

近 30 年西北太平洋热带气旋的时空变化及与海洋上层热状态的关系

陈志伟¹, 康建成¹, 顾成林^{1,2}, 汤明^{1,3}

(1. 上海师范大学 城市生态与环境研究中心, 上海 200234; 2. 佳木斯大学 理学院 资源与环境科学系, 黑龙江 佳木斯 154007; 3. 九江学院 鄱阳湖生态经济研究中心, 江西 九江 332000)

摘要: 使用 1982—2014 年美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)最优插值(1/4)°逐日海温分析资料、美国国家海洋数据中心(National Oceanographic Data Center, NODC)提供的海洋上层 700 m 热含量数据和美国联合台风警报中心(Joint Typhoon Warning Center, JTWC)的热带气旋(tropical cyclone, TC)最佳路径资料, 分析西北太平洋地区(0°~30°N, 105°~155°E)TC 活动的时空分布特征, 探讨 TC 与海洋上层热状态之间的关系。结果表明: TC 频数具有显著的年代际变化特征: 1982—1992 年和 2003—2014 年皆为低频期, 而 1993—2002 年则为高频期, 33 年来 TC 发生频数表现为缓慢增加—快速增加—减少的特征。最近 15 年(2000—2014 年), TC 数量呈现明显下降的趋势。在西北太平洋, TC 有 3 个明显的源地, 分别为源地 1(10°~22°N, 110°~120°E); 源地 2(8°~20°N, 125°~145°E); 和源地 3(5°~20°N, 145°~155°E)。源地 1、源地 2 的频数呈上升趋势, 而源地 3 呈下降趋势。海洋上层热状态的变化给 TC 带来的影响是多方面的, TC 频数对上层热含量(heat content)的响应较明显, 而海表面温度(sea surface temperature, SST)不是影响 TC 数量变化的主要因素。伴随着海洋上层的增暖, TC 的年持续时间有减少趋势, TC 强度正在增强。在全球变暖背景下, TC 活动给西北太平洋沿岸国家带来的潜在威胁极有可能加剧。

关键词: 西北太平洋; 南海; 热带气旋; 海洋上层热状态; 气候变化

中图分类号: P721 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2017)08-0122-12

DOI: 10.11759/hyxx20161017001

百年以来, 全球变暖。过去 40 年, 海洋上层在增温^[1]。随着全球变暖, 作为海气相互作用产物的热带气旋活动的变化趋势(频数、源地、强度、持续时间), 是台风预报和减灾、防灾关注的热点问题。前人通过理论模型分析认为, 热带气旋(tropical cyclone, TC)强度与海表面温度(sea surface temperature, SST)之间具有显著的正相关关系, 由此推断随着气候变暖、SST 升高, TC 的强度将明显增强^[2-4]。Gray^[5]等认为 TC 活动与 SST 有着密切的联系, 热带气旋形成的基本温度应该是 SST 大于 26℃; Elsner 和 Koehler^[6]认为 1970—2004 年热带海洋 SST 增加接近 0.5℃, 这样的条件有利用 TC 形成发展。1960—2003 年, 在 SST 上升的区域, TC 活动(频数、超强台风的比例, 强度等)有加强的趋势^[7]。Elsner 等^[8]发现在 SST 继续升高的情况下在北大西洋、北印度洋超强台风将会变的更强。Emanuel^[9]认为从 70 年代开始, 西北太平洋、北大西洋 TC 生命周期与强度有增加的

趋势。

然而, 进一步的研究提出, 在全球变暖的背景下, TC 的频数有减少的可能, 尽管个别区域强度有所增加^[10]。TC 的活动与海洋热力变化存在一定的联系, 但就年代际变化而言, 海温变化对 TC 的影响并不是主要的引导因素^[11]。也有模式预测, 随着全球持续增暖, TC 在全球范围内出现的频次可能减少或基本保持不变。但是, 目前模式预测结果的可信度很低^[1]。

可以确定的是, 自 1970 年以来, 大西洋强热带气旋活动正在加强^[1]。

收稿日期: 2016-10-17; 修回日期: 2017-04-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41340045); 上海市教委重点学科建设项目(J50402)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41340045; Key Discipline Project of Shanghai Education Commission, No. J50402]

作者简介: 陈志伟(1992-), 男, 江苏南通人, 博士生, 主要从事海洋环境气候变化研究, 电话: 021-64322274, E-mail: 1546335462@qq.com; 康建成(1957-), 通信作者, 男, 甘肃天水人, 教授, 博士生导师, 主要从事全球气候环境演化过程及其影响研究, E-mail: Kangjc@126.com

影响中国的热带气旋发生在西北太平洋,西北太平洋是全球 TC 最集中的区域之一^[12],在此海域年平均生成的 TC 个数为 30 个左右,约占全球热带洋面上 TC 年生成总数的 1/3^[13-14]。但是,随着全球增暖,在西北太平洋 TC 的活动将如何变化,目前尚无定论^[1]。

本研究使用 1982—2014 年 NOAA 最优插值 (1/4)°逐日海温分析资料和美国联合台风警报中心的 TC 最佳路径资料,分析西北太平洋 TC 的时空变化特征,探讨 TC 与海洋上层热状态变化之间的关系。

本文选取的研究区域为西北太平洋(0°~30°N、105°~155°E)海域,是影响中国的强热带气旋——台风的主要活动区域^[8]。

1 数据资料

TC 数据来源于美国联合台风警报中心,1982—2014 年最佳路径资料,主要包括每隔 6 h TC 中心的空间位置、中心气压、最大风速等(<http://weather.unisys.com/hurricane/>)。

SST 数据来源于 NOAA 最优插值(1/4)°逐日海温分析资料 V2.0,时间范围为 1982 年 1 月—2014 年 12 月,空间分辨率为 0.25°×0.25°,主要包括 SST、SST 距平等数据(<ftp://eclipse.ncdc.noaa.gov/pub/OI-daily-v2/netcdf-uncompress>)。

海洋上层 700 m 热含量数据来源于美国国家海洋数据中心,资料长度为 1982—2014 年,时间分辨率为年,空间分辨率为 1°×1°(https://www.nodc.noaa.gov/OC5/3M_HEAT_CONTENT/)。

2 西北太平洋 TC 活动的时空分布特征

西北太平洋是世界上形成 TC 最多的海域,也是全年都有 TC 发生的海域。为了探讨在全球变暖的背景下西北太平洋 TC 活动是怎样变化的,本研究统计了 1982—2014 年各月发生的 TC 频数及其源地位置,以便分析这 33 年中西北太平洋 TC 的时空分布特征。

2.1 TC 活动的季节分布特征

2.1.1 TC 多年平均的季节变化

关于西北太平洋 TC 活动的季节分布,前人的研究指出 TC 全年集中发生在 7—10 月间,8 月发生的频率达到最大,2 月最少^[15-17]。

由 1982—2014 年间 TC 逐月分布的统计结果可见(图 1),TC 在全年都有发生,1—4 月 TC 发生次数少,5 月频数逐渐增多;6—10 月为 TC 发生的高频时

段,占全年 TC 发生总数的 80.1%;11、12 月 TC 发生的频数偏少。

从 33 年的年际变化来看(图 2),1—4 月无明显的变化趋势;5 月 TC 发生频数呈现增长趋势;6—10 月发生的 TC 频数均表现出下降趋势;11、12 月 TC 频数呈现出逐年增加的趋势。综合起来,33 年来,夏季发生 TC 的频数有下降的趋势,春末、秋末冬初有增加的趋势,盛冬、初春没有趋势性的变化。

