

海风锋的遥感分析研究进展

段懿轩^{1,2}, 苗峻峰^{1,2}

(1. 南京信息工程大学大气科学学院, 江苏 南京 210044; 2. 海南省南海气象防灾减灾重点实验室, 海南 海口 570203)

摘要: 本文回顾了近40 a海风锋的遥感分析研究, 归纳总结了海风锋的卫星识别以及遥感分析方法和技术在海风锋三维结构和演变过程中的应用。结果表明: 海风锋的遥感研究已经在不少地区开展, 取得了一些重要成果; 海风锋的遥感分析方法主要为可见光图像云线检测、热红外辐射检测和散射计风场检测3种; 根据可见光图像中云的外观表现及云团传播速度检测海风锋仍是目前海风锋遥感研究的主要手段。此外, 基于现有研究, 提出了一些值得进一步关注的问题。

关键词: 海风锋; 卫星; 遥感

中图分类号: P732.1; P714 **文献标识码:** A

文章编号: 1003-0239(2022)06-0102-08

1 引言

海陆风环流是由海陆热力差异引起的中尺度环流, 包括日间海风环流和夜间陆风环流。日间较冷的海风在向陆地推进过程中遇到较热空气层形成的类似浅冷锋的锋面即为海风锋^[1]。海风锋也被称为海风辐合线, 是一种典型的边界层辐合线, 其水平尺度可达100 km, 垂直尺度和大气边界层相当。海风锋受天气条件和大尺度背景风的影响, 遭遇其他天气系统时会触发不稳定能量释放, 从而引发短时强降水、飑线、雷暴和大风等强对流天气, 对当地天气气候和环境产生较大影响^[2-3]。海风锋和水平对流卷之间的相互作用是目前强对流天气研究领域重点关注的科学问题。海风锋在向内陆推进时若遭遇上升气流和下降气流, 会与形成的水平对流卷之间相互影响, 产生对流; 由于水平对流卷的直接和间接效应, 会在向内陆推进的海风锋前方形成“滚轴云”(Roll Cloud), 从而影响海风锋的移动速度及其上空的云^[4]。IWAI等^[5]利用双多普勒激光雷达和直升机载传感器对海风层中水平对流卷

的三维结构进行了观测研究, 发现高空急流中的上升气流区域在近地面总有低速条纹相对应, 水平对流卷的长宽比也接近线性理论的预测结果。

早在20世纪20年代, 海风研究就引起了欧美科学家的兴趣和重视, 20—50年代发表的相关研究成果包括海风的结构特征和气象条件。JEFFREYS^[6]从理论上揭示了海陆风的形成; WEXLER^[7]对不同地区海陆风的发生次数和物理特征等进行统计分析, 进一步完善了海陆风的理论框架, 对后续的海风研究产生了深远影响。60年代, 气象学家发现在海风的前部存在一个气象要素变化强烈的特殊区域, 并将其定义为海风锋, 随后的几十年气象学家陆续对海风锋进行了相关理论研究。例如: MILLER等^[8]对海风锋的强迫机制、结构、生命周期及其对空气质量的影响进行了全面讨论; CROSMAN等^[9]对海风(锋)的数值研究进行了系统综述, 并讨论了海风锋特征对地表感热通量、环境地转风、大气稳定性和湿度的影响。

海风锋的观测研究可追溯至20世纪60年代。1960—1980年, 气象卫星处于发展初期, 卫星资料

收稿日期: 2022-03-03; 修回日期: 2022-06-15。

基金项目: 海南省南海气象防灾减灾重点实验室开放基金(SCSF201903)。

作者简介: 段懿轩(1998-), 男, 硕士在读, 主要从事中尺度气象学研究。E-mail: 1401853513@qq.com

通信作者: 苗峻峰(1963-), 男, 教授, 博士, 主要从事边界层气象学研究。E-mail: miaoj@nuist.edu.cn

还未成熟,研究人员大多利用观测站资料分析海风锋。大部分常规观测站位于人口密集的地区,而在海上或人烟稀少地则十分匮乏,导致观测站资料的时空覆盖率较低。海风锋是复杂的中尺度系统,受天气和地形影响较大,不同地区海风锋的时空特征具有明显差异,无法利用自动气象站资料精确观测海风锋的发生、发展特征。20世纪八九十年代,Meteosat系列静止气象卫星(欧洲第一代静止气象卫星)和美国第三代极轨气象卫星的成功发射开启了海风锋的遥感观测研究,气象学家开始结合卫星资料对海风锋的识别和结构演变进行研究^[10]。相比自动站资料,卫星资料的覆盖区域更广,时空分辨率更大,利用它能够从整体天气形式上对海风锋的发生和发展进行分析。

