

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.DOI:10.11867/j.issn.1001-8166.2022.010.[DUAN Wansuo, QIN Xiaohao. Application of nonlinear optimal perturbation methods in the targeting observations and field campaigns of tropical cyclones[J]. Advances in Earth Science, 2022, 37(2): 165-176. DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2022.010.]

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*

段晚锁^{1,2}, 秦晓昊^{1*}

(1. 中国科学院大气物理研究所 大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029; 2. 中国科学院大学海洋学院, 北京 101408)

摘要:综述了我国学者近年来用非线性最优扰动方法探索热带气旋目标观测及其外场试验的主要进展,具体包括:从提高数值模式初始场精度的角度,用条件非线性最优扰动方法确定了热带气旋路径和强度预报的目标观测敏感区,并成功应用于“风云四号”气象卫星和下投探空仪台风目标观测外场试验,助力业务部门获得了宝贵资料。从减小模式误差或外强迫不确定性的角度,将非线性强迫奇异向量方法应用于探讨热带气旋强度预报的敏感性,揭示了模式误差的敏感气象要素和敏感区,以及海表温度强迫的敏感区;用集合扰动的思路识别了热带气旋快速增强过程预报的行星边界层的模式误差敏感区。讨论了目前热带气旋目标观测研究存在的问题以及可能的解决方法,展望了未来热带气旋目标观测研究应努力的前沿方向,及其在实际预报中的应用前景。

关键词:热带气旋;目标观测;非线性最优扰动;资料同化;集合预报

中图分类号: P444

文献标志码: A

文章编号: 1001-8166(2022)02-0165-12

1 引言

热带气旋是影响我国的主要灾害性天气之一,它在短期内造成的大风、暴雨、风暴潮等次生灾害不仅严重影响人民生产生活的正常进行,有时甚至造成巨大的生命和财产损失。据统计,自新中国成立以来,每年有4~12个热带气旋登陆我国,尤以华南地区和台湾省居多,占整个西北太平洋热带气旋总数的20%~30%;而登陆我国大陆地区和海南岛的热带气旋每年大约有7个,导致的直接经济损失平均可达到287亿元人民币,平均致死人数470人^[1]。

因此,热带气旋预报具有重要意义。

目标观测作为提高初始场精度、进而提高热带气旋预报水平的主要方法之一,近20年来受到了足够重视^[2-7]。2003年,由我国台湾地区主持的“追风计划”目标观测试验开始实施,并持续至今,该计划主要聚焦于西北太平洋上的热带气旋;2005年,世界气象组织布局了为期10年的THORPEX(the Observing-system Research and Predictability Experiment)计划,旨在通过对大西洋和西北太平洋的热带气旋开展目标观测外场试验,从而进一步认知热带气旋结构、改善热带气旋预报技巧;而我国香港地区也从

收稿日期:2021-12-22;修回日期:2022-01-19.

* 基金项目:国家重点研发计划项目“台风目标观测研究”(编号:2018YFC1506402);国家自然科学基金项目“非线性强迫奇异向量—集合预报方法及其在厄尔尼诺和台风可预报性研究中的应用”(编号:41930971)资助。

作者简介:段晚锁(1973-),男,山西阳城人,研究员,主要从事海气相互作用,以及台风、厄尔尼诺、印度洋偶极子等高影响天气、气候事件和海洋中尺度涡的可预报性、目标观测、资料同化和集合预报等研究. E-mail: duanws@lasg.iap.ac.cn

* 通信作者:秦晓昊(1983-),女,湖南湘潭人,副研究员,主要从事热带气旋的可预报性、目标观测、资料同化和集合预报等研究。

E-mail: xhqin@lasg.iap.ac.cn

2016 年开始对进入我国南海地区的热带气旋开展了目标观测外场试验。目标观测策略的主要思路是希望通过在大概率对未来预报有较大影响的某些关键区域(敏感区)增加额外观测,并经资料同化后,为数值模式提供更接近真实的初始场,从而达到提高预报技巧的目的^[8]。理论上,如果在高敏感区同化观测资料,初值质量的提高会有效地改进预报效果,而且计算代价要小很多;而在低敏感区同化观测资料,初值的质量不会明显改进或对预报效果不产生任何积极影响,甚至可能会影响整个同化过程的收敛性与敏感区域的同化质量,大大增加不必要的计算时间。因此,如果把同化集中在目标观测敏感区,不仅可以提高同化的收敛速度,大大节省计算时间,而且还能有效提高同化质量和预报效果。那么,如何确定热带气旋的目标观测敏感区呢?科学家们一般通过客观的方法识别目标观测敏感区。这些方法中最具代表性的有奇异向量方法^[9](Singular Vector, SV)、集合转换卡尔曼滤波方法^[10](Ensemble Transform Kalman Filter, ETKF)和基于引导流的伴随敏感性方法^[11](Adjoint-Derived Sensitivity Steering Vector, ADSSV)。利用上述方法,气象学家们联合工程师、航空部门等在西太平洋上空实施了多次热带气旋外场目标观测试验,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,热带气旋路径的预报误差减小了 20%~40%,当应用于欧洲中期天气预报中心和日本气象厅的业务预报模式时,在预报时长超过 72 h 时,热带气旋路径预报的改善不大^[12]。

事实上,随着热带气旋的预报时长延长,非线性物理过程的影响逐步显现。然而,在上述外场试验中,用于确定目标观测敏感区的方法在不同程度上均使用了线性近似,这显然忽略了非线性物理过程的影响,而且对于热带气旋这样一个多尺度相互作用的复杂气旋性涡旋,线性近似无法准确反映其发展过程,尤其无法刻画预报时长较长情形下的非线性物理过程的影响。所以,线性近似可能是欧洲和日本模式在更长预报时长情况下无法更好地反映目标观测有效性的原因之一。在这样的背景下, Mu 等^[13-14]提出使用条件非线性最优扰动(Conditional Nonlinear Optimal Perturbation, CNOP)方法识别热带气旋的目标观测敏感区。相较于传统方法, CNOP 方法最具竞争性的方面是考虑初始误差的发展完全由非线性模式主导,不做任何线性

近似,且通过在预报时刻能够导致最大预报误差的初始误差识别敏感区,这更符合实际预报。Qin 等^[15]基于观测系统模拟试验(Observing Systems Simulation Experiment, OSSE)和观测系统试验(Observing System Experiments, OSE),对 CNOP 识别的目标观测敏感区在提高热带气旋路径预报技巧中的有效性进行了验证,认为同化 CNOP 识别的敏感区内的模拟观测或实际观测,对热带气旋路径预报的提高(最大可达到 46%)要显著大于在 SV 识别的敏感区同化资料的情况(最大仅达到 25%)^[16]。虽然 CNOP 方法较传统的目标观测方法有明显优势,但在应用该方法进行热带气旋目标观测理论研究时,未被同步应用于热带气旋的实时外场观测试验。鉴于此,近年来我国气象学家和工程师们开启了利用“风云四号”卫星、无人机和有人机下投探空等观测手段对严重影响我国沿海地区的热带气旋的实时目标观测外场试验,并使用 CNOP 方法提前确定了应优先实施观测的敏感区域,从而对热带气旋的实时观测给予了科学指导,助力业务部门获得了宝贵的观测资料^[17]。