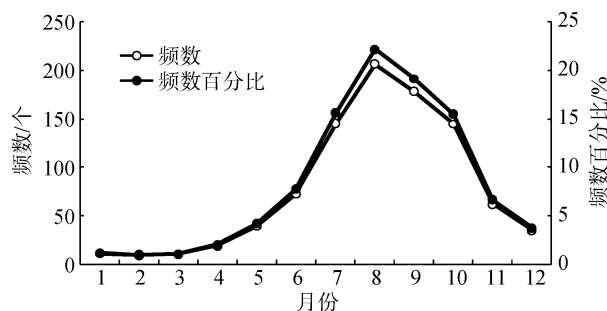


图 1 1982—2014 年西北太平洋 TC 频数和百分比的季节变化

Fig.1 Seasonal changes in frequency and percentage distribution of TC from 1982 to 2014 in the Northwest Pacific

2.1.2 TC 纬度分布的季节变化

前人研究提出西北太平洋 TC 的主要发生源地存在着明显的季节变化,冬季的主要发生源地偏南偏东,以后逐渐向北向西偏移,夏季又向南向东偏移^[15]。对于西北太平洋 TC 经纬度分布的季节变化,研究较少。

本研究统计了西北太平洋 1982—2014 年 33 年中各月 TC 的经纬度分布(见图 3)。从图中可以看出,TC 的发生源地具有明显的季节变化特征。1—4 月发生的 TC 数量很少,且发生源地较为分散,发生的位置偏南,在 2°~15°N 的范围内;从 5 月份开始,TC 发生的次数逐渐增多,相对于 1—4 月份,5 月份 TC 源地向西北方向偏移;6 月份 TC 数量进一步增多,源地进一步向西向北方向偏移;7 月份 TC 源地向北向东方向扩散,TC 的数量也明显增多,主要分布在 5°~20°N,110°~155°E 的海区;8—9 月 TC 源地向西向北方向扩散,TC 数量达到一年中最多,8 月 TC 主要分布在 8°~25°N,112°~155°E 的海区,而 9 月 TC 主要分布在 12°~22°N,112°~155°E 的海区;10 月,TC 源地位置开始向南移动,TC 的数量也逐渐减少,主要分布在 6°~18°N,112°~155°E 海区;11—12 月 TC 的源地进一步南移,又退回到 2°~15°N 的范围内,且 TC 数量明显减少。

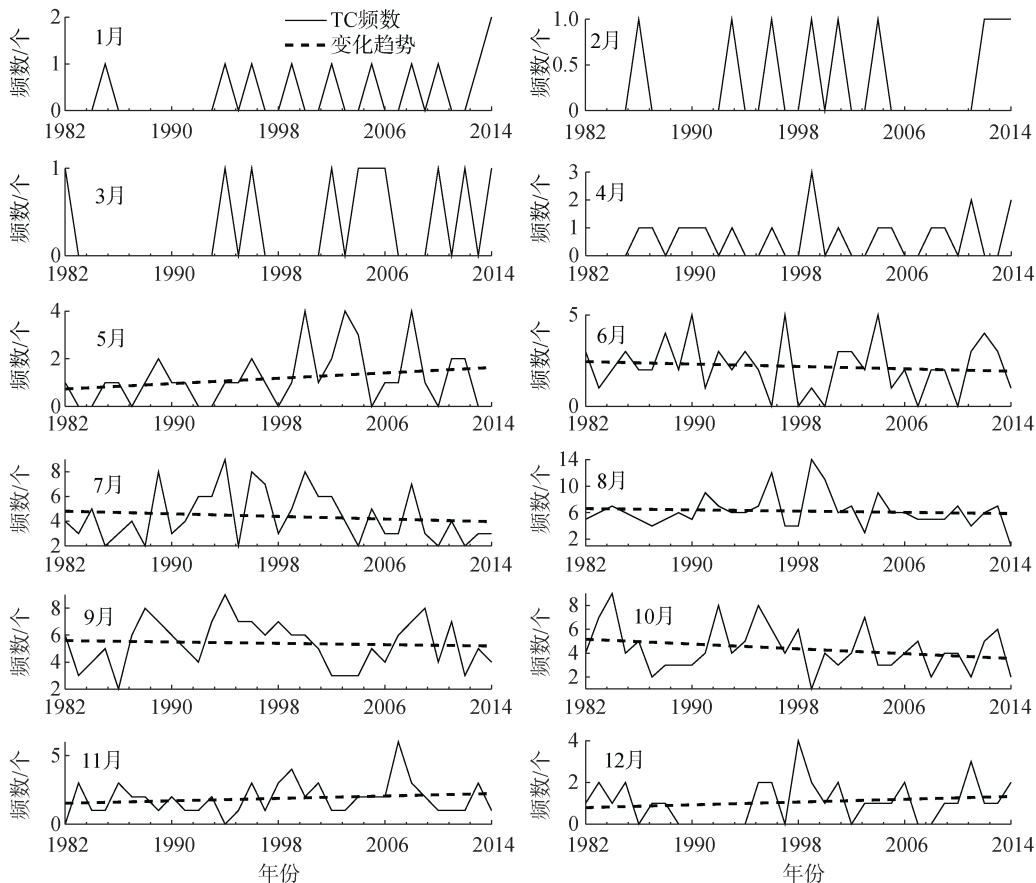


图2 1982—2014年西北太平洋各月TC频数的年际变化

Fig.2 Interannual change of in the TC frequency for each month from 1982 to 2014 in the Northwest Pacific

2.2 TC活动的年际变化特征

关于西北太平洋TC的年际-年代际变化,已有研究提出西北太平洋TC具有明显的年代际特征,表现为,20世纪50年代TC数目有所下降,60年代中期到70年代初期TC发生的频率较高,然后又下降,除了80年代后期和90年代初期略有增加外,一直保持了这种下降趋势,特别是90年代后期,几乎达到了最低值^[16]。也有研究指出,在1949—2003年,TC有3个低频时期:1949—1959年、1975—1984年、1995—2003年,两个高频时期:1960—1974年、1985—1994年^[19]。

为了了解在全球变暖的背景下西北太平洋TC活动的变化,本文统计了西北太平洋1982—2014年生成的TC频数,共发生TC次数930次,平均每年28次,其中TC发生频数最多的年份为1996年,多达44次,最少的年份为2014年,仅为20次。若以年平均发生TC次数为标准,33年中TC偏多年为:1989年、1992年、1993年、1994年、1995年、1996

年、1997年、1999年、2000年、2001年、2005年、2009年、2013年,其余年份为TC发生偏少年(见图4)。33年中西北太平洋TC频数的年代际变化呈现出减少—增多—减少的趋势,即1982—1991年为TC低频期,1992—2002年为TC高频期,且TC明显增多,2003—2014年TC频数又呈现出下降趋势。

2.3 西北太平洋TC的生成源地的变化

关于西北太平洋TC的生成源地,前人提出西北太平洋有3个TC源地,分别为南海中北部偏东海面、菲律宾以东至加罗林群岛之间的海面、加罗林群岛一带的海面^[15];TC路径最为密集的地区集中在我国的南海地区、菲律宾群岛以及马里亚纳群岛附近^[16]。也有研究提出TC源地分布在 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 范围内,发生高频区的纬向轴线位于 12.6°N ,经向对应于南海海区和菲律宾以东及关岛附近的海面有两个峰值^[20]。

这里对西北太平洋 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 、 $105^{\circ}\sim 155^{\circ}\text{E}$ 海域1982—2014年TC的分布按 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的网格统计,