21世纪以来,各国卫星遥感技术不断提升,卫星数据的时空分辨率越来越高,极大地提升了人们对海风锋过程的认知,但在实际识别方面还存在一些局限性。为了克服无法从卫星图像中直接清晰地观测出海风锋的限制,研究人员试图通过观察相关现象来识别海风锋。由于海风锋附近的风会聚,上升的空气凝结形成云层,因此可以根据平行于海岸线并向内陆推进的积云线来推断海风锋的存在。相关研究也论证了积云线在海风锋检测中的重要作用,例如GOLER等^[11]、BIRCH等^[12-13]对全球不同沿海区域的云线特征进行了分类总结,发现不同类型云线的海风环流不尽相同。此外,散射计风资料和云高仪资料也可以用于海风锋的检测^[14-18]。

本文从海风锋的识别以及结构和演变特征两方面,全面介绍了国内外海风锋的遥感应应用研究进展及发展前沿,旨在为国内开展相关研究提供参考。

2 海风锋的识别

从1960年首次成功发射气象卫星至今,空间遥感技术已经不断发展至成熟。卫星数据资料在天气分析预报、数值天气预报和气候预测等方面,特别是在中尺度强对流天气方面有着十分重要的作用^[19]。20世纪六七十年代,世界上主要运行的气象卫星为美国第一代和第二代业务气象卫星以及第一代业务静止气象卫星,但依靠当时较低分辨率的辐射计数据无法对海风锋进行精细观测。

20世纪80年代,美国和欧洲分别发射了第三代极轨气象卫星和Meteosat系列静止气象卫星。第三代极轨气象卫星新增了高分辨率红外探测器(High-resolution Infra Red Sounder, HIRS)和多通道高级甚高分辨率扫描辐射计(Advanced Very High Resolution Radiometer, AVHRR),相比上一代极轨气象卫星增加了同时获取多通道图像的能力。Meteosat系列静止气象卫星所装载的红外可见光成像仪首次获得了水汽图像,明显提高了图像的时空分辨率。这些高精度的卫星设备投入观测试验,获得了大量覆盖面更广、时空密度更大的卫星资料,气象学家也开始将这些卫星资料投入海风锋的识别研究中。FETT等^[10]通过观察气象卫星可见光图像,清楚地看到海岸线附近存在平行于海岸线的明暗线形图案,经过分析得出此图案就是趋向于平行海岸线的无风区(即海风锋),这开启了海风锋的遥感识别观测。

进入21世纪以后,遥感仪器研制技术和数字信号处理技术不断进步,具有高时空分辨率和连续空间覆盖的气象卫星逐渐成为海风锋观测的有效工具。DAMATO等^[20]和PLANCHON等^[21]根据经纬度参考系对可见光图像进行投影,采用平均值过滤器平滑和均匀化图像,在图像上定义并绘制海风锋,其目的是从云图中探测出海风锋,并根据天气条件估计海风锋的出现。这种通过遥感标记海风锋的方法能较为精准地检测出海风锋,但会受到无关云带的干扰和无云天气的限制。GILLE等^[14]通过分析快速散射计(Quick Scaterometer, QuikSCAT)测得的早晚风差异来确定海风锋的存在,观测发现风的显著日变化常发生在北纬50°以北的海岸线和偏东信风地区,平均风及其日变化都倾向于平行海岸;但由于QuikSCAT散射计每天只提供两次采样,所以无法开展海风锋作为重力流在陆上传播的研究(日本ADEOS-II卫星发射后,这个情况有所改善,该卫星在QuikSCAT散射计的测风时间外可提供两次散射仪风测量)。GOLER等^[11]根据卫星观察到的云线形状和移动情况,将澳大利亚北部卡奔塔利亚(Carpentaria)湾旱季形成的云系分成3种基本类型,并且对不同类型的云线与降水的关联进行了总结;该研究发现积云线的产生与前1 d沿海海风锋的出现密切相关,不同类型积云线对应的海风环流不尽相

