言, 海温变化对台风数量的影响并不是主要引导因素。西北太平洋台风变化与中太平洋的热含量相联系, 两者表现为正相关。通过赤道垂直温度剖面可以看出, 相对于 1970—1980 年而言, 1958—1968 年和 1985—1995 年的中太平洋热含量明显增加。中太平洋的热含量增加在 1958—1968 年主要体现在温跃层的海温增暖, 而在 1985—1995 年主要体现在海温表层增暖。这意味着在次表层出现的温度暖异常可能是导致在 1958—1968 这个时间段内台风年生成数多的重要原因。

关键词: 台风; 年代际; 热含量; 次表层温度

中图分类号: P731 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5470(2010)06-0008-07

Relationship between typhoon activity in the northwestern Pacific and the upper-ocean heat content on interdecadal time scale

LIU Qin-yan^{1,2}, ZHOU Wen²

(1. Key Laboratory of Tropical Marine Environmental Dynamics, South China Sea Institute of Oceanology, CAS, Guangzhou 510301, China; 2. Guy Carpenter Asia-Pacific Climate Impact Centre, School of Energy and Environment, City University of Hong Kong, Hong Kong 00852, China)

Abstract: The typhoon activity in the northwestern Pacific region (5°–30°N, 121°E–180°) is analyzed using the tropical cyclone data from 1945 to 2003 provided by the Joint Typhoon Warning Center. The results show that the typhoon activity in the northwestern Pacific has evident interdecadal variability. The number of typhoons occurred in 1958–1968 is more than that occurred in 1985–1995, and both numbers are more than that occurred in 1970–1980. Combining the analysis of the upper-ocean heat content data and temperature data at 11 standard levels provided by the Scripps Institute of Oceanography, it is found that the typhoon activity in the northwestern Pacific has a relationship with the ocean thermal structures. The sea-surface temperature is not the key factor affecting the typhoon number occurred during 1958–1968. The decadal variation of the typhoons occurred in the northwestern Pacific is positively correlated with the upper-ocean heat content in the equatorial central Pacific. There is a sea-surface temperature increase in the central Pacific in 1958–1968 and 1985–1995 compared with 1970–1980 by the mean-temperature profile along the equator, which exists in the surface in 1985–1995 and in the subsurface in 1958–1968. This difference may imply that the subsurface temperature warming played an important role in increased number of typhoon in 1958–1968.

Key words: typhoon; interdecadal variability; upper-ocean heat content; subsurface temperature

收稿日期: 2009-04-02; 修订日期: 2010-05-17. 孙淑杰编辑

基金项目: 广东省联合基金项目(U0733002); 国家自然科学基金项目(40806005); 中国科学院南海海洋研究所青年基金项目(SQ200814)

作者简介: 刘钦燕(1976—), 女, 山东省青岛市人, 博士, 从事海洋-大气相互作用相关研究. E-mail: qyliu66@scsio.ac.cn

* 本文的部分工作是在访问香港城市大学期间完成的。同时在这里一并感谢两位审稿人提出的宝贵意见。

西北太平洋和南海的热带气旋(包括热带风暴、强热带风暴和台风)是影响我国的主要灾害性天气系统之一。近年来对台风的气候学研究已经逐渐被人们所重视,研究表明西北太平洋的台风活动具有明显的年际和年代际变化,并且其发生的频次、路径与 ENSO 有着紧密的联系。ENSO 会通过影响纬向风的垂直切变、海表温度、瓦克环流及西北太平洋季风槽等途径而影响西北太平洋的台风活动^[1-8],并且 ENSO 对西北太平洋热带风暴的影响具有区域性差异,在强 El Niño 年,东南地区热带风暴增多,而西北地区热带风暴减少^[9]。袁金南等^[10]指出,在 El Niño 年超级台风个数及其比例显著增多。

除了高空环流影响外,热带气旋的产生和发展还与海洋下垫面热力条件的发展存在紧密联系,SST、混合层深度和暖涡等海洋热力结构的变化都会对台风强度产生影响。热带气旋经过暖的涡旋时强度会明显加强,混合层越深,热带气旋越强^[11-12]。热带气旋经过暖涡中心时,SST 会有所降低,但降温幅度较小^[13-14]。尽管台风引起的最大海面降温一般出现在台风中心的右后方,但台风削弱主要是由台风内核区的海面降温引起的,内核区 SST 的减小抑制了台风的增强;如果台风在海洋上移动的时间长,还会引起台风的衰减,当台风内核区移出降温显著区后,海面降温对台风强度的影响程度降低^[15]。由于暖涡处的混合层很深,阻止了温跃层的冷水挟卷到混合层中,使得热带气旋引起的海面降温较小,抑制了海面降温对热带气旋强度的削弱作用^[14]。海洋热力结构的正确描述及海气交换过程对台风强度的正确预报是一个非常重要的因素^[16]。热带气旋的活动能够扰动海洋,使海水上下交换、混合层变深、海表面温度降低,海洋向大气的热通量减少,海洋上层的热含量增加。热含量大的海洋能提供更多的热量,又能使热带气旋的活动增强,形成一种正反馈机制^[17]。