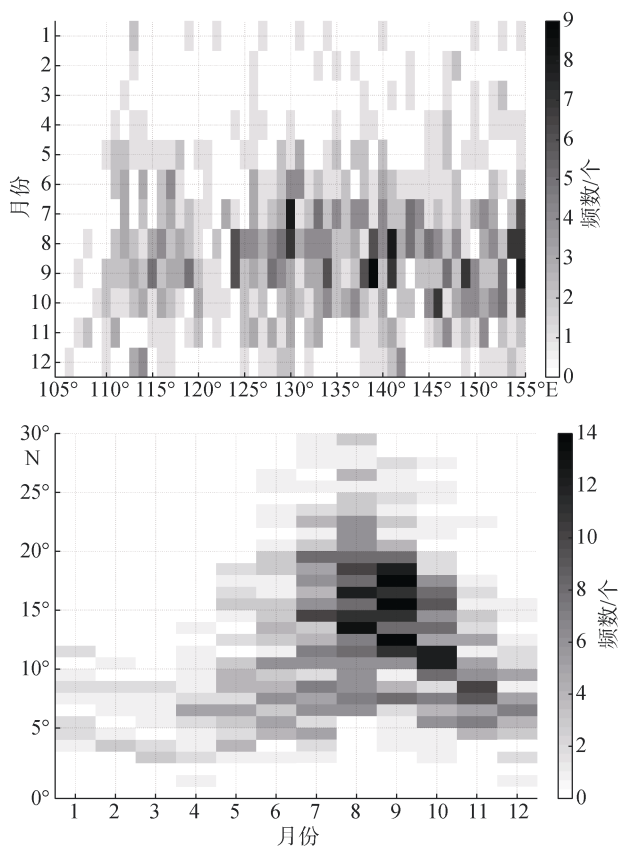


图3 1982—2014年西北太平洋各月生成TC的经纬度分布
Fig.3 Latitude and longitude distribution of the monthly cumulative frequency and percentage distribution of TC from 1982 to 2014 in the Northwest Pacific

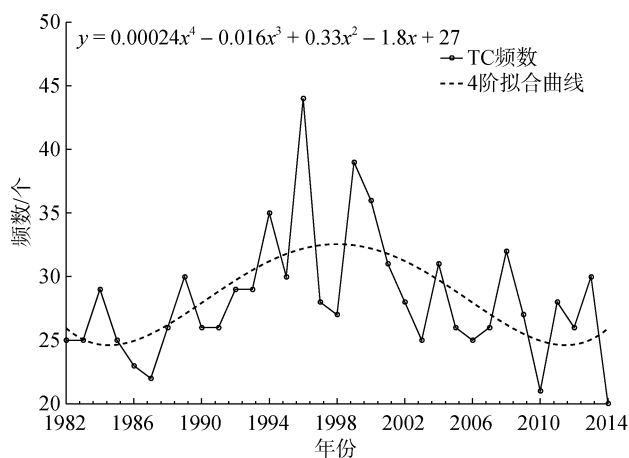


图4 1982—2014年西北太平洋TC频数的年际变化
Fig.4 Interannual change in the TC frequency from 1982 to 2014 in the Northwest Pacific

可得出TC源地发生频数空间分布图(见图5),从图中可以看出,TC源地集中在 $5^{\circ}\sim 22^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\sim 155^{\circ}\text{E}$, TC的源地集中区有3个,分别为 $10^{\circ}\sim 22^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$, $8^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $125^{\circ}\sim 145^{\circ}\text{E}$ 和 $5^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $145^{\circ}\sim 155^{\circ}\text{E}$,

这3个源地中发生的TC次数约各占总TC数量的27%, 46%, 21%, 其余TC均分布于这3个源地周围,第2个TC源地的发生频数远多于其他两个源地。

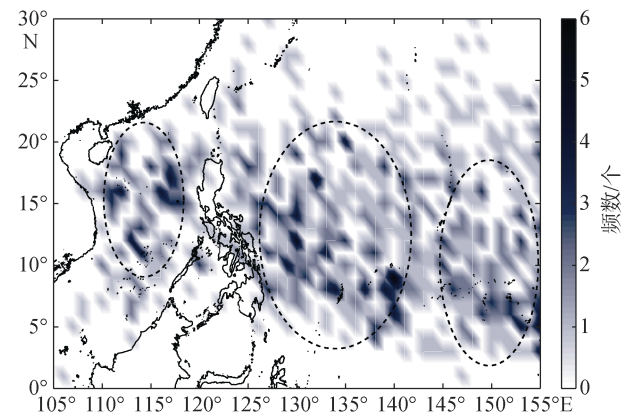


图5 1982—2014年西北太平洋TC源地的空间分布
Fig.5 Spatial distribution of TC birthplace in the Northwest Pacific from 1982 to 2014

2.4 西北太平洋TC的年持续时间、强度的变化

除了发生频数之外,全球变暖背景下TC的持续时间以及强度变化也是衡量TC活动的重要指标。Knutson等^[21-22], Knutson和Tuleya^[23-24]对全球变暖环境场进行模拟,认为飓风在变暖的环境下强度会增加,降雨会增强。在过去50年热带海洋表层一直有增温的趋势^[25], Houghton等^[26]认为在21世纪TC强度极有可能增加5%~10%。除西南太平洋以外,这对热带气旋活动是有影响的。在过去30年,西北太平洋最大风速超过59 m/s的台风有增多趋势^[27]。Trenberth^[28]认为全球变暖加强了TC活动强度与降水。

本文统计了1982—2014年西北太平洋TC的年际持续时间以及TC的最大强度和平均强度(见图6—图7),可见,近33年来,西北太平洋TC年持续时间呈减少趋势,而TC的最大强度和平均强度呈上升趋势。这意味着,尽管发生TC的天数在减少,但是TC的强度在增加,发生超强TC的几率有可能变大,TC的潜在威胁有可能加剧。

3 西北太平洋TC活动与海洋上层热状态间的关系

3.1 TC活动与SST的关系

关于TC与SST之间关系的研究,就年代际变化

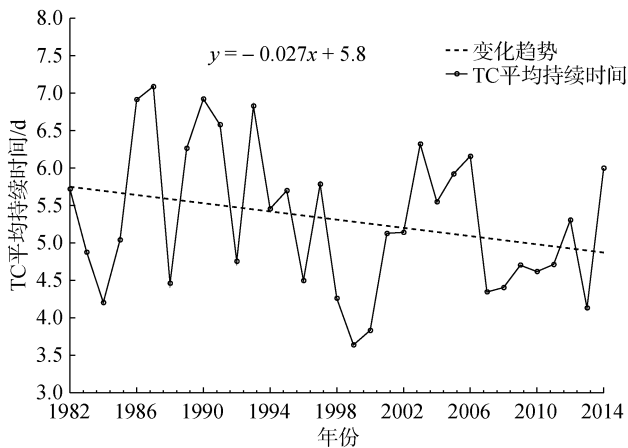


图6 1982—2014年西北太平洋TC平均持续时间变化
Fig.6 Average duration changes of TC in the Northwest Pacific from 1982 to 2014