同,该结果证实了利用积云线检测海风锋的可行性。IWAI等^[5]利用直升机载传感器结合双多普勒激光雷达对海风锋的三维结构进行了观测研究。

近十年来,随着气象卫星及其装载设备的更新换代,卫星资料越来越丰富,时空分辨率逐渐提高。经过不断的改进与应用,卫星识别方法现已成为气象学家研究海风锋的主要手段之一。CORPETTI等^[24]注意到卫星可见光图像中海风锋面生成的特定云纹理模式的复杂性,利用传统的视觉检测方法无法判断,因此提出了一种从图像中提取锋面的活动轮廓方法。这种方法基于蛇形(Snake)活动轮廓法,通过小波分解处理图像中一些特定纹理以及透明现象特性,这种分解能够计算锋面是否存在。此技术已经在实例图像上得到验证,提出的理论框架不仅可以用于海风锋检测,还适用于任何其他纹理模式分析。利用可见光图像中低空云层和地表特征之间反射率的差异可以对云线进行识别,在可见光图像中根据颜色对云型进行分类,灰色/白色阴影代表云的不同厚度和密度,当出现与海岸线形状类似并向内陆推进的曲线时可推断海风锋存在。这种方法能精准识别海风锋,但存在无云情况的限制。为了解决这个问题,LENSKY等^[23]提出了晴空条件下海风锋的检测方法,即使用来自欧洲第二代静止气象卫星的红外可见光图像对夏季晴空条件下的海风锋进行识别分析。这种方法不依赖于云的存在,而是利用晴空条件下从地面反射的热红外辐射来检测海风锋,但由于受到地域条件的影响,检测准确度有待提高。BIRCH等^[12-13]利用卫星云图资料,对澳大利亚西北部和阿拉伯海上空的云线特征进行了分类总结,该研究将澳大利亚西北部云线分为3类,观察表明所有的波状云线都在近海传播,这些波状云线与海风辐合线有关,研究还指出阿拉伯海上空的波状云线与澳大利亚西北海域的波状云线非常相似。ANJOS等^[24]对GOES-13通道1的可见光图像(波长为 $0.55\sim 0.75\ \mu\text{m}$)以及巴西天气预报和气候研究中心(CPTEC)提供的遥感数据进行分析,通过对可见光图像进行顺序分析、将海风锋统计数据应用到环境地理信息系统(Geographic Information System, GIS)、加入地理信息作为参考、计算线密度和定义每小时的海风锋等处理来识别海风锋。FERDIANSYAH等^[24]提出利用地球静止

卫星图像导出海风锋二维分布的框架,该框架将“形态蛇形算法”(Morphological Snake Algorithm)应用于可见光图像来自动检测与海风锋相关的积云线;为了确保挑选的海风日中的云线与海风锋相关,选择了存在从陆风到海风风向变化且海风模式至少连续存在2 h的海风日;结合地面观测,证明了海风锋可以根据湿度增加、气温升高速率降低以及风速增加等要素变化进行判断。

以上研究表明,不同的海风锋识别方法存在显著差异。利用星载散射计测量的早晚风差能确定海风锋的存在,然而由于测量时次的限制无法确定海风锋发生的位置和开始时间。可见光图像检测法更有利于确定海风锋的位置,虽然其早期的视觉检测法的计算成本较低、耗时较短,却无法适应相关云线的复杂纹理分析,导致识别误差较大;之后的检测方法经过发展更新,结合算法可以实现从图像中提取锋面,在一定程度上解决了识别误差较大这一问题,但仍然存在诸多限制。

3 海风锋结构和演变特征

20世纪六七十年代,随着海风锋理论研究的逐步完善和观测技术的快速进步,科学家们积累了丰富的海风锋观测实例,并提出了较成熟的海风锋模型。20世纪80年代,随着卫星技术的不断进步和观测资料的积累,对海风锋结构和演变的认识也在不断完善,尤其是高空间分辨率的气象卫星装载计投入观测试验,获得了大量数据,被应用于海风锋细致结构和演变特征的研究中。RAMIS等^[26]在分析西班牙马略卡(Majorca)岛的一次海风锋过程中,通过气象卫星云图发现一条与海风辐合线相对应的积云线向岛屿内部推进,证实了云线对海风锋检测的指示作用。CAUTENET等^[27]使用可见光图像跟踪了西非几内亚湾1979年1月海风锋面向内陆渗透的日变化,发现几内亚湾周围区域在海风环流方面具有独特的共性和局部特征;研究还利用数值模拟分析了该处对流有效势能的变化,结果表明对流的不稳定性在其两侧最大,对流增强的位置是由 $500\sim 2\ 000\ \text{m}$ 层的风切变决定的。20世纪90年代,WAKIMOTO等^[28]利用单多普勒观测、卫星图像、对流和降水/起电(Convection and Precipitation /

