

次季节-季节尺度热带气旋活动研究和预测技术进展



通信作者简介:余晖,研究员,任上海台风研究所所长,兼任世界气象组织热带气象研究工作组专家成员、中国气象学会台风专业委员会副主任委员、中国气象局台风和海洋气象专家工作组成员、WMO/ESCAP 亚太台风委员会期刊 *Tropical Cyclone Research and Review* 副主编,从事台风动力学理论、预报和灾害风险评估技术研究,并长期致力于科研成果向台风预报和灾害风险预警业务推广和转化工作。

金蕊^{①②},余晖^{①③}*,吴志伟^②,汤杰^{①③}

① 中国气象局 上海台风研究所,上海 200030;

② 复旦大学 大气与海洋科学系/大气科学研究院,上海 200433;

③ 中国气象局 台风数值预报重点实验室,上海 200030

摘要 从外部强迫和大气内部变率两个方面回顾次季节-季节尺度西北太平洋热带气旋活动的主要影响因子及相关机制研究进展,分析统计、动力及混合动力-统计混合3类预测技术的发展历史和现状,对该领域尚未解决的主要科学问题及预测技术发展趋势进行了探讨。

关键词 次季节-季节尺度;西北太平洋;热带气旋

西北太平洋是全球热带气旋活动最频繁的海域。在该海域生成的热带气旋(TC, Tropic Cyclone;如无特别说明,文中TC均指西北太平洋海域的热带气旋)约占全球总数的1/3,其中约50%影响我国,引发狂风、暴雨以及风暴潮等灾害性天气,严重威胁着我国经济发展、社会稳定以及人民生命财产安全(陈联寿等,2012)。据统计,2010年以来,TC给我国带来的直接经济损失每年都达数百亿甚至上千亿元。TC外围环流和中纬度天气系统相结合还有可能会在远离中心的区域造成严重暴雨灾害。2018年,TC灾害共造成全国3260.6万人次受灾,80人死亡,3人失踪,366.6万人紧急转移安置;2.4万间房屋倒塌,4.3万间房屋严重损坏,16.2万间一般损坏;直接经济损失697.3亿元(刘南江和费伟,2019)。因此,我国各级政府部门和相关行业历来都十分重视防台减灾工作。认识TC活动规律、了解影响TC活动的因素、提升预报预测能力,是提高防台减灾有效性的重要基础,具有显著的社会和经济价值。

随着大气监测能力的提升和数值天气预报技术的发展,短、中期天气尺度的TC预报能力一直在不断地提升。2018年,我国TC路径预报的24h平均距离误差是73km,48h平均距离误差是125km,相比20a前均减小了50%(Chen et al., 2019)。全球各大预报中心TC路径预报的有效时效已从1990年代的2d(48h)延长到5d(120h),并计划在将来几年进一步延长到7d(168h)。相应地,TC风雨预报能力也同时得到了提升。在更长的时间尺度上,我国曾在“九五”期间(1996—2000年)组织开展短期气候预测系统的研究攻关,建立了动力与统计相结合的短期气候预测业务系统,预测对象包括月、季、年尺度的干湿冷暖及异常状况,并在后续应用过程中得到了持续发展(丁一汇等,2004;贾小龙等,2013)。TC活动的短期气候预测也是该攻关项目的研究内容之一,所建业务系统的预测对象包括全海域TC

* 联系人, E-mail: yuh@ typhoon.org.cn

2019-10-25 收稿, 2019-11-29 接受

科技部重点研发计划国际合作专项(2017YFE0107700);上海市科学技术委员会科研计划项目(19dz1200101);上海市气象局台风科技创新团队

引用格式:金蕊,余晖,吴志伟,等,2020.次季节-季节尺度热带气旋活动研究和预测技术进展[J].大气科学学报,43(1):238-254.

Jin R, Yu H, Wu Z W, et al., 2020. Sub-seasonal to seasonal prediction of tropical cyclone activity in the Western North Pacific: a review [J]. *Trans Atmos Sci*, 43(1): 238-254. doi: 10. 13878/j.cnki.dqkxxb.20191025006. (in Chinese).

频数以及影响我国不同区域和省市的月、季、年 TC 频数(雷小途和徐一鸣,2001)。此类预测通常又统称为 TC 季节预测。评估表明,在那之后的十余年时间里,虽然我国和国际相关机构在 TC 季节预测技术上都有所发展,但是预测技巧并无提高(Zhan et al.,2012)。TC 季节预测的最新发展主要体现在新技术的应用和预测产品的日益丰富上,也有研究开始尝试 2~10 a 预测(Klotzbach et al.,2019)。

2013 年,世界气象组织世界天气研究计划(WMO/WWRP)联合世界气候研究计划(WCRP)启动了其三大核心计划之一的次季节-季节预测计划(S2S),目的是加深 2 周一季节尺度过程的认识,提高预测能力,以填补中期天气预报和季节预测之间的预报能力空缺。S2S 计划自 2013 年启动至今,已进入了第二个执行期(2018 年 11 月—2023 年 12 月),热带气旋是其重点关注的极端天气事件之一(Vitart and Robertson,2018)。在中国气象局《海洋气象业务行动计划(2019—2022)》中,TC 活动的次季节-季节尺度预测是重点任务之一。因此,TC 活动的次季节-季节尺度预测既是科学前沿课题,同时又具有十分迫切的业务应用需求。本文将从外部强迫因子和大气内部变率因子两个方面回顾次季节-季节尺度 TC 活动影响因子及相关机制的研究进展,分析预测技术的发展历史和现状,并探讨未来发展趋势。

1 次季节-季节尺度 TC 活动影响因子

1.1 外部强迫因子

已有研究表明,季节尺度 TC 活动主要依赖于大尺度缓变背景场的变化。关键区海温以及土壤湿度、积雪、海冰等衡量地表热状况的重要陆面因子凭借其较强的持续性,能够显著调控局地大气环流的变化及极端气象事件的发生。表 1 对影响季节尺度 TC 活动的主要外强迫因子及特征进行了归纳。

厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)事件作为热带大洋最显著的年际变化信号,对北半球大气环流及气候有很强的调制作用,一直是研究热点问题(Huang and Wu,1989;Wang et al.,2000;Xie et al.,2009)。Atkinson(1977)在研究 1972 年厄尔尼诺事件时注意到,当年生成于西北太平洋东部的 TC 明显偏多。此后,Chan(1985)利用谱方法分析得到 TC 生成年频数存在 3.5 a 的周期变化,可能受 ENSO 事件的调控。而 Lander(1994)认为,ENSO 只影响 TC 活

动的位置,与其生成频数没有必然的联系。厄尔尼诺发生时,TC 生成明显偏东,而拉尼娜时偏西。基于上述争议,Wang and Chan(2002)系统性地考察了强 ENSO 事件(Niño 指数的振幅大于 1 倍标准差)对 TC 活动的主要影响特征。台风季前期(4—6 月),TC 活动主要受 ENSO 衰减信号的影响。厄尔尼诺次年 4—6 月,生成于西北太平洋的 TC 明显偏少且位置偏东,而拉尼娜次年则相反。台风季盛期(7—9 月)的 TC 活动主要取决于 ENSO 发展信号。厄尔尼诺(拉尼娜)发展年 7—9 月,TC 主要生成于西北太平洋东南(西北)海域,其生命史偏长(短),强度偏强(弱),但总频数没有明显异常。这主要是由于厄尔尼诺发展年,中东太平洋非绝热加热所导致的西侧气旋性环流有利于季风槽东伸,配合减弱的风切变以及充沛的水汽为 TC 在西北太平洋东南侧海域活动创造有利条件。Zhan et al.(2011a)从波流相互作用的角度指出,ENSO 的背景场能够调控正压波能量由平均场向天气尺度波动的转化,进而有利于 TC 以及强 TC 的活动。除频数外,ENSO 对 TC 强度、路径及其登陆影响的调控同样显著。Wang and Chan(2002)发现,在厄尔尼诺发展年的秋季,TC 以北折路径为主,转向越过 35°N 的 TC 数量是拉尼娜发展年的 2.5 倍之多;而在拉尼娜发展年,TC 以西移路径为主。李崇银(1986)和 Liu and Chan(2003)也得到了类似的结论,认为强厄尔尼诺事件会减少影响南海 TC 以及沿岸登陆的 TC 个数,但平均登陆强度偏强,拉尼娜年则与之相反。也有学者分析了不同强度等级 TC 对 ENSO 事件的响应,Kang et al.(2019)通过南方涛动指数衡量 ENSO 的年际变化,指出 ENSO 主要调控超强台风的活动,没有超强台风事件的年份,TC 年频数对 ENSO 的响应较弱。基于上述 ENSO 与 TC 活动联系的统计事实,近年来不少学者利用气候模式讨论与 ENSO 相联系的 TC 活动变化(Li and Wang,2014;Krishnamurthy et al.,2016;Zhang et al.,2016)。Ta-Huu and Sato(2019)基于轴对称模型设计敏感性试验指出,600 hPa 相对湿度以及 850 hPa 相对涡度是 ENSO 影响 TC 活动的最主要因子。

随着对 ENSO 研究的不断深入,一些学者提出了中太平洋型厄尔尼诺事件(也被称为 El Niño modoki 或暖池型厄尔尼诺)(Fu and Fletcher,1985;Ashok et al.,2007)。其对流异常位置较传统厄尔尼诺事件明显偏西,整个西北太平洋被气旋性环流异常控制,所对应的气候影响也因此完全不同(Kao

and Yu, 2009; Capotondi et al., 2015; Paek et al., 2019)。研究表明,中太平洋型厄尔尼诺事件相比传统事件更有利于 TC 生成,且其异常活跃区明显偏西,有利于 TC 登陆并影响东亚沿海地区(Kim et al., 2011; Ha et al., 2012)。Patricola et al. (2018) 通过气候模式验证了上述结论,并进一步强调了中太平洋型厄尔尼诺事件相比传统厄尔尼诺事件更有利于强 TC 发生以及 TC 累积能量加强。这是由于中太平洋型厄尔尼诺事件的暖海温异常通常叠加于更温暖的背景态海温之上,并且伴随了更强的大气不稳定条件,为强 TC 的生成及发展创造有利的动力及热力条件(Patricola et al., 2016)。Liu (2019) 分析了两类厄尔尼诺以及拉尼娜事件对登陆中国 TC 强度变化的影响,指出由于拉尼娜年异常气旋性环流控制南海地区,并且水汽充足,导致影响我国的 TC 频数偏多,强度更强且影响时间也更长。而传统型厄尔尼诺事件发生时,虽然 TC 频数有所减少,但由于 TC 登陆前移速较慢,获取的能量更多,因此能够在陆地上维持更久,造成更严重的灾害。

