



西北太平洋热带气旋活动 及其反馈效应

钟中 哈瑶 陈宪 王天驹 著



科学出版社

西北太平洋热带气旋活动 及其反馈效应

钟 中 哈 瑶 陈 宪 王天驹 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书内容包括两个部分, 分别是大气环流和海洋热状况对西北太平洋热带气旋活动的影响, 以及热带气旋活动对大尺度环流和气候的反馈效应。第一部分阐述了热带太平洋厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)不同位相和热带印度洋海温异常对西北太平洋热带气旋活动影响的差异性, 第二部分阐明了夏季西北太平洋热带气旋活动对东亚-西北太平洋区域季风环流系统主要成员的反馈作用及其动力学和热力学机制。

本书可供气象、海洋、水文和环境科学等相关专业的科研人员和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

西北太平洋热带气旋活动及其反馈效应/钟中等著. —北京: 科学出版社, 2020.3

ISBN 978-7-03-063536-5

I. ①西… II. ①钟… III. ①太平洋-热带低压-影响-研究 IV. ①P444

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 265299 号

责任编辑: 沈 旭 黄 梅 洪 弘/责任校对: 杨聪敏

责任印制: 师艳茹/封面设计: 许 瑞

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

三河市春园印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2020 年 3 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2020 年 3 月第一次印刷 印张: 14 1/2

字数: 289 000

定价: 148.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

全球热带海洋上每年有 80~90 个热带气旋 (TC) 生成, 其中大约有 2/3 发展成台风或飓风, TC 成为热带天气系统的主要成员之一。西北太平洋是 TC 的频发区, 每年平均发生近 30 个, 约占全球的 1/3, 其中夏季 TC 占全年的 40% 以上。西北太平洋 TC 又是东亚-西北太平洋区域气候系统的特殊成员, 其特殊性表现在热带气旋的时空尺度属于天气系统范畴, 因此, 大尺度大气环流和海洋热状况对 TC 活动的调制作用成为普遍关注的热点研究课题。另外, TC 活动也会通过反馈作用引起大气环流和海洋热状况发生变化, 例如, TRMM 卫星资料已给出了 TC 活动通过冷尾效应引起海面温度 (SST) 分布异常从而产生间接气候效应的新证据。从 TC 对大气的直接反馈作用看, TC 强风和强降水能明显改变受其影响区域内大气环流的状况, TC 在热带海域生成后裹挟大量的热量和水汽向中高纬度区域移动, 将其携带的能量向热带外输送和频散, 从而影响能量的输送、分配和平衡。这种反馈作用产生的影响不仅仅局限在 TC 活动区域, 还会通过大气环流的输送和传播影响更大范围, 乃至引起全球大气环流发生相应的调整。因此, TC 对大尺度环流系统的直接反馈作用也是值得关注的研究课题。

本书取材于作者 10 余年来的研究工作成果, 全书共 12 章。第 1 章介绍国内外对 TC 活动年际变化规律及其反馈作用的研究现状, 剩余的 11 章分为两个部分。第一部分 (第 2 章至第 6 章) 以西北太平洋 TC 活动年际变化与 ENSO 的关系为主线, 阐述 ENSO 事件和印度洋 SST 异常对西北太平洋 TC 活动的调制作用, 第 2 章揭示 ENSO 对西北太平洋 TC 动能及其经向能量输送的影响; 第 3 章通过对西北太平洋 TC 活动的能量来源进行诊断分析, 明确 ENSO 冷暖位相期间正压能量转化对西北太平洋 TC 生成的作用; 第 4 章和第 5 章针对 ENSO 循环不同位相, 分离不同类型的热带太平洋增暖衰亡事件和冷事件, 阐述不同类型 ENSO 事件对西北太平洋 TC 活动影响的差异; 第 6 章研究 ENSO 循环背景下不同调制因子对 TC 活动影响的相对作用, 揭示热带印度洋海面温度异常 (SSTA) 对西北太平洋 TC 活动年际变化存在“次级调制”现象。第二部分 (第 7 章至第 12 章) 阐述西北太平洋 TC 活动对东亚-西北太平洋大尺度环流系统的直接反馈作用, 其中, 第 7 章将空间尺度因子引入 TC 累积气旋能量 (ACE) 指数, 据此揭示西北太平洋 TC 活动对与 ENSO 循环有关的太平洋大气海洋状况的潜在反馈效应; 第 8 章和第 9 章通过对比夏季西北太平洋 TC 活跃年和不活跃年大气环流差异, 揭示 TC 活动在东亚夏季风系统各成员时间演变中的作用, 以及频繁的 TC 活动对中国中