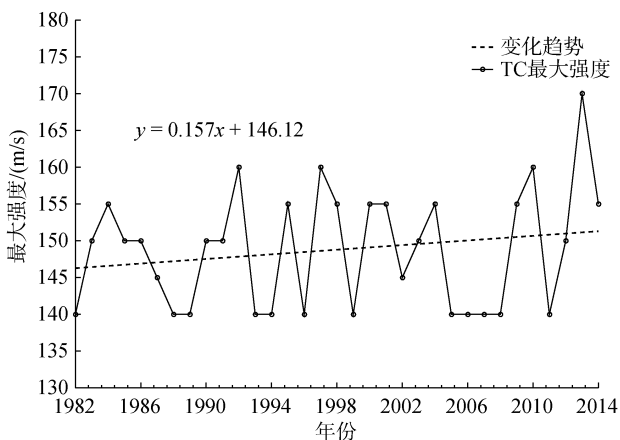
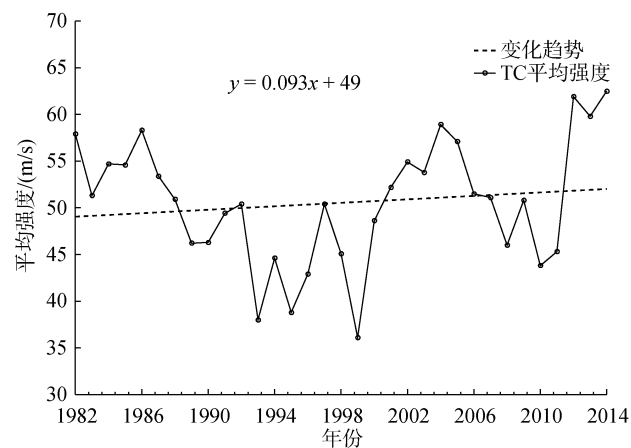


图7 1982—2014年西北太平洋TC年际平均强度和最大强度变化
Fig.7 Interannual mean and maximum intensity changes of TC in the Northwest Pacific from 1982 to 2014

而言,前人认为温暖的SST为TC的发展提供了更加有利的环境^[29];对海洋上层400 m热含量和11个标准层海温数据分析发现,TC活动与海洋热力变化存

在一定的联系,认为海洋次表层的温度暖异常可能是导致TC年生成频数多的重要原因,但海温变化对台风数量的影响并不是主要引导因素^[11]。更多的研究主要集中在探讨TC活动与赤道中东太平洋SST变化所引起的ENSO事件的联系^[30-31]。杨亚新^[15]指出:在赤道中东太平洋暖异常年,TC发生频数偏少,较常年平均偏少2~3个,但强度偏强。WANG等^[32]、黄菲等^[33]指出在El Niño年,TC生成的位置偏东,超强台风数量较多,La Niña年TC生成的位置偏西,超强台风数量会较少,ENSO现象不能直接影响TC的生成频数,但是会影响热带气旋的发展、加强过程。陈光华、黄荣辉^[14]、吴迪生等^[34]研究指出,ENSO事件与西北太平洋TC生成总数之间没有明显的关系,但在El Niño年的夏秋季,西北太平洋东南海域TC活动频繁,西北海域活动减弱。

目前的研究主要集中在探讨TC活动与赤道中东太平洋SST变化所引起的ENSO事件的联系上,对TC活动的年代际、年际变化研究较多,对季节变化研究较少。

3.1.1 西北太平洋TC源地分布与SST的关系

相对于1982年之前年份,近33年来西北太平洋全区SST普遍上升,增温幅度为0~1.6℃,增温幅度最高的为我国东海沿岸海区,其次为西北太平洋暖池区(图8)。使用1982—2014年西北太平洋(0°~30°N, 105°~155°E)SST数据,计算SST多年月均温及年均温,利用统计的TC源地数据资料,分析西北太平洋SST多年年均温度、月均温度与TC源地分布情况,探讨TC与SST之间的关系;结果见图9,西北太平洋1982—2014年TC与多年SST空间分布图。从TC的源地分布与等温线的分布情况可以看出,TC源地

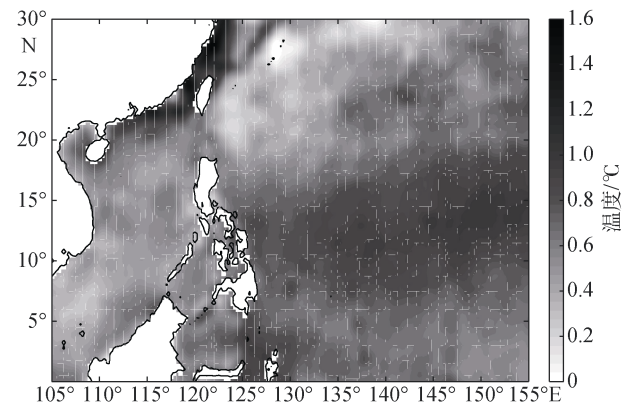


图8 1982—2014年西北太平洋SST增温情况
Fig.8 SST warming situation in the Northwest Pacific from 1982 to 2014

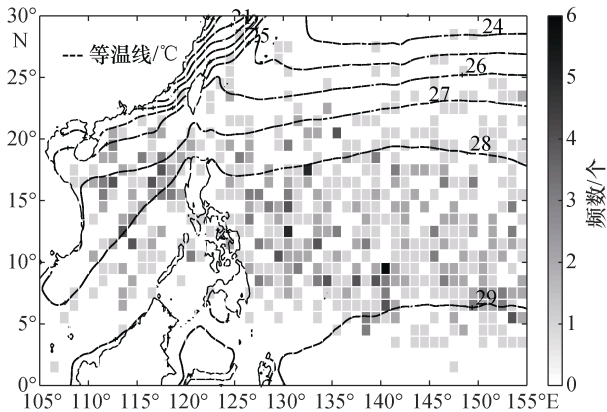


图9 1982—2014年西北太平洋TC源地与年平均SST空间分布关系

Fig.9 Spatial distribution of TC birthplace and mean SST from 1982 to 2014 in the Northwest Pacific

集中分布于 27°C 等温线以南的高温海区, 其中 87% 以上的 TC 分布在 28~29°C 等温线之间的海区。

3.1.2 西北太平洋各季节 TC 源地随 SST 的变化

从西北太平洋 1982—2014 年各季节 TC 发生源地与 SST 的分布关系图(图 10)中可以看出, 冬季: 1 月 TC 均发生在 27°C 等温线以南海区, 分布在 4°~12°N 的范围内; 2 月 TC 都发生在 27°C 等温线以南海区, 分布在 4°~11°N 的范围内; 3 月 TC 都发生在 27°C 等温线以南海区, 但此时 80% 的 TC 都发生在 28°C 等温线以南海区, 分布在 3°~9°N 的范围内。春季: 4 月所有 TC 均发生在 28°C 等温线以南海区, 分布在 1°~14°N 的范围内; 5 月西北太平洋 SST 显著升高, 等温线北移, 相对于冬季, TC 源地也向西北方向偏移, TC 都发生在 27°C 等温线以南海区, 分布在 3°~19°N 的范围内; 6 月西北太平洋海温进一步升高, 等温线向高纬度移动, 此时 TC 源地也进一步向西向北方向偏移, 集中在西北太平洋中西部海区, 且均发生在 27°C 等温线以南海区, 86% 的 TC 发生在 29°C 等温线以南海区。夏季: 7 月 TC 频数明显增加, 源地分布范围较广, 等温线向高纬度移动, TC 源地位置也向东向北移动, TC 均发生在 28°C 等温线以南海区。分布在 3°~30°N 的范围内; 8 月 TC 频数全年最高, 空间分布范围广阔, TC 源地随暖池中心东移且空间分布较为分散, 分布在 7°~30°N 的范围内; 9 月等温线向低纬方向移动, TC 源地也随之南移, TC 源地空间分布集中于暖池中心最高温区域, TC 源地集中于纬度带 4°~28°N 之间。秋季: 10 月 TC 频数减少, TC 源地随等温线南移而南移, 分布在 3°~28°N 的范围内; 11 月等温线南移, TC 源地位置也进一步南移,