气象学家们近年来对多年停滞的热带气旋强度预报水平(尤其是短期预报)也开始了更多关注^[18-20]。他们认识到,对热带气旋初始状态的准确估计有利于热带气旋强度的预报,但模式误差却制约着强度预报时效的上限^[21-23]。可见,模式误差对热带气旋预报的影响是重要的。然而,模式误差来源复杂,如模式分辨率的不足,物理参数化方案的不准确等均导致模式误差^[24],且它们之间相互作用。因此,逐一分析每一种模式误差,并减小其影响是非常困难的;且由于他们之间的相互作用,人们在尝试减小模式误差时,经常会出现“按下葫芦起了瓢”的现象。那么,能否从宏观角度表征这些模式误差的综合作用,进而抵消其影响呢?事实上,该问题长期以来一直困扰着气象学家们。直至 2013 年, Duan 等^[25]提出了使用数值模式倾向扰动表征不同来源模式误差综合影响,进而识别倾向扰动敏感区,通过目标观测手段减小模式误差综合影响的新思路。然而,识别模式倾向扰动敏感区,需求解能够导致最大预报误差的模式倾向误差,从而确定需优先进行目标观测的敏感区域。虽然国际上有若干方法可用于表征模式误差,如随机全倾向扰动^[26](Stochastic Total Tendency Perturbation, STTP)方法和随机动能补偿(Stochastic Kinetic Energy Backscatter, SKEB)^[27]方法等,但这些方法不能充分

刻画倾向扰动的敏感性。Barkmeijer等^[28]提出了能够刻画倾向扰动不稳定增长的强迫奇异向量(First Singular Vector, FSV)方法,但该方法基于线性近似假设,不能描述非线性物理过程的影响。为克服线性局限性,Duan等^[25]提出的非线性强迫奇异向量(Nonlinear Forcing Singular Vector, NFSV)倾向扰动方法刻画了不同来源模式误差的综合影响,代表了在预报时刻能够导致最大预报误差的模式倾向误差,克服了STTP方法不能反映模式误差空间分布及刻画预报误差不稳定增长的局限性^[29]。利用该方法,Qin等^[30]识别了有助于减小模式误差对热带气旋强度预报影响的目标观测变量和敏感区,而Yao等^[31]则揭示了热带气旋强度预报的海温强迫目标观测敏感区和最优目标观测时段,并构建了适用于提高热带气旋快速增强过程预报技巧的最优海温目标观测网,从而在国际上首先开始了关于减小不同来源模式误差综合影响的目标观测研究。

综上所述,我国学者克服传统方法的局限性,首先提出了采用非线性最优扰动理论和方法探讨热带气旋目标观测问题,并取得了突破性进展;尤其在近年来,该理论和方法获得了进一步发展,并被应用于热带气旋路径实时预报的目标观测外场试验,从而逐步迈向热带气旋业务观测;该理论和方法也被应用于更具挑战性的热带气旋强度预报的目标观测研究,并取得了有意义的结果。为有效促进非线性最优扰动理论和方法在热带气旋业务目标观测中的应用,本文将总结我国学者和业务部门近年来关于热带气旋目标观测研究和外场试验的结果,分析非线性最优扰动方法在目标观测中应用的优势,以期获得业务部门的重视,并逐步使其成为业务目标观测的有效方法。

2 CNOP方法在热带气旋目标观测外场试验中的应用

如引言所述,CNOP方法已被成功应用于热带气旋路径预报的目标观测研究^[15-16],尤其在2020—2021年,该方法进一步被应用于热带气旋目标观测的外场试验,助力业务部门获得了非常宝贵的台风资料。如2020年8月至2021年9月,中国科学院大气物理研究所联合国家气象中心、复旦大学和国家卫星气象中心,利用“风云四号”卫星对5个热带气旋实施了多次高频次目标观测。值得欣慰的是,每次观测均采用了通过CNOP方法提前确定的目标观测敏感区,从而实现了CNOP方法理论与目标观测

实践的成功结合。

除此之外,中国气象局上海台风研究所和/或香港天文台等利用机载下投探空仪,对2020—2021年的6个热带气旋也开展了目标观测外场试验,CNOP方法也同样被用来确定目标观测敏感区。随后,Qin等^[17]针对其中的4个热带气旋,即海高斯(202007)、艾莎尼(202020)、浪卡(202016)和沙德尔(202017),基于实时预报计算所得的敏感区(图1),对所获得的目标观测资料在提高热带气旋预报技巧中的有效性进行了验证,并且表明由CNOP方法确定敏感区而获得的目标观测能够提高热带气旋路径的预报技巧;尤其对于海高斯(202007),因为该个例对目标观测的极端敏感性,使得仅同化敏感区内唯一探空仪资料对路径预报技巧的提高,就显著大于同化所有8个探空仪资料对路径预报技巧的提高。另外,该研究还表明,上述目标观测资料对热带气旋强度预报技巧的提高要优于对路径的预报,且针对不同个例呈现了更加一致的性质。尤其值得一提的是,对于个例艾莎尼(202020),仅同化敏感区内少量的探空仪观测即可使气旋强度预报误差减小46%,与同化所有观测的效果相当。由此可知,基于CNOP方法确定的目标观测敏感区而获得的下投探空仪观测对于提高热带气旋路径和强度的预报技巧是有效的。因此,CNOP方法有潜力成为适用于热带气旋预报的业务观测的有效方法。

3 NFSV方法在热带气旋强度模拟的目标观测研究中的应用

CNOP方法在目标观测中的应用主要考虑通过有效提高数值模式初始场准确性,而提高数值模式预报水平。事实上,如前所述,不同来源模式误差的综合影响也严重限制热带气旋(尤其强度)的预报精度。根据NFSV的定义可知,其描述了不同来源模式误差的综合影响,代表了能够导致最大预报误差的模式倾向误差,避免了由于客观或主观原因造成的模式误差影响的遗漏。Duan等^[29]利用NFSV方法识别了导致厄尔尼诺—南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)事件最大预报误差的模式倾向误差结构,并据此确定了模式误差敏感区,从而为优先在哪个区域实施目标观测,进而提高ENSO预报水平提供了科学指导^[32]。受此工作的启发,Qin等^[30]和Yao等^[31]也将NFSV方法应用于热带气旋的可预报性研究,考虑模式误差综合影

