

目标观测与极端天气预报

段晚锁^①, 秦晓昊^{①†}, 杨丽超^②

①中国科学院大气物理研究所, 北京 100029; ②首都师范大学 资源环境与旅游学院, 北京 100048

摘要 “目标观测”是用于提高极端天气事件预报水平的新的观测策略。在世界气象组织于2003年提出的全球大气十年研究发展计划——观测系统研究与可预报性试验(THORPEX)的推动下,国际上众多国家和地区已开展了大量针对极端天气事件预报的目标观测研究和外场试验,有效提高了预报水平。中国针对目标观测的研究和实践起步较晚,但在近十余年取得了突破性进展。该文介绍了目标观测的理念,阐释了实施目标观测需要解决的核心问题,概述了国际上已开展的目标观测外场试验,评述了中国关于热带气旋预报的目标观测研究的进步和外场实践的努力。

关键词 目标观测; 极端天气预报; 敏感区; 资料同化

数值天气预报的诞生标志着天气预报正式迈入客观与现代化的时代,与依赖经验的主观预报,以及传统的预报员手绘天气图预报相比,数值天气预报是基于数值模型来实现对未来一段时间内大气运动状态的预测。什么是数值模型?简而言之,数值模型是一组描述大气状态随时间演变规律、符合流体力学和热力学的非线性偏微分方程组。已知当前时刻大气状态(数值模型的初边值),即可通过求解方程组得到未来一段时间内的大气状态,从而生成天气预报。从20世纪初开始,各国科学家们一直在努力发展数值模型,使其尽可能准确地刻画大气运动规律。时至今日,全球主要国家和地区的气象部门,如欧洲中期天气预报中心、美国国家环境预测中心、日本气象厅、英国气象局、中国气象局、加拿大气象中心都建立了各自的数值预报模型,并定期对数值模型进行优化升级,力求对天气做出更准确的预测。在超级计算机的帮助下,这些数值模型一般只需10 min左右就能预测出1天后的全球天气情况,全球天气的有效预报时效也从

1990年的5天提升至2015年的7天。因此, Bauer等^[1]在发表在*Nature*上的一篇文章中称,数值天气预报在过去30年发生了一场静悄悄的革命,而世界气象组织也因此盛赞数值天气预报是20世纪最伟大的科技和社会成就之一。

未来时刻大气状态强烈依赖当前时刻的大气状态,这也就是需要赋予数值模型初(边)值的原因。气象学家皮耶克尼斯曾指出:已知某一时刻大气状态的观测值,即可通过求解一般形式的流体动力学方程,知道大气在未来时刻的运动状态。因此,对当前时刻大气状态的描述越准确,数值模型的初始误差就会越小,通过数值模型预测得到的未来时刻的大气状态就越可能接近实际情况,即预报误差越小。“蝴蝶效应”观点很好地刻画了初始状态误差对未来预报的影响。“混沌之父”美国气象学家爱德华·洛伦兹这样解释“蝴蝶效应”:一只南美洲亚马孙河流域热带雨林中的蝴蝶,偶尔扇动几下翅膀,可以在两周以后引起美国得克萨斯州的一场龙卷风。“蝴蝶效应”说明,在一个动力系统中,初值微小的变化

† 通信作者,研究方向:热带气旋的目标观测、集合预报研究。E-mail: xhqin@lasg.iap.ac.cn

就能带动整个系统随后发生巨大的连锁反应，而我们的天气运动正是这样一种动力系统。

气象观测是获得当前时刻大气状态的直接手段。对大气，以及与之相互作用的相关系统的状态及其变化过程，进行系统、连续的观察和测量，并对获得的记录和数据进行处理的活动，就是气象观测。从17世纪中叶水银气压计的发明至今，人类已发明出许多工具替代眼睛对大气状态进行观测。百叶箱中常见的温度计、湿度计到复杂的能见度仪，蓝天中的探空气球到大海上的浮标站，矗立在地面的天气雷达到游弋于太空的气象卫星，各种各样的气象观测手段织成了一张精密的大网，忠实地记录着大气的状态。正是这些数据持续不断地为数值预报模型提供初(边)值，从而保障着数值天气预报的进行。

本文将介绍气象观测大军中的一支游击部队——“目标观测”^[2]，及其在提高极端天气事件预报水平中的重要作用，以及未来展望。

1 目标观测是常规观测的有效补充

截至2024年10月，我国已累计建成7.6万余个地面自动气象观测站，实现了对全国乡镇的全覆盖，但仅有131个高空气象观测站。可见，相较于观测密度较高的地面，对高空大气状态的观测要稀疏得多。虽然我们人类的活动主要集中在地表非常薄的一层大气中(约1 km高度)，并在这一薄层中感受着四季更替、风云变幻，但绝大多数天气系统的垂直范围要远远高于这一薄层，有时可高达几千甚至上万米。因此，对一个天气系统进行准确的观测，只靠密集的地面观测是远远不够的。高空气象观测的稀少成为限制准确描述大气状态的一个重要因素。我们进一步将视线移至全球范围，在海洋上的观测又有多少呢？欧洲中期天气预报中心在2024年4月的报告中展示了对全球陆地地面和海洋浮标可用观测站点的统计(图1)。与陆地相比，占地球面积约70%的海洋可用的观测站点总量不及陆地的1/5！因此，稀疏的海洋上空大气观测成为限制准确描述大气状态的又一因素。

幸运的是，我们的观测队伍迎来了卫星这

一天外军团。2003年之后，气象卫星的数量开始迅速增加，目前已经有30多颗气象卫星密切关注着地球和其他星体。气象卫星分为极轨卫星和静止卫星。极轨气象卫星距离地球较近，观测分辨率较高，可获得全球高分辨率气象资料；但极轨卫星相对地球表面在不停移动，对同一地区每12 h才能获得一次观测，不能连续观测同一地区，容易漏掉一些变化速度快、生命周期短的天气系统。静止气象卫星可以连续不断地对同一个区域进行气象观测，这对于监测某些气象系统的发展变化是非常有利的。然而，由于静止气象卫星距离地表较远，其观测的空间分辨率比极轨气象卫星低，且对纬度大于50°的高纬度地区的气象观测能力较差。随着在轨气象卫星陆续投入使用，通过卫星获得的观测数量从2006年起迅速增加，目前已远远超过常规观测总量。以2014年为例，通过卫星获得的观测数量大约为常规观测的10倍。气象卫星有效弥补了垂直空间观测，克服了空间观测稀疏的不足。

