

2020年海洋气象研究热点回眸

邱春华^{1,2}, 王东晓^{1,2*}, 罗希¹, 张婷¹

1. 中山大学海洋科学学院, 珠海 519082

2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 珠海 519020

摘要 回顾了2020年影响东亚气候的梅雨锋、季风、台风、海气通量、风暴潮等天气过程与机制研究取得的重要进展,探讨了海洋气象学的未来发展方向。

关键词 海气相互作用;气象灾害;天气预报

海洋气象学是气象学的一个分支,主要研究与海洋、海岛、海岸带相关的天气和气候,以及它们对海洋的影响。海洋气象的物理和动力机制研究即为海气相互作用的动力机制研究。海气相互作用过程主要包括:(1)小尺度的湍流、涡旋,海气界面的湍流影响海气热通量和湿度通量,进而影响海洋大气的边界层结构;(2)中尺度和天气尺度的海气相互作用,其过程包括海陆风、锋面、台风以及风暴潮等;(3)大尺度的季风、信风、厄尔尼诺/南方涛动(El Niño/Southern Oscillation, ENSO)等^[1]。

2020年,科学技术部国家野外科学观测研究站(包括海洋观测站)及教育部野外海洋台站的建设、《中国气候变化海洋蓝皮书(2020)》的编制完成,为国内学者及大众提供了全球及中国近海海洋要素的监测信息以及气候变化状况,有望加快中国

海洋气象的研究。

本文回顾2020年与东亚海洋气象现象相关的梅雨、季风、台风、海气通量、风暴潮等天气过程及其理论研究进展。

1 梅雨锋

2020年初夏,梅雨系统给江淮地区带来了长时间的异常强降水,降雨总量打破了1961年以来的记录,导致南方大部分地区的江河湖泊水位暴涨,持续引发了山洪、城市内涝、山体滑坡等自然灾害,其中以长江流域洪涝灾害最严重。

2020年8月14日,国家气象中心举办了暴雨过程总结技术交流会,会上发布的数据显示,2020年6月共出现5次强暴雨,主要影响江淮、江南和华

收稿日期:2020-01-01;修回日期:2021-01-09

基金项目:南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)创新团队建设项目(311020004)

作者简介:邱春华,副教授,研究方向为海洋环流,电子信箱:qiuchh3@mail.sysu.edu.cn;王东晓(通信作者),教授,研究方向为海气相互作用及海洋环流,电子信箱:dxwang@mail.sysu.edu.cn

引用格式:邱春华,王东晓,罗希,等. 2020年海洋气象研究热点回眸[J]. 科技导报, 2021, 39(1): 115-125; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.

2021.01.009

南地区,与2019年相比,影响区域偏北,具有极端降水的特性。江淮地区在2020年6月10日入梅,较往年偏早。梅雨锋的维持和水汽来源是降水量大的原因。

中央气象台专家提出高纬地区的单极型极涡较往年强度更强,而中纬度地区西风带活动频发,有利于冷空气南下;同时,弱的厄尔尼诺与赤道印度洋海温异常偏暖,引起副高显著偏强偏西,暖湿空气向北输运。冷空气和暖空气在江淮区域相遇形成稳定的梅雨锋。

针对2020年的梅雨事件,Liu等^[2]认为北大西洋涛动(NAO)调制持续的冷暖锋,可引起极端梅雨事件(图1^[2])。在正的NAO影响下,6月中下旬西

太副高和南亚高压引起的梅雨暖锋导致长江以北降水,而7月初的强降水则由负的NAO距平影响下南亚高压和蒙古气旋相互作用引起。日本气象厅认为副热带高压与黄河流域高压脊的相互作用引起了日本和华中地区降水;Takaya等^[3]用2019年的印度洋偶极子解释2020的强暴雨。2019年的超强印度洋偶极子引起2020年初的暖印度洋水体,而这个暖水体也可以引起中国的强降水。