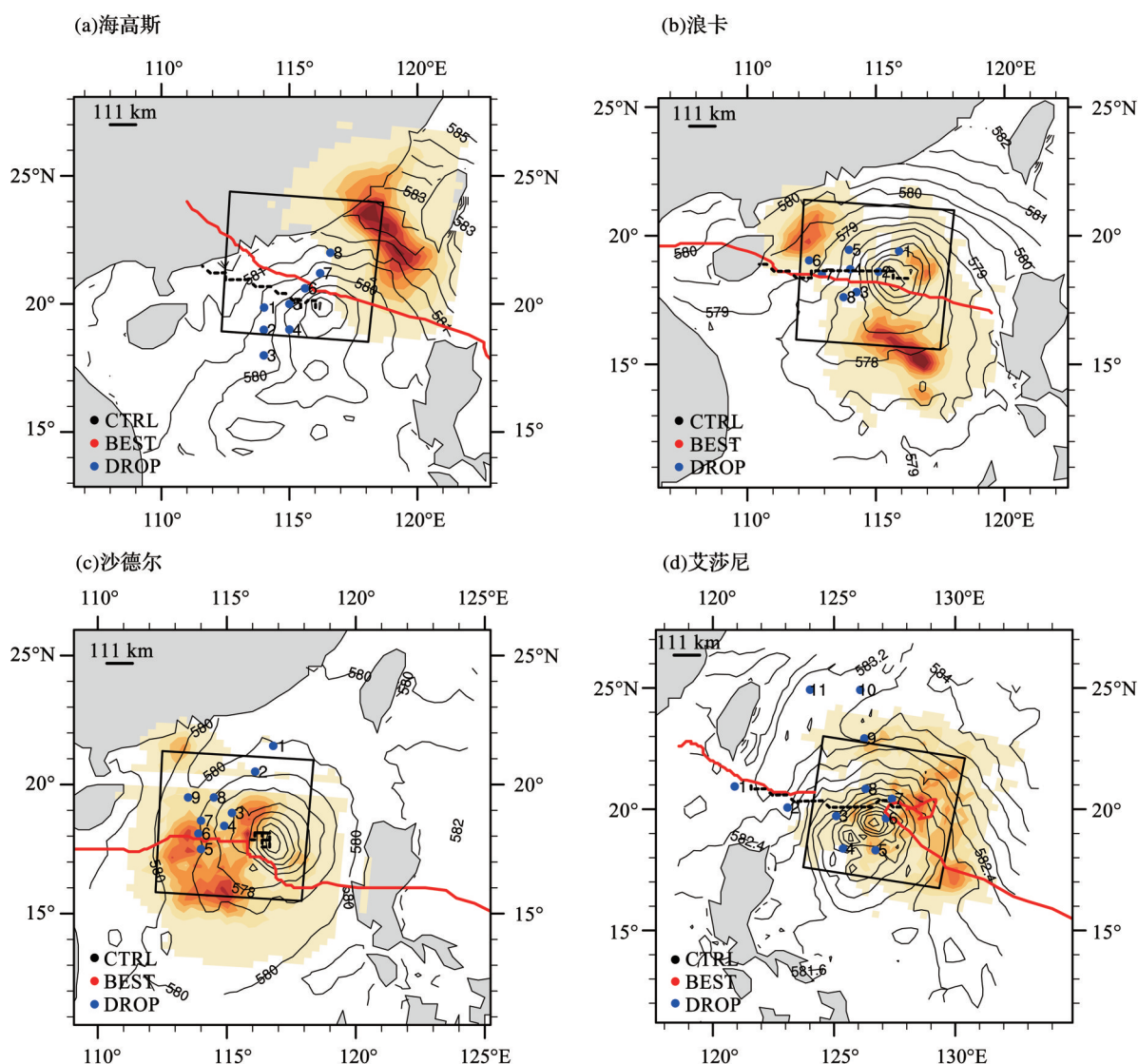


图1 用CNOP方法计算的热带气旋(a)海高斯、(b)浪卡、(c)沙德尔和(d)艾莎尼的目标观测敏感区(填色区域)^[17]

Fig. 1 Sensitive regions (shaded) identified by CNOP for TC cases (a) Higos, (b) Nangka, (c) Saudel, and (d) Atsani^[17]

红色和黑色线分别为观测(BEST)和预报(CTRL)的热带气旋移动路径,蓝色点代表下投探空仪的投放位置(DROP)

Red and black lines respectively denote the tracks in observation (BEST) and control forecast (CTRL),

blue dots denote the dropping sites of dropsondes (DROP)^[17]

响,确定了热带气旋强度模拟的用于减小模式误差影响的目标观测要素和目标观测敏感区或最优目标观测时段。

3.1 热带气旋强度模拟的目标观测要素和目标观测敏感区

Qin等^[30]针对9个具有不同强度的西北太平洋热带气旋,用NFSV方法分别计算了导致其24小时强度模拟具有最大偏差的位温和比湿要素的倾向误差。毫无疑问,该NFSV倾向误差刻画了对位温和比湿变化不确定性具有最大影响的模式误差。Qin等^[30]研究表明,NFSV模式倾向误差的空间分布

特征不依赖热带气旋本身的强度,主要误差能量集中在对流层中低层的热带气旋中心区域,这意味着该区域位温和比湿变化的不确定性是造成热带气旋强度模拟偏差的重要原因,尤以位温变化的不确定性影响较为显著。因此,对流层中低层的热带气旋中心区域代表了热带气旋强度预报的模式误差敏感区,而位温变化代表了热带气旋强度的目标观测敏感要素。通过在上述敏感区对目标观测敏感要素优先进行观测及同化,有效提高了数值模式对热带气旋强度的模拟水平(图2)。可见,对于不同来源模式误差的综合影响,目标观测也是减小其影

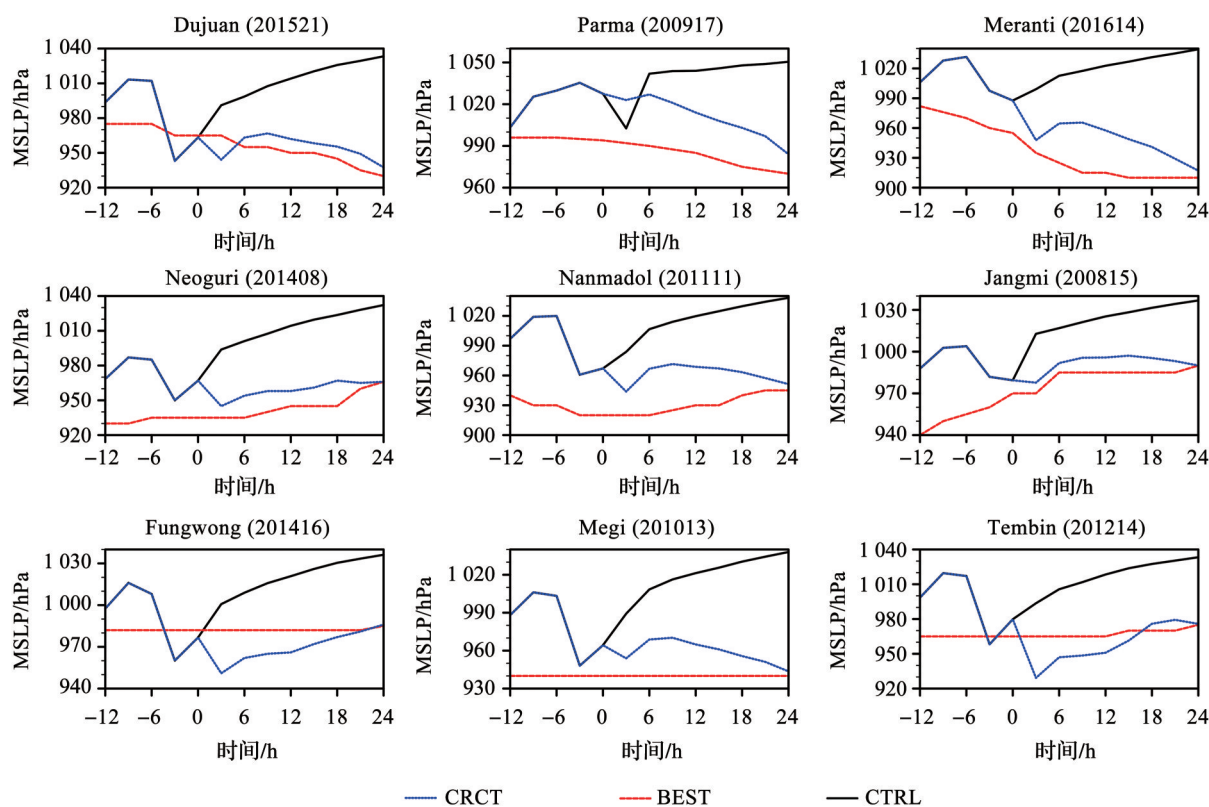


图2 9个热带气旋个例强度(最低海平面中心气压:MSLP)的观测(红线)、控制预报(黑线)以及敏感模式误差被矫正后的预报(蓝线)^[30]