除 ENSO 以外,西太暖池热状况同样能够显著调节 TC 的活动(黄荣辉等, 2016)。西太暖池不仅具备较好的热力条件(其海表面温度常年超过 28.5 °C),还能通过调控季风槽以及西太副高等大尺度环流系统为 TC 的生成提供有利动力条件。黄荣辉和陈光华(2007)的研究指出,当西太平洋暖池处于暖状态时,其上空季风槽位置偏西、偏北,7—10 月 TC 生成位置向西北移动,导致影响我国的 TC 个数偏多;相反,当暖池处于冷状态,TC 生成位置偏东偏南,主要影响日本和韩国。此外,暖池热状况同样能够通过调节西太副高的南北移动影响 TC 的移动路径。黄荣辉等(2005)以及黄荣辉和王磊(2010)的研究指出,暖池的异常增暖有利于副高的北推,此时 TC 移动路径偏北,影响厦门以北沿海地区的 TC 偏多。从其物理机制来看,西太平洋暖池偏冷有利于混合重力 Rossby 波向热带低压型扰动的转化发生于西北太平洋的偏东偏南侧海域上空,导致该地区出现热带低压型波列,为 TC 生成提供先兆扰动(冯涛等, 2016)。

热带印度洋作为印太暖池区的一部分,其海温异常与 ENSO 存在密切联系,能显著调控亚洲季风系统。Yang et al. (2007) 指出,厄尔尼诺次年往往对应了热带印度洋一致增暖,其在春夏季节有很好的持续性,能够通过调控南亚高压以及西太平洋副高的强度及位置对周边气候产生影响。Xie et al.

(2009) 提出了印度洋“充放电”理论。认为热带印度洋海温异常增暖能激发开尔文波东传,导致西北太平洋低层异常反气旋,对东亚季风变率产生影响。基于上述研究,一些学者指出印度洋海温异常能够影响 TC 生成频数。当其处于暖(冷)位相时,TC 生成偏少(多),但其对生成位置的影响则并不显著(Du et al., 2011; Zhan et al., 2011a, 2011b)。从物理机制来看,印度洋显著增暖时,低层反气旋性环流异常以及加强的垂直风切变是导致 TC 减少的关键原因。Zhan et al. (2012) 进一步指出,印度洋海温能够通过调控西北太平洋夏季风以及赤道开尔文波对 TC 生成频数产生影响。对于热带大西洋而言,其海温异常能够显著调控西北太平洋地区大气环流及海平面气压异常,同样受到研究人员的关注。当其处于冷位相时,热带大西洋表现为对流抑制,并通过 Gill 型 Kelvin 波响应,在其东侧(延伸至热带北印度洋)表现出低层西风异常,叠加于印度洋区域的低层西南季风之上,导致热带北印度洋海温降低且进一步通过 Gill 型 Kelvin 波响应在西北太平洋激发气旋性环流,为 TC 生成提供有利背景场(Wu et al., 2012b; Yu et al., 2016)。周波涛和崔绚(2010)发现,当澳大利亚东侧春季海温处于暖位相时,西北太平洋对流层高层(低层)为异常气旋型(反气旋)环流,大气异常下沉从而抑制该地区的对流活动,配合加强的西北太平洋纬向风垂直切变,不利于 TC 发生。此外,北太平洋维多利亚模态同样显著影响 TC 活动。Pu et al. (2019) 和 Zhang et al. (2018) 的研究指出,当春季北太平洋地区出现强的维多利亚模态时,位于北太平洋地区(5°~20°N)的海温异常通过“风-蒸发”机制维持至夏季,并通过加强的季风槽以及减弱的副热带高压为 TC 生成提供有利背景场。

在陆面强迫因子中,受到关注的主要是热带外地区的海冰和青藏高原积雪变化。早在 20 世纪 90 年代初,董波和叶英(1991)探讨了有关北极海冰与 TC 活动的联系,发现冬半年北极海冰覆盖量偏少时,TC 生成频数及登陆我国 TC 数均偏多。高清清等(2017)认为,冬春季北极海冰的异常通过调控副高强度及位置与 9 月 TC 强度等级表现为显著负相关,而与 TC 生成频数表现出显著正相关。导致上述不同结论的原因很可能是两者分析时间段以及海冰关键区存在差异。Sato et al. (2018) 的研究进一步确认了来自北极的观测信号能提高北半球夏季大气环流和 TC 强度及路径预测技巧的事实,因此两

者的联系值得更加系统的研究。除了北极地区的海冰异常,Fan(2007)指出冬春季北太平洋海冰的异常变化也是 TC 生成频数的显著前兆因子。北太平洋海冰偏多(少)时能够通过北太平洋涛动(NPO)以及北太平洋-热带西太平洋大气遥相关,导致热带太平洋高层表现为东风异常,TC 明显偏少(多)。此外,Xie(2005)和 Xie et al.(2007)的研究表明,当冬春季青藏高原积雪偏少(多)时,副高偏强(弱),登陆我国 TC 偏多(少)。

在次季节尺度,与 TC 活动紧密联系的热带对流、季风槽以及副热带高压等的季节内变化同样会受到关键区海温的调控。Li et al.(2012)的研究指出,ENSO 不同位相背景场能够通过调控西北太平

洋对流的活动,进而改变其与 TC 活动的联系。当 ENSO 处于暖位相时,热带对流季节内变化强度更强且能向西传播得更远,对 TC 活动的调控力更强;而当 ENSO 冷位相或中性位相时,两者的联系相对较弱。Liu et al.(2016)指出,东太平洋海温异常增暖在夏季对应于西北太平洋地区较强的季节内北传信号;而中太平洋海温增暖时,对流异常的季节内变化主要集中于赤道地区,可能造成 TC 生成位置及移动路径的次季节变化。此外,黄荣辉等(2016)指出,西太平洋暖池的热状态会显著影响与 TC 活动有关的南海夏季风爆发以及西太平洋副热带高压的季节内变异。

表 1 外强迫因子对季节尺度 TC 活动的影响特征

Table 1 Characteristics of external forcing factors' impact on the TC activities at seasonal scale

影响因子	主要特征	代表性参考文献
ENSO	厄尔尼诺(拉尼娜)次年,TC 生成偏少(多)且位置偏东(西);厄尔尼诺(拉尼娜)发展年,TC 主要生成于西北太平洋东南(西北)海域,其生命史偏长(短),强度偏强(弱),但总频数没有明显异常	Chan,1985;Wang and Chan,2002
西太暖池海温	中太平洋型 El Niño:TC 生成偏多,影响我国东部沿海的 TC 偏多 暖(冷)位相时,7-10 月 TC 生成位置以及移动路径偏西偏北(偏东偏南),影响我国 TC 偏多(少)	Kim et al.,2011;Patricola et al.,2018 黄荣辉等,2016
热带印度洋海温	冷(暖)位相时,TC 偏多(少)	Zhan et al.,2011a,b;Du et al.,2011
热带大西洋海温	冷(暖)位相时,TC 偏多(少)	Wu et al.,2012b;Yu et al.,2016
北太平洋海温	春季出现强维多利亚模态时,TC 偏多	Pu et al.,2019;Zhang et al.,2018
澳大利亚东侧海温	暖(冷)位相时,TC 偏少(多)	周波涛和崔绚,2010;Zhang et al.,2018
北极海冰	北极海冰覆盖量偏少,TC 生成频数及登陆我国 TC 数均偏多 冬春季北极海冰与 9 月 TC 强度等级表现为显著负相关,而与 TC 生成频数表现出显著正相关	董波和叶英,1991 高清清等,2017
北太平洋海冰	冬春季海冰偏多(少)时,TC 偏少(多)	Fan,2007
青藏高原积雪	冬春季积雪偏少(多)时,登陆我国 TC 偏多(少)	Xie,2005;Xie et al.,2007

1.2 大气内部变率因子

除了上述外部强迫因子,大气自身的内部变率,比如平流层准两年振荡(Quasi-Biennial Oscillation, QBO)、中高纬地区的北极涛动(Arctic Oscillation, AO)、北太平洋涛动(North Pacific Oscillation, NPO)等,同样会影响与季节尺度 TC 活动相关的热带环境场,从而调控 TC 活动(表 2)。海洋、陆地及冰冻圈等缓变外强迫与大气耦合形成的不同尺度大气低频变化过程(如 MJO、准双周振荡等)是影响次季节尺度 TC 活动的主要因子(表 3、表 4)。

QBO 是发生在赤道附近平流层西风异常和东风

异常交错出现的一种现象。早在 20 世纪 80 年代,Gray(1984)便指出了 QBO 对大西洋及西南印度洋热带气旋活动的影响,其西风位相有利于减弱对流层上层的垂直风切变,从而促进热带气旋的生成及发展。已有的多数研究都发现,当 QBO 处于西风位相时,TC 生成偏多,且主要影响我国东海区域(Chan,1995;Ho et al.,2009)。但是,也有一些学者对此提出质疑。Camargo et al.(2010)认为,QBO 的信号主要局限于平流层区域,其在对流层范围的影响并不稳定,且当去除 ENSO 信号后,QBO 与 TC 活动的统计关系并不显著。Zhou et al.(2008)研究

表2 大气内部变率因子对季节尺度 TC 的影响特征

Table 2 Characteristics of internal variabilities' impact on the TC activities at seasonal scale

影响因子	主要特征	代表性参考文献
平流层准两年振荡(QBO)	QBO 处于西风(东风)位相时,有(不)利于 TC 生成,且影响我国东海(日本以东洋面)TC 偏多(少)	Gray, 1984; Chan, 1995; Ho et al., 2009
北太平洋涛动(NPO)	NPO 处于正(负)位相时,TC 偏多(少)	Wang et al., 2007; Chen et al., 2015; Zhang et al., 2018
北极涛动(AO)	AO 处于正(负)位相时,TC 生成位置明显偏西(东),其所对应的密集路径同样偏西(东),主要影响我国(韩国及日本等地区)	Choi et al., 2011
南极涛动(AAO)	AAO 处于正(负)位相时,菲律宾东部海域 TC 生成偏多(少),北折路径偏多(少),影响中国南海(东海)TC 偏少	Wang and Fan, 2007; Ho, 2005
哈德莱环流(HC)	前期偏强(弱)的 HC 能减弱(加强)东亚夏季风,通过加强(减弱)垂直风切变以及减弱(加强)对流,抑制(加强)TC 活动	Zhou et al., 2008
亚洲-太平洋涛动(APO)	APO 正(负)位相,TC 偏多(少)	周波涛等, 2008; Zhou and Xu, 2017