由上可见,太平洋、大西洋、印度洋以及极地等的大尺度过程均可以影响中国的梅雨系统,全球大尺度对梅雨的影响是一个研究热点,也是降水预报的难点。

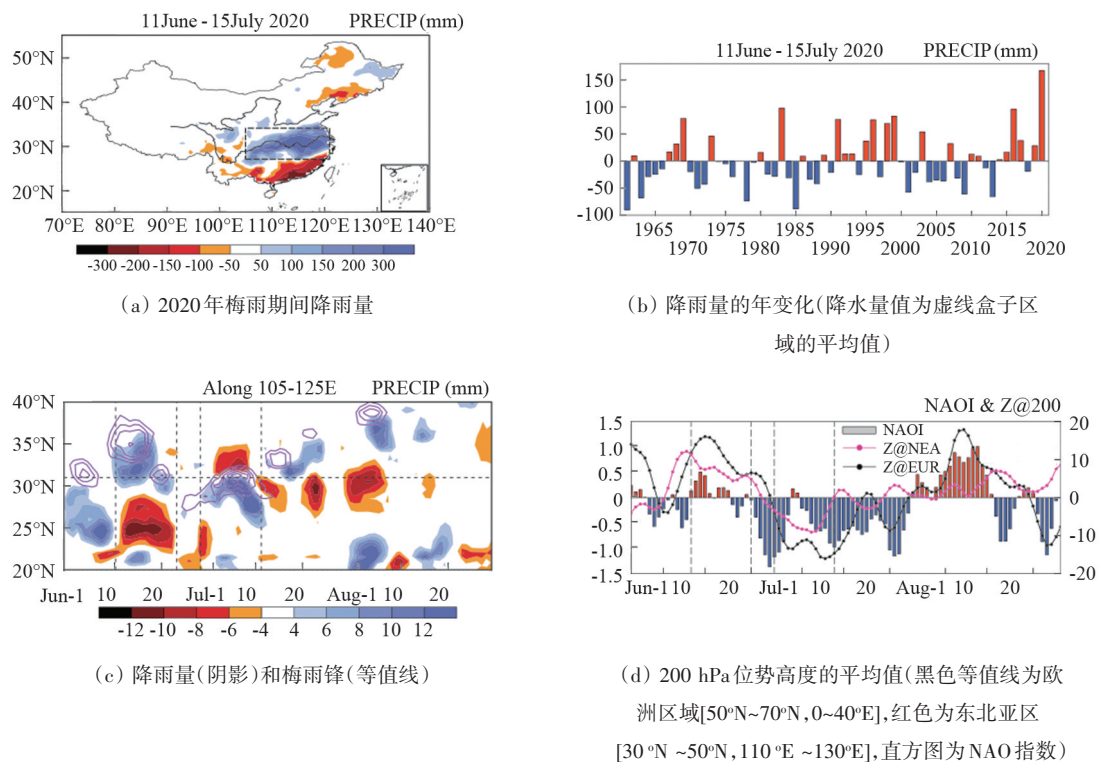


图1 降雨量与NAO的变化

2 季风

东亚夏季风的发生日期、持续时间和总降水量均有显著的年变化。Duan等^[4]认为青藏高原热力异常可以作为东亚夏季风起始的先兆。Li等^[5]和Hari等^[6]发现印度许多地区的气溶胶光学深度自

2002年以来呈现下降趋势,这种减少在此后印度夏季降水的加强中起到重要作用。印度洋-太平洋海表温度异常也同样是调制东亚以及南亚夏季风爆发与降水的重要外部因素之一。Hu等^[7]指出印度洋的30~60 d振荡的对流活跃位相与西风位相为事件提供了有利背景。Jiang和Zhu^[8]指出,发

生冷舌型拉尼娜事件时,中东太平洋由经向风辐散主导,能够使副热带西太平洋海温增暖、对流增强,联合印太暖池的增温趋势,进而抑制南海夏季风的爆发。ENSO类型对季风降水影响也是研究热点之一,Fan等^[9]指出20世纪70年代末,相较于东太平洋型ENSO与南亚夏季风之间的反向关系的显著减弱,中太平洋型ENSO在导致印度季风降水异常上发挥更为重要的作用。

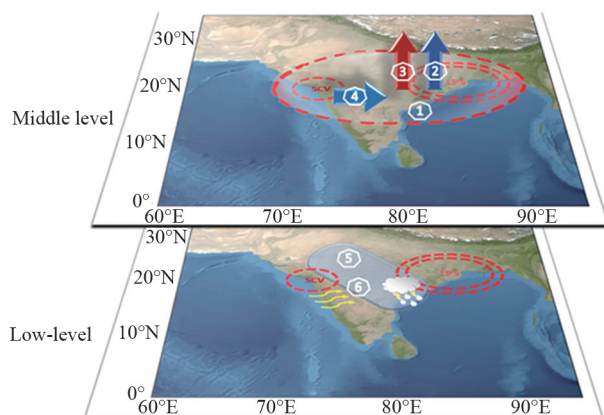
冬季风与寒潮等得到越来越多的关注。Tseng等^[10]发现在东亚冬季风的启动阶段,季风与黑潮锋面及周围大气存在一个直接的局地海气相互作用机制。Abdillah等^[11]将寒潮分成4类:SCS-type、PHS-type、Both-type和Blocked-type。他们认为海洋性大陆的热带大气季节内震荡(MJO)可以影响寒潮事件的路径,而寒潮对热带地区对流活动的影响会反过来影响MJO活动。

季风伴随的低压系统可引起强降水。Nikumbh等^[12]比较了在印度洋中部产生强降水的夏季风低压系统和未产生强降水的强低压系统。强低压系统伴随的次中尺度涡会增强来自阿拉伯海的动态升力、静态不稳定性 and 水分传输,为大气进行深度对流提供了先决条件(图2^[12])。Joseph等^[13]指出对流向气流产生的大气冷池可以显著调节海气相互作用过程,并建立了下午冷池事件的增强与从西部孟加拉湾日尺度上向东南传播的天气尺

度降雨活动之间的联系。Hu等^[14]发现在南海夏季风退出的后期,天气尺度波列明显增强(南海夏季风退出的早期,天气尺度波列受到抑制)。Leung等^[15]研究了热带西印度洋对华南和中南半岛6月降水的远程影响,指出热带西印度洋的暖异常可诱发一个热带印度洋和西太平洋之间弱于正常的Walker环流,进一步导致西北太平洋副热带高压偏东北-西南向,并在南海形成一个弱于常年的季风槽,在年际时间尺度上增强了华南地区的降水,抑制了中南半岛地区的降水。

亚洲夏季风预测模式的不确定性研究也有了一定进展。Huang等^[16]将地球系统模型MPI-ESM和CanESM2组合使用,发现南亚地区内部气候变化通过掩盖SASM的强迫降水趋势导致季风预测存在较大不确定性,模型组合中剔除有关太平洋年代际震荡的降雨变化后可以减少这种不确定性。Xin等^[17]使用CMIP6和CMIP5中的8个气候模型对中国夏季降水和东亚夏季风的模拟进行了比较,发现在中国东部地区,CMIP6在气候降水的空间相关性和标准差(SD)方面更有优势。研究发现,西北太平洋副热带高压和东亚高空对流层西风急流是东亚夏季降水系统的重要组成部分,与东亚夏季降水密切相关。Zhou等^[18]的结果表明东亚夏季风及其组成部分的变化是一个紧密耦合的系统。Ashrit等^[19]对印度季风评估表明,印度季风资料同化与分析资料(IMDAA)在印度大陆上空有更强的低空风、更明显的印度-恒河平原季风槽、更高的季风Hadley指数和更强的季风环流,能很好地用于印度夏季风及风能资源的评估。

亚洲季风区的降水预测始终是热点问题。Suman和Maity^[20]使用协调区域气候降尺度实验,预测未来的印度洋偶极子加剧,并造成印度季风的增强,上空西南季风风向将向东移动,加剧印度南部和北部之间极端降水的观测对比,并在缅甸、泰国、马来西亚等国家引起更多极端降水事件。Moon和Ha^[21]的模式预测结果显示未来大多数季风区的雨季时长会增加。Park等^[22]将偏置校正技术应用于区域气候模式(RCM),表明各分区未来年降水量平均值和极端值的变化在干旱区呈减少趋势,在湿



