

2023 年海洋气象研究热点回眸

王麟^{1,2}, 王东晓^{1,2*}, 邱春华^{1,2}, 张广隶^{1,2}, 邹仲水^{1,2}, 胡湛¹, 戴潇铭¹, 杨桐², 席紫涵¹, 贺垠凯¹, 张微微¹, 张一¹, 廖喜扬¹, 姚凤朝^{1,2}, 孟峥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 519080

摘要 回顾了 2022—2023 年有关台风、海雾、季风、海气通量理论、海浪模拟、寒潮等海洋气象学研究进展和在此期间海洋气象观测技术的提升与发展。研究多关注于各类海洋与气象观测和模拟技术的提升, 以及海洋气象灾害潜在致灾因子的形成和发展机理, 例如近年来台风路径多变, 快速发展的案例频发; 季风、海雾、海浪、海气界面通量等的观测和发展机理研究、模式参数化改进是未来海洋气象学的重要研究方向, 这些研究成果对海洋气象灾害的预测和预警提供一定的科学基础和应用价值。

关键词 海洋气象学; 海气相互作用; 海洋气象灾害

海洋气象学是研究海洋与大气的相互作用的学科, 具有气象为海洋事业服务的科学特性, 主要研究海洋与大气之间的水分和热量的交换, 以及海洋对天气和气候变化的影响, 海洋冰冻状况等^[1-2]。《海洋气象发展规划(2016—2025)》《国务院关于印发气象高质量发展纲要(2022—2035)》等明确提出未来 10 年海洋气象预报要通过加强观测体系建设、理论和技术创新、预警体系建设等措施, 提升海洋气象预报系统的能力, 更好地保障人民生命财产安全, 减少气象灾害带来的风险和损失。近年来海洋气象灾害的频发促进国内外相关研究人员对海洋-大气相互作用机理和现象的研究。

本文回顾 2022—2023 年有关台风、海雾、季风、海气通量理论、海浪模拟、寒潮等海洋气象学研究进展和在此期间海洋气象观测技术的提升与发展。

1 台风

在海气观测技术不断发展的背景下, 国内外研究人员基于观测资料, 利用人工智能、数值模式等手段在台风活动的变化规律、相关的海气相互作用和预报等方面取得了一系列的成果。Shan 等^[3]发现自 1980 年代以后, 北半球和南半球的热带海洋上的强台风事件的发生时间提前了 3.7 d/10 a 和 3.2 d/10 a (图 1^[3])。

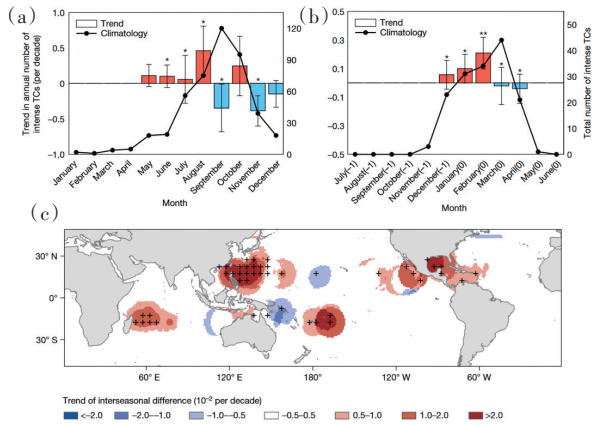
收稿日期: 2023-12-22; 修回日期: 2024-01-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(92158204); 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)创新团队项目(311023005)

作者简介: 王麟, 助理教授, 研究方向为热带印度洋海气相互作用, 电子信箱: wanglin58@mail.sysu.edu.cn; 王东晓(通信作者), 教授, 研究方向为海洋环流动力学和海气相互作用, 电子信箱: dxwang@mail.sysu.edu.cn

引用格式: 王麟, 王东晓, 邱春华, 等. 2023 年海洋气象研究热点回眸[J]. 科技导报, 2024, 42(1): 124-135; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2024.

01.008



北半球(a)与南半球(b)超强台风数量的季节分布(线图)和变化趋势(柱状图);(c) 超强台风季节变化的空间分布(秋-夏)

图1 全球超强台风季节提前

强台风的季节性提前建立与提前快速增强有关,在全球变暖的背景下,强台风的季节性提前将增加与其他极端降水事件复合发生的可能性,从而导致更严重的天气灾害。Chan^[4]综合调查了过去登陆东亚的台风的强度和频率变化并进行了未来预估。依据气候模式的预测结果,未来登陆中国沿岸的台风将会减少,但强度会增加。Huang等^[5]基于第六次耦合模式比较计划(CMIP6)多模式多情景未来预估实验的最新结果,探究了未来西北太平洋台风生成频数的可能变化以及不确定性的主要来源。Cao等^[6]发现春季在西北太平洋上空生成的台风与随后夏季至秋季在南海上空生成的台风之间存在反向变化。Chen等^[7]研究了西北太平洋台风高峰期的台风降雨量(TCR)对不同厄尔尼诺现象的响应。Li等^[8]研究了1981—2020年中国沿海台风快速增强(rapid intensification, RI)事件的长期变化。结果表明:自1981年以来,中国沿海的RI事件频率显著增加,尤其是最近10年。中国沿海显著变暖是导致RI事件显著增加最重要的因素,CMIP6模式模拟也进一步证实了这一结果。Liu等^[9]分析了西北太平洋双台风共存期间的降水的非对称结构与2个台风之间距离的变化关系,发现降水的非对称性随着2个台风之间的距离减少而增加,而距离超过2050 km后就保持稳定。台风的强度日变化研究方面也取得了进展,Zhang等^[10]利用

多源数据统计了全球台风的日变化波动特征。Zhang等^[11]调查了快速增强的台风的增强率和增强开始时间的关系,发现快速增强事件平均可以持续约42 h,主要发生在凌晨0点到6点。结果表明,夜间增强的内核对流可能在触发TC快速增强中发挥作用。Sun等^[12]利用星载微波辐射计和合成孔径雷达的数据,评估了2021年台风“烟花”的涡度结构变化。

1) 台风-海洋相互作用是台风研究领域的前沿问题。海洋表面响应台风而发生的降温是上层海洋对台风最显著的响应特征。台风产生的海面降温主要位于台风路径的右后侧。台风强度和海面降温存在一个负反馈的关系,强的台风会引发更强的海面降温,强的海面降温反过来会抑制台风的强度。Zheng等^[13]基于浮漂和遥感资料分析了台风中心前侧海面降温对台风的响应特征,发现台风从深远海移动到近海时,台风中心前侧海面降温都存在迅速增强的现象(图2^[13])。垂向混合在深远海的海面降温过程中占主导地位,平流作用则是近海区域海面降温迅速增加的主要因素。Zhang^[14]利用南海北部观测站的潜标和浮标数据调查了快速移动的强台风海鸥(1415号)、超强台风威马逊(1409号)和超强台风海马(1622号)对上层海洋垂向温度结构和热含量的影响。Ye等^[15]以台风“玉兔”为例,基于观测和高分辨率海洋环流数值模式调查了台风引起的淡水通量强迫对上层海洋的影响,并通过敏感性试验定量地研究了台风引起的淡水通量强迫和风应力强迫对海温响应的贡献。