上述研究表明,热带气旋强度不仅与 SST 关系密切,与海洋混合层和海洋垂直结构也有关,这些因素统一用热带气旋热含量来表示^[18-19]。Wada 等^[20]的研究表明,热带气旋热含量比 SST 更适合作为预报热带气旋强度变化的指标。Wang 等^[21]对上层热力结构与南海产生的热带气旋位置之间的关系进行研究后指出,在南海热带气旋月平均产生的位置,平均 SST 为 28.8,26 水的深度为 53.1m。有些区域虽然满足这样的热力特征,即 SST 超过 26、26 水深超过 50m,但并没有热带气旋在这里

产生。

本文的研究目的在于分析西北太平洋台风活动的年代际变化特征,并初步探讨台风活动与海洋上层热含量间的关系。

1 数据和研究区域

本文研究所用热带气旋数据为 JTWC(Joint Typhoon Warning Center)提供的从 1945 年到 2003 年热带气旋最佳路径资料库数据。数据包括热带气旋编号、每隔 6h 观测的风暴位置、中心最大风速和中心气压等。根据 Saffir-Simpson 标准通过中心风速将热带气旋分为 3 类:热带低压(小于 $17.2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)、热带风暴($17.2\text{—}32.6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)和台风(大于 $32.7\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),这里的热带风暴包括了强热带风暴。

台风研究区域为西北太平洋(简写 NWP, $5^{\circ}\text{—}30^{\circ}\text{N}$, $121^{\circ}\text{E}\text{—}180^{\circ}$)。本文将热带风暴天数定义为天气系统仅发展成为热带风暴的时间,将台风天数定义为系统达到强风暴状态的时间,包括系统达到热带风暴的时间。

海洋上层 400m 热含量和 11 个标准层(0、20、40、60、80、120、160、200、240、300、400m)的海温数据为美国 Scripps 海洋研究所环境分析中心(JEDAC)提供的 XBT 观测数据,资料长度从 1955 年 1 月到 2003 年 12 月,水平分辨率为 $5^{\circ}\times 2^{\circ}$ 。

2 结果分析

2.1 西北太平洋热带气旋变化特征

图 1 为 1945—2003 年西北太平洋热带风暴和台风的年生成数量特征(图 1a)以及它们各自的持续天数特征(图 1b)。西北太平洋的热带气旋主要以台风为主,年发生台风次数远远大于热带风暴次数,其中西北太平洋台风年生成数与王会军等^[22]统计的台风数目的时间分布特征相类似。

台风的年代际特征最为显著,在 1958—1968 年表现为高值,1970—1980 年表现为低值,1985—1995 年又表现为高值。但热带风暴只在 1950—1960 年表现为低值,后期年代际特征不明显。持续时间和发生个数表现的特征比较一致。1958—1968 年的西北太平洋台风数目相对于 1985—1995 年数目多且持续时间长。

我们同时可以看出,在 1945—2003 年这段时间内,西北太平洋的热带风暴个数和持续时间有缓慢增多的趋势,而台风个数表现为减少趋势。台风持续时间与台风个数表现似乎相反,这可能与统计台

风持续时间时包括热带气旋有关。

利用落后自相关对热带风暴和台风的年生成数及持续天数进行的功率谱分析(标准化, 去倾, 最大落后步长取为 18), 结果表明台风年生成数的 3.3 年

和 36 年周期比较明显(图 2a), 而年持续时间的典型周期是 5 年左右(图 2b)。热带风暴的年生成数的典型周期是 4 年(图 2c), 年持续时间的典型周期是 18 年(图 2d)。