Fig. 2 The Minimum Sea Level Pressure (MSLP) in best-track data (red), CTRL (black), and with the correction item (blue) for nine Tropical cyclones^[30]

校正后的预报更大程度逼近观测,表明了NFSV方法识别的模式误差敏感性的合理性

The simulated MSLPs after correction are closer to the best-track data, indicating the reasonability of the model error sensitivity identified by the NFSV

响,提高热带气旋预报水平的有效途径。另外,“风云四号”卫星观测的主要变量是温度和水汽,因此上述工作也为利用“风云四号”卫星开展热带气旋目标观测的外场试验提供了理论依据。这里值得指出的是,前文综述的关于CNOP方法在“风云四号”卫星目标观测试验中应用,主要针对减小初始误差影响,而本节所描述的NFSV方法的应用,却针对模式误差。所以,上述关于NFSV方法在目标观测中的应用,为“风云四号”卫星拓展观测的功能范畴提供了理论根据。

3.2 热带气旋强度预报的海温强迫目标观测敏感区和最优观测时段

海洋在台风的发生和发展过程中所起到的作用是无可取代的^[33-36]。海洋表面作为海洋与大气的界面,在海洋与热带气旋之间的热量和水汽传递中发挥了重要作用^[37-38]。海表温度(Sea Surface Temperature, SST)是衡量该传递过程重要性的重要

指标,不仅可以决定热带气旋生成的位置,还影响着它们的行进方向和强度变化。因此,在热带气旋的模拟和预报中,考虑SST的影响是十分必要的。Yao等^[31]采用NFSV方法,将SST作为大气模式的外部强迫,考察SST误差对热带气旋强度预报的影响。这里需要指出的是,虽然Yao等^[31]未使用耦合模式开展研究,但因为他们考虑SST的误差,而非SST本身,所以该误差包含了海气耦合频率和强度本身的不确定性造成的影响。因此,该研究为考察海洋不确定性对台风模拟和预报的影响提供了一个新的思路。

Yao等^[31]采用上述思路,对12个具有不同移动轨迹的西北太平洋热带气旋,计算了NFSV型SST强迫误差。该NFSV型SST强迫误差通常具有确定的空间结构,即无论该热带气旋的移动轨迹如何,NFSV型SST强迫误差主要沿着热带气旋移动路径分布,且集中在其快速增强阶段。也就是说,相较

于其他区域,沿着热带气旋路径分布的 SST 误差更容易导致其强度发生较大偏差,而相较于其他阶段(生成期、缓慢增强期、稳定期和衰减期),位于热带气旋快速增强阶段的 SST 误差更容易导致热带气旋强度具有更大的预报误差。针对上述观点,Yao

等^[31]分别从物理解释和数值试验的角度,阐明了上述观点的合理性。所以,沿着热带气旋移动路径且位于其快速增强阶段的区域代表了热带气旋强度模拟的 SST 目标观测敏感区,而热带气旋快速增强阶段扮演了最优目标观测时段(图 3)。

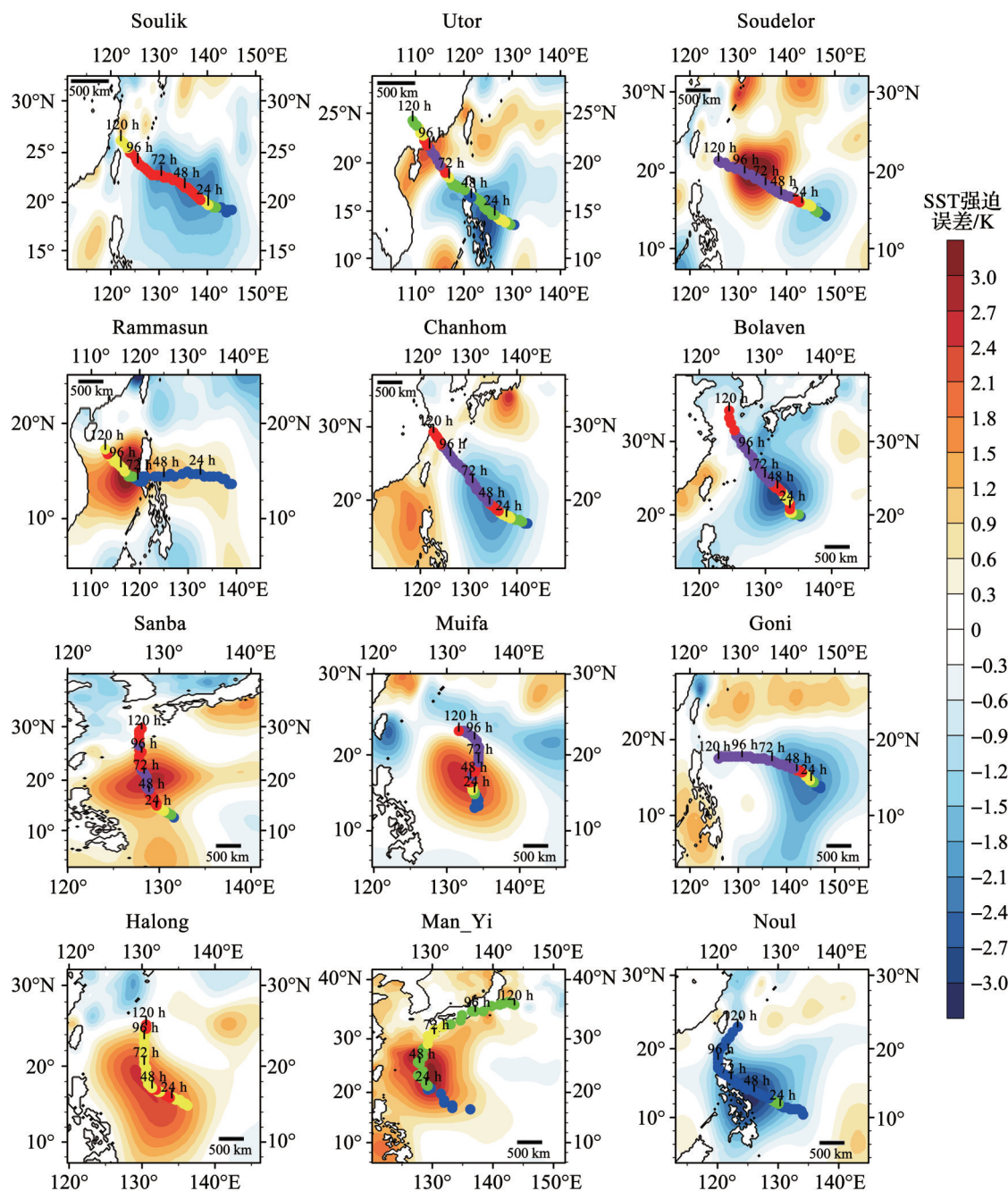


图 3 12 个热带气旋个例强度预报的 NFSV 型 SST 强迫误差(单位:K;填色区域)的空间分布^[31]