东部夏季降水和高温热浪天气的影响；第 10 章和第 11 章利用区域气候模式敏感性试验结果分析 TC 影响大尺度环流的动力学和热力学机制，并给出 TC 影响西太平洋副热带高压经向运动的物理图像；第 12 章借助“模式手术”方法的敏感性数值试验，验证 TC 活动通过反馈东亚夏季风系统从而影响中国东部环流和降水分布的统计结果。

本书第 1 章由钟中和哈瑶撰写，第 2~6 章由哈瑶撰写，第 7 章和第 9 章由钟中撰写，第 8 章、第 10 章和第 12 章由陈宪和钟中撰写，第 11 章由王天驹撰写，全书由钟中统稿。

致谢：本书研究工作和出版受国家自然科学基金（41430426，41505058）和江苏省气候变化协同创新中心项目资助。

钟 中

2019 年 10 月于南京

名词缩写表

ACE	accumulated cyclone energy	累积气旋能量
CISK	conditional instability of second kind	第二类条件不稳定
CP	Central Pacific	中太平洋
CPC	Climate Prediction Center	气候预测中心
EASJ	East Asian subtropical upper-level jet	东亚副热带高空急流
EDC	El Niño decaying mode	厄尔尼诺衰亡模态
EDV	El Niño developing mode	厄尔尼诺发展模态
EKE	eddy kinetic energy	涡动动能
EKE _{TC}	eddy kinetic energy of tropical cyclone	热带气旋涡动动能
EMI	El Niño Modoki index	赤道中太平洋尼诺指数
ENSO	El Niño-Southern oscillation	厄尔尼诺-南方涛动
EOF	empirical orthogonal function	经验正交函数
EP	Eastern Pacific	东太平洋
GPI	genesis potential index	热带气旋潜在生成指数
GPCP	Global Precipitation Climatology Project	全球降水气候计划
ITCZ	inter-tropical convergence zone	热带辐合带
JMA	Japan Meteorological Agency	日本气象厅
JTWC	Joint Typhoon Warning Center	美国台风联合预警中心
KmKe	barotropic energy conversion to synoptic-scale disturbances	正压能量转化
KmKe _{TC}	barotropic energy conversion to tropical cyclone	正压能量向热带气旋扰动转化
LTC	long-lived tropical cyclone	长生命史热带气旋
MM5	The Fifth-generation Pennsylvania State University-NCAR Mesoscale Model	美国宾夕法尼亚州立大学-国家大气研究中心第五代中尺度模式
MPI	maximum potential intensity	热带气旋最大潜在强度
NCAR	National Center for Atmospheric Research	(美国) 国家大气研究中心
NCEP	National Centers for Environmental Prediction	(美国) 国家环境预报中心

OLR	outgoing longwave radiation	向外长波辐射
PDI	power dissipation index	能量耗散指数
PDO	Pacific decadal oscillation	太平洋年代际振荡
PI	potential intensity	热带气旋潜在强度
PJ	Pacific-Japan	太平洋-日本
RMSE	root of mean square errors	均方根误差
SACE	scaled accumulative cyclone energy	考虑尺度效应的累积气旋能量
SCS	South China Sea	中国南海
SEOF	seasonal empirical orthogonal function	季节演变的经验正交函数
SLP	sea level pressure	海平面气压
SST	sea surface temperature	海面温度
SSTA	sea surface temperature anomaly	海面温度异常
TC	tropical cyclone	热带气旋
TCI	tropical cyclone index	热带气旋指数
TCGF	tropical cyclone genesis frequency	热带气旋生成频数
TCOF	tropical cyclone occurrence frequency	热带气旋路径频数
TE	tropical cyclone kinetic energy	热带气旋动能
TET	tropical cyclone kinetic energy meridional transport	热带气旋动能经向输送
TRMM	tropical rainfall measuring mission	热带降雨测量任务卫星
TMI	TRMM microwave imager	TRMM 微波成像仪
WPSH	Western Pacific subtropical high	西太平洋副热带高压

目 录

前言

名词缩写表

第 1 章 绪论	1
1.1 ENSO 对热带气旋活动的影响	2
1.2 印度洋 SSTA 对热带气旋活动的影响	5
1.3 气候变化对热带气旋活动的影响	6
1.4 热带气旋对天气系统和大尺度环流的反馈作用	9
1.5 热带气旋活动的气候效应	10
1.6 本书内容和结构安排	14