数字1~6分别代表对流层中层涡管、动态抬升、静态不稳定性、水分供应、低层系统和季风低压系统平移速度

图2 印度大规模降水机制示意

润区呈增加趋势。预计未来从中国西南湿润区到环渤海地区年降水量将显著增加,东亚夏季风雨带将在该区域附近加强。

3 台风

2020年,国内外学者在热带气旋的活动变化规律、热带气旋与海洋的相互作用以及热带气旋活动预报的数值模拟方面发表了一系列成果。

全球变暖的气候背景下,各大洋的台风活动发生了变异,有许多研究关注全球变暖对台风活动的影响。Murakami等^[23]使用高分辨率动力学模型表明台风发生频率的空间分布变化可能归因于温室

气体排放量的增加。Wu等^[24]分析了在气候变暖情况下台风强度增加、发生频率下降,这与台风向极移动和极端降水增加有关。在全球变暖情况下,台风移动速度会减小,特别是在中高纬度地区,这将对自然和人类造成更大的损失^[25-26]。全球变暖可能导致台风强度增强,快速增强的台风的数量会增多^[27]。Zhao等^[28-29]利用气候模式进一步发现全球变暖主要减少西北太平洋的台风路径密度,有助于更好地了解未来台风路径的潜在变化。Chu等^[30]使用超高分辨率地球系统模型进行了温室变暖实验模拟,发现夏季哈德莱环流上升支的减弱会抑制未来台风生成和台风导致的海洋冷却(图3^[30])。

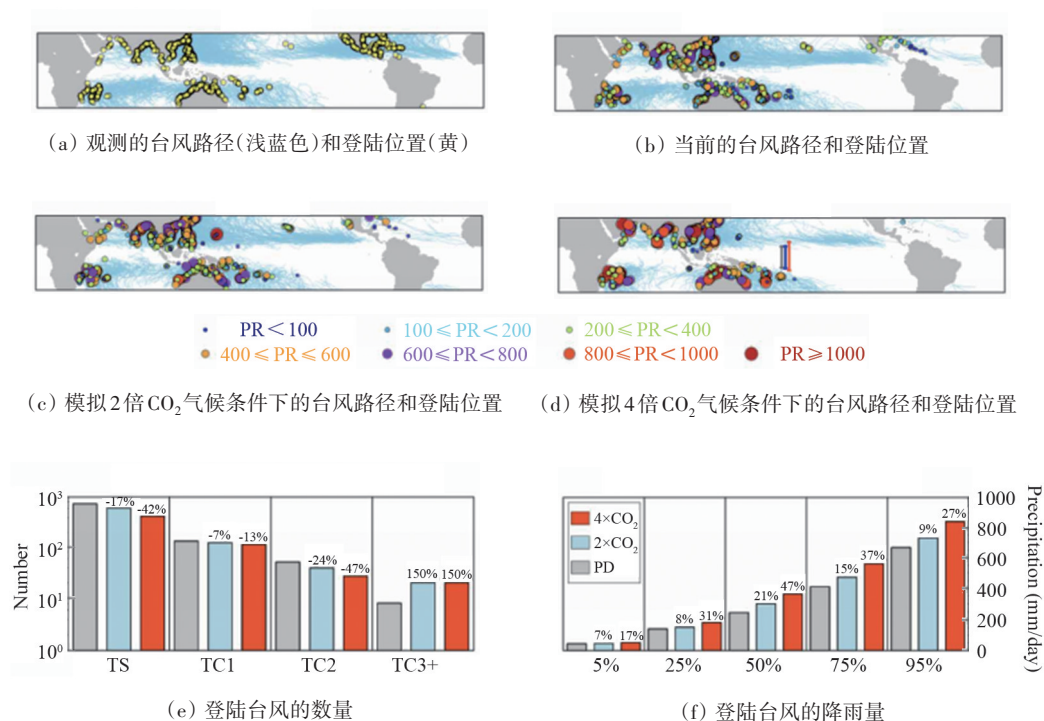


图3 登陆台风的位置、降雨量和强度

太平洋与印度洋模态影响台风活动。自1997年后,台风发生频率显著降低,而2012年以来热带气旋的最大登陆强度逐年增加,这些变化与菲律宾东部和南海北部较小的垂直风切变和较高的台风热势^[31]以及相对涡度的变化相关^[32]。台风的活动会受到大气环流和海温模态的影响。Hu等^[33]发现9—10月中旬西太平洋生成的台风数量与南海夏

季风撤退日期呈正相关。太平洋经向模态指数影响台风的生成位置、频率和引导气流^[34-35]。印度洋偶极子正相位和强厄尔尼诺的共同作用引起了西阿拉伯海的大规模增温,有利于台风生成^[36]。

局地气象条件影响台风的强度。Song等^[37]发现可通过强度/大小与其理论最大值的比值确定西北太平洋台风的演化类型。Ruppert等^[38]研究

了云-红外辐射反馈效应在热带气旋发展中的关键作用。该反馈通过增强发展期台风中的侧向环流,使其核心达到饱和状态,并通过角动量辐聚加速其表面切向环流的加速旋转,以缩短热带风暴在迅速增强为强台风之前的孕育期。Nystrom等^[39]使用海洋-大气耦合和非耦合(仅大气)的集成模拟模型,探索了不确定的海表动量和温度/湿度(焓)交换系数对台风强度的复杂影响。Wu和Ruan^[40]分析了台风强度的日变化特征,发现台风强度的日变化与极深对流云团覆盖量最高有关。Cao等^[41]模拟了高空反气旋和低层气旋式环流对热带气旋形成的影响,发现初始的高空反气旋环流并非台风形成的必要条件,而低层气旋环流与涡旋的叠加,诱发了较大的地表热通量和涡度,导致对流和加热,正涡度快速积累,致使台风快速形成。Liu和Wang^[42]分析了在中国登陆的台风引起的降水趋势及其可能的机制。Feng等^[43]研究了未登陆的台风带来的降水时域地域分布情况,以及带来的极端降水事件。Lai等^[44]发现台风引起的局部降雨总量显著增加,且台风移动速度与局部降雨总量之间存在显著的反相关。在珠三角地区,移动速度较低且降雨总量较高的台风发生频率更高,与快速移动的台风相比,移动缓慢的台风更有可能产生更高总量的强降雨,从而在区域范围内带来更大的洪水风险。