Electrification, CaPE)试验收集到的图像,对1991年8月6日(陆上)和8月12日(海上)的海风事件进行了对比分析,结果表明两日的海风锋在云图上的特征有很大差异,8月6日的水平对流卷与海风锋紧密平行,锋面的传播速度较均匀;8月12日水平对流卷和锋面方向几乎垂直,海风锋线较宽且易于识别。BRUMMER等^[29]在1989年5月9日的可见光图像上观测到一条与天气尺度冷锋相对应的云线从北海移动至德国北部,冷锋到达海岸后与海风锋相互作用,推动海风锋向内陆移动。

进入21世纪以后,随着遥感技术的进一步发展,对海风锋结构和演变的认知也在不断更新和完善,尤其是多种高时空分辨率的卫星探测系统投入观测试验,获得了大量有关海风锋结构和演变特征的精细化数据。DAMATO等^[20]利用卫星可见光图像估算了西欧海风锋的出现频率及其在暖季的内陆渗透,结果表明海风锋的分布和内陆渗透受时间和空间影响,由于地理(地形和海岸暴露)和气象因素的作用,午后的内陆渗透距离在10~50 km之间变化,英吉利海峡地区观测到的海风锋频率与北欧反气旋有关。APARNA等^[13]提出了一种量化海风向海范围的方法,该方法对QuikSCAT卫星散射计的瞬时风矢量资料进行处理,通过风矢量相关系数的退化表现来估计海风的向海程度。这种方法的优势在于它完全依赖于卫星测量,不需要陆地上的风数据,但是该方法不能确定向海范围的日常变化。PLANCHON等^[21]利用卫星遥感资料估算了巴西北部海风锋的频率以及在18时(世界时)穿透内陆的平均距离,研究发现海风锋在旱季(9—12月)的出现频率最高,在9—11月深入内陆最远,距塞阿拉海岸(the coast at Ceará)的最大距离为100 km。AZORIN-MOLINA等^[30]基于卫星观测详细总结了伊比利亚半岛东南部对流内边界层和海风辐合带对各种云发展的影响,进一步的归纳表明海风锋能增加低云和对流积云的出现频率,同时也会对与积雨云有关的高云、中云和低云的发展产生抑制作用。LI等^[31]同时使用了美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)的NOAA-16卫星的AVHRR图像和GOES-8卫星的可见光图像对2001年8月17日美国东海岸的沿海积云线进行观测分析,结果显示:云

线形成于当地时间16:00,从佛罗里达州延伸至北卡罗来纳州的哈特拉斯角(Cape Hatteras),长约850 km,宽约8.5 km,以海岸线的形状穿透内陆超过20 km且穿透速度不均匀;结合数值模拟结果证实了这种云线的形成与海风环流有关,模型模拟的最大垂直速度区域也与云线位置非常吻合。

21世纪初,IWAI等^[18]使用从多普勒激光雷达、云高仪和气象地面站获得的数据,记录了东京地区一次海风锋的三维结构以及与海风锋相关的垂直气溶胶输送情况;云高仪观测到距离地面2 km的气溶胶后向散射,海风锋前端的密度较大的气溶胶从海风锋的头部逸出,然后被强上升气流垂直输送到混合高度;结合雷达和气象站资料推测出海风锋和前部气流之间的热相互作用会影响海风锋结构和相关区域的空气质量。LENSKY等^[23]利用气象卫星连续热红外图像和实测资料,根据不同天气环流对2010年7月以色列的10个实例进行了分类统计,揭示了夏季晴空条件下的海风特征和海风的两种不同模式,结果表明弱水平压力梯度促进海风发展,强水平压力梯度抑制海风发展。BROWN等^[16]使用散射计风观测对澳大利亚达尔文附近的近海海陆风进行研究,使用的数据为欧洲业务极轨气象卫星METOP-B的二级高级散射计(Advanced Scatterometer, ASCAT)海岸优化产品,优化数据则是将ASCAT测量值初始平均到规则的时空网格上而形成;利用模型和卫星估算得到的近海表面海风特征(强度和水平空间范围)大体上是一致的,强度差异小于2 m/s,向海范围变化不超过150 km,模型可以很好地模拟海风扰动振幅随季风状况的变化。ANJOS等^[24]发现巴西东北海岸的塞尔吉佩地区温度升高与海风锋的发展有关,因此对2015年巴西东北部的847幅可见光图像进行序列分析,结合地面气象数据对海风锋的日常表现、海风锋日和非海风锋日的气象变量等进行统计分析;结果显示大部分海风锋从当地时间12:00开始,19:00停止,持续时间为7 h,最大内陆渗透距离海岸94 km;此外,海风锋与太阳辐射、温度增加以及相对湿度和露点温度的降低有关的论点也得到证实。这种现象颠覆了以往海风有利于温度降低的认识。苗春生等^[32]利用国家卫星气象中心的FY-2D卫星的亮温(Black Body Temperature, TBB)产品对夏季江苏沿海海风

