中国科学: 地球科学 2013 年 第 43 卷 第 11 期: 1717 ~ 1725
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

自然科学基金项目进展专栏

评 述

目标观测的方法、现状与发展展望

穆穆*

中国科学院海洋研究所海洋环流与波动重点实验室, 青岛 266071
* E-mail: mumu@qdio.ac.cn

收稿日期: 2013-02-05; 接受日期: 2013-09-04; 网络版发表日期: 2013-10-30
国家自然科学基金重点项目(批准号: 41230420)和国家重点基础研究发展计划(编号: 2012CB417404)资助

摘要 对所关注的自然界现象进行观测的策略方法, 在地球科学中(主要与天气与气候预报、预测有关)被称为目标观测. 本文首先回顾它的发展历史, 然后介绍目前国际上目标观测所采用的主要方法; 在对它们的优点与局限性进行评述的基础上, 探讨了目标观测的理论基础. 在介绍了国内外大气与海洋科学研究与应用中目标观测的现状后, 着重讨论了其方法与效果的评价和检验问题. 最后, 给出了作者关于该领域进一步发展的展望, 以及如何将目标观测方法拓展到处理数值模式误差方面的若干思考.

关键词
目标观测
大气
海洋
可预报性

科学研究(既包括自然科学, 也包括社会科学)离不开观测. 首先, 观测是发现事实的一种重要手段. 其次, 要理解事物演变的规律与机制, 也离不开观测. 衡量一门科学是否成熟的标志之一, 是能否根据它的理论与知识对将来要发生的现象做出有价值的预报或预测. 目前, 大气与海洋科学的发展水平, 使得科技人员可以对将来发生的一些天气与气候事件, 做出有用的预报(预测). 这时, 观测又承担起了提供初始条件与边界条件的任务.

目标观测, 又称为适应性观测, 是 20 世纪 90 年代后期发展起来的观测策略方法. 为了使将来时刻(验证时刻 t_1)我们所关注的区域(验证区)内的预报更加准确, 要在将来时刻(目标时刻 t_2, $t_2<t_1$)对验证区域预报影响较大的区域(敏感区)进行额外的观测(Snyder, 1996), 获得更多的观测资料. 这些额外的观测资料经过资料同化系统处理后, 为模式提供更接近真实状况的初始场, 以期得到更加准确的预报.

目标观测的思想最早可追溯到 20 世纪 50 年代. 在数值天气预报发展的初期, 气象学家们就注意到某一区域数值预报的技巧受限于前期某一局部区域的初值条件(Riehl 等, 1956). 但当时确定增加观测的区域时, 往往是根据经验进行主观的判断. 到了 20 世纪 90 年代中期, “目标观测”的概念被正式提出, 而在确定增加观测区域(敏感区)方面, 也随之发展出科学的方法.

现在科学界所指的目标观测, 与传统的根据经验确定敏感区的做法不同. 前者利用数值模式, 通过考察何种初始误差会对预报产生较大影响, 确定敏感区. 这种方法的优越性是显而易见的: 经验总是具有局限性的, 往往只能考虑较少因素的作用. 天气与气候事件一般是多尺度多因子相互作用(特别是一些非线性过程)的产物. 一个比较完善的数值模式, 由于较好地考虑了动力与物理机制, 考虑了多种因子的综合作用, 因而可以较好地描述天气与气候事件的发生与演变, 帮助我们确定比经验方法更好的敏感区. 由此也可看出, 目标观测是数值天气预报与气

中文引用格式: 穆穆. 目标观测的方法、现状与发展展望. 中国科学: 地球科学, 2013, 43: 1717–1725
英文引用格式: Mu M. Methods, current status, and prospect of targeted observation. Science China: Earth Sciences, 2013, doi: 10.1007/s11430-013-4727-x

候预测发展到一定程度的产物, 只有当模式相对比较成熟时, 才可以使用. 如果模式误差太大, 是不能用该方法来确定敏感区的. 当然, 是否可以把目标观测的思想加以发展, 使其可以用于减小模式误差, 本文将在 5.3 小结中讨论这一问题.