表3 MJO 对次季节尺度 TC 活动的影响特征

Table 3 Characteristics of MJO's impact on the TC activities at sub-seasonal scale

影响因子	主要特征	代表性参考文献
生成频数及位置	与 MJO 有关的对流异常能够显著调控 TC 的生成频数及位置,当 MJO 处于活跃位相时,TC 出现频率增加,反之则减少	Nakazawa, 1988; Liebmann et al., 1994; Camargo et al., 2009; 杨辉和李崇银, 2005; 陈光华和黄荣辉, 2009; Zhao and Li, 2019
生成频数及位置	随着 MJO 向东向北传播,TC 生成位置也会出现相应的偏移	祝从文等, 2004; Kim et al., 2008
生成频数及位置	MJO 对 TC 生成的影响并非完全线性,当 MJO 处于非活跃位相时,TC 主要生成于季风槽外区域,生成频数没有显著的减少	Harr, 2006; Kim et al., 2008
路径	MJO 活跃位相有利于西西北向引导气流的维持,TC 多表现为偏西行路径,且所对应的 TC 强度更强,登陆 TC 也更多	Liebmann et al., 1994; Nakazawa, 2006; 田华等, 2010
路径	MJO 活跃位相处于赤道印度洋(西北太平洋)时,TC 路径密集带偏东(偏西)	黄荣辉和陈光华, 2007; Kim et al., 2008
强度	不同强度 TC 事件对 MJO 的响应存在差异。MJO 的 3+4 位相对应于强台风的显著减少,而其他位相强台风增多	Li and Zhou, 2013a

表4 QBWO 对次季节尺度 TC 活动的影响特征

Table 4 Characteristics of QBWO's impact on the TC activities at sub-seasonal scale

影响因子	主要特征	代表性参考文献
生成频数及位置	QBWO 处于 3+4(7+8)位相时,生成于西北太平洋 150°E 以西洋面的 TC 明显偏多(少),而 150°E 以东洋面的 TC 则明显偏少(多),且 TC 源地也表现为西北-东南向变化的特征	Li and Zhou, 2013a, 2013b; Zhao et al., 2015a, 2015b
路径	QBWO 1+2 位相时副高加强,其底部异常东风有利于西行 TC 影响菲律宾地区;QBWO 3+4 位相(5+6 位相)时影响日本 TC 偏多(少)	Li and Zhou, 2013b
强度	大约 70%和 79%的强台风生成于 QBWO 的 7+8 以及 1+2 位相,而其 5+6 位相则多对应于热带风暴和热带低压的发生	Li and Zhou, 2013a
强度	QBWO 的活跃位相,TC 增长率及最大可能强度都有明显加强,而 QBWO 非活跃位相则显著减弱	Zhou et al., 2018

了哈德莱环流(Hadley Cell, HC)和TC活动的关系,发现前期偏强的HC能减弱东亚夏季风,通过加强垂直风切变以及减弱对流异常来抑制TC活动。

还有一些学者关注了中高纬大气信号对TC活动的影响。Choi et al.(2011)探讨了AO(北半球中高纬大气环流主模态)与TC活动的关系。当AO处于负位相时,TC生成位置明显偏东(主要位于150°以东海域),其所对应的密集路径同样偏东,主要影响韩国及日本等地区。南半球中高纬大气主模态,南极涛动(Antarctic Oscillation, AAO),能够通过调控澳大利亚东南侧及西北太平洋区域的低层环流从而影响TC活动。具体而言,当AAO处于正位相时,生成于菲律宾东部海域的TC偏多,且多对应北折路径,影响中国南海TC偏少(Ho et al., 2005; Wang and Fan, 2007)。此外,NPO与TC活动的关系同样紧密。春季正位相的NPO通过海气相互作用导致北太平洋海温产生异常,该海温异常能维持到夏季,通过减弱垂直风切变促进TC的生成及发展(Wang et al., 2007; Chen et al., 2015; Zhang et al., 2018)。周波涛等(2008)的研究指出,亚洲-太平洋涛动(APO)不仅能很好地衡量海陆热力差异,还能显著调控TC生成频数。其正位相有利于西太副高的北抬及东撤,造成低层辐合及高层辐散的环流场,TC生成偏多。Zhou and Xu(2017)通过CMIP5模式资料进一步分析APO与影响TC活动各环流场之间的联系,发现有5个模式(ACCESS1.3, BNU-ESM, CCSM4, GISS-E2-H, NorESM1-ME)能够重现APO与西北太平洋地区低层垂直风切变、涡度以及中层相对湿度等变量的密切联系,并强调在未来全球变暖的背景下两者的联系仍将维持。

MJO是热带大气季节内振荡的最主要成分,表现为准40 d的周期振荡,沿赤道自印度洋向太平洋移动,期间伴随了对流及降水的活跃和抑制位相(Madden, 1986; Madden and Julian, 1971, 1972)。很多学者认为,MJO是影响次季节尺度TC活动的重要因子(表3),与MJO有关的对流异常能够显著调控TC的生成频数及位置。当MJO处于活跃位相时,TC出现频率增加,反之则减少(Nakazawa, 1988; Liebmann et al., 1994; 杨辉和李崇银, 2005; Camargo et al., 2009; 陈光华和黄荣辉, 2009; You et al., 2019; Zhao and Li, 2019)。Kim et al.(2008)和祝从文等(2004)则发现,随着MJO向东向北传播,TC生成位置也会出现相应的偏移。值得注意的是,MJO对TC生成的影响并非完全线性,当MJO

处于非活跃位相时,TC主要生成于季风槽外区域,生成频数没有显著的减少(Harr, 2006; Kim et al., 2008)。

MJO同样能够显著调控TC路径分布。一般而言,MJO活跃位相有利于西西北向引导气流的维持,TC多表现为偏西行路径(Nakazawa, 2006),且所对应的TC强度更强,登陆TC也更多(Liebmann et al., 1994; 田华等, 2010)。MJO活跃位相处于赤道印度洋(西北太平洋)时,TC路径密集带偏东(偏西)(黄荣辉和陈光华, 2007; Kim et al., 2008; 陶丽等, 2012)。相对TC生成频数、位置以及路径而言,MJO对TC强度以及登陆影响的研究相对较少。Li and Zhou(2013a)指出,不同强度TC事件对MJO的响应存在差异。MJO的3+4位相对应于强台风的显著减少,而其他位相强台风频数增多。这可能是由于MJO处于3+4位相时,TC生成位置明显偏西偏北,不利于其发展成强台风。

基于MJO与TC活动的统计关系,不少学者分析了两者产生联系的可能物理机制。Sobel and Maloney(2000)从波能量累积的角度出发,认为当MJO处于西风位相时,有利于平均动能向扰动动能转化,从而加强低层正压波活动通量,可为TC生成提供有利背景场。Maloney(2000)和Maloney and Hartmann(2000)利用再分析资料以及线性正压模式对其进一步研究,指出当850 hPa西风距平出现在热带西太平洋时,平均流向涡动动能的转化活跃,加强低层气旋式切变以及辐合运动,有利于涡动的发展。黄荣辉和陈光华(2007)认为,季风槽的辐合作用非常重要,其有利于沿赤道西传的Rossby重力波转化成波长较短、波数较多的热带低压型扰动,从而促进TC生成及发展。Mao and Wu(2010)通过个例分析进一步指出,季风槽区域纬向风不稳定所导致的斜压不稳定是MJO调控TC生成的主要过程。近年来,一些学者评估了各类动力及热力因子对TC活动的相对重要性。Cao et al.(2014)指出,MJO活跃位相时,热力及动力因子形成对流-环流-水汽的正反馈机制,有利于TC的生成。在此过程中,水汽等热力因子起主导作用。而当MJO处于非活跃位相时,主要由低层涡度等动力学因子抑制了TC的生成发展。Zhao and Li(2019)通过WRF(WRF-ARM)设计敏感性实验证实,相对湿度等热力因子是MJO活跃位相促进TC生成的关键因子。

位于亚洲季风区10~20 d的准双周振荡(QBWO)主要表现为西北向传播的特征,其动能相对

MJO 来说更强,同样对 TC 活动具有很强的调控作用,只不过其影响相对更为局地(Li and Zhou, 2013a, 2013b; Zhao et al., 2015a, 2015b)(表 4)。QBWO 处于 3+4(7+8)位相时,整个西北太平洋海域 TC 生成频数没有明显差异,但生成于西北太平洋 150°E 以西洋面的 TC 明显偏多(少),而 150°E 以东洋面的 TC 则明显偏少(多),且随着对流位置的西北向传播,TC 源地也表现为西北-东南向变化的特征(王磊等,2009;金小霞等,2012)。QBWO 在非活跃位相时,其对 TC 活动的调制作用并不显著(王磊等,2009)。基于对 TC 生成潜在指数(Genesis Potential Index, GPI)的收支分析,Zhao et al.(2015a, 2015b)的研究发现对流层低层绝对涡度和中层相对湿度是 QBWO 调制 TC 生成的两个重要的大尺度环境因子。

QBWO 对 TC 路径同样存在较强的调控能力。当 QBWO 处于 1+2 位相时,副高底部的东风气流有利于 TC 西行影响菲律宾地区;而 7+8 位相时,TC 生成位置偏东,多对应开阔水面上的转向路径。此外,由于 TC 生成位置以及大范围背景场的差异,QBWO 3+4(5+6)位相时影响日本 TC 偏多(偏少)(Li and Zhou, 2013b)。Shi et al.(2019)讨论了 4~5 级强 TC 移动路径对 QBWO 的响应,当 QBWO 处于成熟位相,强对流导致的气旋性环流控制了西北太平洋 150°E 以西洋面,而其中东侧海域表现为反气旋性环流,有利于强 TC 转向往东北移动。QBWO 主要通过调控季风槽以及副热带高压的强度和位置,进而对 TC 生成位置和移动路径产生影响。Li and Zhou(2013a)关注了 QBWO 对 TC 强度变化的调控作用,发现大约 70% 和 79% 的强 TC 生成于 QBWO 的 7+8 以及 1+2 位相,而其 5+6 位相则多对应于热带风暴和热带低压的发生。这主要是 QBWO 调节 TC 生成位置所决定的,当 QBWO 处于 5+6 位相时,TC 生成位置偏北,不利于其进一步加强。最近,Zhou et al.(2018)的研究进一步指出,在 QBWO 的活跃位相,TC 增长率及最大可能强度都有明显加强,而 QBWO 非活跃位相则显著减弱。这一统计联系对于研究次季节尺度 TC 强度的变化至关重要。