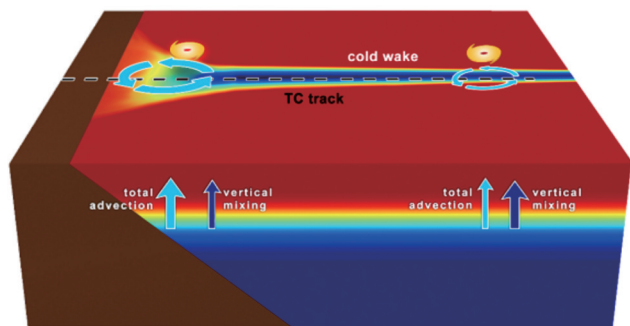


图2 台风中心前侧海面降温机制示意

2) 基于数值模式进行的台风活动预报仍然是当前主流的预报手段。He等^[16]使用WRF模式(the weather research and forecasting model)调查了城市化和人为变暖增强对大湾区台风降雨的影响。Ye等^[17]发展了新的三维湍流参数化方案(Shanghai meteorological service-three dimensional turbulent kinetic energy, SMS-3DTKE方案),该方案可以很好地表征台风边界层以上对流系统内的次网格湍流输送,可用于改善台风强度和结构的模拟。Li等^[18]使用海气耦合和非耦合的理想集合预报试验,从大气误差动力学途径和大气与海洋共同影响途径分别研究了海气耦合系统中台风强度和海表降温的负反馈机制对台风误差增长动力学与强度可预报性的影响。此外,人工智能也被广泛地应用到台风的相关研究中。Zhuo等^[19]利用物理增强的深度学习模型重建了全新的西北太平洋台风尺度数据集“DeepTCSize”。Zhang等^[20]以2002—2016年的台风为训练案例,以2017—2018年的台风为预测和测试用例,利用多变量的长短期记忆递归神经网络(a long short-term memory neural network, LSTM)预测了西北太平洋台风引起的海表温度冷却。Cui等^[21]利用随机森林方法预测了西北太平洋台风导致的海温冷却的空间分布和时空演变。Wang等^[22]基于深度学习方法提出了一种新的台风边界层参数化方案“DeepBL”,首次实现了深度神经网络在中尺度模式边界层参数化中的应用,与传统的模式边界层参数化方案相比,该方案能够更好地再现湍流通量的空间特征和数据分布,有助于提高模式对台风的模拟能力。

3) 在台风观测技术方面,针对全球变暖情况下台风等极端气象灾害逐渐增多以及观测数据缺乏的问题,利用多种手段对台风等气象灾害过程进行地海空天立体协同观测已经成为可能。中国于2020年针对台风“浪卡”开展了涉及卫星、飞机、无人机、无人艇和追风观测车等多平台的协同观测试验,初步验证了地海空天多平台协同观测实验的可行性^[23]。2021年开展了利用风云四号B星、机载下投探空仪和探空气球,针对台风“木兰”前身的协同加密观测试验,加密观测数据在观测1 min内便进

入了CMA-GFS,有效提高了数值模式对台风精细三维结构的刻画^[24]。2023年利用卫星、地基天气雷达观测网、“海燕”无人机、北斗导航平漂探空和“中山大学号”科考船等多种探测手段,在台风“海葵”发展成强台风之际,完成了在“苏拉”“海葵”等多台风背景下南海台风地海空天立体协同观测实验,观测数据在南海台风数值预报系统(CMA-TRAMS)模式中进行同化试验,结果显示协同观测获得的海量数据,可有效提高台风路径和强度预报准确率^[25]。

2 海雾

海雾是指发生在海上或沿海地区大气边界层内,由于水汽凝结而产生的大量水滴或冰晶使大气水平能见度小于1 km的天气现象。而海雾通常会对船舶运输、渔业捕捞和养殖、海上油气勘探开发以及军事活动等造成不利影响。此外,雾中水汽覆盖和离子凝结对滨海农业和建筑均有影响。近1年来,国内外研究人员在极区气候变异反馈海雾生成作出了创新性的科学展望,且基于新观测监测方法、新模式验证、新数据资料,按纬度带划分的特定区域海雾特征及其影响探究发表了一系列成果。

由于北极持续变暖,预计海洋上空的北极雾发生频率将会增加。根据未来排放情景中温度和相对湿度的预计变化,到21世纪末,北极能见度总体下降8%~12%,虽然海冰消融本身有利于高纬度地区海上运输,但海雾频率增加成为另一个限制航线安全因素,因此基于北极海雾的研究方向是新难点。Gilson等^[26]分析了高纬度海雾的综合气候特征。约70%~80%的格陵兰岛东沿海雾发生在夏季(5月~8月),每年雾的出现几乎与海冰融化的开始同时发生。这种暖季雾具有平流雾的典型特征,以及与平静稳定大气,冰间湖破裂向大气输送水汽、提供冷却效应和凝结核,低纬暖平流输送到北极经过海洋锋面相关联,其中南部站点Tasiilaq(TASI)和Prins Christian Sund(PRINS)的雾能见度分别与北大西洋涛动(NAO)和格陵兰阻塞高压(GBI)的每日指数存在相反的相关性。Song等^[27]利用RCP4.5和8.5情形下的海冰CMIP5多模式集合方法,分析了气候

变暖、海冰消退情形下开展北极航线的设计似乎还受海雾频率增加的影响。约20%~30%的北极航线出现海雾频率超过20%，其中海雾导致西北航道的运输时间比之前的估计增加了23%~27%，俄北方海航道（东北航道）的运输时间增加了4%~11%。Yi等^[28]利用中国“雪龙”号科考船队（I和II）上的现场能见度测量研究了楚科奇一波弗特地区（175°E~150°W, 70°~86°N）夏季海雾的时空变化。现场观测结果表明：楚科奇一波弗特地区的雾发生频率在清晨最高可达约18%，全天其余时间小于10%；还结合了星载云气溶胶激光雷达和红外探路者卫星观测（CALIPSO）观测的垂直特征掩膜产品和相关雾产品，分析得到沿大陆海岸线的雾频率也低于楚科奇一波弗特地区。造成这种经纬度模式的原因可能是由于太平洋暖流在夏季通过白令海峡流入北极地区抑制逆温层导致海岸线雾气形成减少，以及波弗特环流使来自北极深处的冷锋与来自太平洋的暖流汇合，锋生作用产生逆温下偏远海的楚科奇一波弗特地区雾气形成增加。