Fig. 3 Patterns NFSV-type SST forcing errors (shaded; unit: K) for 12 TC cases^[31]

主要误差沿着热带气旋移动路径(彩色粗线代表路径)分布,主要位于热带气旋的快速增强阶段的区域,

该区域和时段代表了热带气旋强度预报的目标观测敏感区和最优观测时段

NFSV-type SST forcing errors often locate along the TC tracks (color dots) but concentrate in a particular region which tends to occur during the intensification phase of TCs. These region and period represent the optimal region and period for targeting observation associated with TC intensity forecasts

在上述研究的基础上,姚佳伟等^[39]根据NFSV型SST误差识别的敏感性特征,通过OSSE确定了上述12个热带气旋强度模拟的SST目标观测最优布局。如上所述,NFSV型SST强迫误差敏感区一般沿着台风移动路径,主要位于台风快速增强阶段,而姚佳伟等^[39]的研究进一步表明,在NFSV型SST强迫目标观测敏感区内以90 km间隔加密海温观测,这些额外观测能够更加有效地改善热带气旋强度的模拟水平;与空间范围更大的非敏感区相比,在NFSV型SST强迫目标观测敏感区内进行目标观测,能够更加有效地改进热带气旋强度的模拟能力,而当非敏感区内的局地观测区域逐步接近目标观测敏感区时,该局地区域的加密观测对热带气旋强度模拟的改善程度也逐步提高。而且上述改善尤以NFSV型SST强迫误差大值区所对应的TC快速增强阶段最为明显。所以,在由NFSV型海温强迫误差确定的目标观测敏感区和敏感时段内加密观测,对台风强度模拟能力的提高最有效,而且在敏感区内以合适的间隔实施外场观测是最经济的观测策略。可见,该研究为热带气旋预报研究考虑海洋不确定性的影响,进而提高其强度预报水平提供了新思路。

4 集合扰动方法在热带气旋快速增强预报的目标观测中的应用

大气边界层是大气对流层内与地面直接接触的一层,属于行星边界层(Planetary Boundary Layer,PBL)。PBL内的大气运动受到气压梯度力、地转偏向力和摩擦力的共同作用,体现出湍流特征。热带气旋强度的变化与其在PBL内的结构有密切联系,但热带气旋增强过程中PBL内超梯度风的作用一直是学术界的争论热点。一种观点认为,由于超梯度风的作用,更多的绝对角动量向内输送激发了热带气旋内核的启动^[40-43],从而影响热带气旋的增强;而另一种观点则认为,即使超梯度风的高度和强度不同程度地削弱后,热带气旋的增强速率以及达到稳定后的强度均不会明显变化^[44-46]。聚焦到由PBL参数化方案不确定性导致的热带气旋预报不确定性的研究领域,气象学家们致力于减小PBL参数化方案不确定性的影响,从而使热带气旋具有更高的预报技巧。Zhang等^[47]通过调节PBL参数化方案中的垂直涡旋扩散系数,即可模拟出台风伯爵(2010)出现和不出现快速增强过程(Rapid Intensification,RI)2种结构。Chen等^[48]用一个“尺

度觉知”的PBL方案,削弱了边界层内的垂直湍流混合、激发了更强的径向入流及水汽含量,从而使得模拟的热带气旋在出现RI之前内核收缩更快、RI期间增强速率更大。显然,对于包含了无数个参数的PBL参数化方案而言,穷尽地评估每一个参数对热带气旋预报的影响,不仅是一个非常巨大的工程,而且无法兼顾参数之间的相互作用。所以,如果能够宏观地将PBL参数化方案的各种不确定性统一处理,那么上述复杂问题就迎刃而解了。

Qin等^[49]针对WRF模式中的PBL参数化方案——YSU方案^[50],依据NFSV综合考虑不同来源模式误差综合影响的思想^[25],在数值模式YSU方案的输出项直接叠加倾向扰动,通过构造该倾向的不同扰动样本度量YSU方案的不确定性,产生热带气旋强度的预报样本,考察其离散度,从而揭示台风杜鹃(201521)RI过程预报对YSU参数化方案的敏感性。该研究结果表明,边界层参数化方案的不确定性是热带气旋强度预报、尤其是RI过程预报不确定性的重要来源;相较于热带气旋以外及内部的内核区,热带气旋大风区下边界层内大气状态模拟的准确性对RI过程的预报具有更大影响,而在模式对大气状态的刻画中,模式对通过运动或热变化造成的水汽输送的准确刻画是提高RI预报的重中之重(图4)。事实上,这些结果为热带气旋边界层的目标观测提供了科学依据,即对于热带气旋强度预报,大气边界层非常值得加密观测,且应优先持续对热带气旋大风区内的水汽变化进行加密观测。通过目标观测获得的观测数据,一方面可以及时矫正由于PBL参数化方案偏差引起的预报误差,另一方面则可以通过统计大量个例,作为后期PBL参数化方案订正的参考。因此,PBL的目标观测是非常重要的,上述研究对提高热带气旋强度的预报水平具有实际应用价值。

5 总结与讨论

本文综述了近年来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应用的进展。从改进初始场精度的角度,由我国学者提出的CNOP方法已被有关科研和业务部门先后成功应用于“风云四号”卫星、下投探空仪等观测手段的热带气旋目标观测外场试验,为提高热带气旋的预报水平提供了宝贵的观测资料。但我们需认识到,不是每一次的目标观测都能提高热带气旋的预报技巧^[51]。例如,由于强风、空域的原因,下投探空仪的