目标观测自从被提出以来, 已经在一系列的外场试验中得到实施, 如锋面和大西洋风暴追踪试验(FASTEX, Snyder, 1996), 北太平洋试验(NORPEX, Langland 等, 1999), 冬季风暴观测试验(WSR, Szunyogh 等, 2000), 热带气旋监测计划(DOTSTAR, Wu 等, 2005), 全球观测系统研究与可预报性试验(THORPEX, Rabier 等, 2008), THORPEX 亚太地区试验(T-PARC, Aberson, 2011)等等. 这些外场试验的结果表明目标观测在一定程度上有效地提高了数值天气预报技巧, 如在西北太平洋进行的 DOTSTAR 外场试验中 2003~2009 年的统计结果表明, 约有 60%的热带气旋个例 1~5 天的路径预报误差减小了 10%~20%, 且通过了 90%的显著性检验(Chou 等, 2011). 但是, 目标观测对热带气旋预报技巧的影响并不是一致的. 根据 Langland 等(1999), 在大西洋和太平洋的外场试验中, 有 20%~30%的个例的预报技巧在目标观测后没有明显改善, 有些个例预报技巧甚至下降. 为什么会出现这些情况, 我们在第 4 节中会深入探讨.

1 目标观测的方法

目标观测的关键在于识别敏感区. 在目标观测发展初期, 识别敏感区的方法主要有繁殖模方法(Lorenz 和 Emanuel, 1998), 准反演线性方法(Pu 等, 1997), 线性奇异向量方法(LSV, Palmer 等, 1998)和敏感性向量方法(Langland 和 Rohaly, 1996). 随后, 基于集合的方法也被用于敏感区的识别, 这方面主要发展出集合转换方法(Bishop 和 Toth, 1999), 集合卡曼滤波方法(Hamill 和 Snyder, 2002)和集合转换卡曼滤波方法(ETKF, Bishop 等, 2001)等. 上述各种方法识别的敏感区有时存在较大的差异. 评判目标观测方法的优缺点是一件非常复杂的事情, 我们将在第 4 节中讨论这一问题.

1.1 线性奇异向量方法

Palmer 等(1998)详细阐述了 LSV 方法在目标观测研究中的应用. 简单地说, 该方法假定初始误差比较小, 在所考察的时间段内, 它的发展可以用预报模式的线性近似(切线性模式)加以描述. 线性奇异向量方法通过寻找线性快速增长的误差模态, 消除初始误差在该快速增长模态上的投影, 进而提高预报技巧. 快速增长的误差模态的大值区称为敏感区. 在目标观测发展初期, 主要是运用第一线性奇异向量识别敏感区, 后来, 前几个线性奇异向量也一起被用于识别敏感区, 具体可参见(Buizza 等, 2007).

1.2 条件非线性最优扰动(CNOP)方法

LSV 应用的前提是线性模式能够近似描述初始误差的发展, 也就是说, LSV 只能刻划非线性模式中充分小的初始误差的短期发展, 而不能研究有限振幅初始误差的发展, 不能揭示非线性对初始误差增长的影响. 因而, LSV 不能代表非线性模式中的增长最快的有限振幅初始误差(Mu 等, 2003).

为了克服 LSV 不能处理非线性过程的局限性, 穆穆等(2007)首次将 CNOP 方法引入到目标观测的研究中. 简单地说, CNOP 是 LSV 在非线性领域的一个拓展. CNOP 可以表征非线性空间中最快增长的初始误差, 通过消除这种最快增长的初始误差, 从而提高预报技巧.

1.3 集合方法

在确定目标观测敏感区的集合类方法中, ETKF 是较为常用的一种. ETKF 利用资料同化(Bishop 等, 2001)系统, 预估实施某一目标观测方案后, 验证区域内预报误差方差(信号方差)的减小程度, 进而确定敏感区. ETKF 操作程序是: 首先, 计算同化常规观测资料后的分析误差协方差矩阵; 然后在此基础上计算同化不同目标观测资料后的分析误差协方差矩阵. 信号方差即为上述两矩阵对角元素和之差. 信号方差越大, 表明该目标观测方案可能减小的预报误差方差越多. 根据信号方差的大小, 就能判断哪一种具体的目标观测方案有可能最大限度的减小预报误差方差, 并可据此确定敏感区. 目前, 该方法主要应用于迈阿密大学(Majumdar 等, 2006), 英国气象局(UKMO, Bowler 等, 2008)和法国气象局(Meteo-France); 在 UKMO 和美国国家环境预报中心(NCEP)联合进行的 WSR 试验中, 也作为方法之一用于确定敏感区(Szunyogh 等, 2002; Majumdar 等, 2002).