均发生在 27°C 等温线以南海区, 分布在 5°~23°N 的范围内; 12 月 TC 源地位置进一步南移, 分布在 1°~16°N 的范围内。

将西北太平洋 1982—2014 年各月 TC 分布与 SST 等温线分布建立关系图(图 11)可以看出, 西北太平洋 TC 均发生在 SST 高于 27°C 的海域, 冬季 TC 发生的纬度位置较低, 分布范围较小, 绝大部分 TC 发生在 27~29°C 等温线之间的海区; 随着温度的升高, 等温线向高纬度移动, 春季、夏季 TC 发生的纬度位置较高, 分布范围大, 并且集中发生在 28~30°C 等温线之间的海区, 其中发生在 29~30°C 等温线之间的比例均高于 70%; 秋季 TC 源地向低纬度方向移动, TC 发生源地集中在 27~29°C 等温线之间的海区。

3.1.3 TC 频数、持续时间、平均强度、最大强度与 SST 变化的相关关系

利用 1982—2014 年西北太平洋 SST 和 TC 年生成频数、平均持续时间、平均强度和最大强度进行超前滞后相关分析, 结果如表 1 所示。当 SST 变化超前 TC 1 年时, 西北太平洋 TC 活动与 SST 表现为正相关, 相关系数为 0.35, 这可能意味着在 TC 年生成频数增多前 1 年 SST 上升, SST 的上升将会为 TC 的爆发积蓄一定的能量。当 SST 的变化滞后 TC 1 年时, TC 活动与 SST 表现为负相关, 相关系数为 -0.31, 这可能说明在 TC 发生次年西北太平洋由于受 TC 活动作用的影响, SST 下降。当同期相关时, 西北太平洋 SST 与 TC 平均持续时间呈现为负相关, 相关系数为 -0.45, 说明尽管目前 SST 表现为上升趋势, 但是 TC 年持续时间有可能减少。通过对 SST 与 TC 强度的相关分析可得出, SST 与 TC 强度没有表现出显著的相关关系, 就年际变化而言, SST 并不是影响 TC 强度变化的主要因素。

3.1.4 西北太平洋不同 TC 源地的 TC 频数与 SST 的相关关系

如上所述, 西北太平洋 TC 有 3 个较为明显的源地, 为了探讨 33 年来各 TC 源地的 SST 变化与 TC 发生频数的关系, 分别建立了各源地年 SST 与 TC 的关系图(图 12), 图中 SST 与 TC 的相关系数 R 均通过了 95% 置信度检验。从图中可看出, 源地 1 的 TC 与 SST 的年际变化表现为正相关, 相关系数为 0.34。这说明随着 SST 上升, TC 频数有可能上升。源地 2 也表现出了同样的变化趋势, 且趋势更明显。相反的是, 在源地 3, TC 与 SST 呈现出负相关, 相关系数为 -0.19。这意味着随着海洋表层温度增暖, TC 频数有可能减少。

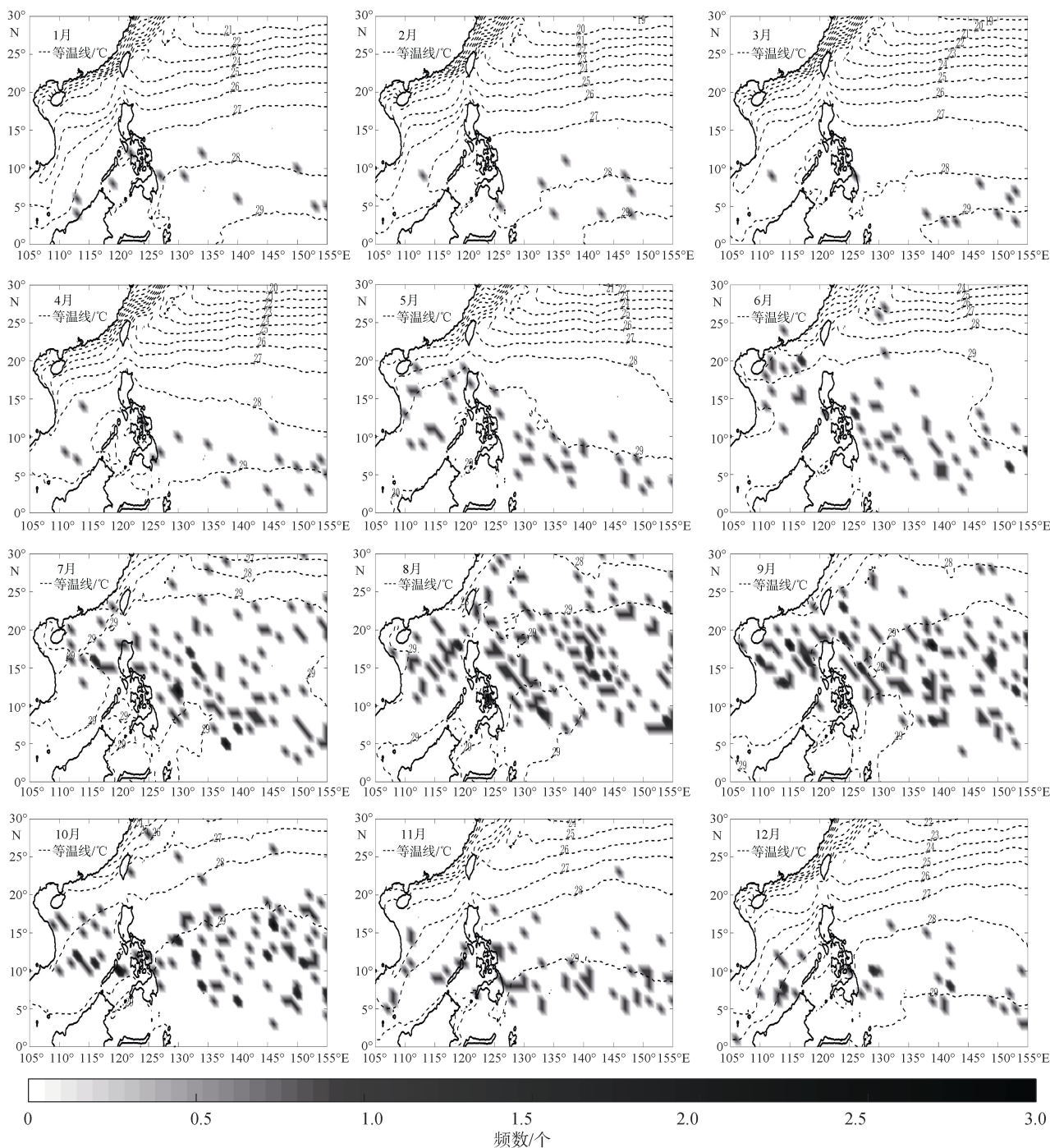


图 10 1982—2014 年西北太平洋各季节 TC 源地与 SST 空间分布

Fig.10 Spatial distribution of TC birthplace and average monthly SST for 1982 to 2014 in the Northwest Pacific

不同的 TC 源地为何会出现明显不同的变化趋势呢？除了热力条件之外，是否有其他因素在影响着 TC 的活动，如动力因素。前人通过研究认为，动力环境的空间差异改变了近几年 TC 变化的相应模式。全球变暖导致西太平洋与中东太平洋纬向温度梯度加大，从而导致 walker 环流的加强，正在加强的 walker 环流能够加强热带西北太平洋风垂直切变与相

对涡度的变化，从而影响西北太平洋 TC 活动的时空变化^[35]。此外，在近赤道附近逐渐加强的低空东风带发生的经向切变，由经向切变所形成的低空反气旋流，这样的异常反气旋流可能是抑制 TC 形成的一个重要因素。另外，有研究指出，近年来在中太平洋低纬区域出现了风垂直切变与相对涡度减弱的趋势^[36]，这极有可能是本研究中源地 3 TC 频数减少的主要因素。