第一部分 ENSO 和印度洋海温对西北太平洋热带气旋 活动的调制作用

第 2 章 ENSO 事件期间热带气旋动能及其经向输送特征	17
2.1 移除涡旋技术	17
2.2 动能及其经向输送的统计特征	21
2.3 动能及其经向输送的时空分布	26
2.4 热带气旋对东亚大气环流的潜在影响	29
第 3 章 ENSO 事件期间热带气旋正压能量转化特征	31
3.1 正压能量转化诊断方法	31
3.2 涡动动能特征	33
3.3 正压能量转化特征	34
3.4 正压能量转化过程	38
第 4 章 太平洋增暖衰亡事件与热带气旋	41
4.1 热带太平洋增暖衰亡年的分类	41
4.2 El Niño I 型期间热带气旋生成异常的东移现象	43
4.3 热带气旋生成的统计特征	51
4.4 热带气旋生成的空间分布	52
4.5 热带气旋的路径和登陆特征	54

4.6	热带气旋活动异常的机制	59
4.6.1	El Niño I 型	59
4.6.2	El Niño II 型	60
4.6.3	El Niño III 型	62
第 5 章	两类 La Niña 事件与热带气旋活动	64
5.1	热带气旋生成的统计特征	65
5.2	正压能量转化特征	70
5.3	对 1988 年个例的解释	75
第 6 章	热带印度洋 SSTA 对热带气旋的“次级调制”作用	78
6.1	热带气旋生成的统计特征	78
6.2	ENSO 和热带印度洋 SSTA 的联合影响	84
6.2.1	ENSO 正常位相	84
6.2.2	El Niño 位相	85
6.2.3	La Niña 位相	88
6.3	不同资料长度的结果对比	91
6.4	印度洋 SSTA “次级调制”的机制分析	92

第二部分 西北太平洋热带气旋对大尺度环流的反馈作用

第 7 章	热带气旋活动对太平洋海气系统反馈作用的统计分析	99
7.1	环境场变量回归分析	100
7.1.1	850 hPa 相对涡度	100
7.1.2	表面纬向风	102
7.1.3	柱水汽含量	102
7.1.4	OLR	105
7.1.5	降水	105
7.1.6	SST	105
7.2	考虑 TC 尺度效应的 ACE	111
7.3	ACE、SACE 与 ENSO 的关系	111
7.4	热带气旋对 SACE 的相对贡献	116
第 8 章	热带气旋活动对东亚夏季风系统时间演变过程的影响	118
8.1	东亚夏季风系统各成员的时间演变特征	118
8.2	夏季东亚-西北太平洋高压系统和副热带高空急流差异	124
8.3	典型年分析	128
8.4	物理机制	131

8.5 东亚夏季风和热带气旋活动的相互促进关系	137
第 9 章 夏季热带气旋活动与中国中东部降水 and 高温热浪天气的关系	139
9.1 地面气候要素分布统计结果	139
9.2 活跃年和不活跃年的环流差异	143
9.3 典型年的环流差异	147
9.4 数值模拟验证	148
9.5 间接效应机制	150
第 10 章 热带气旋影响副热带高空急流的动力和热力过程	152
10.1 物理过程集合模拟试验方案	153
10.2 模拟效果检验	154
10.3 对副热带高空急流的影响	157
10.4 动力和热力过程分析	161
第 11 章 热带气旋对西太平洋副热带高压经向运动的影响	169
11.1 WPSH 经向运动特征的统计分析	169
11.2 数值试验	173
11.3 敏感性试验结果	174
11.3.1 Megi 转向前对 WPSH 经向运动的影响	175
11.3.2 Megi 转向后对 WPSH 脊线垂直分布的影响	178
第 12 章 热带气旋活动对区域气候影响的数值模拟	188
12.1 试验方案设计	188
12.1.1 控制试验方案	188
12.1.2 模式手术方法和 TC 抑制模块	189
12.1.3 模拟 TC 判别方法	190
12.2 模拟效果检验	190
12.3 控制试验和敏感性试验结果	194
12.4 热带气旋活动影响区域气候的物理机制	201
参考文献	207

第1章 绪 论

热带气旋(TC)是一种具有暖心结构、在热带暖洋面上生成发展,并且能量巨大的低压涡旋系统。它的水平尺度一般为数百至数千千米,而垂直高度可以达到10 km以上。按强度由弱到强,可以将TC划分为热带低压、热带风暴、强热带风暴、台风、强台风和超强台风。每年全球有80~90个TC生成(陈联寿和丁一汇,1979),由于TC常伴随着大风、暴雨、风暴潮等强烈的天气和海洋现象,并能引发局地滑坡和泥石流等次生灾害,造成严重的人员伤亡和巨大的经济损失,因此是全球主要的气象灾害之一。例如,1970年一场热带风暴袭击了孟加拉国,造成超过30万人死亡;2005年的“卡特里娜”飓风使美国新奥尔良市成为汪洋,造成全美1836人死亡,数百万人受灾,经济损失1250亿美元。