观测队伍的不断壮大，使得我们每天获得的观测数据与日俱增。如此多的观测难道不足以数值模式提供准确的初(边)值进行未来天气预测吗？假设有一个扰动云团正在热带西北太平洋上空活动，它极有可能发展为一个台风，并可能在经历一段长时间的海面跋涉后靠近、登陆、影响我国。为了更加准确地提前预测出这个扰动云团后期是否会发展为台风、是否会登陆我国、什么时间在什么区域登陆等信息，我们希望在扰动云团不断移动、发展的过程中，获得持续的、高分辨率的观测。这些观测可为数值模型提供更为准确的初(边)值，助力提高预报水平。那么该用什么观测呢？几百、上千公里之外的海洋远远超出了地面气象观测站的有效范围，所以地面气象观测不可行。卫星观测似乎可行。除夜间半球之外，极轨卫星在其余时间可获得较高空间分辨率但时间分辨率较低(间隔24 h)的观测数据。虽然静止卫星可持续观测，但空间分辨率较低。然而，这里存在一个不容忽视的问题，即目前我们的技术水平极大地限制了对卫星在云区观测资料的利用率。因此，对扰动云团这样一个云系水平

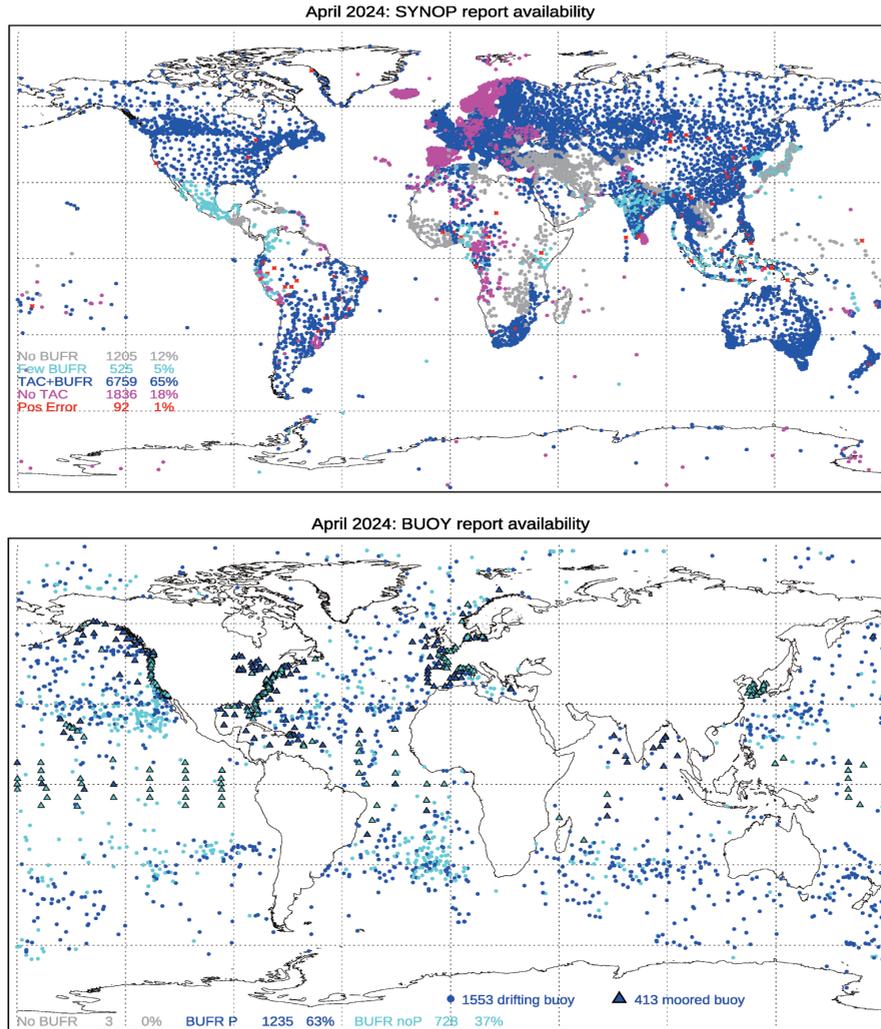


图1 (上)全球陆地地面观测站点分布图,其中蓝、粉、青和灰色圆点分别表示该站点记录观测数据的格式为二进制和文本双格式、无文本格式、少量二进制格式、无二进制格式,共计10 325个站点;(下)全球海洋浮标分布图,圆点和三角形分别代表漂流浮标和锚定浮标,蓝色和青色分别表示包含和不包含气压观测,共记1 966个浮标(图片来自<https://confluence.ecmwf.int/display/TCBUF/Data+availability>)

范围大、垂直深厚的天气系统,采用卫星能够获得的有效观测也是十分有限的。

目标观测(亦即“适应性观测”)应运而生。“目标观测”是一种优化利用观测资源,仅在有限区域进行高质量加密观测,旨在提高极端天气事件预报水平的一种经济的观测策略。优化利用观测资源的途径一般有两种:一种是更加频繁地使用已有的常规观测,如调整静止气象卫星的扫描角度,使观测集中在更小区域,而观测间隔时间从原来每6 h一次的地面观测缩短至每3 h,甚至每1 h一次;另一种是仅在关键区域增加额外

观测。对于那些主要在陆地上形成并发展,或是云系比较稀疏浅薄的天气事件来说,第一种方式性价比更高;而对于在洋面上形成,或是云系深厚的一些极端天气事件,第二种方式更为有效。显然,上文提到的扰动云团属于第二种,即仅在关键区域增加额外观测。如将飞机飞至云团上方或穿越云团,在一些关键区域释故事先装载的探空仪,探空仪在下坠过程中将对所穿过的大气状态进行观测;或者将无线电探空仪安装在机尾或机翼下方,飞机在云团关键区域反复穿梭,从而实现加密观测的目的。这就是我们上述的目标观