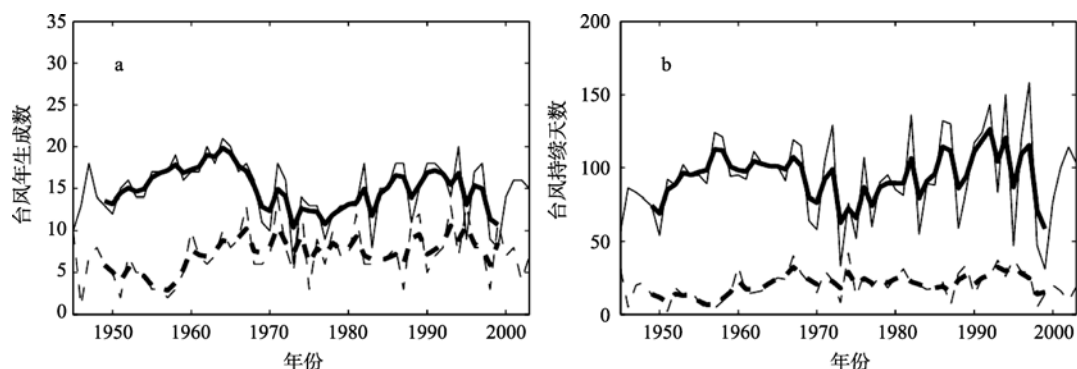


图 1 1945—2003 年西北太平洋热带风暴(虚线)、台风(实线)的年生成数(a)及持续天数(b)时间序列(粗线为 9 点滑动平均的时间序列)

Fig. 1 Number (a) and duration (b) of the tropical storm (dashed line) and typhoon (solid line) occurred in the northwestern Pacific from 1945 to 2003. Bold lines are time series with 9-points running mean

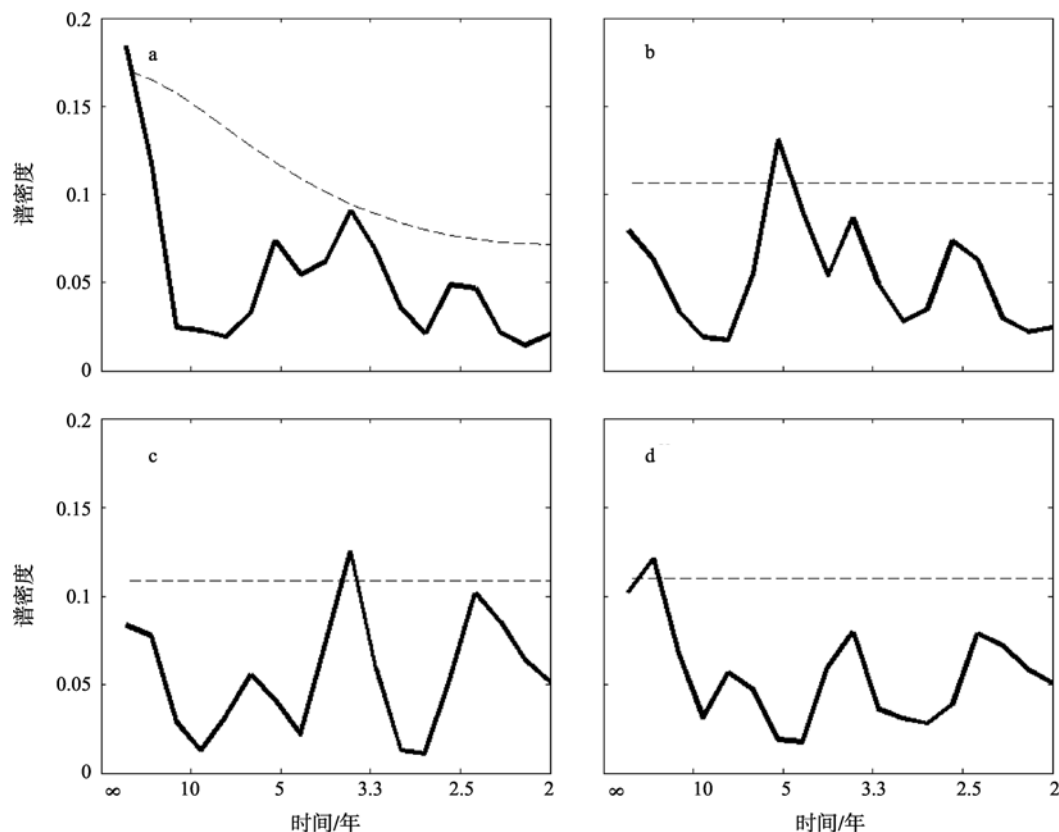


图 2 西北太平洋台风年生成数(a)及持续天数(b)和热带风暴年生成数(c)及持续天数(d)的功率谱特征(其中虚线为 95% 信度水平阈值线)

Fig. 2 Power spectrum analysis of typhoon number (a) and duration (b), tropical storm number (c) and duration (d) occurred in the northwestern Pacific from 1945 to 2003 (dashed lines denote passing 95% significant level)

2.2 西北太平洋台风与海洋热力结构的关系

2.2.1 海表面温度

为了探讨西北太平洋台风与海洋热力结构之间的关系, 我们根据西北太平洋台风年生成数和年持

续时间(图 1), 选择 3 个不同的时间段(1958—1968 年和 1985—1995 年是相对高峰值段, 而 1970—1980 年是相对低峰值段), 然后对这 3 个不同时间段的海表面温度进行分析。图 3 给出的是赤道太平洋