相对 MJO 和 QBWO 的影响而言,有关中高纬低频信号与 TC 次季节变化关系的研究较少。Yu et al.(2017)指出,东亚高空西风急流作为中纬度地区的重要特征系统,能够通过调控南亚高压和西太平洋副热带高压位置的变化影响登陆中国 TC 频数及

位置。当西风急流位置偏北时,登陆中国 TC 活动增强,反之急流偏南,TC 活动减弱。

2 次季节-季节尺度 TC 预测技术

以上主要影响因子研究为开展次季节-季节尺度 TC 预测奠定了理论基础,相关预测技术可归纳为统计、动力和混合动力-统计 3 大类。目前开展 TC 次季节-季节预测的主要机构、研究方法及产品归纳为表 5。

2.1 统计预测方法

在我国较早采用统计预测方法进行 TC 活动季节预测的是国家气候中心(NCC)(Zhan et al., 2012)。1994 年,NCC 基于回归统计模型发布了有关 TC 活动的季节预测结论,主要包括生成于西北太平洋及登陆我国的热带风暴(Tropic Storm, TS)年频数,其预测因子包括 ENSO 指数、太平洋及澳大利亚地区的 500 hPa 高度场、西北太平洋地区的对流活动及垂直风切变等。模型所得到的回归系数还通过气候相似预测技术进行校正。该方法之后得到了一系列的改进(宋文玲和何敏,1999;Gong and He, 2007)。随后在 2000 年,香港城市大学(CUHK)以及热带风暴网(TSR)研制了 TC 统计预测方法。CUHK 基于投影寻踪回归技术,在每年 4、6 月发布两次预报,其结论主要包括被命名的 TC、TS 以及台风(TY)频数(Chan et al., 1998)。2009—2010 年,CUHK 补充了登陆我国华南、韩国以及日本 TC 频数的预测(Goh and Chan, 2012),其预测因子包含了 ENSO 信号、西北太平洋副高边界以及印槽强度等。由于 1997 年之后,TC 呈现明显的年代际减少趋势,该统计预测模型的预测结果往往显著偏多。因此,CUHK 在 2011 年停止发布统计预报结果。TSR 在每年 3—8 月进行逐月的滚动预报,其预报量包括了 TS、TY(台风,下同)、强 TY 数以及 TC 累计能量(ACE)。TS 以及 TY 季节频数的预测是通过 Nino3 指数开展的,而 Nino3.75 海区(5°S~5°N, 140°W~180°)海表面温度则主要用于预测 8—9 月强 TY 频数以及 ACE 指数。总体来说,其预报技巧在 7 月之后有显著提升(ACE 以及强 TY 频数的预报技巧能够达到 0.65 以及 0.75),但针对 TC 频数的预报技巧偏弱。上海台风研究所(STI)于 2005 年开始正式发布 TC 季节预测,所采用的方法包括均生函数预测模型、逐步回归以及最优子集回归方法,预测产品主要为生成及登陆我国 TS 年频数(雷小途,2001;Li et al., 2001),在 2009 年又补

表 5 开展 TC 次季节-季节预测的主要机构、研究方法及产品

Table 5 Information of sub-seasonal to seasonal TC forecasts: agencies, methodologies and products

机构名称	研究方法	主要预报产品
中国气象局国家气候中心	统计模型	热带气旋月/季节频数
	动力模型	登陆中国热带气旋月/季节频数
上海台风研究所	统计模型	热带风暴年频数
	动力模型	热带风暴以及强台风年频数概率热带气旋路径密度
	混合动力-统计模型	登陆中国热带风暴年频数 影响全国、华东、华南以及上海的热带气旋年频数
香港城市大学	统计模型(2000—2011年)	热带气旋、热带风暴以及台风季节频数
	动力模型	登陆我国华南、韩国以及日本热带气旋频数(5—10月) 影响我国华南地区的累计功耗指数
热带风暴网	统计模型	热带风暴、台风、强台风季节频数 热带气旋累计能量季节指数
	统计模型	热带气旋、热带风暴以及台风季节频数
韩国气象局国家台风中心	动力模型	影响韩国热带气旋季节频数
	混合动力-统计模型	热带气旋路径密度
	统计模型	热带风暴、台风月频数
欧洲中期天气预报中心	动力模型	逐月 ACE 逐月热带风暴平均生成位置 逐月热带风暴路径密度
	动力模型	热带风暴季节频数 ACE 季节指数
	动力模型	热带气旋季节频数 ACE 季节指数 热带气旋季节平均生成位置
NOAA 地球流体力学实验室	动力模型	热带风暴季节频数
	混合动力-统计模型	登陆东亚热带气旋月频数
美国国际气候与社会研究所	动力模型(2003—2012年)	ACE 季节指数
中科院大气物理研究所	动力模型	1 周—2 个月热带气旋路径密度异常

充了影响全国、华东、华南以及上海的 TC 频数预报(应明和万日金,2011)。表 6 为 STI 在 2019 年发布的 TC 活动预测意见。所采用的预测因子涵盖了西北太平洋地区与 TC 活动相关的海平面气压、海表面温度、垂直风切变、500 hPa 高度场以及对流异常等。2011 年,韩国气象局国家台风中心(NTC)也基于多元线性回归方法开展了相应的研究,主要关注 TC、TS 以及 TY 生成的季节频数、归一化 TC 活动指数以及可能影响朝鲜半岛的 TC 季节频数,其预测因子包括海表面温度、850 hPa 经向风以及 500 hPa 高度场等。

和 TC 季节预测技术比较而言,关于次季节 TC 活动的统计预测研究相对较少。Zhu et al.(2017)通过时空投影法对西北太平洋群发性 TC 活动建立了统计预测模型,并指出其可预报性来源主要是热带印度洋以及西太平洋地区的低频振荡。该方法可提前 10(20) d 成功地预报出 2003—2014 年 80%(69%)的群发性 TC 事件。上海区域气候中心开展了基于 MJO 的 TC 活动信息预判业务,取得了较好的试验结果(梁萍等,2013)。随着 MJO 等大气低频振荡研究的不断深入,关于降水、气温等的次季节尺度统计预测技术得到了快速发展(陈伯民等,2017;

表6 上海台风研究所(STI)发布的2019年TC活动预测意见

Table 6 Prediction of TC activities in 2019 issued by STI

时间	热带风暴及以上 的生成频数	登陆热带风暴 及以上的频数	影响我国的热带气旋频数			
			全国	华南	华东	上海
1981—2010 年均值±标准差	26±4.8	7±2.0	14±3.0	9±2.5	9±2.6	2±1.6
2019年(预测意见)	23~25	7~8	12~13	8~9	8~9	2~3

Zhu and Li, 2017, 2018)。但是,由于 TC 活动的时空不连续性以及对其关键影响因子的认识还很有限,关于 TC 活动的次季节统计预测技术发展相对落后。值得关注的是,在其他海域开展的相关研究可以为 TC 活动的次季节预测技术研究提供参考。例如, Leroy and Wheeler (2008) 通过统计分析找出影响南半球热带气旋活动的主要因子,进而基于 MJO 的两个指数、印太海温以及气候态年循环对南半球热带气旋活动建立逐周的统计预报模型。其结果表明,在三周以内的预报时效, MJO 的作用是最大的;而在三周之后,年循环及年际尺度信号对预报结果的影响更强。

2.2 动力预测方法

基于动热力学方程的动力预测方法可以弥补统计预测方法时空不连续的缺点。有关季节尺度 TC 活动的动力预测始于 Vitart et al. (1997) 的研究。该研究发现,由观测海表面温度驱动的模式结果能够表现出类似 TC 的涡动,且与观测中 TC 的年际变率具有较好的一致性。近年来,随着动力模式对大尺度环境场以及 TC 活动模拟能力的大幅提升,很多机构开始运用动力方法建立 TC 动力预测系统,包括欧洲中期天气预报中心 (ECMWF)、NCC、STI、CUHK 等 (Vitart et al., 1999; Zhan et al., 2011b)。

20 世纪 90 年代末, ECMWF 基于海气耦合模式率先建立了 TC 活动的动力预测系统,由 2001 年开始发布逐周的预测结果,预测对象包括 TS、TY 频数、ACE、TS 平均生成位置以及 TS 路径密度 (Stockdale et al., 1998)。Stockdale et al. (2018) 通过对 1990—2014 年回报数据的分析指出,6 月起报的 ACE 与实测的关系达到 0.78, 具有较好的预报技巧。美国国际气候与社会研究所 (IRI) 在 2003 年基于德国马普研究所的 ECHAM4.5 大气环流模式建立了 TC 动力预测模型,主要关注 TS 季节频数以及 ACE。2010 年前后, NCC 基于其全球海气耦合模式 (NCC-CGCM) 通过 WRF 降尺度发布有关 TS 季节频数的动力预报结果, STI 利用 NCEP 气候预测系统 (CFSv2) 的输出资料,开展了基于国际太平

洋研究中心 (IPRC) 区域大气模式 (iRAM) 的 TS 频数动力预测 (Wu et al., 2012a)。2014 年, CUHK 基于区域气候模式 (RegCM3) 对整个西北太平洋以及登陆东亚地区的 TC 进行预测。此后, Lok and Chan (2018) 进一步发展了上述预测系统,并利用 RegCM3 的输出资料作为初始及边界条件驱动 WRF 模式得到登陆 TC 强度,进而统计出影响我国华南地区的累计功耗指数 (APDI)。2015 年,英国气象局 (UK Met Office) 基于 GloSea5 开始发布 TC 活动的动力预测结果,该模式对 TS 频率及 ACE 模拟能力较好。最近,又补充进行了有关 2019 年台风季登陆东亚 TC 的季节预测试验。除上述机构外,日本气象厅 (JMA)、NTC 以及 NOAA 的地球流体力学实验室 (GFDL) 等机构也分别发布其各自的动力预测结论。总体来说,动力模式对季节尺度全球热带气旋活动特征模拟效果都较好,但由于一些模式对 ENSO 的发生和发展预测能力较弱,在一定程度上降低了动力模式的预报技巧。