测或适应性观测。

世界气象组织于2003年在第14届会议上确定了全球大气十年研究发展计划，即THORPEX计划。THORPEX计划的主要目的是加速提高1~14天的极端天气预报的准确率，延长极端天气预报的服务时效，并使这些先进的预报产品能够发挥社会经济应用效益，服务于社会。THORPEX计划肯定并推动了目标观测理念。目标观测作为常规的、固定的观测网的有效补充，使用可移动的观测设备优先在重要却资料贫瘠的区域增加观测，从而通过减小这些区域的初始误差达到抑制预报误差增长的目的^[3]。在THORPEX计划的推动下，目标观测外场试验在全球范围如雨后春笋般地展开。以目标观测业务化为最终目标，大西洋-THORPEX区域试验于2003年秋季开始实施。该试验收获了大量的常规遥感观测资料，为提前1~3天对可能影响欧洲的高影响天气系统的预报提供了重要帮助^[4]。2006年，利用上升和平飘气球携带的探空仪，非洲地区启动了针对西非降水、东风波(可导致热带气旋生成)预报的目标观测外场试验^[5]。在高影响天气事件频发的欧洲，为了提高诸如冬季越格陵兰岛的流场畸变、中欧夏季降水以及地中海地区秋季暴雨的预报技巧，一些有规模的外场试验在2007—2009年间陆续开展^[6-8]，从而获得了大量能够助力提高预报技巧的宝贵资料。更大范围的目标观测外场试验于2008年在亚太地区开展，他们将所获目标观测资料应用于美国国家环境预测中心和韩国气象厅的业务预报模式，使热带气旋路径的预报误差减小了20%~40%^[9]。不仅如此，极地地区也开展了目标观测外场试验，有效提高了斯堪的纳维亚地区的极端天气预报水平，也推动了对极轨卫星在南极地区所获得观测资料的应用^[10]。所以，目标观测在提高全球不同地区极端天气预报水平中发挥了重要作用。

2 目标观测的核心：敏感区

图2给出了业务上实施目标观测的路线图，其中沿对角线的黑色坐标轴代表“现实时间”，水平蓝色坐标轴表示依赖数值预报实施目标观测

的时间节点。如图2所示，从当前时刻 t_i (t_{ana})，数值模型对未来一段时间($t_{ana} - t_i$)的全球(区域)大气状态进行预测。预测结果通常以天气图的形式呈现，包括气温、气压、空气湿度、风向风速等气象要素；而极端天气事件的潜在“信号”在天气图中也有迹可循，如异常的辐合中心、急剧的风切变、深厚的高压系统、强大的水汽输送等。在这些潜在“信号”中，有的会最终发展为真正的极端天气事件，有的可能会半途而废。有经验的预报员和科学家会从中甄别出需要进行目标观测的潜在极端天气事件，但它们的预报可能存在较大的不确定性，于是他们根据预报初步划定这一极端天气事件可能影响的区域，即目标观测验证区(见图2中“verification region”)，然后确定开展目标观测的区域和时间 t_{obs} 。开展目标观测的时间要早于该潜在极端天气事件可能影响验证区的时间 t_{vf} ，这样获得的观测才能助力数值预报，及时起到预警、防范作用。这些决策会在较短的时间内($t_i - t_{i+1}$)完成，以方便留有时间做外场观测的准备工作。

实施目标观测的区域称之为敏感区(见图2中“sensitive area”^[11])。它之所以被称为敏感区，是因为相较于其他区域， t_{vf} 时刻验证区内的预报误差对 t_{obs} 时刻该区域的初始误差更为敏感。也就是说，同样的初始误差发生在敏感区内，要比发生在其他区域造成验证区内更大的预报误差。如果通过加密观测能够为 t_{obs} 时刻敏感区内提供更为准确的初始场，将极大可能地提高 t_{vf} 时刻验证区内天气状态的预报精度^[12]。这就好比，亚马孙河流域热带雨林如此广袤，并非每一只蝴蝶扇动一下翅膀都会引起得克萨斯州的龙卷风，某一敏感区内扇动翅膀的蝴蝶才极有可能是罪魁祸首。目标观测的核心就是要识别出这样的敏感区。

从20世纪90年代中期起，一些数学方法开始被用于客观地识别目标观测敏感区。概括而言，这些方法可分为两大类，一类基于分析敏感性，而另一类则基于观测敏感性。分析敏感性方法刻画了预报误差对分析场上不同位置的初始误差的敏感程度。敏感性越大，表明该位置的初始误差将引起更大的预报误差。因此，相较于其他

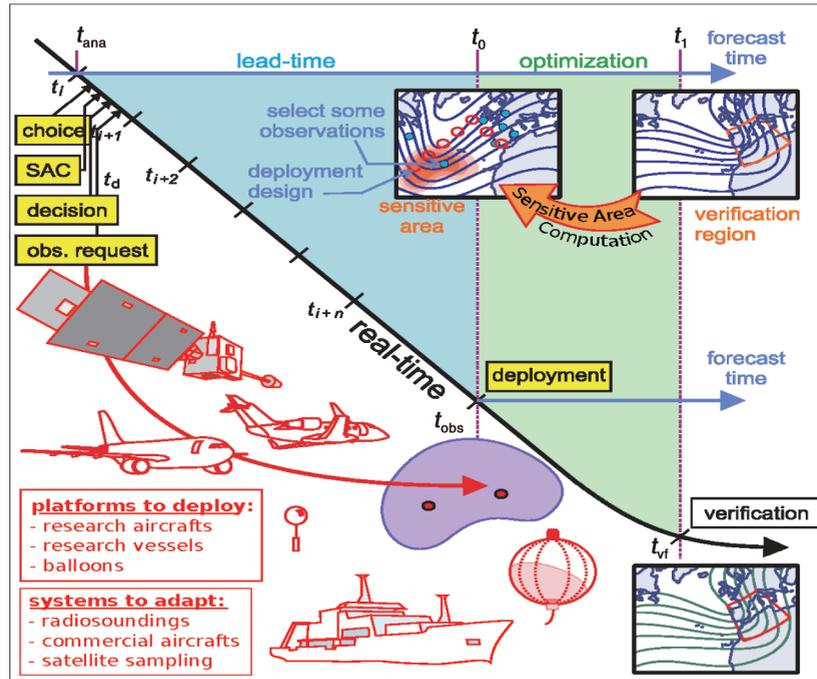


图2 目标观测外场试验流程图^[11]