海表面温度在 3 个时段分布的差异情况。

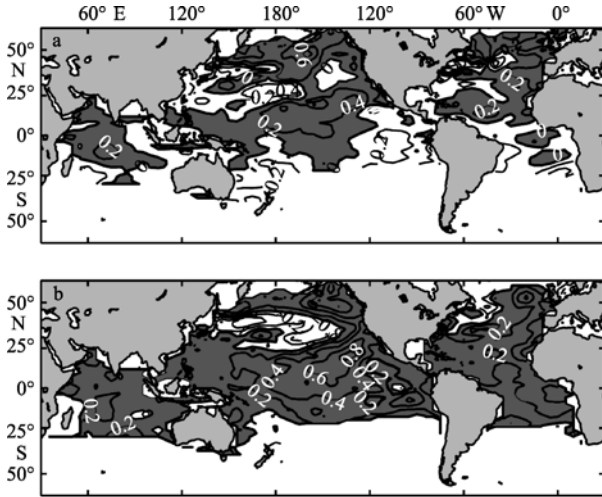


图 3 海表面温度(单位: $^{\circ}\text{C}$)差异

a.1958—1968 年与 1970—1980 年温度差异; b.1985—1995 年与 1970—1980 年温度差异。阴影区为大于零的值

Fig. 3 Sea-surface temperature differences (units: $^{\circ}\text{C}$) between 1958—1968 and 1970—1980 (a), and between 1985—1995 and 1970—1980 (b). Shade denotes the regions with sea-surface temperature differences larger than zero

结果表明,相对于 1970—1980 年这段台风生成数目较少的时段而言,在 1958—1968 年和 1985—1995 年这两个台风生成数量较多的 10 年中,其热带太平洋海表面温度存在着不同程度的增高,增温程度在 1985—1995 年表现得更为突出,增温范围遍布整个热带太平洋区域,增温幅度可以达到 0.8 (图 3b)。而 1958—1968 年的海温与 1970—1980 年的海温差异并不太大,海温差异超过 0.2 的区域仅局限在赤道中太平洋(图 3a)。但从图 1 可以看出,在 1958—1968 年发生的台风数量比 1985—1995 年发生的台风数要多,说明尽管海表面温度都符合台风发生的条件,但就年代际变化而言,海温变化并不是影响台风数量的主要引导因素;也就是说,尽管现在气候变暖,但台风活动并没有明显增强^[23]。

2.2.2 热含量

利用 1955—2003 年共 49 年的上层热含量和西北太平洋台风年生成数进行超前滞后相关分析,图 4a—c 是没有进行 9 点平滑以前的分布情况,图 4d—f 是平滑以后的分布情况。在没有进行 9 点平滑以

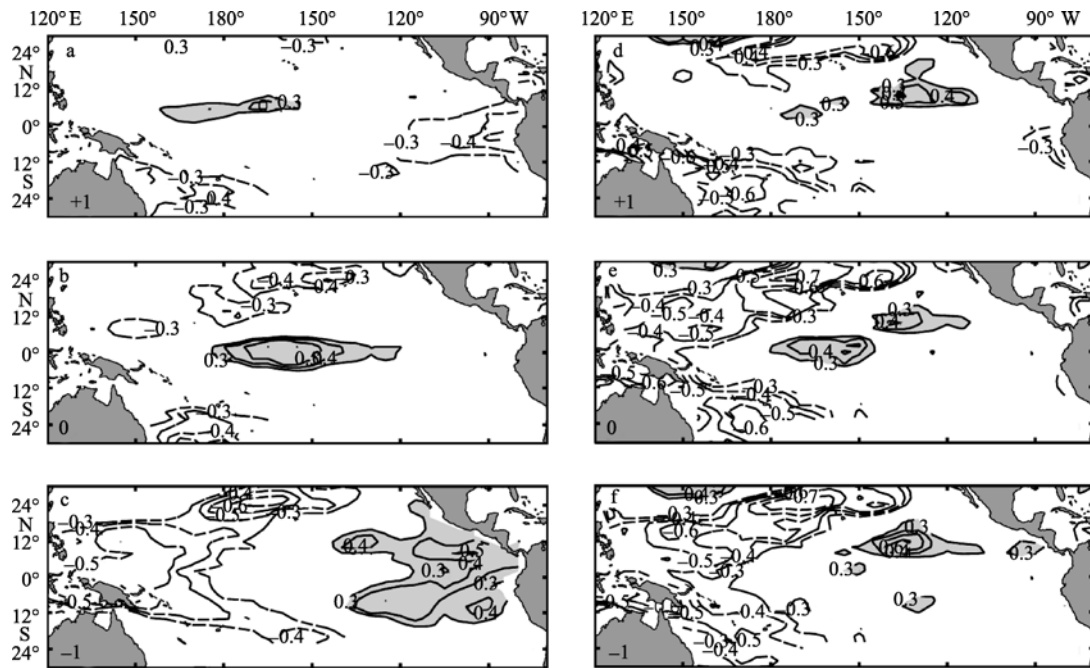


图 4 1955—2003 年西北太平洋台风年生成数与年平均上层热含量(单位: $\times 10^9 \text{W} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$)的相关分布