近年来,由于动力模式对热带大气季节内振荡的模拟能力有了显著的提升,运用动力模式开展 TC 活动次季节预测已具备可行性 (Vitart and Robertson, 2018)。Vitart et al. (2012) 基于 ECMWF 预报系统,研究了 MJO 对全球 7 个海域热带气旋活动的影响,其预报技巧能够达到 12 d 以上。Elsberry et al. (2014) 基于 ECMWF 模式中 51 个成员开展了次季节热带气旋集合预报,该模型表现出 5~30 d 的预报有效性,且发现西北太平洋区域的 TC 预报易于大西洋区域的飓风预报。Xiang et al. (2015) 利用 GFDL 模式,提前 11 d 对 Sandy 以及海燕的生成及路径进行了成功的模拟。中科院大气物理研究所基于 FGOALS-f2 次季节-季节预测系统,也发布了有关 TC 路径密度异常的次季节-季节无缝隙预测结果,表现出较好的预测技巧 (Li et al., 2019)。此外, Zhao et al. (2019) 指出,英国气象局哈德莱中心 (MOHC) 以及北京气候中心 (BCC) 的模式都能够较好的再现 MJO 与 TC 生成频数的关系。MOHC 的预测系统中,由强 MJO 初始条件所

预报的结果更准确。可见,TC活动的次季节动力预测技术已取得一些可观的进展。但是,由于人们对大气低频振荡的认识仍很有限,多数业务预报模式中MJO强度较弱,东传速度过快且很难从印度洋传播到西太平洋地区,从而很大程度上降低了动力模式的预报时效和预报准确性。根据IRI基于6个统计模型以及19个动力模式的预测评估,仅少数模式(如NICAM、ECMWF Cy32r3、GFDL HiRAM以及UH-HCM)能够较好地模拟MJO和全球热带气旋的生成和频数(赵宗慈等,2018)。

2.3 混合动力-统计预测方法

建立基于动力模式结果的混合动力-统计预测方法是提升TC活动的次季节-季节尺度预测能力的另一关键技术手段(Leroy and Wheeler, 2008)。基于NCEP CFS2.0的季节预测结果,STI首先发布了有关TC生成季节频数概率的动力-统计预报产品,并逐步添加了有关TC路径密度的季节预测。其所涉及的预测因子包括东印度洋海温异常、南北海温梯度以及垂直风切变等(Zhan and Wang, 2016)。NTC发布了基于NCEP CFS预测系统的动力-统计模型(NTC-SUN),该模型首先通过聚类分析将TC路径进行分类,对每类路径建模,最后给出TC总路径密度的预测结果(Kim et al., 2012, 2017)。其主要预测因子包括与各类TC路径相关的海温及大尺度环流场。此外,NTC建立了基于GloSea5的混合动力-统计预报模型,其回报的TC频数与观测之间相关能达0.7左右,表现出较好的预测技巧(Klotzbach et al., 2019)。GFDL也发展了基于FLOR的混合动力-统计预报模型。Zhang et al. (2017)指出,1(6)月起报的登陆东亚南部热带气旋频数与观测的相关达0.52(0.64)。目前,由S2S研究计划提供的多个模式的动力预报产品共享平台(Vitart et al., 2017)有望促进TC次季节-季节混合动力-统计预测技术研究的进一步深入。

3 结论与展望

次季节-季节尺度预测是无缝隙预报体系的重要组成部分。已有研究表明,影响次季节-季节尺度TC活动的关键区海温强迫因子包括太平洋海域的ENSO、西太暖池、南北海温梯度等,还包括热带印度洋和热带大西洋的海温异常。青藏高原积雪和北太平洋海冰则是影响季节尺度TC活动的陆面强迫因子。平流层准两年振荡、北太平洋涛动、南北极涛动和亚洲-太平洋涛动等是影响季节尺度TC活动

的大气内部变率因子,MJO和准双周振荡等大气季节内振荡对TC的次季节尺度活动有显著的调控作用。这些外部强迫和大气内部变率因子都是通过一定的海(陆)气相互作用和大气内部动热力学过程来对TC活动区域的大尺度环流场产生影响,比如垂直风切变、气旋或反气旋式环流异常、大气不稳定状况等,从而影响到TC的活动。

已有研究关注较多的是各类因子对次季节-季节尺度TC生成频数、源地以及TC路径的影响,对TC强度影响特征的认识仍然十分缺乏。研究表明,QBWO对于TC强度的调控作用显著,其活跃位相时TC增长率及最大可能强度都有明显加强,但其影响机理还值得进一步探讨。此外,强台风频数对ENSO的响应相对更强。传统型厄尔尼诺发生时,虽然影响我国的TC数量较少,但其登陆强度更强,影响时间也更长,会带来更严重的灾害。因此,对TC强度及风险预估的研究是未来值得注意的方向。

在主要影响因子中,受到较多关注的是热带海洋和大气信号的作用,对中高纬低频信号的作用研究较少。早在20世纪90年代中期,朱乾根和何金海(1995)便明确指出中高纬环流系统与东亚季风低频变化之间存在密切联系。随着近年来相关研究的不断深入,一些学者指出中高纬低频信号对我国南方持续降水及早涝急转等事件的关键作用(Yang et al., 2013; Miao et al., 2019)。这些中高纬低频信号均可能影响TC的异常活动,其具体影响还有待更加系统地开展研究。

不同纬度带的影响因子之间往往存在相互作用,综合考虑其协同影响对提高延伸期预报技巧有重要作用(梁萍和丁一汇, 2012)。例如, Li and Mao (2018, 2019)发现,来自中高纬低频Rossby波列与热带季节内振荡信号在高原地区耦合,进而加强长江流域地区的异常上升运动,导致包括1998年在内的长江中下游暴雨洪涝灾害。还有研究表明,两者的相互作用同样能够影响长江流域夏季热浪事件的发生(Qi et al., 2019)。不同地理位置的低频信号之间的相互作用是如何最终影响到次季节-季节尺度TC活动的,也是值得深入研究的课题。

随着机理研究的不断深入,次季节-季节尺度TC活动的预测技术得到了持续的发展,并表现出从统计预测为主向动力预测和动力-统计预测转变的趋势。统计预测技术经过了多年的发展,预测产品日益丰富,但是预测技巧却无明显进步。可能的

原因之一是,统计预测技术需要有可靠的长时序历史资料作支撑,而作为 TC 活动监测重要技术手段的气象卫星遥感监测至今只有不到 50 a 的历史,这是制约次季节-季节尺度 TC 活动统计预测技术发展的重要因素 (Klotzbach et al, 2019)。此外,次季节-季节尺度 TC 活动受到不同纬度带、不同尺度系统的影响,这些系统之间存在复杂的非线性相互作用,常用的线性统计方法难以很好地描述这些复杂过程。近年来,基于机器学习和人工智能的预报方法正在受到日益广泛的关注。通过 CNN、LSTM 等神经网络及机器学习算法开展的有关降水、温度、飓风等的预测可得到较高的预报技巧 (Gagne et al., 2014)。Ham et al. (2019) 基于模式资料运用深度学习对 ENSO 进行了成功的预测。这些都为发展次季节-季节尺度 TC 活动的统计预测技术、提升次季节-季节尺度 TC 活动的统计预测技巧提供了新思路。

将动力模式应用于开展次季节-季节尺度 TC 活动预测的工作始于 20 世纪末,并且在最近 5 a 得到了非常快速的发展。总体上说,动力模式已经具备一定的 TC 活动次季节-季节预测技巧,并将因具有时空连续性上的优势而受到越来越多的关注。评估表明,模式的季节尺度预测性能受到其对 ENSO

发生和发展预测能力的制约,而次季节尺度预测性能则主要取决于其对热带大气季节内振荡的模拟及预测能力。因受分辨率和模式物理方案能力所限,目前的动力模式仍基本无法对 TC 强度及其风雨影响在次季节-季节尺度上进行准确的再现。因此,基于动力模式预测提取次季节-季节尺度 TC 强度及其风雨影响的主要影响因子,发展混合动力-统计预测方法将继续是未来研究的重要方向之一。

随着近年来高分辨率模式的不断发展,次季节-季节尺度 TC 的多模式集合预报得到广泛关注,且被认为较单个模式具有更高的预测技巧 (Kim et al., 2017)。Zhang and Villarini (2019) 运用北美多个模式对 TC 频数进行季节预测,6 月起报的结果表明,单个模式预测与观测的相关均在 0.4 以上,但使用多模式集合,其相关达 0.63,均方根误差也有明显的减小。尽管 TC 频数以及路径等季节预测技巧已经有了明显的提升,但仍存在很强的不确定性,因此概率预报技术也是未来发展的重要方向 (Elsberry et al., 2014)。目前已经有学者对西南印度洋等海域开展了季节尺度 TC 路径及强度的概率预报 (Bonnardot et al., 2019)。此外,由 S2S 研究计划提供的多个模式的动力预报产品共享平台为次季节-季节 TC 的集合预报提供有力支撑。

参考文献 (References)

- Ashok K, Behera S K, Rao S A, et al., 2007. El Niño Modoki and its possible teleconnection [J]. *J Geophys Res*, 112(C11): C11007.
- Atkinson G, 1977. Proposed system for near real time monitoring of global tropical circulation and weather patterns [C] // 11th Tech Conf on Hurricanes and Tropical Meteorology.
- Bonnardot F, Quetelard H, Jumaux G, et al., 2019. Probabilistic forecasts of tropical cyclone tracks and intensities in the southwest Indian Ocean basin [J]. *Quart J R Meteorol Soc*, 145(719): 675-686.
- Camargo S J, Wheeler M C, Sobel A H, 2009. Diagnosis of the MJO modulation of tropical cyclogenesis using an empirical index [J]. *J Atmos Sci*, 66(10): 3061-3074.
- Camargo S J, Sobel A H, Barnston A G, et al., 2010. The influence of natural climate variability on tropical cyclones, and seasonal forecasts of tropical cyclone activity [M] // *World Scientific Series on Asia-Pacific Weather and Climate*: World Scientific.
- Cao X, Li T, Peng M, et al., 2014. Effects of monsoon trough intraseasonal oscillation on tropical cyclogenesis over the Western North Pacific [J]. *J Atmos Sci*, 71(12): 4639-4660.
- Capotondi A, Wittenberg A T, Newman M, et al., 2015. Understanding ENSO Diversity [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 96(6): 921-938.
- Chan J C L, 1985. Tropical cyclone activity in the northwest Pacific in relation to the El Niño/Southern Oscillation phenomenon [J]. *Mon Wea Rev*, 113(4): 599-606.
- Chan J C L, 1995. Tropical cyclone activity in the Western North Pacific in relation to the stratospheric quasi-biennial oscillation [J]. *Mon Wea Rev*, 123(8): 2567-2571.
- Chan J C L, Shi J E, Lam C M, 1998. Seasonal forecasting of tropical cyclone activity over the Western North Pacific and the South China sea [J]. *Wea Forecasting*, 13(4): 997-1004.
- 陈光华, 黄荣辉, 2009. 西北太平洋低频振荡对热带气旋生成的动力作用及其物理机制 [J]. *大气科学*, 33(2): 205-214. Chen G H, Huang R H, 2009. Dynamical effects of low frequency oscillation on tropical cyclogenesis over the Western North Pacific and the physical mechanisms [J]. *Chin J Atmos Sci*, 33(2): 205-214. (in Chinese).
- Chen G M, Zhang X P, Bai L N, et al., 2019. Verification of tropical cyclone operational forecast in 2018 [C] // ESCAP/WMO Typhoon Committee,

51st Session.