西北太平洋是全球TC活动最活跃的海域,而且是全球唯一的全年都有TC生成和活动的海域(Chia and Ropelewski, 2002)。每年约有30个TC在西北太平洋海域生成,占全球TC生成总数的1/3以上。其中有80%的TC可发展至热带风暴及其以上强度,其中大部分发展成为强台风后在东亚和东南亚沿岸登陆,给这些地区带来了人员伤亡和经济损失。东亚和东南亚大部分沿海国家和地区所遭受的自然灾害中,TC所造成的损失最为惨重。我国也是受TC影响最严重的国家之一,登陆我国的TC不仅数量多,而且往往强度巨大。平均每年大约有12个TC登陆我国华南、华东沿海地区和周边岛屿;近几年TC造成的死亡人数年平均约570人,经济损失年平均达数百亿元,占气象灾害造成损失的11%以上。因此,TC的生成源地、移动路径、强度变化、生命史长短和登陆等问题一直是大气科学研究和气象预报业务的重点问题。

虽然TC会带来巨大的灾害,但它也能将大量的水汽从海洋输送到陆地,是夏季陆地上重要的降水来源(Frank and Young, 2007)。我国除了新疆、青海和西藏外,其他地区均受到TC引发的降水影响,因而TC所导致的降水是我国夏、秋季节沿海地区重要的降水来源。同时,TC将大量水物质和能量从热带地区裹挟到副热带地区,并与副热带的天气系统相互作用,这对于不同纬度间大气物质和能量的交换,以及全球气候的变率也会产生重要的调制作用(Chen et al., 2004; Ha et al., 2013a)。

由于TC活动能够造成巨大灾害,同时也会对天气气候变化产生重要影响,因此TC活动的中长期变率及其预测也是大气科学研究的重要课题。早期的研究更多地关注TC的天气学特征,例如TC的结构、路径、强度、降水特征、登陆、

消亡及其与环境场的相互作用等 (Maloney and Hartmann, 2001); 而 TC 的气候学研究, 特别是其季节内变化、年际变化、年代尺度变化以及长期趋势等研究则起步较晚, 20 世纪 80 年代中期开始逐渐兴起 (Chan, 1985), 进入 21 世纪以来, 肇始于 Emanuel (2005) 和 Webster 等 (2005) 对全球变暖背景下 TC 活动规律变化的研究, TC 气候学再次成为热带气象学的热点研究课题。目前, 已有的大量研究基本上是采用统计和诊断方法分析 TC 长时间尺度变化特征及其与环境场的相互作用关系, 特别是大尺度大气环流和海洋热状况对 TC 活动的调制作用。

对于东亚-西北太平洋地区而言, 夏季风是影响 TC 活跃季节区域气候最重要的大尺度环流系统, 具有多尺度时间变化和非均匀空间分布特点, 并且受到热带大气 30~60 天低频振荡、厄尔尼诺-南方涛动 (ENSO) 以及太平洋年代际振荡 (PDO) 等诸多因子的调制, 这些因素都显著影响着西北太平洋的 TC 活动。另一方面, 大量的 TC 活动除自身会产生区域气候效应外, 对活动区域大尺度大气环流和海洋热状况的反馈作用也会造成气候平均态发生变化, 并且这种反馈作用还会向 TC 活动区域外传播乃至对全球气候产生不可忽视的影响, 而由于缺乏从大气环流资料中分离 TC 反馈作用的有效方法, TC 反馈效应研究一直难以深入开展, 相关的研究结果鲜有报道。

本章较系统地总结了西北太平洋和北大西洋 TC 活动及其反馈作用的研究现状。

1.1 ENSO 对热带气旋活动的影响

ENSO 是热带太平洋大气和海洋年际变化的最强信号, 大部分 TC 年际变化研究重点都放在 ENSO 对 TC 活动的影响上 (陈光华和黄荣辉, 2006)。Horsfall (2000) 指出, El Niño 事件期间, 总体上北大西洋区域的 TC 生成频数增加, 但各海域有所差异, 加勒比海增加最为明显, 相比于正常 ENSO 位相年增多可达 81%, 但墨西哥湾的 TC 活动却有所减少; 在东北太平洋热带海域, 由于暖的海面温度 (SST) 增加了海面潜热释放和感热交换, 这一海域 TC 的活动水平也有所上升。

西北太平洋是 ENSO 对 TC 活动年际变化影响最明显的海域之一 (陈联寿和丁一汇, 1979), 也是 TC 年际变化研究的热点海域 (李崇银, 1985; 林惠娟和张耀存, 2004)。Atkinson (1977) 最早注意到, 在 1972 年 El Niño 事件期间, 西北太平洋中东部生成的 TC 数目多于正常年份。Chan (1985) 利用谱方法, 发现西北太平洋 TC 生成频数存在 3.5 年周期的变化特征, 因此推测其与 ENSO 循环有关。目前普遍认为, 尽管整个西北太平洋区域 TC 发生频数的年际变化与 ENSO 指数的相关性并不明显, 但 ENSO 不同位相上不同海域 TC 的活动频次具有显著差异 (Wang and Chan, 2002), 这是因为 TC 的生成源地、强度以及生命史等变化受东亚季风槽和夏季遥相关波列活动的强烈影响 (Zhou et al., 2009; Wu et al.,