在中高纬度地区的大陆边缘海，尤其当北向的暖湿空气吹过冷海面形成陡峭的海温锋面，导致海雾发生的频率较高，且具有空间尺度大、持续时间长的特点。Pope等^[29]突破了过去局限于海温模拟对海雾时空分布敏感性的影响的研究，在海雾微物理上用RAMS实现中高纬度纽芬兰大浅滩区（Grand Banks）区域模拟，探究控制液滴尺寸分布相对宽度的微物理形状参数和气溶胶数量浓度作用雾的空间范围、持续时间和表层能见度。Xiao等^[30]提出了一种利用CALIOP激光雷达数据和MERRA-2再分析数据近海表面气象条件的新型海雾探测方法，探究雾主要发生在北纬40°以北地区，最高频率出现在鄂霍次克海和白令海千岛群岛邻近地区，其中夏季频率最高，冬季频率最低。Yang等^[31]采用三维湍流闭合边界层方案-大涡模拟（UCLA-LES）模型来追踪西北太平洋跨海面温度（SST）锋面上的雾柱，模拟不沿用过去研究中关注液态水含量以验证模型模拟海雾，而是强调了雾顶长波辐射冷却（LWC）及其相关的热湍流在平流雾期间的演变，对长期船载观测平流冷却雾期间表面

空气温度会下降到海面温度以下的演变作出合理解释。而国内开展海雾方面研究最早的黄海区域相关科学研究也继续完善，Yun等^[32]把黄海海雾按轨迹权重由高到低分类了4条路径，即分别来自山东半岛周围水域的西部气流、源自长江三角洲周围的西南气流、来自大陆并经过沈阳地区的西北气流、源自东海东北部的东南气流，而后两者根据温度平流及水汽诊断有显著的冷暖雾特征；Kim等^[33]研究考虑了过去2017—2020年黄海发生的60次雾事件实例，使用通信、海洋和气象卫星数据（COMS）的中红外通道3.7 μm波段的亮温以及中红外通道和长波红外10.8 μm波段的亮温温度差异数据集，来训练和测试其所提出的基于条件生成对抗性网络技术（cGAN）的数据到数据（D2D）预测模型。模型总体提高了海雾发生时临近预报的精度，弥补了传统数值模型（NWP）依赖各类物理过程和变量导致短临预报不足，实现了卫星遥感监测结合深度学习解决黄海海雾识别的问题。Wang等^[34]通过布置船载相干多普勒激光雷达（CDL）将反演的水平速度和垂直速度处理成高阶矩项反映湍流特征，揭示当海雾存在时，海洋大气边界层内的湍流混合过程较弱；太阳辐射加热海表的日变化也不明显，盛行风向保持南风/西南风是维持2022年4月19日白天黄海海雾事件的主要原因。除上述平流冷却雾外，Li等^[35]研究了在黄海范围青岛沿海罕见的、在温暖海面上出现极冷空气平流产生的特殊蒸发海雾（海浩），采用区域海洋建模系统（ROMS）和天气研究与预报（WRF）模型与Goddard化学气溶胶辐射和传输（GOCART）化学模块耦合模型来重现这种海浩现象并分析海气相互作用。其中极端冷空气（-13.3℃）与相对温暖稳定的海面（4.7~5.7℃）之间20℃的温差增强了海水蒸发。数值结果强调了冬季风暴引发的向岸底流和发生暖异常的上升流是向青岛沿岸输送热能的基本因素。因此，该过程可以维持稳定的海温以支持极端海雾个例的持续水蒸发物理过程。

东中国海方面，Hu等^[36]针对宁波—舟山海雾事件在宁波舟山港开发了一个全面海雾监测系统，该系统利用自动气象站（AWS）、能见度激光成像

探测、测距仪(LIDAR)评估海雾的严重程度,提高监测精度,并研究提出了一种新的方法,利用湿度和能见度数据进行自动提取和分类,通过将湿度作为一个判别因素,提高了海雾过程识别的效率(确定了各站满足湿度阈值的开始和结束时间,缩短时间间隔提高判断海雾发生的时间分辨率);海雾实例是通过分析激光能见度反演值来监测的,能见度反演值是通过运用激光能见度雷达在超过 10 km 的扇形半径内的大范围内监测所获取的相关海雾信息,由此可确认雾的等级水平。Tu 等^[37]总结了 2021 年 4 月 1 日浙江沿海出现大雾的宏微观物理过程(图 3^[37]),利用自动气象站、毫米波雷达和雾滴光谱仪结合预报 WRF 模型模拟调查了雾的形成、爆发、成熟和消散等阶段。被强烈逆温覆盖的足够潮湿的亚云层以及下降运动导致的云底降低对于雾的爆发阶段增强至关重要。弱东北风流场所导致的水汽供应下,凝聚生长是雾形成和爆发的主要微物理过程,碰撞聚并过程在爆发阶段强度强于形成阶段。而所形成的大液滴在成熟阶段发生强烈重力沉降,液态水含量(LWC)减少,粒径谱宽变窄。海雾消散阶段,云顶冷却夹带是主要原因。

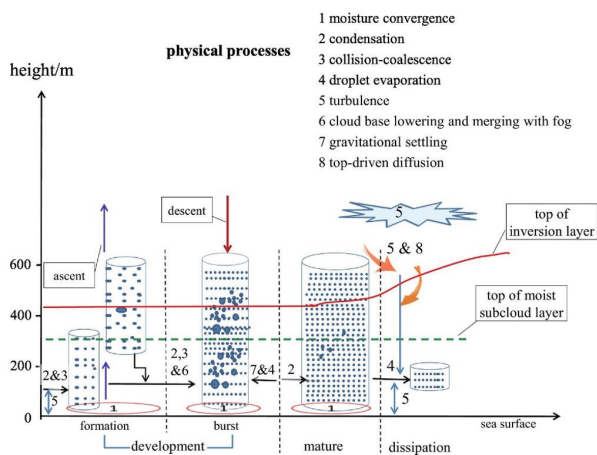


图3 浙江沿海 2021 年 4 月 1 日海雾各阶段的宏微观物理过程

过去国内大部分的海雾探究焦点在黄渤海、东中国海等海雾多发的典型区域,对于北回归线以南的海区讨论一直不集中。Kong 等^[38]获取自 2021 年 1 月至 2022 年 4 月的由 FY-4A 卫星上 AGRI 海雾监