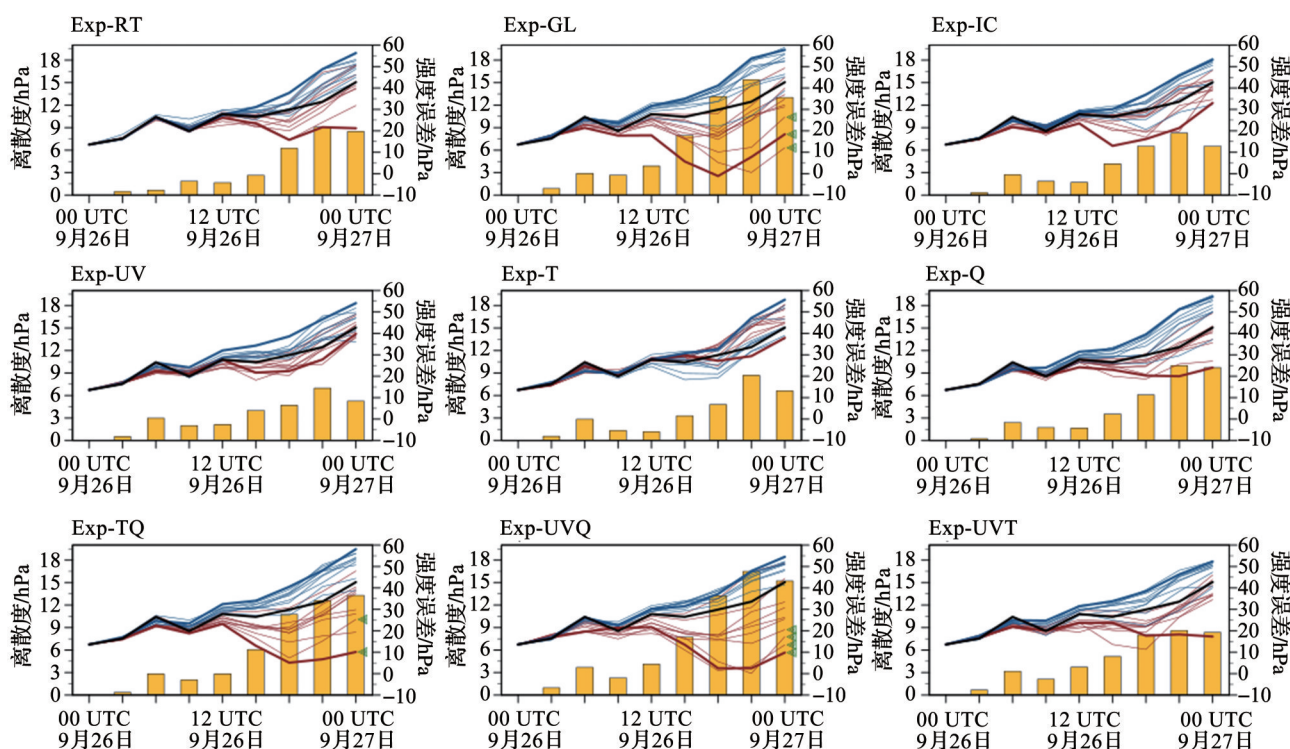


图 4 热带气旋杜鹃(201521)集合模拟的强度误差和离散度的时间演变

Fig. 4 Time series of intensity errors and spread for the tropical cyclone case Dujuan (201521)

Exp-RT、-GL 和 -IC 分别代表热带气旋边缘区、大风区和内核区边界层方案(YSU)扰动试验; Exp-UV、-T 和 -Q, 以及 Exp-TQ、-UVQ 和 -UVT 分别表示大风区 YSU 水平风场、位温、水汽混合比, 以及它们的两两组合的扰动试验。离散度越大, 表明热带气旋强度模拟对扰动越敏感。Exp-RT, -GL, and -IC respectively denote the experiments with the perturbations superimposed on the YSU over the outer, gale, and inner-core area of the tropical cyclone. The Exp-UV, -T, -Q, as well as -TQ, -UVQ, and -UVT, respectively represent the experiments with perturbations superimposed on YSU over the gale area of the tropical cyclone for horizontal wind, potential temperature, water vapor mixing ratio and the combinations of any two among them. The larger the spread, the more sensitive of the simulated intensity to the perturbations is.

位置可能偏离预定位置, 或者无法在预定位置投放等, 使得观测出现了偏差; 数值模式以及同化技术的不完美都会引入新的误差, 这些因素都可能对目标观测的有效性提出挑战^[52]。因此, 我们需要对更多的热带气旋个例进行目标观测外场试验, 从而从统计的角度评估目标观测对提高热带气旋预报水平的有效性。

从减小不同来源模式误差综合影响的角度, 近年来我国学者提出了用 NFSV 方法识别最具不稳定增长性质的模式倾向误差, 并将其应用于 WRF 模式, 识别了大气对流层、海洋表面以及大气边界层中对热带气旋强度预报具有最大影响的目标观测要素及其敏感区或最优观测时段。这些研究不仅丰富了热带气旋可预报性研究的内容, 而且为克服当前热带气旋强度预报瓶颈提出了新的思路。但这些工作尚需进一步完善, 以期未来被业务观测重视和应用。如这些工作主要采用大气模式, 未考虑

热带气旋演变中海气耦合的作用, 而且模式的分辨率也需进一步提高, 以捕捉对流尺度的不确定性对热带气旋强度的影响, 并完整地考虑海洋次表层、中尺度涡、海洋飞沫等对热带气旋强度预报的影响等。此外, 关于热带气旋的极具挑战性的热点问题, 台风的生成和快速增强的预报, 也应在未来的目标观测研究中获得足够重视。

用高分辨率耦合模式探讨热带气旋的目标观测, 无疑对现有的非线性最优扰动理论和方法提出了新挑战。因此, 未来需要加大力气研究非线性最优“耦合”扰动新理论和新方法, 并将其应用于高影响海—气环境事件热带气旋, 甚至其他高影响海—陆—气—冰耦合环境事件的目标观测和可预报性研究。另外, 随着高新技术观测手段, 如气象、海洋卫星、雷达、无人机与水下潜航机等的不断发展, 应推动耦合模式与目标观测相结合的数值模拟研究和目标观测外场试验研究。此外, 为促进学科发

展,希望推动非线性最优化扰动理论和方法在以下领域的研究,这些领域的研究也有助于促进目标观测的可靠性和在提高数值预报水平中的有效性。

(1) 集合预报

作为被世界气象组织列为未来数值预报的主要发展战略之一的集合预报,其产品的丰富性和有用性决定了其在数值预报预测中具有无可替代的重要作用。构造一组合适的集合样本,既是集合预报的核心,也是保障预报结果稳定性和可靠性的前提。由于集合预报样本的多样性,通过它们的离散性质,可提供更加可靠的目标观测敏感性,因而在目标观测研究领域,也应大力发展集合预报的新理论和新方法。Duan等^[53]考虑到传统集合预报方法的局限性,将我国学者提出的CNOP方法拓展到相互独立的相空间产生正交CNOPs,提出了正交-CNOPs集合预报新方法。然后,Huo等^[54-55]表明了正交-CNOPs较SVs和繁殖向量—集合预报方法对热带气旋路径具有更高的预报技巧,汪叶等^[56]更进一步论证了如何使正交-CNOPs方法获得最高集合预报技巧。但是,上述集合预报属于经典的关于初始扰动的集合预报方法,建立在完美模式假定的基础之上。然而,开展实时预报的数值模式既存在初始误差又不可避免地存在模式误差。因此,我们需要发展能够同时考虑初始误差和模式误差的集合预报方法,从而构建更具实际应用价值的集合预报系统,并将其应用于热带气旋、暴雨、东北冷涡、厄尔尼诺等高影响天气和气候事件的目标观测,得到更加可靠的目标观测敏感区和最经济的最优观测网布局,为进一步提高数值预报水平提供有效的高质量观测数据。当然,这项研究具有挑战性,但这是一个极具重要战略意义的科学问题。

(2) 资料同化

一个成熟的同化方法,如果同化最有效的观测,即同化有助于最大程度提高预报水平的观测(如目标观测),我们就可以得到一个最优初始场,从而最大程度地提高数值模式的预报水平。Bauer等^[57]认为“数值天气预报在过去30年发生了一场静悄悄的“革命”,其预报水平提高了近30%,南半球提高幅度尤其明显”,而主要原因之一即是由于20世纪90年代末变分资料同化和卫星资料的有效使用。可见,资料同化在现代数值预报中发挥了关键的作用。然而,经典的资料同化用于改进初始场精度,不考虑模式误差的影响。如上所述,实时预报中模式误差不可避免的存在,那么如何在资料同化