- 陈联寿,端义宏,宋丽莉,等,2012.台风预报及其灾害[M].北京:气象出版社. Chen L S, Duan Y H, Song L L, et al., 2012. Typhoon forecasts and disasters[M]. Beijing: China Meteorological Press. (in Chinese).
- 陈伯民,梁萍,信飞,等,2017.延伸期过程预报预测技术及应用[J].气象科技进展,7(6):82-91. Chen B M, Liang P, Xin F, et al., 2017. The extended-range process prediction technique and application[J]. Adv Meteorol Sci Technol, 7(6):82-91. (in Chinese).
- Chen D, Wang H J, Liu J P, et al., 2015. Why the spring North Pacific Oscillation is a predictor of typhoon activity over the Western North Pacific[J]. Int J Climatol, 35(11):3353-3361.
- Choi K S, Wu C C, Wang Y Q, 2011. Effect of ENSO on landfalling tropical cyclones over the Korean peninsula[J]. Asia-Pacific J Atmos Sci, 47(4):391-397.
- 丁一汇,黄荣辉,王绍武,等,2004.气候预测让生活有备无患[J].中国高校科技与产业化(4):20-23. Ding Y H, Huang R H, Wang S W, et al., 2004. Climate predictions prepare people for life [J]. Chinese Univ Technol Transf(4):20-23. (in Chinese)
- 董波,叶英,1991.北极海冰与西北太平洋热带气旋活动关系的初步分析[J].海洋预报,8(4):21-27. Dong B, Ye Y, 1991. A statistical analysis of relationship between the arctic sea ice and the northwest Pacific tropical cyclone activity[J]. Mar Forecast, 8(4):21-27. (in Chinese).
- Du Y, Yang L, Xie S P, 2011. Tropical Indian ocean influence on northwest Pacific tropical cyclones in summer following strong El Niño[J]. J Climate, 24(1):315-322.
- Elsberry R L, Tsai H C, Jordan M S, 2014. Extended-range forecasts of Atlantic tropical cyclone events during 2012 using the ECMWF 32-day ensemble predictions[J]. Wea Forecasting, 29(2):271-288.
- Fan K, 2007. North Pacific sea ice cover, a predictor for the Western North Pacific typhoon frequency? [J]. Sci China Ser D: Earth Sci, 50(8):1251-1257.
- 冯涛,黄荣辉,杨修群,等,2016. 2004年与2006年7~9月西北太平洋上空大尺度环流场与天气尺度波动的差别及其对热带气旋生成的影响[J].大气科学,40(1):157-175. Feng T, Huang R H, Yang X Q, et al., 2016. Differences between the large-scale circulations and synoptic-scale waves in July-September 2004 and those in 2006 and their impacts on tropical cyclogenesis over the Western North Pacific[J]. Chin J Atmos Sci, 40(1):157-175. (in Chinese).
- Fu C B, J Fletcher, 1985. Two patterns of equatorial warming associated with El Niño[J]. Chin Sci Bull, 30(10):1360-1364.
- Gagne D J, McGovern A, Xue M, 2014. Machine learning enhancement of storm-scale ensemble probabilistic quantitative precipitation forecasts[J]. Wea Forecasting, 29(4):1024-1043.
- 高清清,郭惠明,朱天懋,等,2017.冬春季北极海冰的变化特征及其与西北太平洋热带气旋活动的关系探讨[J].极地研究,29(4):506-512. Gao Q Q, Wu H M, Zhu T M, et al., 2017. Characteristics of winter-spring arctic sea-ice and its relationship with tropical cyclone in the northwest Pacific[J]. Chin J Polar Res, 29(4):506-512. (in Chinese).
- Goh A Z C, Chan J C L, 2012. Variations and prediction of the annual number of tropical cyclones affecting Korea and Japan[J]. Int J Climatol, 32(2):178-189.
- Gong Z S, He M, 2007. Relationships between zonal wind anomalies in high and low troposphere and annual frequency of NW Pacific tropical cyclones [J]. J Trop Meteor, 13:169-172.
- Gray W M, 1984. Atlantic seasonal hurricane frequency. part I: El Niño and 30 mb quasi-biennial oscillation influences[J]. Mon Wea Rev, 112(9):1649-1668.
- Ha K J, Yoon S J, Yun K S, et al., 2012. Dependency of typhoon intensity and genesis locations on El Niño phase and SST shift over the Western North Pacific[J]. Theor Appl Climatol, 109(3/4):383-395.
- Ham Y G, Kim J H, Luo J J, 2019. Deep learning for multi-year ENSO forecasts[J]. Nature, 573(7775):568-572.
- Harr P A, 2006. Temporal clustering of tropical cyclone occurrence on intraseasonal time scales[C]//27th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, Meteor Soc, 3D.2.
- Ho C H, 2005. Possible influence of the Antarctic Oscillation on tropical cyclone activity in the Western North Pacific[J]. J Geophys Res, 110(D19):D19104.
- Ho C H, Kim H S, Jeong J H, et al., 2009. Influence of stratospheric quasi-biennial oscillation on tropical cyclone tracks in the Western North Pacific [J]. Geophys Res Lett, 36(6):L06702.
- Huang R H, Wu Y F, 1989. The influence of ENSO on the summer climate change in China and its mechanism[J]. Adv Atmos Sci, 6(1):21-32.
- 黄荣辉,陈光华,2007.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,65(5):683-694. Huang R H, Chen G H, 2007. Research on interannual variations of tracks of tropical cyclones over northwest Pacific and their physical mechanism[J]. Acta Meteorol Sin, 65(5):683-694. (in Chinese).
- 黄荣辉,王磊,2010.台风在我国登陆地点的年际变化及其与夏季东亚/太平洋型遥相关的关系[J].大气科学,34(5):853-864. Huang R H, Wang L, 2010. Interannual variation of the landfalling locations of typhoons in China and its association with the summer East Asia/Pacific pattern teleconnection[J]. Chin J Atmos Sci, 34(5):853-864. (in Chinese).
- 黄荣辉,顾雷,徐予红,等,2005.东亚夏季风爆发和北进的年际变化特征及其与热带西太平洋热状态的关系[J].大气科学,29(1):20-36.

- Huang R H, Gu L, Xu Y H, et al., 2005. Characteristics of the interannual variations of onset and advance of the East Asian summer monsoon and their associations with thermal states of the tropical Western Pacific[J]. *Chin J Atmos Sci*, 29(1): 20-36. (in Chinese).
- 黄荣辉, 皇甫静亮, 刘永, 等, 2016. 西太平洋暖池对西北太平洋季风槽和台风活动影响过程及其机理的最近研究进展[J]. *大气科学*, 40(5): 877-896.
- Huang R H, Huangfu J L, Liu Y, et al., 2016. Progress in recent research on the processes and physical mechanisms involved in the influence of the Western Pacific warm pool on the monsoon trough and tropical cyclone activity over the Western North Pacific[J]. *Chin J Atmos Sci*, 40(5): 877-896. (in Chinese).
- 贾小龙, 陈丽娟, 高辉, 等, 2013. 我国短期气候预测技术进展[J]. *应用气象学报*, 24(6): 641-655.
- Jia X L, Chen L J, Gao H, et al., 2013. Advances of the short-range climate prediction in China[J]. *J Appl Meteorol Sci*, 24(6): 641-655. (in Chinese).
- 金小霞, 何金海, 占瑞芬, 等, 2012. 南海-西北太平洋地区大气准双周振荡对 TC 生成的调节作用[J]. *热带气象学报*, 28(4): 451-460.
- Jin X X, He J H, Zhan R F, et al., 2012. The modulation effect of quasi-biweekly oscillation on tropical cyclones over South China sea-Western North Pacific[J]. *J Trop Meteorol*, 28(4): 451-460. (in Chinese).
- Kao H Y, Yu J Y, 2009. Contrasting Eastern-Pacific and central-Pacific types of ENSO[J]. *J Climate*, 22(3): 615-632.
- Kang N Y, Kim D, Elsner J B, 2019. The contribution of super typhoons to tropical cyclone activity in response to ENSO[J]. *Sci Rep*, 9: 5046.
- Kim J H, Ho C H, Kim H S, et al., 2008. Systematic variation of summertime tropical cyclone activity in the Western North Pacific in relation to the Madden-Julian oscillation[J]. *J Climate*, 21(6): 1171-1191.
- Kim H M, Webster P J, Curry J A, 2011. Modulation of North Pacific tropical cyclone activity by three phases of ENSO[J]. *J Climate*, 24(6): 1839-1849.
- Kim H S, Ho C H, Kim J H, et al., 2012. Track-pattern-based model for seasonal prediction of tropical cyclone activity in the Western North Pacific[J]. *J Climate*, 25(13): 4660-4678.
- Kim O Y, Kim H M, Lee M I, et al., 2017. Dynamical—statistical seasonal prediction for Western North Pacific typhoons based on APCC multi-models[J]. *Clim Dyn*, 48(1/2): 71-88.
- Klotzbach P, Blake E, Camp J, et al., 2019. Seasonal Tropical Cyclone Forecasting[J]. *Trop Cyclone Res Rev*, 8(3): 134-149.
- Krishnamurthy L, Vecchi G A, Msadek R, et al., 2016. Impact of strong ENSO on regional tropical cyclone activity in a high-resolution climate model in the North Pacific and North Atlantic oceans[J]. *J Climate*, 29(7): 2375-2394.
- Lander M A, 1994. An exploratory analysis of the relationship between tropical storm formation in the Western North Pacific and ENSO[J]. *Mon Wea Rev*, 122(4): 636-651.
- 雷小途, 2001. 热带气旋频数的短期气候预测水平评估[J]. *应用气象学报*, 12(4): 501-506.
- Lei X T, 2001. Accuracy evaluation of short-climatic forecast on tropical cyclone frequency[J]. *Q J Appl Meteorolgy*, 12(4): 501-506. (in Chinese).
- 雷小途, 徐一鸣, 2001. 影响上海、长江三角洲及华东地区热带气旋频数的短期气候预测[J]. *海洋通报*, 20(3): 15-28.
- Lei X T, Xu Y M, 2001. Research on short-term climatic forecast for tropical cyclone frequency[J]. *Mar Sci Bulletin*, 20(3): 15-28. (in Chinese).
- Leroy A, Wheeler M C, 2008. Statistical prediction of weekly tropical cyclone activity in the southern hemisphere[J]. *Mon Wea Rev*, 136(10): 3637-3654.
- 李崇银, 1986. 厄尼诺与南海的台风活动[J]. *热带气象*, 2(2): 117-124.
- Li C Y, 1986. El Niño and actions of typhoon over the South China sea[J]. *J Trop Meteorol*, 2(2): 117-124. (in Chinese).
- Li C X, Wang C Z, 2014. Simulated impacts of two types of ENSO events on tropical cyclone activity in the Western North Pacific: large-scale atmospheric response[J]. *Clim Dyn*, 42(9/10): 2727-2743.
- Li J X, Bao Q, Liu Y M, et al., 2019. Evaluation of FAMIL2 in simulating the climatology and seasonal-to-interannual variability of tropical cyclone characteristics[J]. *J Adv Model Earth Syst*, 11(4): 1117-1136.
- Li J Y, Mao J Y, 2018. The impact of interactions between tropical and midlatitude intraseasonal oscillations around the Tibetan Plateau on the 1998 Yangtze floods[J]. *QJR Meteorol Soc*, 144(713): 1123-1139.
- Li J Y, Mao J Y, 2019. Coordinated influences of the tropical and extratropical intraseasonal oscillations on the 10—30-day variability of the summer rainfall over southeastern China[J]. *Clim Dyn*, 53(1/2): 137-153.
- Li R C Y, Zhou W, Chan J C L, et al., 2012. Asymmetric modulation of Western North Pacific cyclogenesis by the Madden-Julian oscillation under ENSO conditions[J]. *J Climate*, 25(15): 5374-5385.
- Li R C Y, Zhou W, 2013a. Modulation of Western North Pacific tropical cyclone activity by the ISO. part I: genesis and intensity[J]. *J Climate*, 26(9): 2904-2918.
- Li R C Y, Zhou W, 2013b. Modulation of Western North Pacific tropical cyclone activity by the ISO. part II: tracks and landfalls[J]. *J Climate*, 26(9): 2919-2930.
- Li Y P, Liang X D, Deng Z Y, 2001. Prediction of annual frequency of affecting tropical cyclone using the products of hybrid couple air-sea model[J]. *J Trop Meteorol*, 7: 63-68.
- 梁萍, 何金海, 穆海振, 2013. MJO 在延伸期预报中的应用进展[J]. *气象科技进展*, 3(1): 31-38.
- Liang P, He J H, Mu H Z, 2013. Application of MJO in extended-range forecast[J]. *Adv Meteorol Sci Technol*, 3(1): 31-38. (in Chinese).