位置，更应该在此处进行目标观测，此处即为目标观测的敏感区。该类方法比较有代表性的有伴随敏感性方法^[13-14]、奇异向量(singular vectors)方法^[15]以及集合转换技术^[16]等。观测敏感性方法的最大特点是引入了模拟观测和资料同化技术，通过评估在不同位置引入新的模拟观测(即可能实施的目标观测)对预报误差的影响来确定目标观测的敏感区。相较于其他区域，通过同化观测能够更多减小预报误差的区域被识别为敏感区。这类方法的代表有Hessian SVs方法^[17]和集合转换卡尔曼滤波方法(ETKF)^[18]。在上述所有方法中，伴随敏感性方法、SVs方法和ETKF方法被更多地用于THORPEX计划外场试验识别目标观测敏感区。

上述确定敏感区的方法均在不同程度上使用了线性近似，这显然违背了大气海洋运动的非线性本质。在这样的背景下，穆穆(现工作单位为复旦大学)等^[19]提出了根据条件非线性最优扰动(CNOP)方法^[20]识别目标观测敏感区的思路，构建了依据CNOP初始误差特定空间结构和所处地理位置确定目标观测敏感区，进而通过在该区域实施加密观测，达到减小初始误差和降低预报

误差目的的新技术。

CNOP与线性方法确定的敏感区有什么区别？CNOP方法确定的敏感区能否更加助力提高极端天气事件的预报水平？穆穆团队做了大量工作来揭示上述问题^[19, 21-23]。例如，Qin和Mu^[22]揭示了CNOP与SVs确定的敏感区的差别，以及对台风路径预报的影响。以台风环高(2009)为例，他们分别用CNOP和SVs方法确定了台风环高(2009)路径预报的目标观测敏感区(图3)。CNOP方法确定的目标观测敏感区包括两个主要区域：一个在台风中心以东约1 000 km、介于台风与副热带高压交界区域的位置，另一个则围绕台风中心。该敏感区位置刻画了台风与周边主要天气系统的相互作用，以及台风系统本身对台风环高(2009)路径预报的重要性，反映了非线性过程的影响，而SVs方法确定的敏感区主要集中在台风中心以东约500 km，仅强调了台风系统本身的局部区域(如东部)对台风环高(2009)路径预报的重要性。可见，CNOP确定的敏感区更符合台风演变的物理意义。特别地，观测系统模拟试验表明，虽然在CNOP和SVs方法确定的敏感区内增加观测，都能提高台风环高(2009)的路径预

报水平, 但CNOP方法确定的敏感区可助力减小约31%的路径预报误差, 而SVs仅为14%。不仅如此, 大量台风个例的统计结果更加肯定了在CNOP方法识别的敏感区内进行目标观测, 对提

高热带气旋路径预报技巧的重要作用(可使预报误差减小13%~46%), 且较在传统方法SVs识别的敏感区内同化资料对预报水平的提高(可使预报误差减小14%~25%)更加明显^[22]。

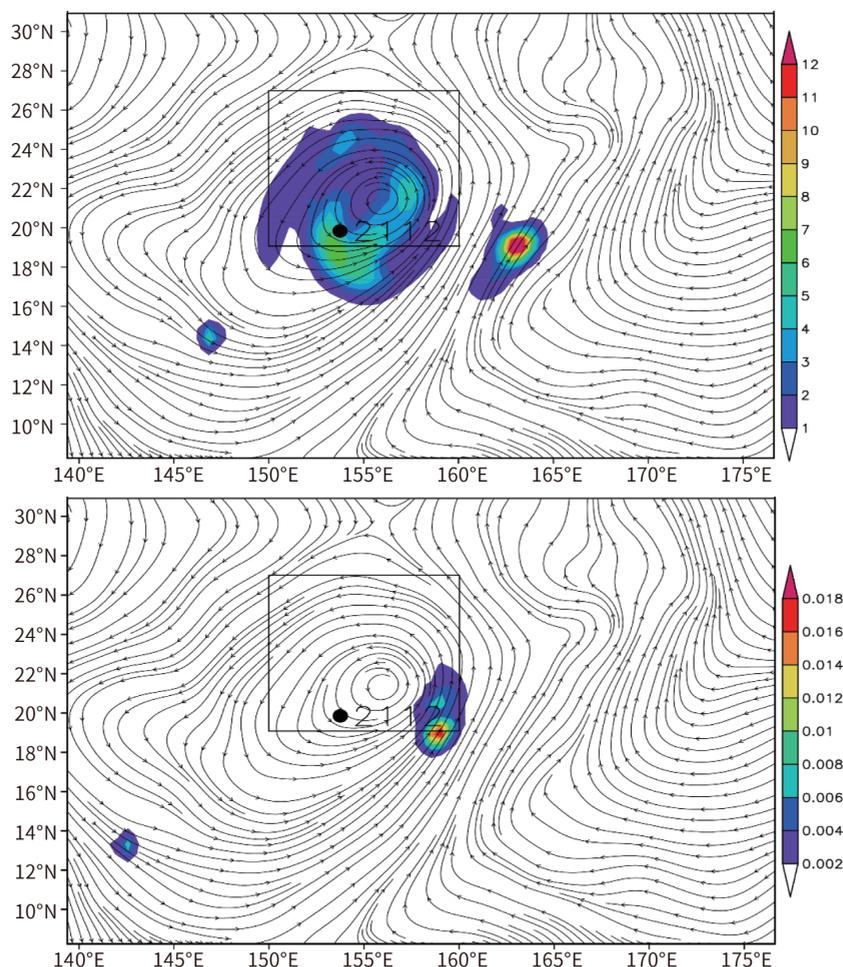


图3 台风环高(2009)预报: 用CNOP方法(上)和SVs方法(下)识别的目标观测敏感区(填色)及垂直层 $\sigma=0.5$ 流场(曲线)

CNOP目标观测新技术得到了国内外学者的肯定。Vidard等^[24]称CNOP目标观测能够“改善监测网”, “更好地遴选目标观测”, 而Chen等^[25]在关于海洋观测网的评述文章中称CNOP目标观测“能精准优化海洋观测系统”。另外, 中国工程院院士笄良龙团队将CNOP用于有关院校在我国近海开展的外场观测试验, 称“在敏感区同化观测对预报结果产生更多收益”, “使垂直热结构的预报误差从 $2.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ 减小到 $0.88\text{ }^{\circ}\text{C}$ ”^[26]。我国气象部门也多次开展关于台风预报的目标观测外场试验, 验证了由CNOP确