台风活动与局地上层海洋的背景条件相互影响。热带海洋与大气边界层之间的非绝热加热是台风发生发展的重要能量来源,因此热带海洋上层海水的温度变化对于台风的形成、移动及耗散都具有关键作用。Chih等^[45]发现由于台风引起的海洋降温,在台风内部核心区域的海洋热含量和海面温度(SST)较低。Bruneau等^[46]发现台风最大风速在穿过涡旋尺度的海表温度异常后迅速恢复,而由海表温度异常引起的台风半径和积分动能的变化却不会迅速恢复。Ma等^[47-48]发现冷涡较强的上升运动导致台风引起的海面温度下降幅度增大,海表焓通量下降近50%,对流爆发被抑制,潜热释放减少50%。同时,海洋冷涡也会影响台风大气边界层的结构。Anandh等^[49]发现冷涡导致热带气旋Madi的

强度减弱了80%,而暖涡区的潜热输送使得台风增强。Mawren等^[50]发现海洋涡旋通过影响海温、焓通量、热带气旋热势和上层海洋热含量而调制热带气旋的强度。Lu和Wang等^[51]研究了台风过后的海洋地转响应,发现台风引起的位势涡度扰动变化局限于温跃层之内,这些扰动造成了涡旋扰动的三维准地转演变过程。

台风的数值预报模式具有不确定性。学者发现增强分辨率的耦合模型有利于提高台风生成的可预测性^[52]。Qin和Duan^[53]利用非线性强迫奇异向量方法表明了模式误差是台风强度短期预报不确定性的重要来源之一;台风强度短期预报的不确定性对对流层中低层的温度变化更为敏感。Park和Cha^[54]选择天气预报模式(WRF)单矩微物理学3类水成物(WSM3)和6类水成物(WSM6)方案分别作为简单方案和复杂方案,分析了西北太平洋模式台风实时轨迹和强度预报对云微物理方案的敏感性,发现WSM6方案对台风的强度、大小和相关 β 效应的改进模拟改善了台风运动轨迹和强度预测。Li和Peng^[55]发现公共大气模式(CAM)5.0中模拟的热带气旋降水、强度以及物理参数对时间步长是很敏感的。Wang等^[56]使用WRF模型分析了初始环境场的不确定性对台风预测强度的影响,表明初始条件的不确定性会导致台风预报的不确定性,这种不确定性随着预测时间的增加而增加。海表面温度预报模式的不确定性可能会严重影响南太平洋热带气旋预报的准确性^[57]。沿着台风路径进行的SST的精确连续预报可能对改善台风大小的预测至关重要,而台风中心附近的瞬时SST对于最大风速的预测更为重要^[46]。

2020年,中国的台风预报模式也取得了新的进展。南海台风模式(tropical regional atmosphere model for the South China Sea, TRAMS)形成了3.0版本,在模式分辨率和对流参数化方案方面较TRAMS 2.0模式有明显的改进,72 h的平均路径续保误差改进了7%,强度预报误差改进了10.5%^[58]。Fumin等^[59]将统计算法和动力模型相结合开发了一个动力-统计算法的集合预报模型(DSAEF),对登

陆的热带气旋的累积雨量进行预测,其预测能力与当前的数值天气预报模型相当。Jia 和 Ren^[60]利用轨迹-相似性的动力统计集合预报模型(LTP_DSEF)预测了登陆的热带气旋暴雨。LTP_DSEF 模型在预报登陆后累计的强降水方面优于ECMWF、GFS 以及 GRAPES 模型,尤其是对于大于 250 mm 的降水预报,能够对登陆台风较大的累积降水提供有用的预报指南。

在台风观测方面,无人艇成功地穿越了三号台风“森拉克”中心,提供了时间分辨率高达 1 min 的实时观测数据,检测了台风过境时洋面各要素的详细变化过程,为台风预报、预警发挥了重要作用^[61]。

4 海气通量

海气界面的动量、热量和水汽交换是连接海洋和大气的重要桥梁,是进行海洋与大气之间物质与能量转换的主要机制,是影响全球气候变化的重要过程。海气通量直接决定和调控近海面大气边界层内的动力学结构,其中动量通量显著地影响着海流、海浪和风暴潮的产生。

近几十年的观测表明,海表面波浪与其上方风场的相互作用,会产生动量通量在海气界面之间的双向传递。当近海表面处风速极小,并且海表面涌浪占优时,动量通量由海洋传递到大气,使得近海表面风速剪切增加,导致传统对数风廓线的方法难以准确计算该条件下的海气通量。此后,不同研究者在理论模型和海气数值耦合模式的改进中考虑了涌浪作用。例如,Zou 等^[62]分别在中性和非中性条件下考虑了涌浪对海气边界层的影响,指出同时考虑空气浮力和涌浪所计算的海气通量与观测数据符合较好;Wu 等^[63]将涌浪所诱导的动量通量及其对大气混合的作用加入到湍封闭参数化方案中进行一维大气模拟实验,结果表明涌浪作用的考虑使得所模拟的海气边界层内要素更加接近大涡模拟结果。2020 年,Jiang^[64]利用诊断大涡模拟明确计算了海表面边界层和涌浪,进而检验了涌浪对近海面边界层内的湍流结构和标量剖线的影响。该结