中同时考虑初始误差和模式误差,是目前限制资料同化有效性的瓶颈问题。NFSV方法的提出为人们提供了一个通过模式倾向误差刻画不同来源模式误差综合影响的新思路,那么是否可以利用该思路,用资料同化的办法减小模式误差综合影响呢?Tao等^[58]基于NFSV提出了减小模式误差的资料同化新思路,即NFSV-资料同化方法。该方法不仅可有效抵消模式误差影响,而且对由初始误差引起的预报误差也有较大的抑制作用。然而,该方法尚处于理论探索阶段,未来还需大量理论和应用的研究来突破该方法目前计算效率不高以及在基于复杂模式的实时预报中时效性弱的困难,从而将其更有效地应用于数值模式的高质量实时预报。事实上,复杂网络和机器学习等新兴学科的兴起,为从理论上优化该同化方法,实践中提高该同化方法的计算效率和质量提供了可尝试的新途径。所以,希望未来的工作能够在气象学家、数学家以及人工智能领域学者的深入合作下,发展一个适用于同时考虑初始误差和模式误差影响且可应用于实时预报的先进资料同化方法。综上,非线性最优扰动理论和方法已应用于热带气旋目标观测的外场试验,但尚存挑战性的问题,尤其是与之相关的数值模式不确定性的敏感性问题及其伴随的资料同化和集合预报问题,需要气象学家们付出更多努力,甚至需要与有关领域,如数学、计算机科学以及业务部门等的专家和学者合作共同探讨,希望随着人工智能、复杂网络等新兴科学和先进计算机技术的发展,上述问题能够在各领域学者交叉合作的基础上得到解决,并成功应用于热带气旋等高影响天气和气候事件的目标观测和预报研究中,有效提高实时预报的水平。

参考文献(References):

- [1] ZHANG Q, WU L, LIU Q. Tropical cyclone damages in China 1983-2006 [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, 90: 489-495.
- [2] BURPEE R W, FRANKLIN J L, LORD S J, *et al.* The impact of Omega dropwindsondes on operational hurricane track forecast models [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77: 925-933.
- [3] WU C C, LIN P H, ABERSON S D, *et al.* Dropwindsonde Observations for Typhoon Surveillance near the Taiwan Region (DOTSTAR): an overview [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2005, 86: 787-790.
- [4] ABERSON S D. Ten years of hurricane synoptic surveillance (1997-2006) [J]. *Monthly Weather Review*, 2010, 138: 1 536-1 549.
- [5] BRAUN S A, NEWMAN P A, HEYMSFIELD G M. NASA's

- Hurricane and Severe Storm Sentinel (HS3) investigation[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2016, 97: 2 085-2 102.
- [6] BLACK P G, HARRISON L, BEAUBIEN M, *et al.* High Definition Sounding System (HDSS) for atmospheric profiling[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2017, 34: 777-796.
- [7] FENG J, WANG X G. Impact of assimilating upper-level dropsonde observations collected during the TCI field campaign on the prediction of intensity and structure of hurricane patricia (2015)[J]. *Monthly Weather Review*, 2019, 147: 3 069-3 088.
- [8] SNYDER C. Summary of an informal workshop on adaptive observations and FASTEX[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77: 953-961.
- [9] BUIZZA R, PALMER T N. The singular-vector structure of the atmospheric global circulation[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1995, 52: 1 434-1 456.
- [10] MAJUMDAR S J, BISHOP C H, BUIZZA R, *et al.* A comparison of ensemble-transform Kalman-filter targeting guidance with ECMWF and NRL total-energy singular-vector guidance[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological*, 2002, 128: 2 527-2 549.
- [11] WU C C, CHOU K H, LIN P H, *et al.* The impact of dropwindsonde data on typhoon track forecasts in DOTSTAR[J]. *Weather Forecasting*, 2007, 22: 1 157-1 176.
- [12] WEISSMANN M, HARNISCH F, WU C C, *et al.* The influence of assimilating dropsonde data on typhoon track and mid-latitude forecasts[J]. *Monthly Weather Review*, 2011, 139: 908-920.
- [13] MU M, ZHOU F F, WANG H L. A method for identifying the sensitive areas in targeted observations for tropical cyclone prediction: conditional nonlinear optimal perturbation[J]. *Monthly Weather Review*, 2009, 137: 1 623-1 639.
- [14] MU M, DUAN W S, WNAG B. Conditional nonlinear optimal perturbation and its applications[J]. *Nonlinear Processes Geophysics*, 2003, 10: 493-501.
- [15] QIN X H, MU M. Influence of conditional nonlinear optimal perturbations sensitivity on typhoon track forecasts[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological*, 2011, 138: 185-197.
- [16] CHEN B Y, MU M, QIN X H. The impact of assimilating dropwindsonde data deployed at different sites on typhoon track forecasts[J]. *Monthly Weather Review*, 2013, 141: 2 669-2 682.
- [17] QIN X H, DUAN W S, CHAN P W, *et al.* Effects of dropsonde data in field campaigns on forecasts of tropical cyclones over the western North Pacific in 2020 and role of CNOP sensitivity[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2022, in revision.
- [18] DEMARIA M, SAMPSON C R, KNAFF J A, *et al.* Is tropical cyclone intensity guidance improving? [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2014, 95: 387-398.
- [19] EMANUEL K, ZHANG F Q. On the predictability and error sources of tropical cyclone intensity forecasts[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2016, 73: 3 739-3 747.
- [20] EMANUEL K, ZHANG F Q. The role of inner-core moisture in tropical cyclone predictability and practical forecast skill[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2017, 74: 2 315-2 324.
- [21] GENTRY M S, LACKMANN G M. Sensitivity of simulated tropical cyclone structure and intensity to horizontal resolution[J]. *Monthly Weather Review*, 2010, 138: 688-704.
- [22] GREEN B W, ZHANG F Q. Impacts of air-sea flux parameterizations on the intensity and structure of tropical cyclones[J]. *Monthly Weather Review*, 2013, 141: 2 303-2 324.
- [23] TORN R D. Evaluation of atmosphere and ocean initial condition uncertainty and stochastic exchange coefficients on ensemble tropical cyclone intensity forecasts[J]. *Monthly Weather Review*, 2016, 144: 3 487-3 506.
- [24] LEUTBECHER M, LOCK S J, OLLINAHO P, *et al.* Stochastic representations of model uncertainties at ECMWF: state of the art and future vision[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological*, 2017, 143: 2 315-2 339.
- [25] DUAN W S, ZHOU F F. Nonlinear forcing singular vector of a two-dimensional quasi-geostrophic model[J]. *Tellus A*, 2013, 65: 18452.
- [26] BUIZZA R, MILLEER M, PALMER T N. Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF ensemble prediction system[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological*, 1999, 125: 2 887-2 908.
- [27] BERNER J, SHUTTS G J, LEUTBECHER M, *et al.* A spectral stochastic kinetic energy backscatter scheme and its impact on flow-dependent predictability in the ECMWF ensemble prediction system[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2009, 66: 603-626.
- [28] BARKMEIJER J, IVERSEN T, PALMER T N. Forcing singular vectors and other sensitive model structures[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological*, 2003, 129: 2 401-2 423.
- [29] DUAN W S, ZHAO P. Revealing the most disturbing tendency error of Zebiak-Cane model associated with El Niño predictions by nonlinear forcing singular vector approach[J]. *Climate Dynamics*, 2015, 44(9): 2 351-2 367.
- [30] QIN X H, DUAN W S, 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.
- [31] YAO J W, DUAN W S, QIN X H. Which features of the SST forcing error most likely disturb the simulation of tropical cyclone intensity?[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2021, 38(4): 581-602.
- [32] DUAN W S, LI X Q, TIAN B. Towards optimal observational array for dealing with challenges of El Niño-Southern Oscillation predictions due to diversities of El Niño[J]. *Climate Dynamics*, 2018. DOI:10.1007/s00382-018-4082-x.
- [33] GRAY W M. Tropical cyclone genesis and intensification[M]// Bengtsson L, Lighthill J. Intense atmospheric vortices. Springer-Verlag, 1982:3-20.
- [34] SCHADE L R, EMANUEL K. The ocean's effect on the intensity of tropical cyclones: results from a simple coupled atmosphere-ocean model[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*,