测产品(分辨率 4 km)和海面温度(SST)产品(分辨率 3 km),分析 3 月为南海区(2.5°N~23.6°N)的最高雾频月,且持续时间为 4 个月,重点分布在北部湾、中沙群岛东南及南沙群岛北部,产生海雾适宜的 SST 为 19℃~25℃。在有关南海海雾长期气候变化的研究中,Han 等^[39]用国际综合海洋大气数据集(ICOADS)观测能见度和 ERA-5 再分析数据中云液态水含量(CLWC)交叉代为表征雾事件变量,指出了随着太平洋年代际震荡(PDO)正位相冬季风的加强,对流层下部冷暖平流交汇,增加了南海北部上空空气湿度,从而有助于增加海雾频率(SFF)。而混合单粒子拉格朗日综合轨迹模型可以帮助分析一段时期的大量海雾样本,确定海雾产生源。其中 Zhou 等^[40]发现南海北部的两大重要港口——徐闻港和湛江港在历史 2013—2021 年冷暖平流雾分配比例上差异,靠南侧的徐闻港低层大气更多受偏东南或偏南气流影响,因此暖平流雾比例略高。

3 季风

研究人员在季风的驱动因素、降水的影响及预报方面取得了一定的进展。海表温度的变化和海洋大气相互作用会导致亚洲夏季季风的出现。Zuo 等^[41]使用 CMIP6 实验数据,研究了亚洲陆地和印度洋之间海陆热对比(TCAI)与夏季季风的关系,发现对流层的 TCAI 能够可靠地反映夏季季风的变化状态,还发现 TCAI 的主要驱动因素是人为强迫和大西洋年代际振荡(AMO)。同样地,在南亚地区,Liu 等^[42]发现孟加拉湾、南海和印度的季风发生过程由 3 种不同的年际模式引起:ENSO 相关的海温和热带印度洋—太平洋的异常环流、印度西南部的海温对阿拉伯海上空的低层跨赤道气流的影响、北太平洋西部海温及其产生的环流异常调控了南海北部的 ASMOP。在东南亚,Zhuang 等^[43]研究表明中南半岛的地形和海陆温度对比差异对亚洲夏季季风的形成具有关键作用。Lin 等^[44]发现 CMIP6 不同模式对 ENSO 在衰退年夏季影响东南亚夏季风作用的模拟情况具有较大差异,并指出该模式间差异主要由热带太平洋冷舌的强度差异引起的热力

和动力机制差异所造成。

除此之外,青藏高原的热效应、太平洋年代际涛动(IPO)、大气遥相关对季风的强度也存在调制作用。Lu等^[45]通过观测分析和模式实验研究发现青藏高原的热效应会减弱东南亚夏季季风,而大西洋海温的变暖则会通过温带波列和热带纬向环流增强这种关系(图4)。Wang等^[46]研究表明IPO正相位时,东亚夏季风和热带大西洋海温之间存在较强的关系,导致东亚夏季风的增强,负相位时,这种联系则不明显。Hu等^[47]证实了热亚洲带夏季季风的延迟发生与青藏高原偏冷的温度异常有关。Huang等^[48]的研究也证实了青藏高原地区的强迫调节着亚洲夏季风的演变。

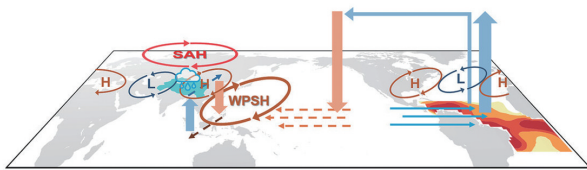


图4 TP对SEASM的热影响的物理机制示意图以及热带大西洋海温异常对TP-SEASM关系的调制

不同时间尺度上对季风的研究也在逐步开展。Li等^[49]研究发现受南印度洋海温年代际变化的影响,当南印度洋海温异常增暖时,菲律宾和西北太平洋上空的气旋-反气旋耦合导致水汽异常向东输送、东亚南部水汽输运减少,中纬度西北太平洋向东亚中部的水汽输送增加,使得东亚夏季降水异常在年代际时间尺度上形成东亚中部降水异常增加,东亚北部和南部降水异常减少的“负-正-负”经向三级型。Gui等^[50]通过对印度夏季风和东亚夏季风交界面的年代际变化研究发现,东亚夏季风和印度夏季风之间呈跷跷板型变化,其中与APO类似的模态正相位会导致东亚地区的季风增强、印度夏季风减弱;而与NAT类似的模态则会导致界面的纬向运动(模态负相位则情况相反)。

由于季风与降水信号的紧密联系,它对气候的调节和人类社会的生产都会造成较大影响,因此提高其可预报性与对预报效果进行评估很有必要。Dai等^[51]利用机器学习方法,将印度的夏季风和冬季风各自总结出3个子阶段,并分别提出紧凑指数

来对南亚季节季风进行监测和预报。Zhang等^[52]利用GloSea5在对东亚冬季风的模拟和预测中发现,提前2个月预测东亚冬季风的强度指数效果最好,但在华北和东北地区存在冷偏差。

4 海气通量理论

贴近海洋表面几十米的大气边界层是海洋-大气相互作用中物质与能量交换的主要场所。在该区域内,湍流引发的海-气界面动量、热量和水汽通量是海-气相互作用中的重要参数,对海浪、风暴潮以及台风等海洋灾害的精准预报起着关键作用,同时也对研究气候变化有着重要的意义。过去1年研究人员在海浪对海气通量的影响方面取得了一定的进展。

海气通量的研究一般借用Monin-Obukhov相似理论(MOST)。实验室研究证明在壁湍流中的含能区有某一类附着涡(attached eddies),传递物质效率比较高,并满足MOST理论,在湍流谱表现出 k^{-1} 指数律,既区别于边界层尾流中心的涡,亦区别于满足湍流谱的 $k^{-5/3}$ 指数律的湍流惯性副区,这反映海洋垫面属性的变化可能影响大气中动量以及热量、水汽等被动标量的湍流自相似性特性^[53]。下垫面为海洋时,海-气边界层的湍流远比陆地或者实验室复杂^[54]。使得MOST偏离陆地、实验室中的结果^[55-56]。在此情况下,Huang等^[57]结合附着涡理论(attached eddies model)研究了覆盖在波浪上的湍流,结果显示附着涡理论是适用的,但是在波浪影响下满足 k^{-1} 的尺度有所偏离,Liu等^[58]建议将海浪的相速度加入附着涡理论。

海气界面海浪诱导的通量是另外一个问题。Grare等^[59]观测显示海浪扰流与Miles^[60]剪切不稳定一致。Chen等^[61]用 $e^{-\alpha z}$ 描述浪致雷诺应力的衰减方式。Wu等^[62]通过给定不同的衰减系数来研究海浪对大气的反馈。但值得注意的是, $e^{-\alpha z}$ 衰减形式与实验室和大涡模拟结果不符,表现为在海面浪致雷诺应力为0,随着高度增加先增大后减小^[63-64]。

近海面大气边界层中的常通量层也是近年热点问题。Grare等^[65]的观测显示底层通量小高层通

量大; Mahrt 等^[66]观测显示通量随着高度增加而衰减; Ortiz-Suslow 等^[67]进一步报道满足常通量层假定的动量通量仅有 30%~40%, 热量通量为 50%~60%。