a—c 为未作滑动平均; d—e 为 9 点滑动平均后。1、0、-1 分别代表热含量超前台风、同期、热含量滞后台风。绝对值小于 0.3 的线省略,阴影部分相关系数大于 0.3。0.31 代表其相关系数超过 95% 的信度检验(假定样本数为 40, 相关系数临界值 $r_c = \sqrt{\frac{(2.021)^2}{40 - 2 + (2.021)^2}} = 0.31$)

Fig. 4 Correlation between typhoon number of the northwestern Pacific and upper-ocean heat content (units: $\times 10^9 \text{W} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$), with (a)–(c) for no running mean, and (d)–(e) for 9-point running mean. The values of 1, 0 or -1 mean the heat content leads, or is contemporaneous with, or lags behind typhoon number. The absolute values smaller than 0.3 are omitted, and shading denotes the correlation coefficient is higher than 0.3. The critical correlation coefficient value is 0.31 with 95% significant level, assuming sample number of 40

前, 当上层 400m 热含量超前台风 1 年时, 西北太平洋的台风活动与中太平洋的热含量表现为正相关, 与东南太平洋的热含量表现为负相关(图 3a), 这可能意味着在台风年生成数增多前 1 年赤道中太平洋的热含量增多, 这为次年的台风爆发储蓄了一定的能量。当同期相关时, 西北太平洋台风与热含量在赤道中太平洋的正相关增强, 其相关系数能够达到 0.5 以上(图 4b); 而在副热带太平洋区域则出现明显的负相关(图 4b)。当热含量滞后台风 1 年时, 其相关分布为典型的东正西负型, 台风与西太平洋的负相关系数可以达到 -0.5 以上, 这可能意味着在台风发生次年西北太平洋由于受台风作用的影响, 其热含量明显降低; 而且在负相关区域出现两个负相关极值中心: 一个位于赤道西太平洋, 另外一个位于副热带中太平洋(图 4c)。

为了扣除年际变化的影响, 我们在进行 9 点滑动平均后, 同样作超前滞后相关分析。结果表明, 热含量和台风年生成数的超前滞后相关分布与平滑前存在一定的差异(图 4d—f)。当热含量超前台风 1 年时, 正相关区域在热带中太平洋变成两个中心, 而且在副热带区域已经开始出现负相关区(图 4d)。当同期相关时, 中太平洋的正相关区依然存在, 而负相关区在西北太平洋表现得非常明显, 并且存在一定的赤道对称结构; 尽管南半球的负相关区域明显变小(图 4e), 但这种结构特征可以维持到台风发生

1 年以后(图 4f)。最明显的变化体现在热含量滞后 1 年时(图 4c、f), 这时东西反对称结构已经不明显, 这说明图 4c 东太平洋和西太平洋相关系数分布的跷跷板型结构基本反映的是年际变化特征。这种结构主要体现年际模态上。但是西太平洋的负相关形态仍然保持, 这种负相关无论是在年际还是年代际上都有着很好的体现。

根据热含量与台风相关分布特征, 分别选取西北太平洋(120°E — 180° , 0° — 30°N)和赤道中太平洋(6°S — 6°N , 180° — 220°E)两个区域, 对两个区域平均的热含量和西北太平洋台风年生成数和持续时间异常(扣除气候态平均, 并做 9 点平滑)作时间序列分析(图 5)。对于赤道中太平洋热含量与西北太平洋台风年生成数和持续时间的关系而言, 最大相关都表现为同期(表 1)。没有进行 9 点平滑前, 西北太平洋台风年生成数与赤道中太平洋的最大相关为 0.47; 而平滑后两者的最大相关仅为 0.29。对于台风年持续时间与赤道中太平洋的关系而言, 平滑前同期相关为 0.63, 平滑后为 0.55。西北太平洋热含量与台风年生成数的关系有所不同, 热含量滞后台风 1 年时, 平滑前后最大负相关分别为 -0.36 和 -0.47; 而台风年持续时间与西北太平洋热含量的相关表现在同期, 分别为 -0.28 和 -0.44。也就是说, 在发生台风后, 西北太平洋的热含量可能受台风活动的影响而有所下降。