锋的对流云活动进行了观察分析。SHORT等^[17]综合考虑了5种卫星数据:NOAA卫星在4个季节下观测到的向外长波辐射(Outgoing Longwave Radiation, OLR)数据、METOP-A和METOP-B两颗卫星上的ASCAT数据、搭载在OceanSat-2卫星上的快速散射计(Rapid Scatterometer, RSCAT)数据、搭载在海洋二号(HY-2A)卫星上的散射计(HY2-SCAT)数据以及由国际空间站(International Space Station, ISS)携带的快速散射计数据,利用多个实例对海风锋和近海降水的日循环之间的联系进行分析,发现来自附近岛屿的海风锋会对日降水的周期产生影响。

20世纪20年代以来,BERRI等^[33]使用空间分辨率为 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$,时间分辨率为30 min的可见光图像对La Plata河地区两个发展良好的海风个例进行分析,发现当地的海岸线特征明显影响海风锋向内陆的渗透,结合当地观测和静力边界层模式的模拟可以发现,海风锋的传播与边界层内三维环流的变化有关,模式较好地模拟了卫星图像中明显云带的向内陆传播速度,但估算的海风锋向内陆的传播速度明显大于高空云带的传播速度。FERDIANSYAH等^[25]利用日本业务静止气象卫星葵花8号(Himawari-8)探测积云线的B03波段可见光图像(空间分辨率500 m,时间分辨率为10 min)和用来反演表面温度的B13热红外图像(空间分辨率为2 km,时间分辨率为10 min)对印度尼西亚雅加达地区的海风锋进行检测研究,结果表明云线能够合理地表示海风锋的到达时间,但城市热岛环流引起的上升气流会造成市中心的时间偏差稍大于其他地区。GRAU等^[34]使用来自第二代地球静止轨道气象卫星(Meteosat Second Generation, MSG)的地表和海面温度数据计算地中海西部帕尔马(Parma)盆地的海陆温差,并对发生在帕尔马盆地的海风锋进行分析研究,以评估水平温差在海风特征中的贡献;研究发现,在暖月期间,海风锋日的海陆温差(约 $13\text{ }^{\circ}\text{C}$)略大于非海风锋日(约 $11\text{ }^{\circ}\text{C}$)。

目前海风锋研究主要以常规气象站资料和雷达资料为主,卫星遥感资料为辅。卫星的星载散射计和光学成像仪能够提供高时空分辨率的气象信息,可用来推断海风锋的发生和发展特征。早期利用光学成像仪对海风锋进行研究大多是通过云线

的移动来描述其演变过程,后来的研究更进一步,可以通过云的种类、云的外观表现、对流云团的云顶高度及云团传播速度来定量描述海风锋。

国内气象卫星和海洋卫星已经成系列发展。后续研制发射的风云三号F星、G星等极轨气象卫星均将搭载视场幅宽更大、观测频率更高的微波成像仪和中分辨率光谱成像仪;海洋动力环境卫星搭载的微波散射计已经形成HY-2B/C/D三星组网观测能力,具备每6 h全球80%以上海域监测的覆盖能力,未来将构建第二个海洋动力环境卫星星座,重点加强星地一体化的设计,以提高多要素、高精度和全覆盖的综合观测能力^[35-37]。这些遥感资料的分析和应用有望能显著提高对海风锋等中小尺度天气系统结构和演变过程的科学认识。

4 总结与展望

在海风锋研究领域,由于常规气象观测和模式的时空密度有限,难以对海风锋进行精准检测。高时空分辨率的卫星遥感观测作为海风锋研究的有效工具,已经在不少地区开展,并受到气象学家的广泛重视(见表1)。从遥感手段来看,遥感资料从早期单一的星载光学成像仪资料变成与星载散射计风场资料和星载红外成像仪资料相结合^[14-17];从研究内容来看,遥感资料多应用于海风锋的识别、三维结构和演变特征研究,而在海风锋物理机制等方面的应用研究还鲜有涉及。