果指出,在大气稳定条件下,涌浪对近海面边界层内的平均风速和其他标量廓线影响明显;但当湍流中的浮力作用增强时,涌浪对风速以及标量廓线的作用减小,相反,它通过对波边界层上施加阻力来修改垂直风速切变,使得风速垂直切变重新分布并导致标量的湍流混合。另外,考虑到涌浪场与海表面上方风场分布的不一致性,Chen 等^[65]利用在中国南海北部沿海地区的海气通量观测数据,分析了涌浪占优条件下风应力的矢量性质,发现涌浪的存在使得应力方向与风向偏离,并且偏离程度随着风向与涌浪之间夹角的增大而增大。

当海表面以上风速为中低风速时,在海表面波浪处于风浪占优的情况下,大气将一部分能量传递到海表面波浪,使得海浪获得一部分动量。风浪对海气通量的影响是海洋研究中最为基础的问题之一,关于这方面的讨论仍处于完善与补充中。最近一个新的模型被提出^[66],用来表示风浪对近海面边界层内湍流动能耗散的影响。在该模型中,给定高度的动量通量由附着在海面的涡流平均贡献所产生。该模型阐明了风浪对 Monin-Obukhvo 相似理论的影响及其对动量通量变化的作用。

当海表面以上风达到并超过飓风风速时(30 m/s),海表面波浪大量破碎,复杂的海表面条件为观测和理论分析带来了挑战。一些外海观测和实验室数据表明^[67-69]:当风速足够大时,海表面阻力系数不再符合传统模型的计算结果,即随着风速增加而增加。大部分研究将这个现象归因为海洋飞沫液滴,并通过参数化传统模型中的海表面动力学粗糙长度来刻画这一现象。Zhang 等^[70-71]将海表面波浪与海洋飞沫所诱导的动量通量同时引入到海气边界层的动量守恒方程中,通过分析动量在空气、海浪和飞沫之间的分布情况,进一步解释了阻力系数值随风速的变化趋势。Chen 等^[72]将飞沫的作用加入到海流-海浪耦合模式的波边界层模块中,模拟了热带气旋下的海表面拖曳系数并且与外海观测数据符合较好。然而半径为 0.01~1000 μm 的飞沫液滴浓度在外海中的测量十分具有挑战性,尤其在极端天气条件下。2020 年,Ma 等^[73]利用激

光高度计,通过观测得到了热带气旋“奥尔文”经过印度海时的飞沫体积通量。该体积通量随风速增加而增大,并且比通过两个实验室实验所得到的结果大两个量级,该体积通量与海表面状态有关。

5 风暴潮

风暴潮发生在世界各地的沿岸地区,通常强风和气压骤变导致海面异常升降,风暴涌浪对沿海设施造成巨大的破坏,甚至造成人员伤亡。2020年,科学家对风暴潮进行深入研究,主要集中在风暴潮对沿海地区的影响方面。通过模型对风暴潮进行模拟是当今研究风暴潮的主流方法。随着风暴潮模型的研究日渐深入,模型与实际结果之间的误差也在不断减小。全球潮汐、风暴潮和波浪模型被用于预测未来一个世纪的沿海地区突发性洪水,模型预测在没有海岸保护或适应的情况下,全球受风暴潮影响的陆地面积将增加48%,受影响人口将增加52%,受影响的资产将增加46%。全球68%的沿海地区的洪水将由风暴潮事件造成,其中32%是由于预计的区域海平面上升影响^[74]。

气候变化和海平面上升给风暴潮的研究及其灾害预防带来了新的挑战,美国休斯敦大学学者Cheikh等^[75]通过改变波浪高度、周期和海平面来研究多种风暴潮情景对沿海建筑物的影响,造成风暴潮和洪灾风险增加的主要原因是潮汐放大和飓风的加剧。在气候变化上,西班牙坎塔布里亚大学环境研究所在未来海平面变化上提出,风暴潮受全球和区域气候变化的影响,这种不确定性随着时间的推移而增加^[76]。

美国伊利诺伊大学的研究人员使用逻辑模型和非平稳随机域的组合开发的风暴潮预报的概率公式对北卡罗来纳州的风暴潮进行了分析和预测,该模型中提供了某一地区被洪水淹没的可能性,考虑了不同地区风暴潮的空间相关性,此外,该模型还使用观测值对模型实际进行校正^[77]。美国佛罗里达大学使用了基于物理过程和数据驱动的模式模拟风暴潮,该模型量化了风暴潮预报与相关预报

因子(风速、平均海平面压力等)之间的关系,数据驱动模型在温带地区和亚热带地区比热带地区更好地模拟了每日最大涌浪^[78]。美国斯蒂文斯理工学院的研究人员Orton^[79]验证三维水动力模型,分析了热带气旋、离岸热带气旋和内陆“湿温带”旋风的水流与风暴潮叠加在一起,在潮汐较高的河流中,“湿温带”旋风对洪水风险非常重要;在河口和潮汐较低的河流中,离岸热带气旋对洪水风险非常重要;在所有位置,热带气旋对风暴潮和极端降雨都很重要。

波浪等因素与风暴潮的相互作用对灾害的加剧十分显著,浪潮相互作用在现今也是一个研究热点。研究人员利用耦合模型研究了台风诱发的风暴潮和波浪形成的效应,结果表明随着台风强度或台风尺寸的增加,有效波高和风暴潮的最大值以及扩展的空间范围都显著增加,波浪对最大风暴潮的贡献随着台风强度和大小的增加而非线性增加,但当台风强度大于55 m/s或台风规模大于40 km时,波浪对风暴潮的贡献趋于饱和^[80]。Cheikh等^[75]也研究了在波浪条件下的风暴潮对沿海地区的影响。

在风暴潮的影响下,对沿海湿地生态系统的研究也在不断深入。比利时的研究人员研究了当风暴潮经过红树林等湿地时,幅度会被削弱,全球约35%的沿岸地区居民因此受益^[81]。美国研究人员对佛罗里达州的红树林进行研究,风暴潮期间的红树林沉积物出现堆积,Feher等^[82]认为这是周期性的,侵蚀和堆积交替进行,最终适应了海平面高度变化;Radabaugh等^[83]认为热带和亚热带西大西洋沿岸的红树林间断地受到飓风的影响,并可能因速度较高的风、高能风暴潮和风暴潮沉积物沉积而使树根窒息而受到破坏。