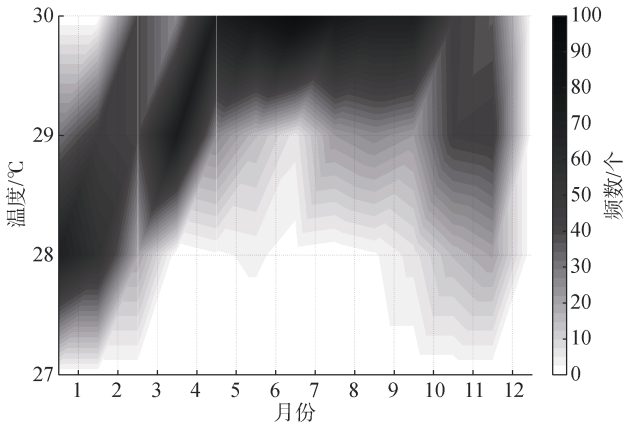


图 11 1982—2014 年西北太平洋各月 TC 与 SST 等温线分布的关系

Fig.11 Spatial distribution of the monthly TC and SST isotherm for 1982 to 2014 in the Northwest Pacific

表 1 西北太平洋 TC 年频数、持续时间、平均强度和最大强度与 SST 相关分析

Tab.1 Analysis between frequency, duration, maximum intensity, and mean intensity of the TC in the Northwest Pacific and the SST

	SST 超前 1 年	与 SST 同期	SST 滞后 1 年
TC 年频数	0.35*	0.02	-0.31*
TC 平均持续时间	-0.44	-0.45*	-0.14
TC 平均强度	-0.15	-0.1	0.24
TC 最大强度	-0.03	0.24	0.26

注：表中加*的数值表示通过 95%置信度检验

TC 源地 1 与源地 2 更靠近东亚大陆，通过以上分析可知，这两个区域的 TC 频数呈现上升趋势，这意味着在未来，TC 活动有可能加剧威胁东亚沿海国家。

3.2 TC 活动与海洋上层热含量的关系

以往的研究多采用 SST 作为基本海洋参数，但 SST 受海面热通量的严重影响，尤其是在 TC 活动频繁的夏秋季节。在此期间，SST 仅代表海洋浅薄层的温度状况，不能充分表现海洋热力状态的动力学过程^[37]。另外，西太平洋海域的 TC 活动受到 ENSO 的强烈影响^[38-39]，而西太平洋上层海洋的热力变化直接反应了 ENSO 的变化趋势^[40-43]。进一步的观测资料表明，在 ENSO 事件期间，次表层海温异常 (SOTA) 比 SST 更加明显，特别在温跃层较深的热带西太平洋^[37]。因此有必要从通过分析上层海洋的热力变化特征来考虑海洋对 TC 的影响。

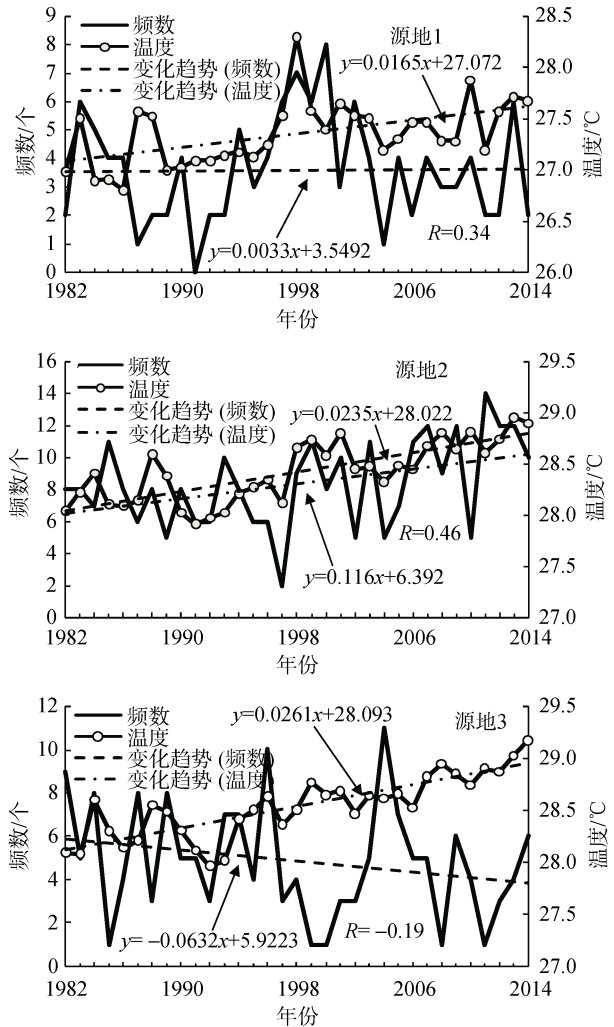


图 12 1982—2014 年西北太平洋各 TC 源地 SST 与 TC 频数的关系

Fig.12 Spatial distribution of each TC birthplace and SST in the Northwest Pacific from 1982 to 2014

近 33 年来，西北太平洋上层热含量总体呈上升趋势(图 13)，其中 15°N 以南海域热含量上升最为明显。利用 1982—2014 年西北太平洋上层热含量和 TC 年生成频数、平均持续时间、平均强度和最大强度进行超前滞后相关分析，结果如表 2 所示。当 TC 频数与热含量同期相关时，相关系数为 0.53，说明海洋上层热含量的上升可能会带来 TC 频数的增加。TC 平均持续时间和热含量在同期表现为负相关，相关系数为-0.68，这意味着随着海洋上层热含量的增加，尽管 TC 频数有上升趋势，但 TC 平均持续时间有可能下降。热含量滞后 TC 1 年时，相关系数为-0.5。也就是说，在 TC 发生后，西北太平洋的热含量可能受 TC 活动的影响而有所下降。当热含量超前 TC 1

年时,西北太平洋 TC 的平均强度和最大强度与热含量表现为正相关,相关系数分别为 0.48 和 0.4。这可能意味着在 TC 生成前 1 年,西北太平洋热含量增加,这将为次年 TC 的爆发积蓄了一定的能量,从而导致 TC 的强度显著增加。可以推测,伴随着海洋上层热含量的增加,强 TC 和超强 TC 的数量以及发生几率极有可能显著增加。在未来,TC 活动对西北太平洋沿海国家的威胁有可能加剧。

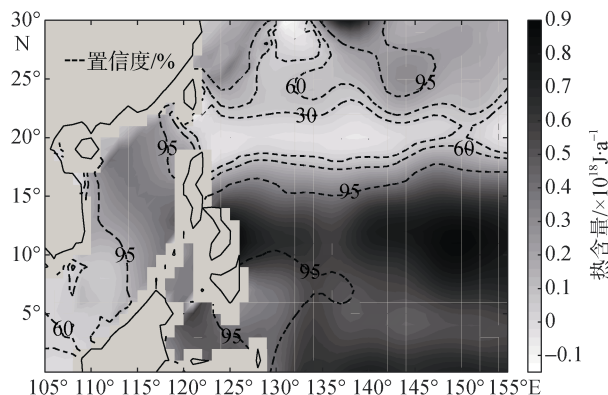


图 13 1982—2014 年西北太平洋上层热含量年变化率
Fig.13 Annual change in the rate of heat content in the Upper Pacific of the Northwest Pacific from 1982 to 2014

表 2 西北太平洋 TC 年频数、持续时间、平均强度和最大强度与热含量相关分析

Tab.2 Analysis between frequency, duration, maximum intensity, and mean intensity of the TC in the Northwest Pacific and the heat content