从表1可以看出,海风锋遥感分析研究尽管起步较晚,但随着遥感探测技术的飞速发展,也在不断进步;气象卫星可提供高时空分辨率和高精度的资料,卫星扫描可达到10 min级更新,空间分辨率可达到500 m,这些资料的利用使得研究海风锋的精细结构和细致的连续演变过程成为可能。未来研究可关注以下问题:

(1)通过识别可见光图像中与海风锋相关的云线来检测海风锋的方法常被使用,效果也比较稳定,但由于存在大量无关云线的干扰和无云天气的限制,海风锋也不总是与云线相关联;此外,由于边界条件十分复杂,在数学上也很难处理可见光图像中的噪声。

(2)通过地面反射的热红外辐射来检测海风

表 1 海风锋卫星遥感研究的年代和区域分布

Table 1 Temporal and regional distribution of satellite remote sensing studies of sea breeze front

年份	作者(年份)	研究地区	遥感数据/卫星名称
2020—	GRAU等(2021)	西班牙马略卡岛	欧洲第二代静止气象卫星(MSG)
	FERDIANSYAH等(2020)	印度尼西亚雅加达	日本业务静止气象卫星(Himawari-8)
	BERRI等(2020)	阿根廷	美国第四代静止气象卫星(GOES-13)
2010—2019	SHORT等(2019)	苏门答腊岛、新几内亚、大洋洲巴布亚湾	欧洲第一代业务极轨气象卫星(METOP-A和METOP-B)的高级散射计(ASCAT)、印度 OceanSat-2 卫星快速散射计(RSCAT)、中国 HY-2A 卫星散射计(HY2-SCAT)
	ANJOS等(2018)	巴西东北部	美国第四代静止气象(GOES-13)
	BROWN等(2017)	澳大利亚北部	欧洲第一代业务极轨气象卫星(METOP-B)的2级高级散射计
	BIRCH等(2014)	阿拉伯海	欧洲第二代静止气象卫星(MSG)
	BIRCH等(2013)	澳大利亚北部	日本多功能传输卫星(MTSAT)
	LENSKY等(2012)	以色列	欧洲第二代静止气象卫星(MSG)
	CORPETTI等(2011)	—	欧洲第二代静止气象卫星(MSG)
	LI等(2009)	美国东海岸	美国第四代静止气象卫星(GOES-13),美国第四代极轨业务气象卫星(NOAA-16)
	PLANCHON等(2006)	巴西东北部	美国第三代静止气象卫星(GOES-8)
2000—2009	APARNA等(2005)	—	美国快速散射计卫星(QuikSCAT)
	GILLE等(2003)	—	美国快速散射计卫星(QuikSCAT)
	DAMATO等(2003)	英吉利海峡	美国第三代极轨业务气象卫星(NOAA-14)
	BRUMMER等(1995)	德国柏林	可见光图像
	WAKIMOTO等(1993)	美国佛罗里达州	美国第三代极轨业务气象卫星(NOAA-11)
1980—1989	CAUTENET等(1989)	西非几内亚	欧洲第一代静止气象卫星(Meteosat-1)
	RAMIS等(1988)	西班牙马略卡岛	欧洲第一代静止气象卫星(Meteosat-2)
	FETT等(1984)	美国佛罗里达州	美国国防气象卫星计划(DMSP)卫星

锋,能够检测晴空条件下的海风锋,但由于受到地理信息的影响,检测精确度较低。

(3)通过散射计风资料进行海风锋分析可以排除上述限制,并且能够清晰地表现出海风特征,但由于散射计数据受到卫星条带时间的限制,不能很好地表现海风锋的日变化。

我国在海风(锋)的遥感研究方面尚处于起步阶段,至今缺乏针对性的研究,而相关研究采用的视觉检测方法较为传统,无法精准检测出海风锋^[32,38]。从技术层面来看,利用卫星图像提取海风锋的活动轮廓、应用“形态蛇形算法”自动检测可见光图像中积云线等方法检测海风锋比传统的视觉检测方法更高效、更精准;通过观测早期积云发展

特征以及相对湿度变化可以更加直接且定量地监测海风锋。此外,国内气象卫星和海洋卫星正处于更新换代时期,新一代气象卫星和海洋卫星在时空分辨率、光谱通道数以及搭载仪器性能等方面都有质的提升,有望促进海风锋的深入研究。

参考文献:

- [1] CHEN G X, IWAI H, ISHII S, et al. Structures of the sea-breeze front in Dual-Doppler Lidar observation and coupled Mesoscale-to-LES modeling[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, 124(5): 2397-2413.
- [2] LIANG Z M, WANG D H, LIU Y, et al. A numerical study of the convection triggering and propagation associated with sea breeze circulation over Hainan Island[J]. Journal of Geophysical