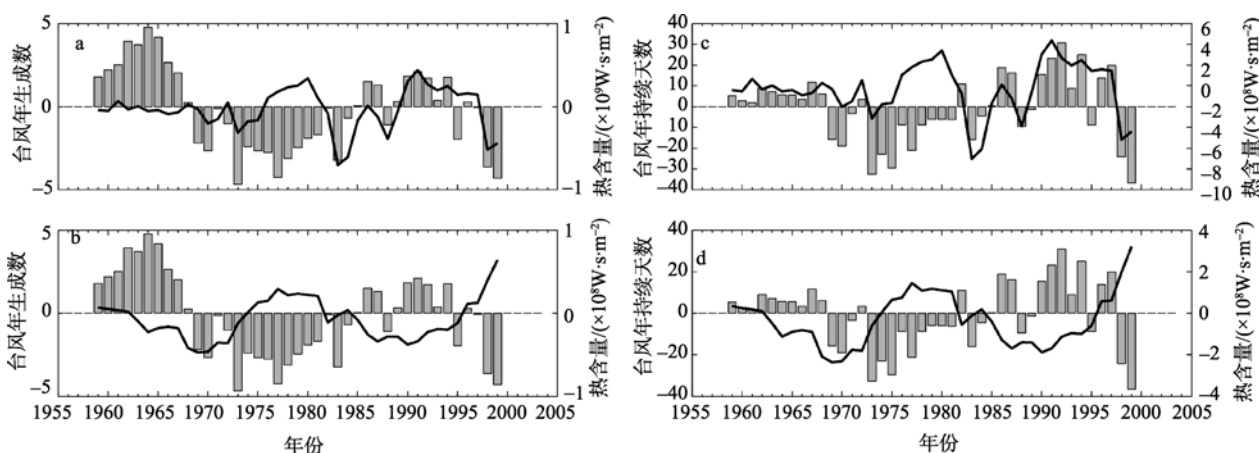


图 5 时间序列分布情况

a. 西北太平洋台风年生成数(柱状)和赤道中太平洋平均热含量(实线); b. 西北太平洋台风年生成数(柱状)和西北太平洋平均热含量(实线); c. 西北太平洋台风年持续天数(柱状)和赤道太平洋平均热含量(实线); d. 西北太平洋台风年持续天数(柱状)和西北太平洋平均热含量(实线); 时间序列均已扣除气候态平均值并做 9 点滑动平均

Fig. 5 Time series of (a) typhoon number of the northwestern Pacific (bar) and heat content averaged in the equatorial central Pacific (solid line), (b) typhoon number of the northwestern Pacific (bar) and heat content averaged in the northwestern Pacific (solid line), (c) typhoon duration of the northwestern Pacific (bar) and the heat content averaged in the equatorial central Pacific (solid line), and (d) typhoon duration of the northwestern Pacific (bar) and heat content averaged in the northwestern Pacific (solid line). The seasonal cycle is removed from all variables, and 9-point running mean is applied

表 1 西北太平洋台风年生成数、持续时间与赤道中太平洋和西北太平洋热含量的最大相关分析

Tab. 1 Maximum correlation analysis between number and duration of the typhoon in the northwestern Pacific and the heat content averaged in the equatorial central Pacific and northwestern Pacific

	赤道中太平洋热含量	西北太平洋热含量
西北太平洋台风年生成数	0.47(0)/0.29(0)	-0.36(-1)/-0.47(-1)
西北太平洋台风年持续时间	0.63(0)/0.55(0)	-0.28(0)/-0.44(0)

注：斜杠前后分别代表平滑前和平滑后，括号里面的数字 1、0、-1 分别代表热含量超前台风、同期、热含量滞后台风。

西北太平洋的上层热含量和西北太平洋的热带气旋活动在年际上是负相关的，因为热带气旋在活动过程中从海洋得到了大量的能量，使得海洋上层热含量降低^[7, 24]。在年代际时间尺度上，这一机制看来能够解释在台风发生当年及其后 1 年西北太平洋上层热含量出现的负相关。从图 5 可以看出，西北

太平洋台风与海洋热含量变化之间存在明显的年代际变化特征。

图 6a 给出的是 1958—1968 年和 1970—1980 年沿赤道剖面(4°N—4°S 平均)0—400m 平均温度的差异(前者减后者)，图 6b 是 1985—1995 年和 1970—1980 年沿赤道剖面 0—400m 平均温度的差异(前者减后者)。由图 6 可以看出，相对于 1970—1980 年西北太平洋台风年生成数较少的年份而言，在 1958—1968 年和 1985—1995 年西北太平洋台风数量高值年份，中太平洋的热含量明显增加。1958—1968 年，中太平洋的热含量增加主要体现在温跃层的海温增高，增温中心集中在 150—200m(中心差异可以达到 0.6)，在赤道西太平洋则体现为次表层的冷却(图 6a)；1985—1995 年主要体现在中太平洋表层海温增高，即 150m 以浅地区(中心差异达到 0.6)海温增高范围可以扩展到整个热带东太平洋区域，而西太平洋地区次表层为明显的冷却中心(图 6b)。