	热含量 超前 1 年	与热含量 同期	热含量 滞后 1 年
TC 年频数	-0.16	0.53*	0.14
TC 平均持续时间	-0.2	-0.68*	-0.5*
TC 平均强度	0.48*	-0.21	-0.25
TC 最大强度	0.4*	-0.26	-0.32

注:表中加*的数值表示通过 95%置信度检验

4 结论与讨论

通过对 1982—2014 年西北太平洋 TC 活动季节和年变化特征的分析,发现 TC 频数具有显著的年代际变化特征,表现为:1982—1992 年和 2003—2014 年皆为低频期,而 1993—2002 年则为高频期,33 年来 TC 发生频数表现为缓慢增加—快速增加—减少的特征。最近 15 年(2000—2014 年),TC 数量呈现明显下降的趋势。从各季 TC 的长期趋势上看,夏季 TC 频数有下降的趋势,春末、秋末冬初有增加的趋势,

盛冬、初春没有明显变化。

西北太平洋有 3 个明显的 TC 源地,伴随着 SST 的上升,源地 1、源地 2 的 TC 频数呈上升趋势,而源地 3 频数却呈下降趋势。这种变化极有可能是因为全球变暖导致西太平洋与中东太平洋纬向温度梯度加大,从而导致 walker 环流的加强,正在加强的 walker 环流能够加强热带西北太平洋风垂直切变与相对湿度的变化,从而影响西北太平洋 TC 活动的变化。另外,异常反气旋流以及中太平洋低纬区域风垂直切变与相对湿度的减弱,极有可能是本研究中源地 3 TC 频数减少的主要因素。

在全球增暖背景下,海洋上层热状态的变化给 TC 带来的影响是多方面的。在 TC 年生成频数增多前 1 年 SST 上升,SST 的上升将会为 TC 的爆发积蓄一定的能量。当 SST 滞后 TC 1 年时,TC 活动与 SST 表现为负相关,这可能说明在 TC 发生次年西北太平洋由于受 TC 活动作用的影响,SST 下降。当同期相关时,尽管 SST 表现为上升趋势,但是 TC 平均持续时间有可能减少。通过对 TC 和海洋上层热含量进行分析,同期相关时,海洋上层热含量的上升可能会带来 TC 频数的增加。TC 平均持续时间和热含量在同期表现为负相关,这意味着随着海洋上层热含量的增加,TC 持续时间有可能下降。当热含量超前 TC 1 年时,TC 的平均强度和最大强度与热含量表现为正相关,由此可推测伴随着海洋上层热含量的增加,强 TC 和超强 TC 的数量以及发生几率极有可能显著增加。在未来,TC 活动对西北太平洋沿海国家的威胁有可能加剧。

参考文献:

- [1] IPCC. Working group I contribution to the IPCC fifth assessment report (AR5). Climate change 2013: The physical science basis. Final draft underlying Scientific-Technical assessment[R/OL]. [2013-10-30]. http://www.climatechange2013.org/images/uploads/WGIAR5_WGI-12Doc2b_FinalDraft_ALL.pdf.
- [2] Miler B I. On the maximum intensity of hurricanes[J]. Journal of Meteorology, 1958, 15: 184-195.
- [3] Emanuel K A. The dependence of hurricane intensity on climate[J]. Nature, 1987, 326: 483-485.
- [4] Emanuel K A. The maximum intensity of hurricanes[J]. Journal of Atmosphere Science, 1988, 45: 1143-1155.
- [5] Gray W M. Global view of the origin of tropical disturbances and storms[J]. Mon Weather Rev, 1968, 96: 669-700.

- [6] Elsner J B, Kocher B. Global tropical cyclone activity: a link to the North Atlantic oscillation[J]. *Geophys Res Lett*, 2000, 27: 129-132.
- [7] Chan J C L, Liu K S. Global warming and western North Pacific typhoon activity from an observational perspective[J]. *J Climate*, 2004, 17: 4590-4602.
- [8] Elsner J B, Kossin J P, Jagger T H. The increasing intensity of the strongest tropical cyclones[J]. *Nature*, 2008, 455: 92-95.
- [9] Emanuel K A. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years[J]. *Nature*, 2005, 436: 686-688.
- [10] Emanuel K A, Sundararajan R, Williams J. Hurricanes and global warming: results from downscaling IPCC AR4 simulations[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 2008, 89: 347-367.
- [11] 刘钦燕, 周文. 西北太平洋台风数目与海洋热含量的年代际关系分析[J]. *热带气象学报*, 2010, 29(6): 8-14.
Liu Qinyan, Zhou Wen. Relationship between typhoon activity in the northwestern Pacific and the up-per-ocean heat content on interdecadal time scale[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2010, 29(6): 8-14.
- [12] 陈大可, 雷小途, 王伟, 等. 上层海洋对台风的响应和调制机理[J]. *地球科学进展*, 2013, 28(10): 1077-1086.
Chen Dake, Lei Xiaotu, Wang Wei, et al. Upper ocean response and feedback mechanisms to typhoon[J]. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(10): 1007-1086.
- [13] Chan J C L. Interannual and interdecadal variations of tropical cyclone activity over the western North Pacific[J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2005, 89(1): 143-152.
- [14] 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.
Chen Guanghua, Huang Ronghui. The effect of warm pool thermal states on tropical cyclone in west north-west Pacific[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2006, 22(6): 527-532.
- [15] 杨亚新. 西北太平洋热带气旋发生的时空变化特征[J]. *海洋预报*, 2005, 22(1): 86-91.
Yang Yaxin. Spatial-temporal variation feather of occurrence of tropical cyclone in western north Pacific[J]. *Marine Forecasts*, 2005, 22(1): 86-91.
- [16] 周俊华, 史培军, 陈学文. 1994~1999 年西北太平洋热带气旋活动时空分异研究[J]. *自然灾害学报*, 2002, 11(3): 44-49.
Zhou Junhua, Shi Peijun, Chen Xuewen. Spatio-temporal variability of tropical cyclone activities in the western North Pacific from 1949 to 1999[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2002, 11(3): 44-49.
- [17] 梁健, 李晓娟, 谢定升, 等. 南海热带气旋的气候变化及强度预测方法研究[J]. *海洋科学*, 2008, 32(12): 29-34.
Liang Jian, Li Xiaojuan, Xie Dingsheng, et al. A study on the climate characteristics and the intensity prediction of the tropical cyclones affected in the South China Sea[J]. *Marine Sciences*, 2008, 32(12): 29-34.
- [18] 张艳霞, 钱永甫, 王谦谦. 西北太平洋热带气旋的年代际和年代际变化及其与南亚高压的关系[J]. *应用气象学报*, 2004, 15(1): 74-80.
Zhang Yanxia, Qian Yongfu, Wang Qianqian. The interannual and interdecadal variations of tropical cyclones in the Northwest Pacific and its relationship with the South Asia high[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2004, 15(1): 74-80.
- [19] 黄勇, 李崇银, 王颖. 西北太平洋生成热带气旋的年代际变化[J]. *解放军理工大学学报: 自然科学版*, 2008, 9(5): 557-564.
Huang Yong, Li Chongyin, Wang Ying. Interdecadal variability of tropical cyclone formation in the north-west Pacific[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology*, 2008, 9(5): 557-564.
- [20] 王毅, 石汉青, 黄思训. 西北太平洋热带气旋的时空分布特征分析[J]. *自然灾害学报*, 2009, 18(6): 166-174.
Wang Yi, Shi Hanqing, Huang Sixun. Spatio temporal distribution of tropic cyclones in North-West Pacific Ocean[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2009, 18(6): 166-174.
- [21] Knutson T R, Tuleya R E, Kurihara Y. The recent increase in Atlantic hurricane activity: causes and implications[J]. *Science*, 1998, 279: 1018-1020.
- [22] Knutson T R, Tuleya R E, Shen W, et al. Impact of CO₂-induced warming on hurricane intensities as simulated in a hurricane model with ocean coupling[J]. *J Climate*, 2001, 14: 2458-2468.
- [23] Knutson T R, Tuleya R. E. Increased hurricane intensities with CO₂-induced warming as simulated using the GFDL hurricane prediction system[J]. *Clim Dyn*, 1999, 15: 503-519.
- [24] 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]. *J Climate*, 2004, 17: 3477-3495.
- [25] Kumar A, Yang F, Goddard L, et al. Differing trends in the tropical surface temperatures and precipitation over land and oceans[J]. *J Climate*, 2004, 17: 653-664.
- [26] IPCC. *Climate Change 2001: the Scientific Basis*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 1-881.
- [27] Webster P J, Holland G J, Curry J A, et al. Changes in tropical cyclone number, duration and intensity in a