2010), 它们的时空演变特征均与 ENSO 循环有关, 因而表现出 TC 活动对 ENSO 位相的时空选择性。具体来说, El Niño 事件期间西北太平洋东南部 TC 的生成频数偏高 (Pudov and Petrichenko, 1998; Chan, 2000; Chia and Ropelewski, 2002; Wang and Chan, 2002; Camargo and Sobel, 2005; Chen et al., 2006; Ha et al., 2013a), 这一区域生成的 TC 在热带洋面上活动时间较长, 因而能达到的强度更大, 生命史也相应延长; 而 La Niña 事件期间, TC 多生成于西北太平洋的西北部, 在向西和向北移动过程中发展成为长生命史 TC 的可能性减小, 表现出与 El Niño 位相相反的特征。

鉴于目前定量评估 ENSO 循环对西北太平洋 TC 生成和强度的影响的研究工作尚不多见, 本书第 2 章通过提取再分析资料中 TC 涡旋风场, 阐述 ENSO 期间 TC 动能及其经向输送的变化特征; 第 3 章利用线性化的正压涡动动能方程, 从季风槽动力学和正压能量转化入手分析介绍 ENSO 期间 TC 生成的能量来源。通过量化观测 ENSO 对西北太平洋 TC 生成和强度年际变化的影响, 获得 ENSO 对西北太平洋 TC 活动调制更为全面的认识。

另外值得关注的是不同类型的 ENSO 事件所引起的海洋大气持续性异常是造成 ENSO 对西北太平洋区域 TC 活动影响呈现复杂性的主要原因。ENSO 对 TC 活动的影响不仅局限在冷暖事件当年, 冷暖事件的前后年 TC 活动特征也会出现显著的变化 (Chan, 2000; Wang and Chan, 2002), 其中最具代表性且 TC 活动异常最为显著的是 El Niño 事件的衰亡年。在这一位相期间, 虽然赤道中东太平洋海温已逐渐恢复正常状态, 但热带印度洋 SST 则出现明显增暖。基于赤道波动理论, 热带印度洋 SST 正异常通过激发赤道波动, 影响西北太平洋大气环流状况, 进而与 TC 活动存在显著的负相关 (Du et al., 2011; Zhan et al., 2011a)。这表明与 ENSO 循环相关的非局地 SSTA、大气遥相关波列等调制因子能够激发大气环流异常和扰动信号, 通过大气桥和波列传播等过程进一步影响西北太平洋的 TC 活动。

已有的研究还依据赤道中东太平洋 SST 最大增暖位置分布的差异, 将 El Niño 事件进一步细分为两种类型 (Larkin and Harrison, 2005; Ashok et al., 2007; Weng et al., 2007, 2009; Yu and Kao, 2007; Kao and Yu, 2009; Kug et al., 2009; Yeh et al., 2009; Yu and Kim, 2010; 刘正奇等, 2013)。一种类型的最大增暖区位于东太平洋 (EP) 冷舌海域, 被定义为 EP 型增暖或 EP El Niño, 这类增暖是传统意义上的 El Niño 事件。另一种类型的最大增暖区位于赤道中太平洋 (CP) 的日界线附近 ($160^{\circ}\text{E} \sim 140^{\circ}\text{W}$), 其东侧和西侧的 SST 增暖幅度均小于 CP 海域, 因而被称为 CP 型增暖或 CP El Niño, 也被称为 El Niño Modoki (Ashok et al., 2007; Weng et al., 2007)。

Yeh 等 (2009) 的研究表明, CP El Niño 事件在全球变暖的背景下发生频次

有增加的趋势。Lee 和 McPhaden(2010)基于卫星资料证明在过去 30 年 CP El Niño 事件发生频次增加了一倍，他们的研究指出 CP 型增暖事件增多的趋势主要源于近 30 年 El Niño 事件的强度不断增加，并由此推断 CP El Niño 增多与全球变暖和太平洋 SST 升高密切相关。由于 ENSO 循环本身也存在显著的年代际变化，因此 ENSO 事件对西北太平洋 TC 活动的影响不仅局限于年际尺度上，在年代际等更长时间尺度上也有体现。