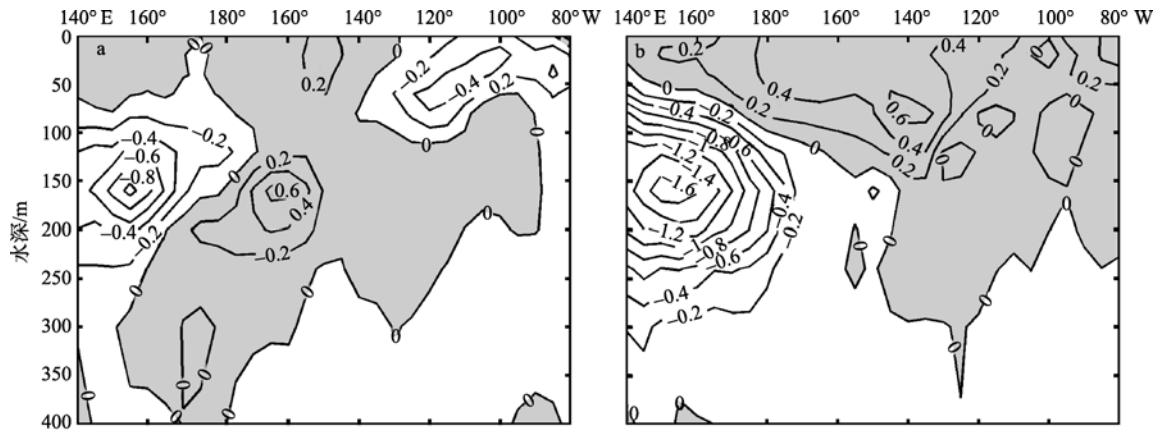


图 6 沿赤道剖面(4°N—4°S 平均)的平均温度(单位:)差异
a.1958—1968 年与 1970—1980 年的温度差异; b.1985—1995 年与 1970—1980 年的温度差异。阴影区为大于零的值
Fig. 6 Temperature difference (units:) along the equatorial section (averaged from 4°N to 4°S), with (a) between 1958—1968 and 1970—1980, and (b) between 1985—1995 and 1970—1980. Shading denotes the region with values larger than zero

3 小结和讨论

通过对西北太平洋台风数量和持续时间的年变化特征的分析，发现西北太平洋台风变化具有明显的年代际特征：台风年生成数在 1958—1968 年表现为高值，1970—1980 年表现为低值，1985—1995 年又表现为高值；并且台风年生成数在 1958—1968 年这一时段的数量要多于 1985—1995 年的数量。

1958—1968 年与 1970—1980 年的海温差异相对于 1985—1995 年与 1970—1980 年的海温差异并不大，但在 1958—1968 年发生的台风数量比

1985—1995 年发生的台风数要多，这说明尽管海面温度都符合台风发生的条件，但就年代际变化而言，海温变化并不是影响台风数量的主要引导因素。

在台风年生成数增多的前 1 年，赤道中太平洋的热含量增多，这为次年的台风爆发储蓄了一定的能量，两者的年代际变化特征表现为正相关。通过赤道垂直温度剖面可以看出，相对于 1970—1980 年而言，1958—1968 年和 1985—1995 年的中太平洋热含量明显增加。中太平洋的热含量增加在 1958—1968 年主要体现在温跃层的海温升高，而在

1985—1995 年主要体现在表层海温升高, 这意味着次表层的水体暖异常可能是导致在 1958—1968 年这个时间段台风年生成数增加的重要原因。本文仅仅是一些初步探讨的结果, 要探讨储蓄在中太平洋的能量如何提供给在西北太平洋发生的台风、两者是如何联系的, 还有待进一步大量的工作。

本文主要针对西北太平洋台风年变化特征与热含量的关系进行了探讨, 但台风变化具有明显的季节特征; 而且相关分析发现, 台风年平均数目与年

平均热含量的相关特征具有典型的 ENSO 形态。已有研究指出, 西北太平洋夏季台风活动年代际变化与副热带西北太平洋高压相联系^[25]; 大的纬向风垂直切变幅度(MWS)可以阻止热带气旋的产生或者减弱热带气旋的强度甚至使热带气旋消亡^[26]; 并且南极涛动会通过影响 MWS 来影响西北太平洋台风的生成^[22]。ENSO 事件在调整台风与热含量年变化中的作用和长时间尺度风场变化对台风的影响等问题仍值得作进一步的探讨。