定的目标观测敏感区对于提高台风预报水平的有效性(详见第3节)。不仅如此, CNOP方法的提出推动了国际上大气、海洋、数学和流体力学领域关于CNOP及其应用的研究和讨论, 促进了交叉学科的发展。Terwisscha van Scheltinga等^[27]将CNOP用于探讨海洋双环流结构预报的最快增长初始误差; Rivière等^[28]将CNOP拓展到研究大气湿过程的可预报性; Wang等^[29]利用CNOP的敏感性开展了业务预报模式对流尺度集合预报的研究; Duan等^[30]更将CNOP作为重要集合预报方法与国际主流方法一起收录在Springer出版

的“*Handbook of Hydrometeorological Ensemble Forecasting*”，该书获The Atmospheric Science Librarians International 甄选奖，以及施普林格·自然2020中国新发展奖。Shen等^[31]在评述新中国成立70周年以来中国气象研究重要进展时，称“CNOP在各类时间尺度可预报性研究、目标观测和集合预报中有广泛应用前景”。

3 我国关于热带气旋预报的目标观测外场试验

受THORPEX计划的鼓舞，我国大陆地区在2008年启动了热带气旋外场观测试验。2008至2018年间，中国气象局联合多部门对24个热带气旋开展了外场观测试验^[32]，而从2016年开始，香港天文台持续对南海上空的热带气旋开展下投探空观测试验^[33]。虽然这些外场观测试验未使用客观的目标观测策略，也未做到观测与实时预报的互动，但试验获得了宝贵的数据，深入认识了登陆台风的边界层结构^[34-46]，尤其帮助科学家更好地理解热带气旋边界层内滚涡的发生及作用^[47-48]，同时也促进了新的资料同化技术、短临预报系统、评估体系的发展^[49-54]。

我国台湾地区较早地将基于伴随的奇异向量方法(ADSSV)应用于热带气旋“追风计划”外场试验(DOTSTAR^[14])，并逐步实现了台风目标观测的业务化。中国气象局也一直在积极探索目标观测策略的应用，尤其是我国风云系列卫星的陆续发射为目标观测外场试验提供了新的、强有力的观测平台，加速了目标观测策略在我国热带气旋业务预报中的应用^[55]。中国气象局首先于2018年，采用风云四号卫星A星(FY-4A)，用SVs识别了热带气旋玛利亚(2018)预报的目标观测敏感区，所获资料助力数值模式更好地刻画了台风玛利亚(2018)周围的大气结构，提高了预报技巧^[56]。虽然SVs方法存在着线性近似的局限性，但这仍然标志着中国气象局外场试验开始实现观测与实时预报互动，迈向目标观测的关键一步。考虑到SVs方法的线性局限性，中国工程院院士沈学顺团队于2020年首次将CNOP用于我国气象部门开展的风云卫星台风“海高斯”预报的

目标观测外场试验^[57-58]。随后两年间，我国气象部门进一步与有关院校合作，将CNOP成功应用于FY-4A卫星针对热带气旋美莎克(2020)、灿鸿(2020)、康森(2021)和灿都(2021)的加密观测试验，确定了需要加密扫描的区域，获取了有用的目标观测资料，使“3天平均路径误差减小约100 km”^[58-59](图4)。尤其在台风灿都(2021)的试验中，原预报该台风将在台湾登陆，而同化目标观测后的预报与实况一致，即台风未在台湾登陆^[58]，从而证实了FY-4A目标观测对提高台风预报技巧的重要作用^[55, 58]。

FY-4B在2021年6月成功发射后迅速加入了目标观测外场试验观测的队伍，并于2022年开展了对台风木兰(2022)的外场试验。Chan等^[60]称，这是“中国首次开展的地-空-天‘木兰’观测试验”。该次试验对台风木兰(2022)组织了连续3天的外场观测试验，观测平台包括FY-4B卫星、机载下投探空仪和平飘探空仪。在实施观测之前，科学家们先用SVs方法对敏感区位置进行了初步确定，随着气旋的发展以及非线性过程影响的加剧，又相继多次用CNOP方法对敏感区进行了优化，从而确定了此次外场试验最终的目标观测区域。目标观测资料通过卫星及时传送至中国地球系统数值预报中心的业务模式，并进行实时预报，及时为后续全国天气会商提供了服务。此次目标观测试验有效提高了台风木兰(2022)路径、强度及其引发降水的预报水平^[61](图5)。在原预报中，台风木兰(2022)以西北行登陆我国雷州半岛，而利用了目标观测数据的预报则表明台风木兰将先西行后北折，表现了与实际异常路径更为一致的预报效果。

热带气旋异常路径和强度预报，是热带气旋预报的难点和痛点，而从台风木兰(2022)的目标观测试验可知，目标观测对于在预报中捕捉路径异常转向、提高台风异常路径预报水平具有重要作用。此外，该目标观测数据也使台风“木兰”36 h内的强度预报误差平均减小11%，对 ≥ 25 mm级别的降水预报也更为准确。所以，实施目标观测是提高热带气旋路径、强度和降水预报水平的有效手段^[55, 60]。