自 Ashok 等 (2007) 提出 El Niño Modoki 的概念后，大量研究工作集中在 CP El Niño 事件对全球各区域天气气候所造成的潜在影响 (Larkin and Harrison, 2005; Ashok et al., 2007; Kim et al., 2009; Ashok and Yamagata, 2009; Yeh et al., 2009; Cai and Cowan, 2009; Lee and McPhaden, 2010; Kim et al., 2011; Chand et al., 2013)。Kim 等 (2009) 首次将 CP El Niño 事件与 TC 活动建立联系，于 2009 年在《科学》杂志撰文指出，CP 型增暖事件使得北大西洋飓风频数增加，飓风登陆墨西哥湾和中美洲诸国的可能性也相应增加。造成飓风活动增多的主要原因是 CP 型增暖所激发的大气遥相关减弱了 TC 生成源地海域的垂直风切变，从而导致更多 TC 出现。但 Lee 和 McPhaden (2010) 对 Kim 等 (2009) 的结论提出质疑，认为由于其分析时段较短，所做出的结论在统计意义上不够显著。

对于西北太平洋和东亚区域，Kim 等 (2011) 比较了 CP El Niño、EP El Niño 和 EP La Niña 期间北太平洋 TC 生成频数 (TCGF) 异常和 TC 路径频数 (TCOF) 异常的特征 (图 1.1)。结果发现 CP 型增暖期间东太平洋 TC 活动减少，TC 生成源地西移，对应西北太平洋西部 TC 活动增多，有更多 TC 在中国东部沿海、朝

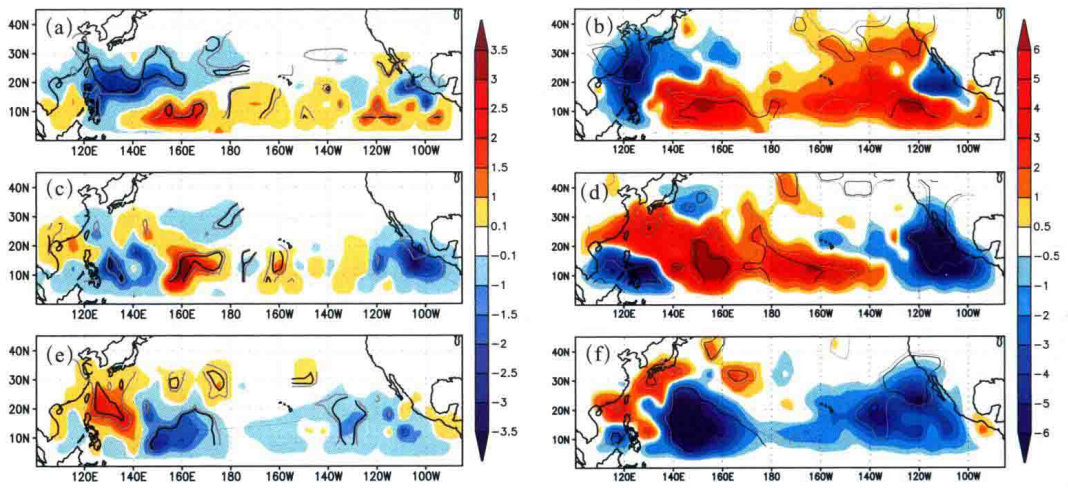


图 1.1 合成的 7~10 月 TCGF (左) 和 TCOF (右) 异常 (引自 Kim 等, 2011)
(a)、(b) EP 型增暖年; (c)、(d) CP 型增暖年; (e)、(f) EP 型冷却年

鲜半岛和日本南部登陆。Zhang 等 (2012) 的研究也得到类似的结论, 发现 CP 型增暖期间登陆东亚的 TC 数量明显增加, 尤其在 6~9 月期间日本和朝鲜半岛极易遭受 TC 侵袭, 其他学者的研究工作也支持这样的观点 (Chen and Tam, 2010; Chen, 2011; Hong et al., 2011)。

1.2 印度洋 SST 对热带气旋活动的影响

近年来有不少学者关注了 El Niño 衰亡年春季和夏季热带印度洋 SST 增暖对东亚夏季气候和西北太平洋 TC 活动的影响。Wang 等 (2000) 提出 ENSO 通过局地海气相互作用和遥相关强迫等过程, 激发西北太平洋反气旋环流异常并能使其持续到 El Niño 衰亡年的夏季。Xie 等 (2009) 提出“电容器效应”机制解释了热带印度洋 SST 通过维持西北太平洋反气旋环流异常, 进一步影响东亚夏季大气环流和西北太平洋的 TC 活动 (Klein et al., 1999; Yoo et al., 2006; Yang et al., 2007; Wu et al., 2010; Xie et al., 2009; Kim et al., 2010; Du et al., 2011; Tao et al., 2012)。