6 结论

总结了2020年近百篇海洋气象学研究论文,重点回顾了在与东亚气象灾害相关的天气过程(包括梅雨锋、台风、季风、风暴潮等)方面取得的一系列成果。成果表明,海气多尺度过程之间的相互作

用、全球大洋遥相关对影响中国天气尺度过程的调制、季风本身及其降水预测的不确定性、台风的气候变化与厄尔尼诺的关系、台风与海洋中小尺度动力过程的耦合及海面粗糙度(波浪、泡沫)等精细观测等方面既是2020年也是未来海洋气象的发展方向。

致谢: 中山大学海洋科学学院王志豪、吴松泰、罗楚仪、杨梓浩、吴浩慈等协助部分工作。

参考文献(References)

- [1] Xie L, Liu B. Weather forecasting/marine meteorology[J]. Encyclopedia of Atmospheric Sciences, 2015, 2(3816): 287-292.
- [2] Liu B, Yan Y, Zhu C, et al. Record-breaking Meiyu rainfall around the Yangtze River in 2020 regulated by the subseasonal phase transition of the North Atlantic Oscillation[J]. Geophysical Research Letters, 2020, 47(22). doi: 10.1029/2020GL090342.
- [3] Takaya Y, Ishikawa I, Kobayashi C, et al. Enhanced MeiyuBaiu rainfall in early summer 2020: After math of the 2019 super IOD event[J]. Geophysical Research Letters, 2020, 47(22). doi: 10.1029/2020GL090671.
- [4] Duan A, Hu D, Hu W, et al. Precursor effect of the Tibetan Plateau heating anomaly on the seasonal march of the East Asian summer monsoon precipitation[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2020, 125(23). doi: 10.1029/2020JD032948.
- [5] Li X, Ting M, You Y, et al. South Asian summer monsoon response to aerosol-forced sea surface temperatures [J]. Geophysical Research Letters, 2020, 47(1). doi: 10.1029/2019GL085329.
- [6] Hari V, Villarini G, Karmakar S, et al. Northward propagation of the Inter Tropical Convergence Zone and strengthening of Indian summer monsoon rainfall[J]. Geophysical Research Letters, 2020, 47(23). doi: 10.1029/2020GL089823.
- [7] Hu P, Chen W, Chen S, et al. Extremely early summer monsoon onset in the South China Sea in 2019 following an El Niño event[J]. Monthly Weather Review, 2020, 148(5): 1877-1890.
- [8] Jiang N, Zhu C. Seasonal forecast of South China Sea summer monsoon onset disturbed by the cold tongue La Niña in recent decade[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2021, 38: 147-155.
- [9] Fan F, Lin R, Fang X, et al. Influence of the Eastern Pacific and central Pacific types of ENSO on the South Asian summer monsoon[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2021, 38: 12-28.
- [10] Tseng Y, Ding R, Zhao S, et al. Could the North Pacific Oscillation be modified by the initiation of the East Asian Winter Monsoon?[J]. Journal of Climate, 2021, 34(1): 361-377.
- [11] Abdillah M R, Kanno Y, Iwasaki T, et al. Cold surge pathways in East Asia and their tropical impacts[J]. Journal of Climate, 2021, 34(1): 157-170.
- [12] Nikumbh A C, Chakraborty A, Bhat G S, et al. Large-scale extreme rainfall-producing synoptic systems of the Indian Summer Monsoon[J]. Geophysical Research Letters, 2020, 47(11). doi: 10.1029/2020GL088403.
- [13] Joseph J, Girishkumar M S, Mcphaden M J, et al. Diurnal variability of atmospheric cold pool events and associated air-sea interactions in the Bay of Bengal during the summer monsoon[J]. Climate Dynamics, 2020. doi: 10.1007/s00382-020-05506-w.
- [14] Hu P, Huangfu J, Chen W, et al. South China Sea summer monsoon withdrawal and the synoptic-scale wave train over the western North Pacific[J]. International Journal of Climatology, 2020, 40: 5599-5611.
- [15] Leung Y T, Zhou W, Wang D, et al. Remote Tropical Western Indian Ocean forcing on changes in June precipitation in South China and the Indochina Peninsula [J]. Journal of Climate, 2020, 33(17): 7553-7566.
- [16] Huang X, Zhou T, Dai A, et al. South Asian summer monsoon projections constrained by the interdecadal Pacific oscillation[J]. Science Advances, 2020, 6(11): 6546.
- [17] Xin X, Wu T, Zhang J, et al. Comparison of CMIP6 and CMIP5 simulations of precipitation in China and the East Asian summer monsoon[J]. International Journal of Climatology, 2020, 40: 6423-6440.
- [18] Zhou S, Huang G, Huang P. Inter-model spread of the changes in the East Asian summer monsoon system in CMIP5/6 models[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2020, 125(24). doi: 10.1029/2020JD033016.
- [19] Ashrit R, Indira Rani S, Kumar S, et al. IMDAA regional reanalysis: Performance evaluation during Indian summer monsoon season[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2020, 125(2). doi: 10.1029/2019JD030973.
- [20] Suman M, Maity R. Southward shift of precipitation extremes over south Asia: Evidences from CORDEX data [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 6452.
- [21] Moon S, Ha K J. Future changes in monsoon duration