另外, Huang^[68]使用观测数据和一个一维混合模式的流动, 研究海气热通量对北欧海周边大西洋水冷却所起的作用, 发现海气热通量几乎完全占 AW 的净冷却沿着挪威大西洋锋流, 而海洋的横向传热似乎占主导地位的温度变化沿着挪威大西洋斜坡流。Liu 等^[69]利用 2021 年南海夏季风(SCSSM)期间的船载观测资料, 分析了南海近地面气象条件、地面热量收支和大气边界层结构特征。结果表明, 近地面气温和相对湿度在季风发展期显著下降, 而近地面风速从季风前期到季风发展期呈明显上升趋势, 由于云层的覆盖, 太阳辐射显著减少, 导致海洋热通量方向由下向上的逆转; 南海夏季风爆发后, 海表感热和潜热通量均受到抑制; 大气边界层高度与近地面气温(湿度)呈正(负)相关关系。Barrell 等^[70]利用 HadGEM 3-GC3.1 气候模式的输出对副极地北大西洋的湍流热通量的预测进行了研究。模拟结果一致预测, 随着气候变化, 在 21 世纪后期副极地北大西洋将看到冬季海冰和海气湍流热通量减少, 特别是在拉布拉多海和伊尔明格海以及北欧海内陆。2023 年, Song 等^[71]研究了 2021 年南海夏季风爆发期间海气湍流热通量异常的观测结果, 并解释了高分辨率热通量变化的机制。在典型拉尼娜年(2006 年和 2018 年前的冬季)和厄尔尼诺年(2015 年前的冬季), 湍流热通量正偏差表现为海盆一致模态。而在其他年份, 会在连续年份内呈现纬向或经向偶极子结构。Zhi 等^[72]利用冬季实测海表温度(SST)、湍流热通量(THF)和海平面气压(SLP)资料, 采用超前滞后相关和回归方法, 从年际尺度上研究海气相互作用。在大气的强迫下, 海洋对大气也有响应, 特别是在副北极锋区和北太平洋东部。当海表温度领先海平面气压 1 个月时, 2 个海区的海气相互作用十分相似, 但对应的大气变率型不同。Mayer 等^[73]研究了 1950—2019 年北大西洋海盆上空 ERA5 预报的海气热通量趋势的时间稳定性和可靠性, 结果表明在子流域尺度及以下

ERA5 预测的海气热通量具有良好的时间稳定性和可靠性。

5 波浪模拟

在波浪场数值模拟中, 风应力影响是其中一个重要因素。Giudici 等^[74]使用 2 个不同的风数据集(ERA5 和 BaltAn65+)在覆盖波罗的海的高分辨率 3 层嵌套网格上计算了 2 组理想化的无冰波后预报数据, 以评估该模型在开阔海洋和避风地带的性能。发现使用 BaltAn65+数据集的模拟与记录的平均波属性具有更好匹配性, 而 ERA5 数据集可以更好地复制极端波情况。

关于预测区域波浪有效波高等参数对于分析波浪对近岸影响具有重要意义, 基于物理的波浪预测方法涉及复杂的计算, 限制了实时信息的提供。卷积神经网络(CNN)在波浪预测方面在高海况下存在特征损失、位置不敏感和性能不佳的问题。Liu 等^[75]提出了一种基于视觉变换器(VIT)的区域波浪预测模型, 以解决特征信息丢失问题, 捕捉整体与局部之间的相关性, 研究利用多注意力机制提取风特征信息, 并建立了风速与波高之间的映射关系, 以便快速准确地预测大尺度波浪。研究人员将模型在(26.00°N, 165.5°W~45.00°N, 58.00°W)地理范围内涵盖了各种波浪条件的 ERA5 数据集上进行了训练和测试, 发现 VIT-RWP 模型在预测准确性方面优于 CNN-RWP 模型, 在预测同一海域 48 h 内每小时的显著波高时相较于 SWAN 和 WW3 模型表现出出色的计算效率。

同样对于波高预测, Wang 等^[76]提出了一种基于 LSTM-GRU 和 KDE 的海浪高度点预测和区间预测框架。该框架首先对多维度和多源数据集进行预处理, 然后执行特征选择过程以去除不必要的特征。接着, 使用将长短期记忆(LSTM)和门控循环单元(GRU)相结合的混合模型来预测海浪高度, 该模型使用与海浪高度正相关的多元特征作为输入数据。最后, 利用核密度估计(KDE)估计海浪高度预测误差的概率密度分布, 生成预测区间。研究结果表明, 与基准模型相比, 提出的 LSTM-GRU-

KDE 预测框架在所有浮标站的每小时海浪高度预测中具有较低的均方根误差、平均绝对误差值和较高的决定系数。

南海海浪的产生和传播受到包括台风以及复杂的地形等许多因素的影响,使得大多数深度学习方法的准确性受到限制。Yu等^[77]提出一种结合了多变量注意力机制的时空网络MA-TrajGRU模型,用于对台风过程中的海洋波浪条件进行预测。研究中使用SWAN模拟并验证了2017—2021年的波浪数据,并将其应用于MA-TrajGRU模型进行预测。实验结果显示,与常用的时空网络模型相比,MA-TrajGRU在预测准确性和性能上表现更优,特别适合于预测台风过程中的大规模海洋波浪。

6 寒潮

寒潮天气过程是一种大规模的强冷空气南下活动过程,通常会出现剧烈降温和大风天气,有时伴有雨、雪、雨淞和霜冻,对工农业生产、人民生活和健康都有着较为严重的影响,因此对寒潮的研究有助于提升寒潮的预报水平,为防灾减灾提供帮助。2023年对寒潮振荡周期及机制研究方面取得了以下进展。

Yuan等^[78]发现2020/2021年冬季的3次全国型强冷空气过程表现出不同低频振荡特征:其中,第一次过程中准双周振荡有正贡献而30~60 d振荡为负贡献,表明第一次过程以准双周低频波动为主,第二次和第三次过程兼有准双周振荡和30~60 d振荡的正贡献作用,第三次过程同时处于准双周和30~60 d低频振荡发展的最强时期。Shao等^[79]指出大多数全国阻塞型和南方阻塞型寒潮的冷空气都是西北型路径,两者环流过程类似,而北方阻塞型寒潮自蒙古或西伯利亚沿西向型路径影响华北地区。Liu等^[80]发现大尺度寒潮通过菲律宾海反气旋形成的水汽池延迟效应间接刺激了中国南方冬季强降水。在寒潮爆发期东亚地区以强南下冷气团为主,寒潮前缘形成冷锋,伴有少量降雨,菲律宾海北部对流层下层的降温和干燥;在寒潮衰减阶段,与寒潮相关的降温和干燥将导致大尺度下气流增