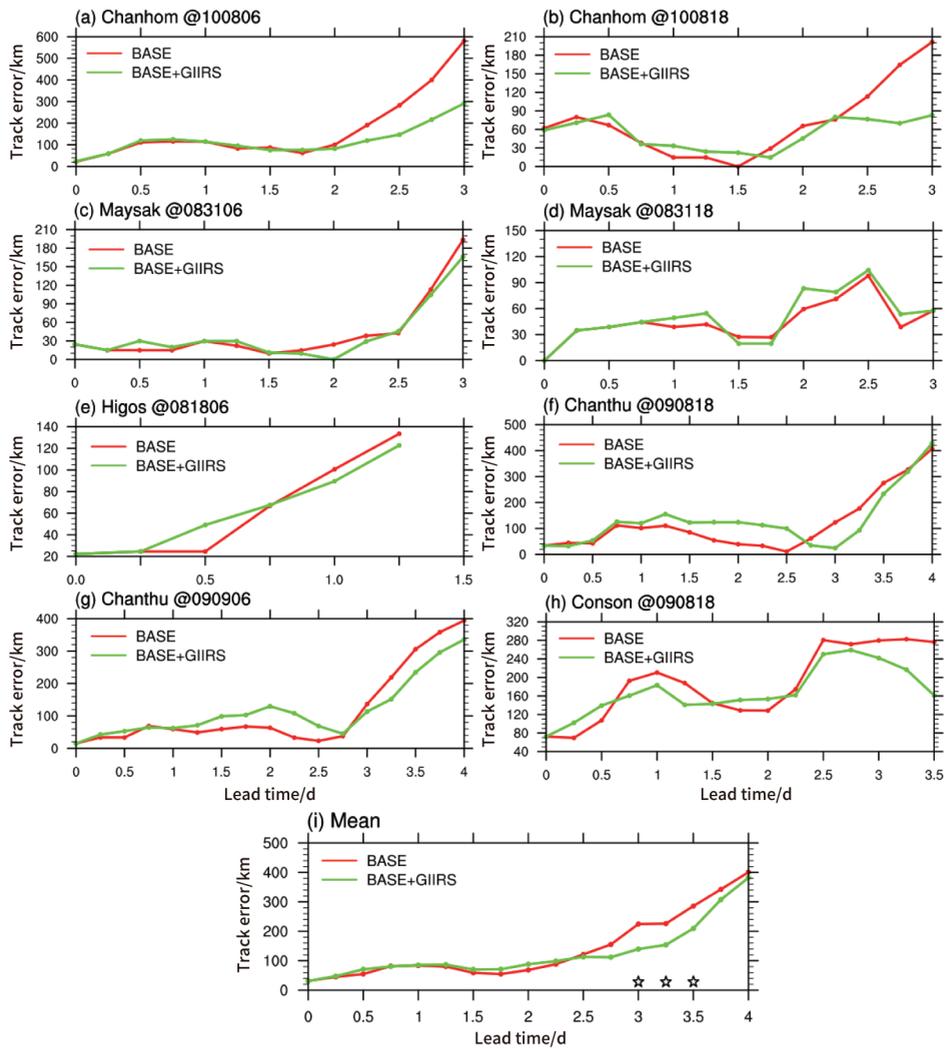


图4 针对8个热带气旋个例，同化业务观测数据(BASE, 红色)和额外同化FY-4高光谱观测数据(BASE+GIIRS, 绿色)的路径预报误差^[58]

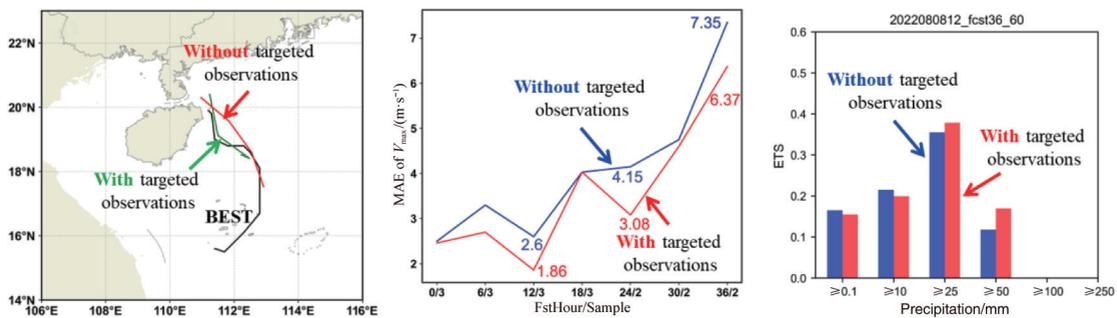


图5 台风木兰(2022)目标观测前后路径(左)、强度(中)、降水(右)预报技巧比较^[60]

综上，相较盲目地选择或将SVs方法确定的敏感区作为观测区域进行加密观测，将有限的观测资源集中在CNOP敏感区内，可获得更大的预

报收益，真正实现低成本观测与高回报预报的良好互动^[57, 61]，也凸显CNOP方法在目标观测外场试验中的优势。

4 结语

目标观测是一种能够与数值预报互动且经济有效的观测策略，主要目的是有效利用资源，仅在有限的敏感区进行高质量加密观测，从而改进初始场质量，提高极端天气事件的预报精度。自20世纪90年代以来，国际上各大业务和科研机构纷纷针对不同极端天气系统的预报，开展了目标观测理论研究和外场试验，取得了丰硕成果，获得了大量宝贵的观测数据，有效提高了极端天气事件的预报水平。虽然我国起步较晚，但在近十余年的时间里，我国气象学家们对台风预报的目标观测研究和实践也取得了突破性进展，不仅突破传统方法的线性限制，发展了利用完全考虑非线性物理过程的CNOP方法识别目标观测敏感区的非线性新技术，而且自2020年以来，该技术被逐步应用于我国台风目标观测的外场试验，对于降低观测误差、减小台风预报不确定性提供了极其宝贵的观测数据。另外，值得一提的是，CNOP目标观测技术近期被植入中国气象局上海台风研究所华东区域业务预报模式，对2024年秋季台风进行了业务运行尝试，取得了良好效果，从而使CNOP目标观测技术开始向台风业务预报场景迈进。我们相信，在严谨的科学支撑和气象部门的大力支持和密切协作下，我国的目标观测业务会逐渐变得更加成熟，同时也将带动新的资料同化技术和新的预报技术的发展，最终大大促进极端天气预报水平的提高。

2024年诺贝尔物理学奖授予了美国和加拿大科学家John J. Hopfield、Geoffrey E. Hinton，以表彰他们“基于神经网络实现机器学习的基础性发现和发明”。事实上，近年来，人工智能(AI)逐渐兴起，气象大数据AI模型也如雨后春笋般大量出现，而且各类AI模型对所针对的天气气候现象的预报呈现了良好的表现。尽管这样，由于AI模型基于的大数据不可避免地存在误差，AI模型也不能确切地描述大气海洋运动，这些误差的存在无疑给CNOP目标观测技术的应用提供了新的场景。AI模型的最大优势是它的计算效率远超数值预报模型，所以，AI技

术的利用可大大缩短目标观测敏感区的计算时间，从而缩短因提前识别目标观测敏感区所需的预报时间长度，进而减小目标观测敏感区的不确定性，增强目标观测提高极端天气事件预报水平的可靠性。因此，尽管天气预报范式正在发生改变，但CNOP目标观测技术仍是新范式下实施目标观测的关键手段，希望未来在继续研究的基础上，将CNOP与AI结合，实现CNOP目标观测技术与AI的完美结合，同时探索符合不同观测平台特点，或综合不同平台开展立体观测的CNOP目标观测新技术，依此促进资料同化和数值预报技术的进一步发展，服务我国极端天气事件的精准预报。