- 梁萍,丁一汇,2012.基于季节内振荡的延伸预报试验[J].大气科学,36(1):102-116. Liang P, Ding Y H, 2012. Extended range forecast experiment based on intraseasonal oscillation[J]. Chin J Atmos Sci, 36(1):102-116. (in Chinese).
- Liebmann B, Hendon H H, Glick J D, 1994. The relationship between tropical cyclones of the Western Pacific and Indian oceans and the Madden-Julian oscillation[J]. Journal Meteorological Society Japan, 72(3):401-412.
- Liu K S, Chan J C L, 2003. Climatological characteristics and seasonal forecasting of tropical cyclones making landfall along the South China coast[J]. Mon Wea Rev, 131(8):1650-1662.
- Liu F, Zhou L, Ling J, et al., 2016. Relationship between SST anomalies and the intensity of intraseasonal variability[J]. Theor Appl Climatol, 124(3/4):847-854.
- 刘南江, 费伟, 2019. 2018年全国自然灾害基本情况分析[J]. 中国减灾(5):14-17. Liu N J, Fei W, 2019. The basic analysis of natural disasters in 2018 [J]. Disaster Reduct China(5):14-17. (in Chinese).
- Liu L, 2019. Impact of different types of ENSO years on intensity changes of landfalling tropical cyclones over China[J]. Atmosphere, 10(3):161.
- Lok C C F, Chan J C L, 2018. Simulating seasonal tropical cyclone intensities at landfall along the South China coast[J]. Clim Dyn, 50(7/8):2661-2672.
- Madden R A, 1986. Seasonal variations of the 40-50 day oscillation in the tropics[J]. J Atmos Sci, 43(24):3138-3158.
- Madden R A, Julian P R, 1971. Detection of a 40-50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific[J]. J Atmos Sci, 28(5):702-708.
- Madden R A, Julian P R, 1972. Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40-50 day period[J]. J Atmos Sci, 29(6):1109-1123.
- Maloney E D, 2000. Modulation of hurricane activity in the gulf of Mexico by the madden-Julian oscillation[J]. Science, 287(5460):2002-2004.
- Maloney E D, Hartmann D L, 2000. Modulation of Eastern North Pacific hurricanes by the madden-Julian oscillation [J]. J Climate, 13(9):1451-1460.
- Mao J Y, Wu G X, 2010. Intraseasonal modulation of tropical cyclogenesis in the Western North Pacific: a case study[J]. Theor Appl Climatol, 100(3/4):397-411.
- Miao R, Wen M, Zhang R H, et al., 2019. The influence of wave trains in mid-high latitudes on persistent heavy rain during the first rainy season over South China[J]. Clim Dyn, 53(5/6):2949-2968.
- Nakazawa T, 1988. Tropical super clusters within intraseasonal variations over the Western Pacific[J]. Journal Meteorological Society Japan, 66(6):823-839.
- Nakazawa T, 2006. Madden-Julian oscillation activity and typhoon landfall on Japan in 2004[J]. SOLA, 2:136-139.
- Paek H, Yu J Y, Zheng F, et al., 2019. Impacts of ENSO diversity on the Western Pacific and North Pacific subtropical highs during boreal summer[J]. Clim Dyn, 52(12):7153-7172.
- Patricola C M, Chang P, Saravanan R, 2016. Degree of simulated suppression of Atlantic tropical cyclones modulated by flavour of El Niño[J]. Nature Geosci, 9(2):155-160.
- Patricola C M, Camargo S J, Klotzbach P J, et al., 2018. The influence of ENSO flavors on Western North Pacific tropical cyclone activity[J]. J Climate, 31(14):5395-5416.
- Pu X S, Chen Q L, Zhong Q J, et al., 2019. Influence of the North Pacific Victoria mode on Western North Pacific tropical cyclone genesis[J]. Clim Dyn, 52(1/2):245-256.
- Qi X, Yang J, Gao M N, et al., 2019. Roles of the tropical/extratropical intraseasonal oscillations on generating the heat wave over Yangtze River valley: a numerical study[J]. J Geophys Res Atmos, 124(6):3110-3123.
- Sato K, Inoue J, Yamazaki A, et al., 2018. Impact on predictability of tropical and mid-latitude cyclones by extra Arctic observations[J]. Sci Rep, 8:12104.
- Shi Y P, Du Y, Chen Z S, et al., 2019. Impact of the quasi-biweekly oscillation on the super typhoon tracks in winter over the Western North Pacific [J]. Clim Dyn, 53(1/2):793-804.
- Sobel A H, Maloney E D, 2000. Effect of ENSO and the MJO on Western North Pacific tropical cyclones[J]. Geophys Res Lett, 27(12):1739-1742.
- 宋文玲, 何敏, 1999. 用非线性逐步回归方法作台风预测试验[J]. 气象, 25(10):20-23. Song W L, He M, 1999. Typhoon forecast test with nonlinear stepwise regression method[J]. Meteorol Mon, 25(10):20-23. (in Chinese).
- Stockdale T N, Anderson D L T, Alves J O S, et al., 1998. Global seasonal rainfall forecasts using a coupled ocean-atmosphere model[J]. Nature, 392(6674):370-373.
- Stockdale T N, Alonso-Balmaseda M, Johnson S et al., 2018. SEAS5 and the future evolution of the long-range forecast system[R]. ECMWF Technical Memorandum.
- Ta-Huu C, Sato T, 2019. Effect of ENSO phase on the contribution of environmental variables to tropical cyclone genesis in the Western North Pacific [J]. Int J Climatol, 39(4):2461-2473.
- 陶丽, 李双君, 韩艳, 等, 2012. 热带大气季节内振荡对西北太平洋地区热带气旋路径的影响[J]. 热带气象学报, 28(5):698-706. Tao L, Li S J, Han Y, et al., 2012. Impact of intraseasonal oscillations of tropical atmosphere on tc track change over the Western North Pacific[J]. J Trop Meteorol, 28(5):698-706. (in Chinese).