相对于 LSV 方法而言, ETKF 方法基于集合技术,

不依赖伴随系统, 在成熟的系统中, 花费计算机资源较少. 然而 Bishop 等(1999)也指出, ETKF 方法的应用要受到下面的限制: 分析误差协方差矩阵足够精确, 以提供恰当的背景误差场; 集合扰动的样本必须足够丰富; 初始扰动足够小以至于可以采用线性近似.

2 目标观测的理论基础

在目标观测的研究与具体应用中, 隐含着一个朴素的假定: 在自然界, 空间分布上呈现随机状态的误差, 一般地要比呈现某种特定空间结构的误差, 发展的要慢. 更准确地说, 对于特定的每一个天气或气候事件, 存在某种特定空间结构的误差, 在某个特定的空间区域, 由于动力与物理机制的作用, 它的发展要比其他类型误差(特别是随机误差)发展的要快. 如果不是这样, 则不会有敏感区的概念, 更不会有目标观测.

在目标观测的研究中, 笔者没有见到直接验证该假定成立的研究. 也许, 业务上实施的目标观测确实提高了预报技巧是一种间接的验证. 但是, 从严谨的科学研究的角度, 事先开展该类研究是必须的. 笔者的研究组, 分别对台风(Chen 和 Mu, 2012)与 ENSO(Yu 等, 2012)事件, 使用 MM5 与 Z-C 模式, 证实了该假定是成立的.

3 目标观测现状

3.1 大气目标观测现状

进入 21 世纪以来, 关于目标观测的外场试验及后续研究在全球范围内深入进行. 其中有两件大事应该提及.

在 THORPEX, T-PARC, 热带气旋结构试验-2008(TCS08)和 DOTSTAR 的联合支持下, 2008 年 8 月 27 日至 10 月 2 日期间, 4 架飞机同时在西北太平洋上空投放探空仪, 对热带气旋进行目标观测, 以期加深对热带气旋动力结构的了解及提高该区域热带气旋的预报技巧(Weissmann 等, 2010). 选择探空仪是因为海洋上缺乏观测资料, 而强对流热带气旋系统衍生的深厚积云使得卫星资料准确性大大下降. 其中 3 架飞机在 150, 300 和 400 hPa 高度上每隔 150~200 km 投放一个探空仪, 还有一架飞机关注热带气旋周围的环境场以及各种目标观测方法确定的敏感区, 在这些区域获得额外的观测数据. 在将近一个半月的时间里, 四架飞机累积飞行时间超过 500 h, 共获得超过 1500 个观测资料.

整体而言, 同化上述目标观测资料使得西太平洋的热带气旋路径预报误差减小了 4%~23%, 大于在大西洋进行类似试验的效果. 相对于欧洲中期天气预报中心(ECMWF)及日本气象厅的全球模式, NCEP 的全球模式及韩国的天气研究预报区域模式的效果更好一些(Aberson, 2011; Aberson 等, 2011; Chou 等, 2011; Kim 等, 2011).

从 2008 年 2 月 4 日至 12 月 19 日, 在 ECMWF, 针对高影响天气(如: 温带气旋、冬季风暴)的短期预报(1~3 天)进行了目标观测的业务化试验(Prates 等, 2009). 当一个天气事件即将威胁欧洲大部分范围或某个成员国时, 各业务部门将首先商讨是否对这个天气事件进行目标观测, 如果所有成员国业务部门关于同一天气事件的预报差别很大, 说明该事件对模式与资料的依赖性很强, 敏感性很高, 就需要进一步考虑是否开展目标观测. 一旦确定开展目标观测, ECMWF, UKMO 和 Meteo-France 将针对该次天气事件, 分别用不同的方法确定目标观测的敏感区. 由于上述三个中心所用模式、资料和方法的不同, 对于同一个事件确定的目标观测敏感区, 在位置上可能存在一些差异. 这时, ECMWF 会综合考虑天气背景和各敏感区的差异, 确定最终的目标观测实施范围和实施方案, 并进行最终操作. 在将近一年的时间里, ECMWF 共对 548 个高影响天气事件进行了目标观测, 使用了 1228 个地面观测站和 123 个探空仪. 但是截至目前为止, 笔者尚未见到这一试验效果的公开报道.

在亚洲地区, 日本、韩国和中国台湾地区较早的加入了 THORPEX 计划并参与了目标观测的外场试验. 我国于 2005 年成为 THORPEX 计划成员, 且在 2008 年夏秋季针对暴雨进行了外场试验(Zhang 等, 2011). 此外, 中日合作青藏高原大气观测试验——JICA/Tibet 项目也于 2010 年开展. 同化该次野外试验的加密观测资料, 结果表明可以有效提高中国东部地区灾害天气的数值预报效果, 说明高原是其下游的中国东部地区灾害天气发生的一个重要敏感区(Zhang 等, 2012).