参考文献

- [1] CHAN J C L. Tropical cyclone activity in the Northwest Pacific in relation to the El Niño/Southern Oscillation phenomenon [J]. *Mon Wea Rev*, 1985, 113(4): 599–606.
- [2] LANDER M A. An exploratory analysis of the relationship between tropical storm formation in the Western North Pacific and ENSO [J]. *Mon Wea Rev*, 1994, 122(4): 636–651.
- [3] CHAN J C L. Tropical cyclone activity over the western North Pacific associated with El Niño and La Niña events [J]. *J Climate*, 2000, 13: 2960–2972.
- [4] CHIA H H, ROPELEWSKI C F. The interannual variability in the genesis location of tropical cyclones in the Northwest Pacific [J]. *J Clim*, 2002, 15(20): 2934–2944.
- [5] WU M C, CHANG W L, LEUNG W M. Impacts of El Niño-Southern Oscillation events on tropical cyclone land-falling activity in the Western North Pacific [J]. *J Clim*, 2004, 17(6): 1419–1428.
- [6] CAMARGO S J, SOBEL A H. Western North Pacific tropical cyclone intensity and ENSO [J]. *J Clim*, 2005, 18(15): 2996–3006.
- [7] 陈光华, 黄荣辉. 西北太平洋暖池热状态对热带气旋活动的影响[J]. *热带气象学报*, 2006, 22(6): 527–532.
- [8] 黄荣辉, 陈光华. 西北太平洋热带气旋移动路径的年际变化及其机理研究[J]. *气象学报*, 2007, 65(5): 683–694.
- [9] WANG B, CHAN J C L. How strong ENSO events affect tropical storm activity over the Western North Pacific [J]. *J Clim*, 2002, 15(13): 1643–1658.
- [10] 袁金南, 林爱兰, 刘春霞. 60年来西北太平洋上不同强度热带气旋的变化特征[J]. *气象学报*, 2008, 66(2): 213–223.
- [11] MAO Q, CHANG S W, PFEFFER R L. Influence of Large-Scale Initial Oceanic Mixed Layer Depth on Tropical Cyclones [J]. *Mon Wea Rev*, 2000, 128(12): 4058–4070.
- [12] CHAN J C L, DUAN Y H, SHAY L K. Tropical cyclone intensity change from a simple ocean-atmosphere coupled model [J]. *J Atmos Sci*, 2001, 58: 154–172.
- [13] HONG X, CHANG S W, RAMAN S, et al. The interaction between Hurricane Opal (1995) and a warm core ring in the Gulf of Mexico [J]. *Mon Wea Rev*, 2000, 128: 1347–1365.
- [14] LIN I-I, WU C C, EMANUEL K A, et al. The interaction of supertyphoon Maemi (2003) with a warm ocean eddy [J]. *Mon Wea Rev*, 2005, 133(9): 2635–2649.
- [15] 蒋小平. 南海热带气旋过程中的海气相互作用研究 [D]. 南京: 中国人民解放军理工大学, 2008.
- [16] EMANUEL K A. Thermodynamic control of hurricane intensity [J]. *Nature*, 1999, 401: 665–669.
- [17] CLAUDIA PASQUERO, KERRY EMANUEL. Tropical cyclones and transient upper-ocean warming [J]. *Journal of Climate*, 2008, 21: 149–162.
- [18] LEIPPER D F. Observed ocean conditions and Hurricane Hilda (1964) [J]. *J Atmos Sci*, 1967, 24: 182–196.
- [19] GRAY W M. Hurricanes: Their formation, structure, and likely role in the tropical circulation. *Meteorology over the Tropical Oceans* [M]//SHAW D B. Royal Meteorological Society, 1979: 155–199.
- [20] WADA A, USUI N. Importance of tropical cyclone heat potential for tropical cyclone intensity and intensification in the Western North Pacific [J]. *J Oceanogr*, 2007, 63: 427–447.
- [21] WANG L, FUNG C H, LAU K H. The upper ocean thermal structure and the genesis location of tropical cyclones in the South China Sea [J]. *J Ocean Univ Chin*, 2007, 6(2): 125–131.
- [22] 王会军, 范可. 西北太平洋台风生成频次与南极涛动的关系[J]. *科学通报*, 2006, 51(24): 2910–2914.
- [23] CHAN J C L. Comments on “Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment” [J]. *Science*, 311, 1713b.
- [24] 储惠芸, 王元, 伍荣生. 上层海洋热力异常对西北太平洋热带气旋气候特征的影响 [J]. *南京大学学报*, 2007, 43(6): 581–588.
- [25] HO C H, BAIK J J, KIM J H, et al. Interdecadal changes in summertime typhoon tracks [J]. *J Clim*, 2004, 17: 1767–1776.
- [26] GRAY W M. Global view of the origin of tropical disturbances and storms [J]. *Mon Wea Rev*, 1968, 96: 669–700.