- 田华,李崇银,杨辉,2010.热带大气季节内振荡与对西北太平洋台风生成数的影响研究[J].热带气象学报,26(3):283-292. Tian H, Li C Y, Yang H, 2010. Modulation of typhoon genesis over the Western North Pacific by intraseasonal oscillation[J]. J Trop Meteorol, 26(3): 283-292. (in Chinese).
- Vitart F, Anderson J L, Stern W F, 1997. Simulation of interannual variability of tropical storm frequency in an ensemble of GCM integrations[J]. J Climate, 10(4): 745-760.
- Vitart F, Anderson J L, Stern W F, 1999. Impact of large-scale circulation on tropical storm frequency, intensity, and location, simulated by an ensemble of GCM integrations[J]. J Climate, 12(11): 3237-3254.
- Vitart F, Prates F, Bonet A, et al., 2012. New tropical cyclone products on the web[J]. ECMWF Newsletter, 130: 17-23.
- Vitart F, Ardilouze C, Bonet A, et al., 2017. The subseasonal to seasonal (S2S) prediction project database[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 98.
- Vitart F, Robertson A W, 2018. The sub-seasonal to seasonal prediction project (S2S) and the prediction of extreme events[J]. Npj Clim Atmos Sci, 1: 3.
- Wang B, Chan J C L, 2002. How strong ENSO events affect tropical storm activity over the Western North Pacific[J]. J Climate, 15(13): 1643-1658.
- Wang B, Wu R G, Fu X, 2000. Pacific—East Asian teleconnection: how does ENSO affect East Asian climate? [J]. J Climate, 13(9): 1517-1536.
- Wang H J, Fan K, 2007. Relationship between the Antarctic oscillation in the Western North Pacific typhoon frequency[J]. Chin Sci Bull, 52(4): 561-565.
- Wang H J, Sun J Q, Fan K, 2007. Relationships between the North Pacific Oscillation and the typhoon/hurricane frequencies[J]. Sci China Ser D: Earth Sci, 50(9): 1409-1416.
- 王磊,陈光华,黄荣辉,2009.西北太平洋大气准双周振荡对热带气旋活动的影响[J].大气科学,33(3):416-424. Wang L, Chen G H, Huang R H, 2009. The modulation of quasi-biweekly oscillation on tropical cyclone activity over the Western North Pacific[J]. Chin J Atmos Sci, 33(3): 416-424. (in Chinese).
- Wu C C, Zhan R F, Lu Y, et al., 2012a. Internal variability of the dynamically downscaled tropical cyclone activity over the Western North Pacific by the IPRC regional atmospheric model[J]. J Climate, 25(6): 2104-2122.
- Wu Z W, Li J P, Jiang Z H, et al., 2012b. Possible effects of the North Atlantic Oscillation on the strengthening relationship between the East Asian Summer monsoon and ENSO[J]. Int J Climatol, 32(5): 794-800.
- Xiang B Q, Lin S J, Zhao M, et al., 2015. Beyond weather time-scale prediction for hurricane sandy and super typhoon Haiyan in a global climate model [J]. Mon Wea Rev, 143(2): 524-535.
- Xie L, 2005. Relationship between Western North Pacific typhoon activity and Tibetan Plateau winter and spring snow cover[J]. Geophys Res Lett, 32(16): L16703.
- Xie L, Yan T Z, 2007. West North Pacific typhoon track patterns and their potential connection to Tibetan Plateau snow cover[J]. Nat Hazards, 42(2): 317-333.
- Xie S P, Hu K M, Hafner J, et al., 2009. Indian ocean capacitor effect on indo—Western Pacific climate during the summer following El Niño[J]. J Climate, 22(3): 730-747.
- 杨辉,李崇银,2005.热带大气季节内振荡的传播及影响因子研究[J].气候与环境研究,10(2):145-156. Yang H, Li C Y, 2005. A study of propagation of tropical intraseasonal oscillation and its influence mechanism[J]. Clim Environ Res, 10(2): 145-156. (in Chinese).
- Yang J L, Liu Q Y, Xie S P, et al., 2007. Impact of the Indian Ocean SST basin mode on the Asian summer monsoon[J]. Geophys Res Lett, 34(2): L02708.
- Yang S Y, Wu B Y, Zhang R H, et al., 2013. The zonal propagating characteristics of low-frequency oscillation over the Eurasian mid-high latitude in boreal summer[J]. Sci China Earth Sci, 56(9): 1566-1575.
- 应明,万日金,2011.影响我国的热带气旋年频数预测[J].应用气象学报,22(1):66-76. Ying M, Wan R J, 2011. The annual frequency prediction of tropical cyclones affecting China[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 22(1): 66-76. (in Chinese).
- You L J, Gao J Y, Lin H, et al., 2019. Impact of the intra-seasonal oscillation on tropical cyclone genesis over the Western North Pacific[J]. Int J Climatol, 39(4): 1969-1984.
- Yu J H, Xue H X, Song J, 2017. Tropical cyclone potential hazard in Southeast China and its linkage with the East Asian westerly jet[J]. Asia-Pacific J Atmos Sci, 53(2): 295-304.
- Yu J H, Li T, Tan Z M, et al., 2016. Effects of tropical North Atlantic SST on tropical cyclone genesis in the Western North Pacific[J]. Clim Dyn, 46(3/4): 865-877.
- Zhan R F, Wang Y Q, Lei X T, 2011a. Contributions of ENSO and East Indian ocean SSTA to the interannual variability of Northwest Pacific tropical cyclone frequency[J]. J Climate, 24(2): 509-521.
- Zhan R F, Wang Y Q, Wu C C, 2011b. Impact of SSTA in the East Indian ocean on the frequency of Northwest Pacific tropical cyclones: A regional atmospheric model study[J]. J Climate, 24(23): 6227-6242.
- Zhan R F, Y Wang, Ying M, 2012. Seasonal forecasts of tropical cyclone activity over the Western North Pacific: a review[J]. Tropical Cyclone Re-

- search and Review, 1(3):307-324.
- Zhan R F, Wang Y Q, 2016. CFSv2-based statistical prediction for seasonal accumulated cyclone energy (ACE) over the Western North Pacific [J]. *J Climate*, 29(2):525-541.
- Zhang W, Vecchi G A, Murakami H, et al., 2016. Improved simulation of tropical cyclone responses to ENSO in the Western North Pacific in the high-resolution GFDL HiFLOR coupled climate model [J]. *J Climate*, 29(4):1391-1415.
- Zhang W, Vecchi G A, Villarini G, et al., 2017. Statistical—dynamical seasonal forecast of Western North Pacific and East Asia land falling tropical cyclones using the GFDL FLOR coupled climate model [J]. *J Climate*, 30(6):2209-2232.
- Zhang X C, Zhong S S, Wu Z W, et al., 2018. Seasonal prediction of the typhoon genesis frequency over the Western North Pacific with a Poisson regression model [J]. *Clim Dyn*, 51(11/12):4585-4600.
- Zhang W, Villarini G, 2019. Seasonal forecasting of Western North Pacific tropical cyclone frequency using the North American multi-model ensemble [J]. *Clim Dyn*, 52(9/10):5985-5997.
- Zhao H K, Jiang X N, Wu L G, 2015a. Modulation of northwest Pacific tropical cyclone genesis by the intraseasonal variability [J]. *Journal Meteorological Society Japan*, 93(1):81-97.
- Zhao H K, Yoshida R, Raga G B, 2015b. Impact of the Madden—Julian oscillation on Western North Pacific tropical cyclogenesis associated with large-scale patterns [J]. *J Appl Meteor Climatol*, 54(7):1413-1429.
- Zhao C, Li T, 2019. Basin dependence of the MJO modulating tropical cyclone genesis [J]. *Clim Dyn*, 52(9/10):6081-6096.
- Zhao C B, Ren H L, Eade R, et al., 2019. MJO modulation and its ability to predict boreal summer tropical cyclone genesis over the Northwest Pacific in Met Office Hadley Centre and Beijing Climate Center seasonal prediction systems [J]. *QJR Meteorol Soc*, 145(720):1089-1101.
- 赵宗慈, 罗勇, 黄建斌, 2018. 用动力模式做热带气旋的季节内到百年预测与预估的评估 [J]. *气候变化研究进展*, 14(1):106-110. Zhao Z C, Luo Y, Huang J B, 2018. Assessment on predictions and projections of tropical cyclones from intraseasonal to centennial time scales using the dynamic models [J]. *Clim Chang Res*, 14(1):106-110. (in Chinese).
- 周波涛, 崔绚, 2010. 澳大利亚东侧海温:西北太平洋热带气旋生成频数的预测信号 [J]. *科学通报*, 55(31):3056-3062. Zhou B T, Cui X, 2010. The predictor signal for the Western North Pacific tropical cyclone genesis; sea surface temperature on the eastern edge of Australia [J]. *Chin Sci Bull*, 55(31):3056-3062. (in Chinese).
- 周波涛, 崔绚, 赵平, 2008. 亚洲-太平洋涛动与西北太平洋热带气旋频数的关系 [J]. *中国科学(D辑:地球科学)*, 38(1):118-123. Zhou B T, Cui X, Zhao P, 2008. The relationship between Asian-Pacific Oscillation and Western North Pacific tropical cyclone frequency [J]. *Sci China Ser D Earth Sci*, 38(1):118-123. (in Chinese).
- Zhou B T, Cui X, Zhao P, 2008. Relationship between the Asian-Pacific oscillation and the tropical cyclone frequency in the Western North Pacific [J]. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 51(3):380-385.
- Zhou B T, Xu Y, 2017. How the “best” CIMP5 models project relations of Asian-Pacific Oscillation to circulation backgrounds favorable for tropical cyclone genesis over the Western North Pacific [J]. *J Meteorol Res*, 31(1):107-116.
- Zhou H Y, Hsu P C, Qian Y T, 2018. Close linkage between quasi-biweekly oscillation and tropical cyclone intensification over the Western North Pacific [J]. *Atmos Sci Lett*, 19(7):e826. DOI:10.1002/asl.826.
- 祝从文, Tetsuo Nakazawa, 李建平, 2004. 大气季节内振荡对印度洋-西太平洋地区热带低压/气旋生成的影响 [J]. *气象学报*, 62(1):42-50, 130. Zhu C W, Nakazawa T, Li J P, 2004. Modulation of tropical depression/cyclone over the Indian-western Pacific Oceans by madden-Julian oscillation [J]. *Acta Meteorol Sin*, 62(1):42-50, 130. (in Chinese).
- 朱乾根, 何金海, 1995. 中高纬度低频环流系统与东亚季风低频变化及其异常 [J]. *地球科学进展*, 10(3):304-305. Zhu Q G, He J H, 1995. The middle-high latitudes low-frequency circulation system and the low-frequency variation and anomaly of east Asian monsoon [J]. *Advances Earth Sci*, 10(3):304-305. (in Chinese)
- Zhu Z W, Li T, 2017. Statistical extended-range forecast of winter surface air temperature and extremely cold days over China [J]. *Quart J Roy Meteorol Soc*, 143(704):1528-1538.
- Zhu Z W, Li T, 2018. Extended-range forecasting of Chinese summer surface air temperature and heat waves [J]. *Clim Dyn*, 50(5/6):2007-2021.
- Zhu Z W, Li T, Bai L, et al., 2017. Extended-range forecast for the temporal distribution of clustering tropical cyclogenesis over the Western North Pacific [J]. *Theor Appl Climatol*, 130(3/4):865-877.

Sub-seasonal to seasonal prediction of tropical cyclone activity in the Western North Pacific: a review

JIN Rui^{1,2}, YU Hui^{1,3}, WU Zhiwei², TANG Jie^{1,3}

¹Shanghai Typhoon Institute of China Meteorological Administration, Shanghai 200030, China;

²Department of Atmospheric and Oceanic Sciences & Institute of Atmospheric Sciences, Fudan University, Shanghai 200433, China;

³Key Laboratory of Tropical Cyclone Numerical Weather Prediction, China Meteorological Administration, Shanghai 200030, China

In this paper, the external forcing factors and internal variabilities which impact the Western North Pacific tropical cyclone activity (WNPTC) on the sub-seasonal to seasonal time scale were reviewed, along with the associated mechanisms. Additionally, the developing history and current situation were summarized for the prediction techniques, including statistical, dynamical and hybrid statistical-dynamical approaches. Also discussed were several scientific issues which require further research, as well as the future trends of prediction technique development.

sub-seasonal to seasonal; Western North Pacific; tropical cyclone

doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20191025006

(责任编辑:袁东敏)