强、对流抑制和SLP增加,这些变化最终会有利于菲律宾海反气旋的形成和发展。受菲律宾海西侧偏南风和气旋的强水汽输送,华南寒潮残余锋出现强降雨。Abdillah等^[81]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。Tan等^[82]指出在大尺度上,湿寒潮或干寒潮形成的环境与MJO密切相关,干寒潮和中等寒潮主要发生在MJO的抑制阶段,而湿寒潮通常预示着MJO对流包络向东传播。

Aman等^[83]研究了曼谷地区4类雾霾的特征及其和寒潮以及海风的关系,I型雾霾是曼谷地区寒潮导致了停滞性雾霾的发展;II型由海风诱发,海风局部再循环和热内边界层的发展导致大气污染物的积累;III型为寒潮和海风协同作用下的短时间雾霾;IV型为不受寒潮和海风影响的短时间雾霾。Prajapati等^[84]研究发现当寒潮强度较弱时,从第-1天到第+1天的降雨量通常会增加;而对于中等寒潮,直到第+2天出现寒潮时,降雨量才开始增加;寒潮较强时,从第-2天到第+2天,降雨量和寒潮的潜力都有所增加。Zheng等^[85]认为北极涛动负相、西伯利亚高压增强、乌拉尔高压增强和东亚槽加深所导致的北半球中高纬大尺度大气环流异常是2020/2021年冬季寒潮频发的直接原因(图5^[85])。

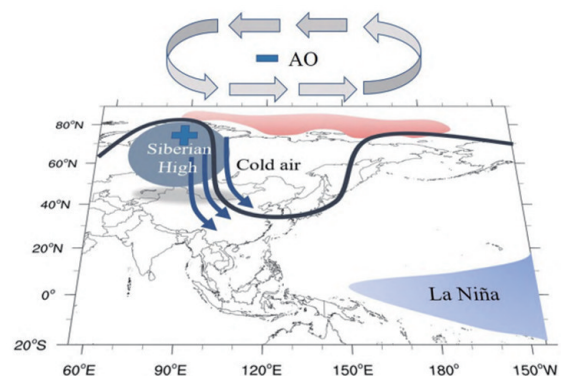


图5 在温暖的北极和寒冷的热带太平洋的协同作用下,中高纬大尺度大气环流异常强迫冷空气入侵中国的过程机理

7 结论

总结了2022—2023年近百篇海洋气象学研究工作,近一两年的研究进展着重关注于各类海洋气象现象观测和模拟技术的提升,以及各类海洋气象灾害潜在致灾因子的形成和发展机理。这些多尺度海洋-大气相互作用过程为研究提升海洋气象预报系统能力提供有力的科学依据。台风结构及其和海洋的相互作用、海雾的机理研究和模式参数化设置、季风对全球气候变暖的响应、海气通量和波浪的观测与模拟改进、寒潮过程变异等科学问题既是近几年也是未来海洋气象学的重要研究问题。

致谢:中山大学海洋科学学院罗希、蓝铭、张紫琦、莫梓峰、袁琳珂、傅振浩、覃安文、钱昊坤、林希等协助部分工作。

参考文献(References)

- [1] 杨展, 李希圣, 黄伟雄. 地理学大辞典[M]. 安徽: 安徽人民出版社, 1992.
- [2] 孙即霖, 彭垣. 海洋小百科全书: 海洋气象[M]. 广州: 中山大学出版社, 2012.
- [3] Shan K, Lin Y, Chu P S, et al. Seasonal advance of intense tropical cyclones in a warming climate[J]. *Nature*, 2023, doi: 10.1038/s41586-023-06544-0.
- [4] Chan J C L. Frequency and intensity of landfalling tropical cyclones in East Asia: Past variations and future projections[J]. *Meteorology*, 2023, 2: 171-190.
- [5] Huang X, Zhou T J, Chan J C, et al. Understanding uncertainties in projections of western North Pacific tropical cyclogenesis[J]. *Environmental Research Letters*, 2023, 18 (11): 114037.
- [6] Cao X, Wu R G, Xu L T, et al. A trans-season out-of-phase relationship of tropical cyclogenesis between the Western North Pacific and South China Sea[J]. *Journal of Climate*, 2023, 36: 3697-3716.
- [7] Chen X, Guo Y P, Tan Z M, et al. Influence of different types of ENSO events on the tropical cyclone rainfall over the western North Pacific[J]. *Climate Dynamics*, 2023, 60 (11/12): 3969-3982.
- [8] Li X M, Zhan R F, Wang Y Q, et al. Recent increase in rapid intensification events of tropical cyclones along China coast[J]. *Climate Dynamics*, 2023, doi:10.1007/s00382-023-06917-1.
- [9] Liu H Y, Gu J F, Wang Y Q. Consistent pattern of rainfall asymmetry in binary tropical cyclones[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50: e2022GL101866.
- [10] Zhang X Y, Ditchek S D, Kristen L C, et al. Global and regional characteristics of radially outward propagating tropical cyclone diurnal pulses[J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2023, 128: e2022JD037660.
- [11] Zhang X Y, Xu W X. Diurnal Variations on the initiation time and intensification rate of rapidly intensifying tropical cyclones[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(14): e2023GL103551.
- [12] Sun Z Y, Bai L, Zhu X S, et al. The extraordinarily large vortex structure of Typhoon In-fa (2021), observed by spaceborne microwave radiometer and synthetic aperture radar[J]. *Atmospheric Research*, 2023, 292: 106837.
- [13] Zheng Y X, Ma Z H, Tang J, et al. The coastal effect on ahead-of-eye-center cooling induced by tropical cyclones[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2023, 53: 1519-1534.
- [14] Zhang H. Modulation of upper ocean vertical temperature structure and heat content by a fast-moving tropical cyclone[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2023, 53(2): 493-508.
- [15] Ye S N, Zhang R H, Wang H N. The role played by tropical cyclones-induced freshwater flux forcing in the upper-ocean responses: A case for Typhoon Yutu(2018) [J]. *Ocean Modelling*, 2023, 184: 102211.
- [16] He L K, Li Q L, Wang Y Q, et al. Effects of urban expansion and anthropogenic heat enhancement on tropical cyclone precipitation in the Greater Bay Area of China[J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2023, 128: e2022JD038184.
- [17] Ye G J, Zhang X, Yu H. Modifications to three-dimensional turbulence parameterization for tropical cyclone simulation at convection-permitting resolution[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2023, 15 (4): e2022MS003530.
- [18] Li D Y, Tan Z. The role of ocean-atmosphere interactions in tropical cyclone intensity predictability[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2023, 80: 1213-1226.
- [19] Zhuo J Y, Tan Z M. A deep-learning reconstruction of tropical cyclone size metrics 1981-2017: Examining trends[J]. *Journal of Climate*, 2023, 36: 5103-5123.
- [20] Zhang H, Jin M Y, Zhang H Y, et al. Deep learning approach for forecasting sea surface temperature response to tropical cyclones in the Western North Pacific[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2023, 197: 104042.
- [21] Cui H X, Tang D L, Mei W, et al. Predicting tropical cyclone-induced sea surface temperature responses using