- and precipitation using CMIP6[J]. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 2020, 3, 45. doi: 10.1038/s41612-020-00151-w.
- [22] Park C, Lee G, Kim G, et al. Future changes in precipitation for identified sub-regions in East Asia using bias-corrected multi-RCMs[J]. *International Journal of Climatology*, 2020. doi: 10.1002/joc.6936.
- [23] Murakami H, Delworth T L, Cooke W F, et al. Detected climatic change in global distribution of tropical cyclones [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020, 117(20): 10706–10714.
- [24] Wu L, Wen Z, Huang R. Tropical cyclones in a warming climate[J]. *Science China Earth Science*, 2020, 63(3): 146–148.
- [25] Yamaguchi M, Chan J C L, Moon I J, et al. Global warming changes tropical cyclone translation speed[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 47.
- [26] Zhang G, Murakami H, Knutson T R, et al. Tropical cyclone motion in a changing climate[J]. *Science Advances*, 2020, 6(17): 7610.
- [27] Qi P, Wang A. Numerical simulation of tropical cyclone generated waves in South China Sea during winter monsoon surge[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 22156. doi: 10.1038/s41598-020-79204-2.
- [28] Zhao J, Zhan R, Wang Y. Different responses of tropical cyclone tracks over the western north Pacific and north Atlantic to two distinct sea surface temperature warming patterns[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(7). doi: 10.1029/2019GL086923.
- [29] Zhao J, Zhan R, Wang Y, et al. Untangling impacts of global warming and Interdecadal Pacific Oscillation on long-term variability of North Pacific tropical cyclone track density[J]. *Science Advances*. 2020, 6(41): 1–8.
- [30] Chu J E, Lee S S, Timmermann A, et al. Reduced tropical cyclone densities and ocean effects due to anthropogenic greenhouse warming[J]. *Science Advances*, 2020, 6(51): 5109.
- [31] Liu K S, Chan J C L. Recent increase in extreme intensity of tropical cyclones making landfall in South China [J]. *Climate Dynamics*, 2020, 55(5–6): 1059–1074.
- [32] Li P H, Chih H T, Jia Y Y. Investigating the abrupt change of tropical cyclone (TC) activity in the Western North Pacific by using different TC genesis indices[J]. *International Journal of Climatology*, 2020, 40(14): 5959–5972.
- [33] Hu P, Huangfu J, Chen W, et al. Impacts of early/late South China Sea summer monsoon withdrawal on tropical cyclone genesis over the western North Pacific[J]. *Climate Dynamics*, 2020, 55(5–6): 1507–1520.
- [34] Gao S, Zhu L, Zhang W, Shen X. Impact of the Pacific Meridional Mode on landfalling tropical cyclone frequency in China[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, 146(730): 2410–2420.
- [35] Wu Q, Zhao J, Zhan R, et al. Revisiting the interannual impact of the Pacific Meridional Mode on tropical cyclone genesis frequency in the Western North Pacific[J]. *Climate Dynamics*, 2020. doi: 10.1007/s00382-020-05515-9.
- [36] Chowdhury R R, Kumar S P, Narvekar J, et al. Back-to-back occurrence of tropical cyclones in the Arabian Sea during October–November 2015: Causes and responses[J]. *Journal of Geophysical Research–Oceans*, 2020, 125(6). doi: 10.1029/2019JC015836.
- [37] Song J, Duan Y, Klotzbach P J. Revisiting the relationship between tropical cyclone size and intensity over the western North Pacific[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(13). doi: 10.1029/2020GL088217.
- [38] Ruppert J H, Wing A A, Tang X D, et al. The critical role of cloud–infrared radiation feedback in tropical cyclone development[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020, 117(45): 27884–27892.
- [39] Nystrom R G, Chen X, Zhang F, et al. Nonlinear impacts of surface exchange coefficient uncertainty on tropical cyclone intensity and air–sea interactions[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(3). doi: 10.1029/2019GL085783.
- [40] Wu Q, Hong J, Ruan Z. Diurnal variations in tropical cyclone intensification[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(23). doi: 10.1029/2020GL090397.
- [41] Cao X, Wu R G, Dai Y F, et al. A comparison of the effects of an upper-level anticyclone and a lower-level cyclone on tropical cyclogenesis in idealized simulations [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2020, 98(5): 1005–1027.
- [42] Liu L, Wang Y. Trends in landfalling tropical cyclone induced precipitation over China[J]. *Journal of Climate*, 2020, 33(6): 2223–2235.
- [43] Feng T, Ren F, Zhang D L, et al. Sideswiping tropical cyclones and their associated precipitation over China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2020, 37(7): 707–717.
- [44] Lai Y, Li J, Gu X, et al. Greater flood risks in response to slowdown of tropical cyclones over the coast of China [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020, 117(26): 14751–14755.
- [45] Chih C H, Wu C C. Exploratory analysis of upper ocean heat content and sea surface temperature underlying tropical cyclone rapid intensification in the Western