- Research: Atmospheres, 2017, 122(16): 8567-8592.
- [3] 万夫敬, 孙继松, 孙敏, 等. 山东半岛海风锋在一次飑线系统演变过程中的作用[J]. 气象学报, 2021, 79(5): 717-731.
- WAN F J, SUN J S, SUN M, et al. Impacts of sea breeze front over Shandong Peninsula on the evolution of a squall line[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2021, 79(5): 717-731.
- [4] FOVELL R G. Convective initiation ahead of the sea-breeze front [J]. Monthly Weather Review, 2005, 133(1): 264-278.
- [5] IWAI H, ISHII S, TSUNEMATSU N, et al. Dual-Doppler Lidar observation of horizontal convective rolls and near-surface streaks [J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(14): L14808.
- [6] JEFFREYS H. On the dynamics of wind[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1922, 48(201): 29-48.
- [7] WEXLER R. Theory and observations of land and sea breezes[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1946, 27(6): 272-287.
- [8] MILLER S T K, KEIM B D, TALBOT R W, et al. Sea breeze: structure, forecasting, and impacts[J]. Reviews of Geophysics, 2003, 41(3): 1011.
- [9] CROSMAN E T, HOREL J D. Sea and lake breezes: a review of numerical studies[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2010, 137(1): 1-29.
- [10] FETT R W, TAG P M. The sea-breeze-induced coastal calm zone as revealed by satellite data and simulated by a numerical model [J]. Monthly Weather Review, 1984, 112(6): 1226-1233.
- [11] GOLER R, REEDER M J, SMITH R K, et al. Low-level convergence lines over northeastern Australia. Part I: The north Australian cloud line[J]. Monthly Weather Review, 2006, 134(11): 3092-3108.
- [12] BIRCH C E, REEDER M J. Wave-cloud lines over northwest Australia[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2013, 139(674): 1311-1326.
- [13] BIRCH C E, REEDER M J, BERRY G J. Wave-cloud lines over the Arabian Sea[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, 119(8): 4447-4457.
- [14] GILLE S T, LEWELLYN SMITH S G, LEE S M. Measuring the sea breeze from QuikSCAT Scatterometry[J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(3): 1114.
- [15] APARNA M, SHETYE S R, SHANKAR D, et al. Estimating the seaward extent of sea breeze from QuikSCAT scatterometry[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(13): L13601.
- [16] BROWN A L, VINCENT C L, LANE T P, et al. Scatterometer estimates of the tropical sea-breeze circulation near Darwin, with comparison to regional models[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2017, 143(708): 2818-2831.
- [17] SHORT E, VINCENT C L, LANE T P. Diurnal cycle of surface winds in the Maritime Continent observed through satellite scatterometry[J]. Monthly Weather Review, 2019, 147(6): 2023-2044.
- [18] IWAI H, MURAYAMA Y, ISHII S, et al. Strong updraft at a sea-breeze front and associated vertical transport of near-surface dense aerosol observed by Doppler Lidar and Ceilometer[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2011, 141(1): 117-142.
- [19] 卢乃锰, 谷松岩. 气象卫星发展回顾与展望[J]. 遥感学报, 2016, 20(5): 832-841.
- LU N M, GU S Y. Review and prospect on the development of meteorological satellites[J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(5): 832-841.
- [20] DAMATO F, PLANCHON O, DUBREUIL V. A remote-sensing study of the inland penetration of sea-breeze fronts from the English Channel[J]. Weather, 2003, 58(6): 219-226.
- [21] PLANCHON O, DAMATO F, DUBREUIL V, et al. A method of identifying and locating sea-breeze fronts in north-eastern Brazil by remote sensing[J]. Meteorological Applications, 2006, 13(3): 225-234.
- [22] CORPETTI T, PLANCHON O. Front detection on satellite images based on wavelet and evidence theory: application to the sea breeze fronts[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(2): 306-324.
- [23] LENSKY I M, DAYAN U. Continuous detection and characterization of the sea breeze in clear sky conditions using Meteosat second generation[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, 12(14): 6505-6513.
- [24] ANJOS M, LOPES A. Sea breeze front identification on the northeastern coast of Brazil and its implications for meteorological conditions in the Sergipe region[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2019, 137: 2151-2165.
- [25] FERDIANSYAH M R, INAGAKI A, KANDA M. Detection of sea-breeze inland penetration in the coastal-urban region using geostationary satellite images[J]. Urban Climate, 2020, 31: 100586.
- [26] RAMIS C, ALONSO S. Sea-breeze convergence line in Majorca: a satellite observation[J]. Weather, 1988, 43(8): 288-293.
- [27] CAUTENET S, ROSSET R. Numerical simulation of sea breezes with vertical wind shear during dry season at Cape of Three Points, West Africa[J]. Monthly Weather Review, 1989, 117(2): 329-339.
- [28] WAKIMOTO R M, ATKINS N T. Observations of the sea-breeze front during CaPE. Part I: single-doppler, satellite, and cloud photogrammetry analysis[J]. Monthly Weather Review, 1994, 122(6): 1092-1114.
- [29] BRÜMMER B, HENNEMUTH B, RHODIN A, et al. Interaction of a cold front with a sea-breeze front observations[J]. Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography, 1995, 47(4): 383-402.
- [30] AZORIN-MOLINA C, SANCHEZ-LORENZO A, CALBÓ J. A climatological study of sea breeze clouds in the southeast of the