- 1999, 56: 642-651.
- [35] HONG X, CHANG S W, RAMAN S, *et al.* The interaction between Hurricane Opal (1995) and a warm core ring in the Gulf of Mexico[J]. *Monthly Weather Review*, 2000, 128: 1 347-1 365.
- [36] SCHADE L R. Tropical cyclone intensity and sea surface temperature[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2000, 57: 3 122-3 130.
- [37] KILIC C, RAIBLE C C. Investigating the sensitivity of hurricane intensity and trajectory to sea surface temperatures using the regional model WRF [J]. *Meteorologische Zeitschrift*, 2014, 22: 685-698.
- [38] MA Z H, FEI J F, LIU L, *et al.* An investigation of the influences of mesoscale ocean eddies on tropical cyclone intensities [J]. *Monthly Weather Review*, 2017, 145: 1 181-1 201.
- [39] YAO Jiawei, DUAN Wansuo. Target observation of sea surface temperature for tropical cyclone intensity simulation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2022, 46(1): 1-16. [姚佳伟, 段晚锁. 台风强度模拟的海温目标观测研究[J]. 大气科学, 2022, 46(1): 1-16.]
- [40] SMITH R K, MONTGOMERY M T, VAN SANG N. Tropical cyclone spin-up revisited [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological*, 2009, 135: 1 321-1 335.
- [41] HUANG Y H, MONTGOMERY M T, WU C C. Concentric eyewall formation in typhoon Sinlaku (2008). Part II: axisymmetric dynamical processes[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2012, 69: 662-674.
- [42] SCHMIDT C J, SMITH R K. Tropical cyclone evolution in a minimal axisymmetric model revisited[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological*, 2016, 142: 1 505-1 516.
- [43] MONTGOMERY M T, SMITH R K. Recent developments in the fluid dynamics of tropical cyclones [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2017, 49: 541-574.
- [44] HENG J, WANG Y, ZHOU W. Revisiting the balanced and unbalanced aspects of tropical intensification [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2017, 74: 2 575-2 791.
- [45] LI Y L, WANG Y Q, LIN Y L. How much does the upward advection of the supergradient component of boundary layer wind contribute to tropical cyclone intensification and maximum intensity? [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2020, 77: 2 649-2 664.
- [46] FEI R, WANG Y Q, LI Y L. Contribution of vertical advection to supergradient wind in tropical cyclone boundary layer: a numerical study [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2021, 78: 1 057-1 073.
- [47] ZHANG J A, ROGERS R F. Effects of parameterized boundary layer structure on hurricane rapid intensification in shear [J]. *Monthly Weather Review*, 2019, 147: 853-870.
- [48] CHEN X M, XUE M, ZHOU B W, *et al.* Effects of scale-aware planetary boundary layer schemes on tropical cyclone intensification and structural changes in the gray zone [J]. *Monthly Weather Review*, 2021, 149: 2 079-2 095.
- [49] QIN X H, DUAN W S. Forecast uncertainty of rapid intensification of typhoon dujuan (201521) induced by uncertainty in the boundary layer [J]. *Atmosphere*, 2020, 11(1 263): 1-17.
- [50] HONG SY, NOH Y, DUDHIA J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes [J]. *Monthly Weather Review*, 2006, 134: 2 318-2 341.
- [51] LANGLAND R H, TOTH Z, RELARO R, *et al.* The North Pacific Experiment (NORPEX-98): targeted observations for improved North American weather forecasts [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1999, 80: 1 363-1 384.
- [52] MU M. Methods, current status, and prospect of targeted observation [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2013, 56(12): 1 997-2 005.
- [53] DUAN W S, HUO Z H. An approach to generating mutually independent initial perturbations for ensemble forecasts: orthogonal conditional nonlinear optimal perturbations [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2016, 73(3): 997-1 014.
- [54] HUO Z H, DUAN W S. The application of the orthogonal conditional nonlinear optimal perturbations method to typhoon track ensemble forecasts [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2018. DOI:10.1007/s11430-018-9248-9.
- [55] HUO Z H, DUAN W S, ZHOU F F. Ensemble forecasts of tropical cyclone track with orthogonal conditional nonlinear optimal perturbations [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2019, 36(2): 231-247.
- [56] WANG Ye, DUAN Wansuo. Influences of initial perturbation amplitudes and ensemble sizes on the ensemble forecasts made by CNOPs method [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2019, 43(4): 919-933. [汪叶, 段晚锁. 初始扰动振幅和集合样本数对CNOPs集合预报的影响[J]. 大气科学, 2019, 43(4): 919-933.]
- [57] BAUER P, THORPE A, BRUNET G. The quiet revolution of numerical weather prediction [J]. *Nature*, 2015, 525: 47-55.
- [58] TAO L J, DUAN W S. Using a nonlinear forcing singular vector approach to reduce model error effects in ENSO forecasting [J]. *Weather and Forecasting*, 2019, 34: 1 321-1 342.

Application of Nonlinear Optimal Perturbation Methods in the Targeting Observations and Field Campaigns of Tropical Cyclones^{*}

DUAN Wansuo^{1,2}, QIN Xiaohao^{1*}

(1.State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2.College of Marine Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China)

Abstract: The authors review the major progresses in the targeting observations and field campaigns for Tropical Cyclones (TCs) using their proposed nonlinear optimal perturbation methods. They used condition nonlinear optimal perturbation, which aims at reducing the initial errors for numerical models, to identify the sensitive regions for TC track and intensity forecasts. This guides both FY-4 satellite and dropsonde in the field campaigns to effectively collect valuable observation data. Furthermore, they investigated the sensitivity of TC intensity forecast to model errors using nonlinear forcing singular vector, which indicates both the sensitive regions and variables in troposphere and the sensitive regions of sea surface temperature. Simultaneously, they also identified the sensitive regions and variables in the boundary layer during a rapid intensification process of a TC using ensemble perturbation method. In final the unresolved problems, possible solutions, and future recommendations in the targeting observations for TCs are discussed.

Key words: Tropical cyclones; Targeting observations; Nonlinear optimal perturbation; Ensemble forecast; Data assimilation.

^{*} **Foundation item:** Project supported by the National Key Research and Development Program "Targeting observation research on typhoons" (Grant No.2018YFC1506402); The National Natural Science Foundation of China "The nonlinear forcing singular vector-ensemble forecast method and its application in the predictability study in El Niño and tropical cyclone" (Grant No.41930971).

First author: DUAN Wansuo (1973-), Yangcheng County, Shanxi Province, Professor. Research areas include air-sea interaction, as well as the predictability, targeting observation, data assimilation and ensemble forecasts of high-impact weather and climate events.

E-mail: duanws@lasg.iap.ac.cn

^{*} **Corresponding author:** QIN Xiaohao (1983-), female, Xiangtan City, Hunan Province, Associate professor. Research areas include the predictability, targeting observation, data assimilation, and ensemble forecasts of tropical cyclones. **E-mail:** xhqin@lasg.iap.ac.cn