(2024年10月27日收稿)■



参考文献

- [1] BAUER P, THORPE A, BRUNET G. The quiet revolution of numerical weather prediction [J]. *Nature*, 2015, 525: 47-55.
- [2] SNYDER C. Summary of an informal workshop on adaptive observations and FASTEX [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77(5): 953-961.
- [3] SHAPIRO M A, THORPE A J. THORPEX international science plan [R]. Version 3. WMO/TD No. 1246. WWRP/THORPEX No. 2. Geneva: WMO, 2004.
- [4] RABIER F, GAUTHIER P, CARDINALI C, et al. An update on THORPEX-related research in data assimilation and observing strategies [J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2008, 15: 81-94.
- [5] AGUSTI-PANAREDA A, BELJAARS A, CARDINALI C, et al. Impact of assimilating AMMA soundings on ECMWF analyses and forecasts [J]. *Weather Forecasting*, 2010, 25: 1142-1160.
- [6] WULFMAYER V, BEHRENDT A, BAUER H, et al. The convective and orographically-induced precipitation study: A research and development project of the world weather research programme for improving quantitative precipitation forecasting in low-mountain regions [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2008, 89: 1477-1486.
- [7] PRATES C, RICHARDSON D, SAHIN C. Final report of the PREVIEW observation Data Targeting System (DTS) [R]. ECMWF Technical Memoranda 581, 2009. DOI: 10.21957/ziumqeedn.
- [8] JANS A, ARBOGAST P, DOERENBECHER A, et al. A new approach to sensitivity climatologies: the DTSMEDEX-2009 campaign [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2011, 11(9): 2381-2390.
- [9] WEISSMANN M, HARNISCH F, WU C. et al. The influence of assimilating dropsonde data on typhoon track and mid-latitude forecasts [J]. *Monthly Weather Review*, 2011, 139: 908-920.
- [10] IRVINE E A, GRAY S L, METHVEN J, et al. Forecast impact of targeted observations: sensitivity to observation error and proximity to steep orography [J]. *Monthly Weather Review*, 2011, 139: 69-78.

- [11] World Meteorological Organization (WMO). Targeted observations for improving numerical weather prediction: an overview [R]. WWRP/THORPEX No. 15, Geneva: WMO, 2011: 4.
- [12] MU M, DUAN W, CHEN D, et al. Target observations for improving initialization of high-impact ocean-atmospheric environmental events forecasting [J]. *National Science Review*, 2015, 2(2): 226-236
- [13] BERGOT T. Adaptive observations during FASTEX: A systematic survey of upstream flights [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1999, 125: 3271-3298.
- [14] WU C, CHEN J, LIN P, et al. Targeted observations of tropical cyclone movement based on the adjoint-derived sensitivity steering vector [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2007, 64: 2611-2626.
- [15] PALMER T, GELARO R, BARKMEIJER J, et al. Singular vectors, metrics, and adaptive observations [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1998, 55: 633-653.
- [16] BISHOP C, TOTH Z. Ensemble transformation and adaptive observations [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1999, 56: 1748-1765.
- [17] BARKMEIJER J, VAN GIJZEN M, BOUTTIER F. Singular vectors and estimates of the analysis error covariance metric [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1998, 124: 1695-1713.
- [18] BISHOP C, ETHERTON B, MAJUMDAR S. Adaptive sampling with the ensemble transform Kalman filter. Part I: Theoretical aspects [J]. *Monthly Weather Review*, 2001, 129: 420-436.
- [19] MU M, ZHOU F, WANG H. A method for identifying the sensitive areas in targeted observations for tropical cyclone prediction: conditional nonlinear optimal perturbation [J]. *Monthly Weather Review*, 2009, 137: 1623-1639.
- [20] MU M, DUAN W, WANG B. Conditional nonlinear optimal perturbation and its applications [J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2003, 10: 493-501.
- [21] QIN X, MU M. A study on the reduction of forecast error variance by three adaptive observation approaches for tropical cyclone prediction [J]. *Monthly Weather Review*, 2011, 139: 2218-2232.
- [22] QIN X, MU M. Influence of conditional nonlinear optimal perturbations sensitivity on typhoon track forecasts [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2011, 138: 185-197.
- [23] CHEN B, MU M, QIN X. The impact of assimilating dropwindsonde data deployed at different sites on typhoon track forecasts [J]. *Monthly Weather Review*, 2013, 141: 2669-2682.
- [24] VIDARD A, BOUTTIER P-A, VIGILANT F. NEMOTAM: tangent and adjoint models for the ocean modelling platform NEMO [J]. *Geoscientific Model Development*, 2015, 8: 1245-1257.
- [25] CHEN D, SMITH N, KESSLER W. The evolving ENSO observing system [J]. *National Science Review*, 2018, 5(6): 805-807.
- [26] LIU K, GUO W, DAL L, et al. Improving the thermal structure predictions in the Yellow Sea by conducting targeted observations in the CNOP-identified sensitive areas [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 19518.
- [27] TERWISSCHA VAN SCHELTINGA A D, DIJKSTRA H A. Conditional nonlinear optimal perturbations of the double-gyre ocean circulation [J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2008, 15(5): 727-734.
- [28] RIVIÈRE O, LAPEYRE G, TALAGRAND O. A novel technique for nonlinear sensitivity analysis: application to moist predictability [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2009, 135: 1520-1537.
- [29] WANG L, SHEN X, LIU J, et al. Model uncertainty representation for a convection-allowing ensemble prediction system based on CNOP-P [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2020, 37(8): 817-831.
- [30] DUAN Q, PAPPENBERGER F, WOOD A, et al. Handbook of hydrometeorological ensemble forecasting [M]. Berlin, Germany: Springer, 2019.
- [31] SHEN X, WANG J, LI Z, et al. Research and operational development of numerical weather prediction in China [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2020, 34(4): 675-698.
- [32] DUAN Y, WAN Q, HUANG J, et al. Landfalling tropical cyclone research project (LTCRP) in China [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2019, 100: ES447-ES472.
- [33] CHAN P, WU N, ZHANG C, et al. The first complete dropsonde observation of a tropical cyclone over the South China Sea by the Hong Kong Observatory [J]. *Weather*, 2018, 73: 227-234.
- [34] ZHANG J, ROGERS R, NOLAN D, et al. On the characteristic height scales of the hurricane boundary layer [J]. *Monthly Weather Review*, 2011, 139: 2523-2535.
- [35] ZHANG J, NOLAN D, ROGERS R, et al. Evaluating the impact of improvements in the boundary layer parameterization on hurricane intensity and structure forecasts in HWRF [J]. *Monthly Weather Review*, 2015, 143: 3136-3155.
- [36] MING J, ZHANG J, ROGERS R, et al. Multiplatform observations of boundary layer structure in the outer rainbands of landfalling typhoons [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119: 7799-7814.
- [37] BI X, GAO Z, LIU Y, et al. Observed drag coefficients in high winds in the near offshore of the South China Sea [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(13): 6444-6459.
- [38] TANG J, BYRNE D, ZHANG J, et al. Horizontal transition of turbulent cascade in the near-surface layer of tropical cyclones [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2015, 72: 4915-4925.
- [39] ZHAO Z, LIU C, LI Q, et al. Typhoon air-sea drag coefficient in coastal regions [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2015, 120: 716-727.
- [40] ZHANG X, DUAN Y, WANG Y, et al. A high-resolution simulation of Supertyphoon Rammasun (2014). Part I: Model verification and surface energetics analysis [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2017, 34: 757-770.
- [41] ZHAO K, WANG M, XUE M, et al. Doppler radar analysis of a tornadic miniature supercell during the landfall of Typhoon Mujigae (2015) in South China [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2017, 98: 1821-1831.
- [42] MING J, ZHANG J. Direct measurements of momentum flux and dissipative heating in the surface layer of tropical cyclones during landfalls [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123: 4926-4938.
- [43] WEN L, ZHAO K, CHEN G, et al. Drop size distribution characteristics of Seven Typhoons in China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123: 6529-6548.
- [44] WANG M, ZHAO K, XUE M, et al. Precipitation microphysics characteristics of a Typhoon Matmo (2014) rainband after landfall