El Niño 通过海气相互作用和大气桥机制在其衰亡位相的春季和夏季强迫热带印度洋出现 SST 异常增暖, 形成热带印度洋 SST 对太平洋 ENSO 事件的响应模态。这种效应在 El Niño 衰亡年春季达到峰值, 整个过程就像 ENSO 事件作为“电池”向印度洋 SST “电容”充电。印度洋 SST 增暖从前一年冬季持续到当年的夏秋季, 并伴随夏季南亚高压增强 (Yang et al., 2007), 西太平洋副热带高压 (WPSH) 增强西伸 (袁媛和李崇银, 2009)。El Niño 衰亡年夏季, 热带印度洋 SST 增暖激发出东传赤道斜压 Kelvin 波, 当其传播到西太平洋区域时, 边界层摩擦效应导致热带西太平洋对流层低层东风异常增强, 并从赤道向高纬度区域递减, 赤道外西太平洋区域形成反气旋切变涡度, 引起东亚副热带区域边界层辐散, 对流活动受到抑制, 潜热释放减少, 从而进一步激发并维持西北太平洋低层反气旋环流异常 (Wu et al., 2010)。需要指出的是, 尽管 El Niño 事件衰亡年赤道中东太平洋 SST 异常逐渐消失, 但西北太平洋低层反气旋环流异常将发展并得以维持, 这种由 El Niño 遥相关所激发的印度洋 SST 增暖将开启对西太平洋的“放电”过程, 并通过西北太平洋异常反气旋环流影响东亚气候系统。因此, 在 El Niño 事件的诱导下, 热带印度洋 SST 对东亚夏季风气候的调制过程被称为印度洋的“电容器效应”机制。

西北太平洋对流层低层的反气旋环流异常会导致局地低层辐散和垂直风切变增强, 这种环境场不利于 TC 在 El Niño 衰亡年的生成和发展, 尤其是中等强度以下的 TC 生成和活动受印度洋 SST 增暖的抑制最为显著 (图 1.2), 而强 TC 的生成主要受 ENSO 的影响, 因此与印度洋 SST 的线性关系不明显 (Du et al., 2011;

Zhan et al., 2011a, 2011b; Tao et al., 2012; 陶丽等, 2013)。与此同时, 由于受西北太平洋西北部和中国南海北部垂直风切变减小以及对流活动增强的影响, El Niño 衰亡年夏季在上述海域生成的 TC 稍有增加 (Du et al., 2011)。

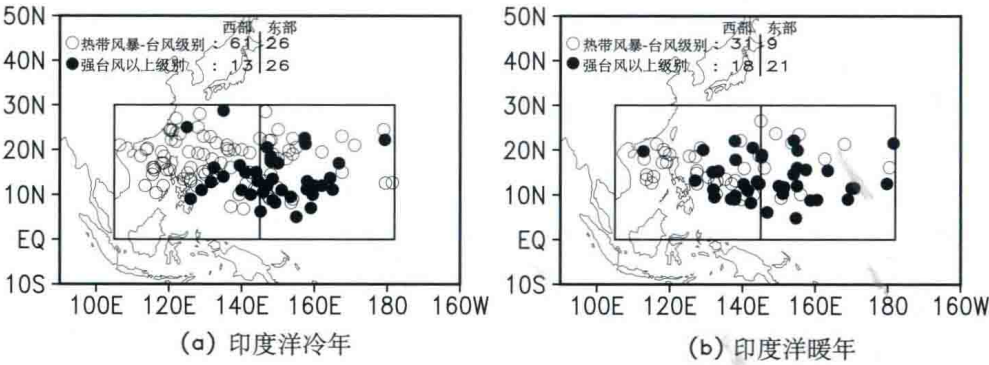


图 1.2 热带印度洋 SST 冷异常年和暖异常年夏季 TC 生成频数和源地 (引自 Zhan 等, 2011a)
实线段将西北太平洋分成东 (E) 和西 (W) 两部分