- machine learning[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50: e2023GL104171.
- [22] Wang L Y, Tan Z. Deep learning parameterization of the tropical cyclone boundary layer[J]. *Deep Learning Parameterization of the Tropical Cyclone Boundary Layer*, 2023, 15(1): e2022MS003034.
- [23] 宛霞, 唐碧. 地海空天多平台协同观测台风科学试验成功[N]. *中国气象报*, 2020-10-20(1).
- [24] 王婉, 刘钊. 地空天协同开展台风加密观测试验[N]. *中国气象报*, 2022-08-12(1).
- [25] 刘倩, 安涛, 孙夏. 中国气象局首次开展南海台风多平台协同机动观测[N]. *中国气象报*, 2023-09-05(1).
- [26] Gilson G F, Jiskoot H, Gueye S, et al. A climatology of Arctic fog along the coast of East Greenland[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2023, doi: 10.1002/qj.4617.
- [27] Song S T, Chen Y, Chen X Y, et al. Adapting to a foggy future along trans-arctic shipping routes[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(8): e2022GL102395.
- [28] Yi L, Li K F, Chen X Y, et al. Summer marine fog distribution in the Chukchi-Beaufort Seas[J]. *Earth and Space Science*, 2023, 10(2): e2021EA002049.
- [29] Pope N H, Igel A L. Identifying important microphysical properties and processes for marine fog forecasts[J]. *Monthly Weather Review*, 2023, 151(9): 2427-2441.
- [30] Xiao Y F, Liu R J, Ma Y, et al. MERRA-2 reanalysis-aided sea fog detection based on CALIOP observation over North Pacific[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2023, 292: 113583.
- [31] Yang L, Ding S S, Liu J W, et al. Effects of longwave radiative cooling on advection fog over the Northwest Pacific Ocean: Observations and large eddy simulations[J/OL]. *EGUsphere*, 2023. [2023-12-01]. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-1494>.
- [32] Yun J H, Ha K J. Physical processes in sea fog formation and characteristics of turbulent air-sea fluxes at Socheongcho ocean research station in the Yellow sea[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9: 825973.
- [33] Kim Y, Ryu H S, Hong S. Data-to-data translation-based nowcasting of specific sea fog using geostationary weather satellite observation[J]. *Atmospheric Research*, 2023, 290: 106792.
- [34] Wang X Y, Dai G Y, Wu S H, et al. Classification of turbulent mixing driven sources in marine atmospheric boundary layer with use of shipborne coherent doppler lidar observations[J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2023, 128(20): e2023JD038918.
- [35] Li X F, Shen D L, Zheng G, et al. comprehensive satellite observations and a numerical study of a Wintertime Shallow Sea Smoke Event in the Yellow Sea[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2022, 79(12): 3163-3179.
- [36] Hu L J, Xu R, Yang M, et al. Enhancing maritime safety and efficiency: A Comprehensive sea fog monitoring system for Ningbo Zhoushan Port[J]. *Atmosphere*, 2023, 14(10): 1513.
- [37] Tu X, Yao R S, Hu L J, et al. Modifications to three-dimensional turbulence parameterization for tropical cyclone simulation at convection-permitting resolution, observation and simulation study on the macro-microphysical characteristics of a coastal fog offshore Zhejiang Province of China[J]. *Atmospheric Research*, 2023, 282: 106537.
- [38] Kong X J, Jiang Z H, Ma M, et al. The temporal and spatial distribution of sea fog in offshore of China based on FY-4A satellite data[C]. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2023, 2486(1): 012015.
- [39] Han L G, Long J C, Xu F, et al. Decadal shift in sea fog frequency over the Northern South China Sea in spring: Interdecadal variation and impact of the Pacific Decadal Oscillation[J]. *Atmospheric Research*, 2022, 265: 105905.
- [40] Zhou M S, Huang H J, Lao H Q, et al. Feasibility analysis of early warning of sea fog within six hours for two harbors in the South China Sea[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 968744.
- [41] Zuo Z, Zhang K. Link between the Land-Sea Thermal Contrast and the Asian Summer Monsoon[J]. *Journal of Climate*, 2023, 36(1): 213-225.
- [42] Liu B Q, Duan Y N. Diverse interannual variability of asian summer monsoon onset process[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, doi: 10.1029/2022GL100583.
- [43] Zhuang M, Duan A, Lu R, et al. Relative impacts of the orography and land-sea contrast over the indochina peninsula on the Asian summer monsoon between early and late summer [J]. *Journal of Climate*, 2022, 35(10): 3037-3055.
- [44] Lin S H, Dong B W, Yang S, et al. Causes of diverse impacts of ENSO on the Southeast Asian summer monsoon among CMIP6 Models[J]. *Journal of Climate*, 2021, 37(2): 419-438.
- [45] Lu M M, Yang S, Zhu C W, et al. Thermal impact of the Southern Tibetan Plateau on the Southeast Asian Summer Monsoon and Modulation by the Tropical Atlantic SST[J]. *Journal of Climate*, 2022, 36(5): 1319-1330.
- [46] Wang H, Li Z G, Li J P, et al. Interannual variation in the East Asian summer monsoon-tropical Atlantic SST relationship modulated by the Interdecadal Pacific Oscillation[J]. *NPJ Climate and Atmospheric Science*, 2023, 6(1): 169.
- [47] Hu D, Duan A M, Tang Y H, et al. Delayed onset of the tropical Asian summer monsoon in CMIP6 can be