- over eastern China based on polarimetric radar observations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(20): 12415-12433.
- [45] WANG M, ZHAO K, LEE W, et al. Microphysical and kinematic structure of convective-scale elements in the inner rainband of Typhoon Matmo (2014) after landfall [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2018, 123: 6549-6564.
- [46] WU D, ZHAO K, KUMJIAN M R, et al. Kinematics and microphysics of convection in the outer rainband of Typhoon Nida (2016) revealed by polarimetric radar [J]. *Monthly Weather Review*, 2018, 146: 2147-2159.
- [47] CHEN N, TANG J, ZHANG J, et al. On the distribution of helicity in the tropical cyclone boundary layer from dropsonde composites [J]. *Atmospheric Research*, 2021, 249: 105298.
- [48] TANG J, ZHANG J, CHAN P, et al. A direct aircraft observation of helical rolls in the tropical cyclone boundary layer [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 18771.
- [49] CHA D, WANG Y. A dynamical initialization scheme for real-time forecasts of tropical cyclones using the WRF model [J]. *Monthly Weather Review*, 2013, 141: 964-986.
- [50] WEN J, ZHAO K, HUANG H, et al. Evolution of microphysical structure of a subtropical squall line observed by a polarimetric radar and a disdrometer during OPACC in Eastern China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(15): 8033-8050.
- [51] LI J, GAO Y, WAN Q. Sample optimization of ensemble forecast to simulate a tropical cyclone using the observed track [J]. *Atmosphere-Ocean*, 2018, 56: 112-128.
- [52] LIU H, WANG Y, XU J, et al. A dynamical initialization scheme for tropical cyclones under the influence of terrain [J]. *Weather and Forecasting*, 2018, 3: 641-659.
- [53] LU Y, REN F, ZHU W. Risk zoning of typhoon disasters in Zhejiang Province, China [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2018, 18: 2921-2932.
- [54] CHEN H, YU H, YE G, et al. Return period and the trend of extreme disastrous rainstorm events in Zhejiang Province [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2019, 25: 192-200.
- [55] HAN W, YIN R, LI J, et al. Assimilation of geostationary hyperspectral infrared sounders (GeoHIS): Progresses and perspectives [M]//PARK S K (ed). *Numerical Weather Prediction: East Asian Perspectives*. Springer Atmospheric Sciences. Cham, Switzerland: Springer, 2023: 205-216.
- [56] YIN R, HAN W, GAO Z, et al. Impact of high temporal resolution FY-4A geostationary interferometric infrared sounder (GIIRS) radiance measurements on typhoon forecasts: Maria (2018) case with GRAPES global 4D-Var assimilation system [J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(15): e2021GL093672.
- [57] 段晚锁, 秦晓昊. 非线性最优扰动方法在热带气旋目标观测研究和外场试验中的应用 [J]. *地球科学进展*, 2022, 37(2): 165-176.
- [58] FENG J, QIN X, WU C, et al. Improving typhoon predictions by assimilating the retrieval of atmospheric temperature profiles from the FengYun-4A's geostationary interferometric infrared sounder (GIIRS) [J]. *Atmospheric Research*, 2022, 280: 106391.
- [59] 雷小途, 张雪芬, 段晚锁, 等. 近海台风立体协同观测科学试验[J]. *地球科学进展*, 2019, 34 (7): 671-678.
- [60] CHAN P, HAN W, MAK B, et al. Running head: Ground-space-sky OSE of TC Mulan in August 2022 ground-space-sky observing system experiment during tropical cyclone Mulan in August 2022 [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2023, 40(2): 194-200.
- [61] QIN X, DUAN W, CHAN P, et al. Effects of dropsonde data in field campaigns on forecasts of tropical cyclones over the western North Pacific in 2020 and the role of CNOP sensitivity [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2023, 40(5): 791-803.

Target observation and extreme weather forecasts

DUAN Wansuo^①, QIN Xiaohao^①, YANG Lichao^②

① Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; ② College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China

Abstract Target observation is a new observational strategy to improve forecast level of extreme weather events. Under the promotion of the Observing System Research and Predictability Experiment proposed by the World Meteorological Organization in 2003, a lot of scientific research and field campaigns for target observation have been worldwide conducted and effectively upgraded the forecast level of relevant extreme weather events. Chinese scientists started late in target observations; however, they have achieved breakthroughs in the past decade or so. In this article, we introduce the idea of target observation and elucidate the crucial issues for target observations. We also overview the field campaigns conducted for target observations in the world and review both the progresses in research and the efforts in implementing field campaigns for target observation associated with tropical cyclone forecasts in China.

Key words target observation, extreme weather forecast, sensitive region, data assimilation

(编辑: 沈美芳)