1.3 气候变化对热带气旋活动的影响

随着全球气候变化研究的深入, 对气候变化背景下 TC 活动特征与演变规律的研究日渐增多。Holland (1997) 利用 Emanuel (1987) 提出的 TC 最大潜在强度 (MPI) 理论模型, 推断随着全球 SST 持续升温, 强 TC 或超强 TC 出现的可能性将会增加。Webster 等 (2005) 和 Elsner 等 (2008) 的观测研究表明, 自 1970 年以来, 全球海洋 4 级和 5 级飓风频数增多, 强度也出现持续增大的趋势。Hoyos 等 (2006) 通过分析对 TC 生成和增强具有重要贡献的环境场因子, 发现全球强 TC 的增多趋势与热带海域 SST 升温存在最为密切的联系, 而垂直风切变、对流层中层湿度和水汽等大气条件与 TC 强度间的关联性只出现在特定时段和某些海区, 并不具有全球性特征, 因此与全球 TC 强度变化趋势并无显著关系。除海温影响外, 也有观点认为全球 TC 活动变化可能与 CO₂ 等温室气体排放所产生的温室效应有关。Henderson-Seller 等 (1998) 首次给出温室气体排放对 TC 强度影响的定量评估结果, 估算在 CO₂ 加倍的情况下, TC 的 MPI 将平均增加 10.2%。Wu 和 Wang (2004) 利用一个 TC 移动轨迹模型, 通过测算提出温室气体排放引起的气候变化可能会对 TC 移动路径产生影响的观点。Emanuel (2005) 将 TC 总能量耗散率的时间积分定义为 TC 能量耗散指数 (PDI), 指出 PDI 会随着 SST 的升高而增加, 并提出近 30 年全球 TC 破坏力明显增强的观点 (图 1.3), 他还将大西洋的 PDI 序列延伸至 19 世纪, 发现该序列与大西洋飓风主要源地 SST 的世纪尺度

变化存在较好的正相关性 (Emanuel et al., 2006)。Srивer 和 Huber (2006) 估算了全球 PDI 对 SST 变化的敏感性, 发现全球 SST 每增加 0.25°C , TC 的总 PDI 将增加约 60%。Holland 和 Bruyère (2014) 通过分析 1975~2010 年卫星同化资料和多源数据集资料, 发现全球每增暖 1°C , 4 级和 5 级 TC 发生频数在所有生成 TC 中的比例将上升 25%~30%; 与此同时, 1 级和 2 级 TC 发生频数的比例则出现同等程度的降低, 表明超强 TC 的频次与全球变暖存在显著的正相关关系。此外, 随着全球变暖加剧, 除了东北太平洋之外的全球各海盆超强 TC 的生成占比均出现明显升高外, 全球其他区域 TC 的生成频数和平均强度与全球变暖现象并未表现出显著联系。

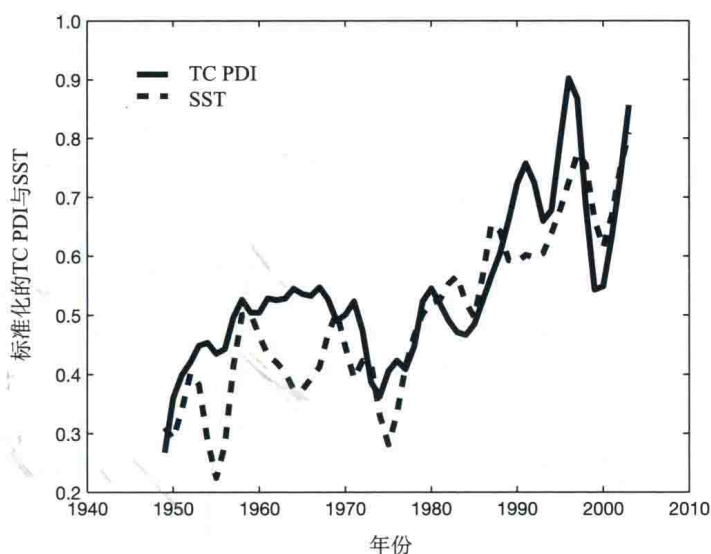


图 1.3 标准化的大西洋与西太平洋 TC 年平均 PDI 和 SST 随时间的演变 (引自 Emanuel, 2005)

另一方面, 也有学者认为 TC 活动的长期变化趋势仅仅是其自然变率的表现, 并非完全是全球变暖的产物 (Landsea, 1996; Chan, 2006)。Pielke (2005) 分析了 2004 年之前由 TC 强风造成破坏的历史记录, 并未发现明显的增加趋势, 据此指出 Emanuel (2005) 所定义的 PDI 可能并非是衡量台风破坏力较为合理的指数。Landsea (2005) 指出, 20 世纪 70 年代后, 卫星资料的应用使对 TC 的监测更加准确, 在全球范围内预警出更多 4 级和 5 级 TC。因此, 对 TC 气候特征进行较为准确研究的时间长度应局限在有卫星观测以来的 30 余年。然而, 对于研究气候变化问题来说, 30 余年的资料序列显得偏短, 得出全球变暖造成 TC 活动增强结论的依据尚显不足。Klotzbach 和 Landsea (2015) 通过延长 Webster 等 (2005) 的研究资料时间, 发现 1990~2014 年期间 4 级和 5 级 TC 的生成频数出现较弱下降趋势, 与此同时, 超强 TC 的生成占比则有所升高, 但上述两种趋势变化均不显