- linked to the cold bias over the Tibetan Plateau[J]. *Environmental Research Letters*, 2023, 18: 11405.
- [48] Huang J P, Zhou X J, Wu G X, et al. Global climate impacts of land-surface and atmospheric processes over the Tibetan Plateau[J]. *Reviews of Geophysics*, 2023, 61(3): e2022RG000771.
- [49] Li X Y, Li Q Q, Ding Y H, et al. Possible influence of the interdecadal variation of the extratropical southern Indian Ocean SST on East Asian summer monsoon precipitation[J]. *Atmospheric Research*, 2023, 288: 106721.
- [50] Gui S, Yang R W, Zeng F, et al. Interdecadal variability in the interface between the Indian summer monsoon and the East Asian Summer Monsoon[J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2023, 128(20): e2022JD038399.
- [51] Dai L, Cheng T F, Wang B, et al. Subseasonal features of the Indian monsoon[J]. *Journal of Climate*, 2023, 36(20): 7199-7211.
- [52] Zhang D Q, Chen L J, Martin G M, et al. Seasonal prediction skill and biases in glosea5 relating to the East Asia winter monsoon[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2023, 40(11): 2013-2028.
- [53] Marusic I, Monty J P. Attached eddy model of wall turbulence[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2019, 51(1): 49-74.
- [54] Sun J, French J R. Air-sea interactions in light of new understanding of air-land interactions[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2016, 73(10): 3931-3949.
- [55] Babanin A V, McConochie J, Chalikov D. Winds near the surface of waves: Observations and modeling[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2018, 48(5): 1079-1088.
- [56] Voermans J J, Rapizo H, Ma H Y, et al. Air-sea momentum fluxes during tropical cyclone olwyn[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2019, 49(6): 1369-1379.
- [57] Huang J, Zou Z S, Zeng Q C, et al. The turbulent structure of the marine atmospheric boundary layer during and before a cold front[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2021, 78(3): 863-875.
- [58] Liu C L, Li X Y, Song J B, et al. Characteristics of the marine atmospheric boundary layer under the influence of ocean surface waves[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2022, 52(6): 1261-1276.
- [59] Grare L, Lenain L, Melville W K. Wave-Coherent airflow and critical layers over ocean waves[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2013, 43(10): 2156-2172.
- [60] Miles J W. On the generation of surface waves by shear flows[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1957, 3(2): 185-204.
- [61] Chen S, Qiao F, Zhang J A, et al. Swell modulation on wind stress in the constant flux layer[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(20): e2020GL089883.
- [62] Wu L C, Qiao F. Wind profile in the wave boundary layer and its application in a coupled atmosphere-wave model[J]. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 2022, 127(2): e2021JC018123.
- [63] Buckley M P, Veron F. Structure of the airflow above surface waves[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2016, 46(5): 1377-1397.
- [64] Cao T, Shen L. A numerical and theoretical study of wind over fast-propagating water waves[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2021, 919(A38): PII S0022112021004-16X.
- [65] Grare L, Lenain L, Melville W K. Vertical profiles of the wave-induced airflow above ocean surface waves[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2018, 48(12): 2901-2922.
- [66] Mahrt L, Thomas C K, Grachev A A, et al. Near-surface vertical flux divergence in the stable boundary layer[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2018, 169(3): 373-393.
- [67] Ortiz-Suslow D G, Kalogiros J, Yamaguchi R, et al. An evaluation of the constant flux layer in the atmospheric flow above the wavy air-sea interface[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, 126(8): e2020JD-032834.
- [68] Huang J, Pickart R S, Chen Z M, et al. Role of air-sea heat flux on the transformation of Atlantic Water encircling the Nordic Seas[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 141.
- [69] Liu C W, Yang Q H, Xu M, et al. Response of sea surface heat fluxes to the South China Sea summer monsoon onset in 2021[J]. *Atmospheric Research*, 2023, 282: 106513.
- [70] Barrell C, Renfrew I A, King J C, et al. Projected changes to wintertime air-sea turbulent heat fluxes over the subpolar North Atlantic Ocean[J]. *Earth's Future*, 2023, 11(4): e2022EF003337.
- [71] Song X Z, Wang X Y, Cai W B, et al. Observed air-sea turbulent heat flux anomalies during the onset of the South China sea summer monsoon in 2021[J]. *Monthly Weather Review*, 2023, 151(9): 2443-2464.
- [72] Zhi X F, Pan M T, Song B, et al. Investigating air-sea interactions in the North Pacific on interannual timescales during boreal winter[J]. *Atmospheric Research*, 2022, 269: 106043.
- [73] Mayer J, Haimberger L, Mayer M. A quantitative assessment of air-sea heat flux trends from ERA5 since 1950 in the North Atlantic basin[J]. *Earth System Dynamics*, 2023, 14(5): 1085-1105.

- [74] Giudici A, Jankowski M Z, Mannikus R, et al. A comparison of Baltic Sea wave properties simulated using two modelled wind data sets[J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2023, 290: 108401.
- [75] Liu Y L, Huang L M, Ma X W, et al. A fast, high-precision deep learning model for regional wave prediction[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 288: 115949.
- [76] Wang M, Ying F X. Point and interval prediction for significant wave height based on LSTM-GRU and KDE[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 289: 116247.
- [77] Yu M, Wang Z F, Song D L, et al. Spatio-temporal ocean wave conditions forecasting using MA-TrajGRU model in the South China sea[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 291(1): 116486.
- [78] Yuan Y, Shen L L, Yan H M, et al. Three cold surges in China during the winter of 2020/2021 and their low-frequency features[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2023, 47(5): 1557-1575.
- [79] Shao J H, Diao Y N. Analysis characteristics of the blocking cold surge paths and circulation in Autumn and Winter in China[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2023, 53(4): 145-158.
- [80] Liu Q, Huang L, Bai L Q. Delayed effects of large-scale cold surge on winter heavy rainfall in southern China[J]. *Atmospheric Research*, 2023, 285: 106632.
- [81] 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.
- [82] Tan I, Reeder M J, Singh M S, et al. Wet and dry cold surges over the Maritime Continent[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2023, 128(12): e2022JD038196.
- [83] Aman N, Manomaiphiboon K, Pala-En N, et al. A study of urban haze and its association with cold surge and sea breeze for greater bangkok[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, 20(4): 3482.
- [84] Praja A S, Trismidianto. Impact of cold surge based on its strength on rainfall distribution in Western Indonesia [C]. *International Conference on Radioscience, Equatorial Atmospheric Science and Environment*, 2023, 290: 349-357.
- [85] Zheng F, Yuan Y, Ding Y H, et al. The 2020/21 extremely cold winter in China influenced by the synergistic effect of La Niña and warm Arctic[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2022, 39(4): 546-552.

Review of hotspots of marine meteorology in 2023

WANG Lin^{1,2}, WANG Dongxiao^{1,2*}, QIU Chunhua^{1,2}, ZHANG Guangli^{1,2}, ZOU Zhongshui^{1,2}, HU Zhan¹, DAI Xiaoming¹, YANG Tong², XI Zihan¹, HE Yinkai¹, ZHANG Weiwei¹, ZHANG Yi¹, LIAO Xiyang¹, YAO Fengchao^{1,2}, MENG Zheng¹

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

2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519080, China

Abstract This paper reviews the research progress of marine meteorology during 2022-2023 on typhoon, sea fog, monsoon, air-sea flux, wave simulation, cold wave and the improvement and development of marine meteorological observation technology during this period. These researches mainly focused on the improvement of various oceanic and meteorological observation and simulation technologies, as well as the formation and development mechanisms of potential factors of marine meteorological disasters, e. g., diverse typhoon paths and the rapid development cases. The observation and development mechanisms of monsoon, sea fog, wave and air-sea flux and the improvement of model parameterization are important research directions of marine meteorology in the future. These research results provide certain scientific bases and application values for prediction and warning of marine meteorological disasters.

Keywords marine meteorology; air-sea interaction; marine meteorological disaster ●



(责任编辑 卫夏雯)