- North Pacific[J]. *Journal of Climate*, 2020, 33(3): 1031–1050.
- [46] Bruneau N, Wang S, Toumi R. Long memory impact of ocean mesoscale temperature anomalies on tropical cyclone size[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(6). doi: 10.1029/2019GL086165.
- [47] Ma Z. A study of the interaction between typhoon Francisco (2013) and a cold core eddy. Part I: Rapid weakening[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2020, 77(1): 355–377.
- [48] Ma Z, Fei J, Huang X, et al. A study of the interaction between typhoon Francisco (2013) and a cold-core eddy. Part II: Boundary layer structures[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2020, 77(8): 2865–2883.
- [49] Anandh T S, Das B K, Kuttippurath J, et al. A coupled model analyses on the interaction between oceanic eddies and tropical cyclones over the Bay of Bengal[J]. *Ocean Dynamics*, 2020, 70(19): 327–337.
- [50] Mawren D, Hermes J, Reason C J C. Exceptional tropical cyclone Kenneth in the far northern Mozambique channel and ocean eddy influences[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(16). doi: 10.1029/2020GL088715.
- [51] Lu Z, Wang G, Shang X. Strength and spatial structure of the perturbation induced by a tropical cyclone to the underlying eddies[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2020, 125(5). doi: 10.1029/2020JC016097.
- [52] Li M K, Zhang S Q, Wu L X, et al. An examination of the predictability of tropical cyclone genesis in high-resolution coupled models with dynamically downscaled coupled data assimilation initialization[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2020, 37: 939–950.
- [53] Qin X, Duan W, Xu H. Sensitivity to tendency perturbations of tropical cyclone short-range intensity forecasts generated by WRF[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2020, 37(3): 291–306.
- [54] Park J, Cha D H, Lee M K, et al. Impact of cloud microphysics schemes on tropical cyclone forecast over the western North Pacific[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, 125(18). doi: 10.1029/2019JD032288.
- [55] Li X, Peng X, Zhang Y. Investigation of the effect of the time step on the physics-dynamics interaction in CAM5 using an idealized tropical cyclone experiment[J]. *Climate Dynamics*, 2020, 55(3–4): 665–680.
- [56] Wang C, Wu L, Lu J, et al. Interannual variability of the basinwide translation speed of tropical cyclones in the western north Pacific[J]. *Journal of Climate*, 2020, 33(20): 1–33.
- [57] Dutheil C, Lengaigne M, Bador M, et al. Impact of projected sea surface temperature biases on tropical cyclones projections in the South Pacific[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 4838.
- [58] 徐道生, 陈子通, 张艳霞, 等. 南海台风模式 TRAMS 3.0 的技术更新和评估结果[J]. *气象*, 2020, 46(11): 1474–1484.
- [59] Fumin R, Ding C, Zhang D L, et al. A dynamical-statistical-analog ensemble forecast model: Theory and an application to heavy rainfall forecasts of landfalling tropical cyclones[J]. *Monthly Weather Review*, 2020, 148(4): 1503–1517.
- [60] Jia Z, Ren F, Zhang D, et al. An application of the LTP_DSEF model to heavy precipitation forecasts of landfalling tropical cyclones over China in 2018[J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, 63: 27–36.
- [61] 中科院无人艇成功穿越台风眼[J]. *传感器世界*, 2020, 26(8): 44.
- [62] Zou Z, Zhao D, Zhang J A, et al. The influence of swell on the atmospheric boundary layer under nonneutral conditions[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2018, 48(4): 925–936.
- [63] Wu L, Rutgersson A, Nilsson E. Atmospheric boundary layer turbulence closure scheme for wind-following swell conditions[J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 2017, 74(7): 2363–2382.
- [64] Jiang Q. Influence of swell on marine surface layer structure[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2020, 77(5): 1865–1885.
- [65] Chen S, Qiao F, Xue Y, et al. Directional characteristic of wind stress vector under swell-dominated conditions [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2020, 125(7). doi: <https://doi.org/10.1029/2020JC016352>.
- [66] Ayet A, Chapron B, Redelsperger J L, et al. On the impact of long wind-waves on near-surface turbulence and momentum fluxes[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2020, 174: 465–496.
- [67] Powell M D, Vickery P J, Reinhold T A. Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones[J]. *Nature*, 2003, 422(6929): 279–283.
- [68] Ewa J, Mitchell D A, Wang D W, et al. Bottom-up determination of air-sea momentum exchange under a major tropical cyclone[J]. *Science*, 2007, 315(5819): 1707–1709.
- [69] Holthuijsen L H, Powell M D, Pietrzak J D. Wind and waves in extreme hurricanes[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2012, 117(C9). doi: 10.1029/2012JC007983.
- [70] Zhang T, Song J B, Li S, et al. The effects of wind-driven

- en waves and ocean spray on the drag coefficient and near-surface wind profiles over the ocean[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, 35(11): 79–85.
- [71] Zhang T, Song J B. Effects of sea-surface waves and ocean spray on air-sea momentum fluxes[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2018, 35(4): 469–478.
- [72] Chen Y J, Yu X P. Enhancement of wind stress evaluation method under storm conditions[J]. *Climate Dynamics*, 2016, 47(12): 3833–3843.
- [73] Ma H Y, Babanin A V, Qiao F L. Field observations of sea spray under tropical cyclone Olwyn[J]. *Ocean Dynamics*, 2020, 70: 1439–1448.
- [74] Kirezci E, Young I R, Ranasinghe R, et al. Projections of global-scale extreme sea levels and resulting episodic coastal flooding over the 21st Century[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 11629.
- [75] Cheikh M I, Momen M. The interacting effects of storm surge intensification and sea-level rise on coastal resiliency: a high-resolution turbulence resolving case study [J]. *Environmental Research Communications*, 2020, 2(11): 115002.
- [76] Toimil A, Camus P, Losada I J, et al. Climate change-driven coastal erosion modelling in temperate sandy beaches: methods and uncertainty treatment[J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 202: 103110.
- [77] Contento A, Xu H, Gardoni P. Probabilistic formulation for storm surge predictions[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2020, 16(4): 547–566.
- [78] Tadesse M, Wahl T, Cid A. Data-driven modeling of global storm surges[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2020, 7: 260.
- [79] Orton P M, Conticello F R, Cioffi F, et al. Flood hazard assessment from storm tides, rain and sea level rise for a tidal river estuary[J]. *Natural Hazards*, 2020, 102: 729–757.
- [80] Li A, Guan S, Mo D, et al. Modeling wave effects on storm surge from different typhoon intensities and sizes in the South China Sea[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, 235: 106551.
- [81] Coppenolle R V, Temmerman S. Identifying global hotspots where coastal wetland conservation can contribute to nature-based mitigation of coastal flood risks[J]. *Global and Planetary Change*, 2020, 187: 103125.
- [82] Feher L C, Osland M J, Anderson G H, et al. The long-term effects of hurricanes Wilma and Irma on soil elevation change in Everglades mangrove forests[J]. *Ecosystems*, 2020, 23: 917–931.
- [83] Radabaugh K R, Moyer R P, Chappel A R, et al. Mangrove damage, delayed mortality, and early recovery following Hurricane Irma at two landfall sites in southwest Florida, USA[J]. *Estuaries and Coasts*, 2020, 43: 1104–1118.

Review of hotspots of marine meteorology in 2020

QIU Chunhua^{1,2}, WANG Dongxiao^{1,2*}, LUO Xi¹, ZHANG Ting¹

1. School of Marine Science, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082

2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519020

Abstract Marine meteorology is important to global climate and meteorological disaster. We summarize the development in weather processes and mechanisms which influenced the climate of East Asia in 2020, including the Meiyu front, monsoon, tropical cyclone, air-sea fluxes, and storm surge. We also discuss the future hotspots in marine meteorology.

Keywords air-sea interaction; meteorological disaster; weather forecast ●



(责任编辑 王丽娜)