- Iberian Peninsula (Alicante, Spain)[J]. *Atmósfera*, 2009, 22(1): 33-49.
- [31] LI X F, ZHENG W Z, PICHEL W G, et al. Multisatellite observations and numerical simulation of an along-coast cumulus cloud line induced by sea-breeze circulation[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(14): 3573-3584.
- [32] 苗春生, 张远汀, 王坚红, 等. 江苏近海岸夏季两类海风锋特征及其对强对流的激发[J]. *大气科学学报*, 2018, 41(6): 838-849.
- MIAO C S, ZHANG Y T, WANG J H, et al. Characteristics of two types of sea-breeze fronts along the coastal areas of Jiangsu Province and their triggers on strong convections[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2018, 41(6): 838-849.
- [33] BERRI G J, DEZZUTTI M. A sea-breeze case study in the La Plata River region using local observations, satellite images, and model simulations[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2020, 177(1): 123-147.
- [34] GRAU A, JIMENEZ M A, CUXART J. Statistical characterization of the sea-breeze physical mechanisms through in-situ and satellite observations[J]. *International Journal of Climatology*, 2021, 41(1): 17-30.
- [35] 林明森, 张有广, 袁欣哲. 海洋遥感卫星发展历程与趋势展望[J]. *海洋学报*, 2015, 37(1): 1-10.
- LIN M S, ZHANG Y G, YUAN X Z. The development course and trend of ocean remote sensing satellite[J]. *Haiyang Xuebao*, 2015, 37(1): 1-10.
- [36] 林明森, 张有广. 我国海洋动力环境卫星应用现状及发展展望[J]. *卫星应用*, 2018, 9(5): 19-23.
- LIN M S, ZHANG Y G. Application status and development prospect of marine dynamic environmental satellites in China[J]. *Satellite Application*, 2018, 9(5): 19-23.
- [37] 贾永君, 刘建强, 林明森, 等. 海洋动力环境卫星星座与应用[J]. *卫星应用*, 2021, 12(9): 27-32.
- JIA Y J, LIU J Q, LIN M S, et al. Marine dynamic environment satellite constellation and its application[J]. *Satellite Application*, 2021, 12(9): 27-32.
- [38] 张晶, 姚文, 陈海涛, 等. 渤海北部东岸海风锋活动及其触发对流特征分析[J]. *气象与环境学报*, 2021, 37(2): 33-40.
- ZHANG J, YAO W, CHEN H T, et al. Characteristics of sea breeze fronts and triggered convection on the eastern coast of the northern Bohai Sea[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2021, 37(2): 33-40.

An overview of remote sensing study of sea breeze front

DUAN Yixuan^{1,2}, MIAO Junfeng^{1,2}

(1. College of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Key Laboratory of South China Sea Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Hainan Province, Haikou 570203, China)

Abstract: This paper reviews the remote sensing analysis studies of sea breeze front (SBF) in the past 40 years, and summarizes the satellite identification of the SBF and the application of remote sensing analysis methods and techniques in the three-dimensional structure and evolution of SBF. The results show that the remote sensing study of SBF has been carried out in many regions, and many important results have been achieved. The remote sensing analysis methods of SBF mainly include visible image cloud line detection, thermal infrared radiation detection and scatterometer wind field detection. Detection of SBF based on cloud appearance and cloud propagation velocity in visible light images is still the main means of remote sensing study of SBF. In addition, based on the existed studies, some issues worthy of further attention are addressed.

Key words: sea breeze front; satellite; remote sensing