- warming environment[J]. *Science*, 2005, 309: 1844-1846.
- [28] Trenberth K. Warmer oceans, stronger hurricanes[J]. *Scientific American*, 2007, 297(297): 45-51.
- [29] Gabriel A. Effect of remote sea surface temperature change on tropical cyclone potential intensity[J]. *Nature*, 2007, 12(13): 1066-1070.
- [30] 林惠娟, 张耀存. 影响我国热带气旋活动的气候特征及其与太平洋海温的关系[J]. *热带气象学报*, 2004, 20(2): 218-224.
Lin Huijuan, Zhang Yaocun. Climatic features of the tropical cyclone influencing China and its relationship with the sea surface temperature in the Pacific Ocean[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2004, 20(2): 218-224.
- [31] Chen T C, Weng S P, Yamazaki N, et al. Interannual Variation in the Tropical Cyclone Formation over the Western North Pacific[J]. *Monthly Weather Review*, 1998, 126(4): 1080-1090.
- [32] Wang B, Chan J C L. How strong ENSO events affect tropical storm activity over the western North Pacific[J]. *J Climate*, 2002, 15(13): 1643-1658.
- [33] 黄菲, 许士斌. 西北太平洋超强台风活动特征及其与 ENSO 的关系[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2009, 39(5): 883-888.
Huang Fei, Xu Shibin. Characteristics of super typhoon activity over western North Pacific and its relationship with ENSO[J]. *Periodical of Ocean University of China (Natural Science Edition)*, 2009, 39(5): 883-888.
- [34] 吴迪生, 白毅平. 赤道西太平洋暖池次表层水温变化对热带气旋的影响[J]. *热带气象学报*, 2003, 19(3): 253-259.
Wu Disheng, Bai Yiping. The influence of variation of subsurface ocean temperature in the equatorial Western Pacific warm pool on tropical cyclones[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2003, 19(3): 253-259.
- [35] Park D S R, Ho C H, Kim J H, et al. Spatially inhomogeneous trends of tropical cyclone intensity over the western North Pacific for 1977-2010[J]. *J Climate*, 2013, 26: 5088-5101.
- [36] Gu Chenglin, Kang Jiancheng. Spatial and temporal variability of Northwest Pacific tropical cyclone activity in a global warming scenario[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2016, 22: 15-23
- [37] 陈永利, 赵永平, 王凡. ENSO 与海洋环境和中国气候异常[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
Chen Yongli, Zhao Yongping, Wang Fan. ENSO and Marine Environment and Climate Anomalies in China[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [38] Landsea C W, Pielke Jr R A, Mestas-Nuñez A M, et al. Atlantic Basin Hurricanes: indices of climatic changes[C]// Thomas R K. *Weather and Climate Extremes*. Netherlands: Springer Netherlands, 1999: 89-129.
- [39] Camargo S J, Sobel A H. Western North Pacific Tropical Cyclone Intensity and ENSO[J]. *Journal of Climate*, 2005, 18(15): 2996-3006.
- [40] Mcphaden M J. Climate oscillations - Genesis and evolution of the 1997-98 El Niño[J]. *Science*, 2007, 85(5): 5395-5403.
- [41] 李崇银, 穆明权. 厄尔尼诺的发生与赤道西太平洋暖池次表层海温异常[J]. *大气科学*, 1999, 23(5): 513-521.
Li Chongyin, Mu Mingquan. The Occurrence of the El Nino event and the subsurface temperature anomaly of warm pool in the equatorial western Pacific[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1999, 23(5): 513-521.
- [42] Chao J, Yuan S, Chao Q, et al. A data analysis study on the evolution of the El Niño/La Niña cycle[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2002, 19(5): 837-844.
- [43] 于卫东, 乔方利. ENSO 事件中热带太平洋上层海洋热含量变化分析[J]. *海洋科学进展*, 2003, 21(4): 446-453.
Yu Weidong, Qiao Fangli. Analysis of the heat content variability of the tropical Pacific Upper Ocean during ENSO events[J]. *Advances in Marine Science*, 2003, 21(4): 446-453.

Spatial and temporal variation of the Northwest Pacific tropical cyclone and its relation with the thermal status of Upper Ocean in the past 30 years

CHEN Zhi-wei¹, KANG Jian-cheng¹, GU Cheng-lin^{1, 2}, TANG Ming^{1, 3}

(1. Urban Ecology and Environment Research Center, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China;

2. Department of Resources and Environment, Faculty of Science, Jiamusi University, Jiamusi 154007, China;

3. Poyang Lake Eco-economy Research Center, Jiujiang University, Jiujiang 332000, China)

Received: Oct. 17, 2016

Key words: the Northwest Pacific; the South China Sea; tropical cyclone; thermal state of Upper Ocean; climate change

Abstract: Data from the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Optimum Interpolation (1/4)^o Daily Sea Surface Temperature Analysis, the National Oceanographic Data Center (NODC) Upper Ocean heat content, and the Joint Typhoon Warning Center (JTWC) best-track tropical cyclone (TC) for the period 1982 to 2014 was utilized in order to analyze the spatial and temporal characteristics of the Northwest Pacific (0^o–30^oN, 105^o–155^oE) tropical cyclone activities. Our research on the relation between the tropical cyclone and the thermal structure of the Upper Ocean which indicates the following: The interannual variation in the frequency of tropical cyclone is evident. The low-frequency years were from 1982 to 1992 and 2003 to 2014, whereas the high-frequency years were from 1993 to 2002. For the period from 1982 to 2014, the frequency characteristics of cyclones were slow increase, rapid increase, decrease in that order. The number of tropical cyclones has shown a clear downward trend in the last 15 years (2000–2014). Tropical cyclone originates from three distinct birthplaces: birthplace 1 (10^o–22^oN, 110^o–120^oE), birthplace 2 (8^o–20^oN, 125^o–145^oE), and birthplace 3 (5^o–20^oN, 145^o–155^oE). The frequency of TC in birthplace 1 and birthplace 2 increases slowly, whereas the frequency of TC in birthplace 3 decreases significantly. The influence of changes in the thermal state of the upper ocean to the TC is multifaceted TC frequency response to the upper heat content more obvious. The sea surface temperature is not the key factor affecting the frequency of the TC. With the warming of the Upper Ocean, the duration of the TC shows a decreasing trend, whereas the TC intensity shows an increasing trend. Global warming will intensify the potential threat posed by TC activities to the Pacific Northwest countries.

(本文编辑: 刘珊珊)