另一方面, 我国气象学者也开展了关于目标观测的理论与方法的研究. Chen 等(2012)利用 MM5 模式和 WRF 模式, 以台风 Longwang(2005)和 Sinlaku

(2008)为例, 研究了不同方法确定的敏感区和不同类型初始误差对台风预报的影响以及敏感区对模式的依赖性. 结果表明, 敏感区内随机初始误差的发展一般要大于其他随机选择的区域内误差的发展; 而在所有选择的区域中, CNOP 所识别的敏感区内的随机误差的发展是最大的; 在同一个区域中, 具有特定空间结构的初始误差(如 CNOP 和第一线性奇异向量类型的初始误差)的发展一般要大于随机误差的发展. 综合比较发现 CNOP 所识别的敏感区内 CNOP 类型初始误差对预报结果不确定性的影响最大. 将 MM5 模式计算得到的台风预报的敏感区应用于 WRF 模式, 结果发现由 MM5 模式确定的敏感区在 WRF 模式中也能有效地减小预报误差.

另外, Chen(2011)通过观测系统试验(OSEs), 在 CNOP 敏感区内同化目标观测资料, 计算各气象要素及总扰动能量(TPE)的均方根误差(RMSE), 与未同化目标观测资料在验证时刻的预报作比较. 结果发现在 CNOP 敏感区进行目标观测后 TPE 的 RMSE 减小幅度要明显大于在随机区域的情况. 这说明在 CNOP 确定的敏感区内进行目标观测, 确实能够有效减小台风预报误差. 综上, CNOP 方法比线性奇异向量方法更能抓住台风预报中初始误差的敏感区域, 具有相对较弱的模式依赖性, OSEs 试验进一步验证了 CNOP 确定的敏感区在改进台风预报技巧中的有效性.

Qin 等(2011)利用 MM5 模式, 将 CNOP 方法应用于 2009 年西太平洋 7 个台风个例路径预报的研究. 选择占全场不到 1%的格点作为探空仪投放点. 将同化了模拟观测资料后的初始场作为进行了目标观测后改善的初始场, 进行每 6 h 一次的路径预报, 总共预报时长为 72 h. 结果表明: 7 个台风个例中有 6 个个例的路径预报得到了改善. 在 CNOP 敏感区内进行目标观测, 路径预报改善程度为 13%~46%, 路径预报误差平均减少 50 km 左右; 在 SV 敏感区内进行目标观测, 改善程度为 14%~25%; 上述改善不仅出现在优化时间段内(24~48 h), 甚至延续到 72 h. 这说明 CNOP 方法可以有效地改进台风路径的预报技巧.

3.2 海洋目标观测研究现状

相对于大气的观测, 海洋观测所面临的困难更大, 成本更高. 近年来关于海洋目标观测问题的研究, 开始受到一些科学家的关注. 其研究工作主要包括两个方面: 一方面, 一些学者试图通过目标观测获得更好的海洋状态估计, 进而提高对海洋中某些现象的认识和理解. 如 Köhl 等(2004)针对跨 Greenland-Scotland 脊的热输送, 利用伴随梯度方法进行目标观测设计, 发现目标观测比传统观测(根据经验选取观测区域)更能有效地估计跨脊热输送; Köhl(2005)利用相同的方法设计目标观测, 更好地估计了大西洋经向翻转环流(MOC)的状态, 加深了对 MOC 变异机制的理解; Baehr 等(2008)用进化算法识别目标观测区域, 在此区域进行观测, 改进了海洋状态估计, 进而考察了 MOC 的变异机制.

另一方面, 对一些海洋环流问题, 研究者们考察在预报敏感的区域(即目标观测区域)内增加观测是否能改进预报效果. Morss 等(2004)通过观测系统模拟试验(OSSE), 指出赤道东太平洋的观测资料对提前几个月预报 ENSO 具有十分重要的作用; Kramer 等(2012)利用粒子滤波(particle filtering)方法识别了黑潮延伸体变异的目标观测区域, 揭示了这些区域的观测资料对黑潮延伸体变异预报有重要影响. Yu 等(2012)应用 CNOP 方法考察了 ENSO 预测的敏感区问题, 发现初始误差的位置与空间结构对其预测的不确定性有重要影响. Mu 等(2013)发现 ENSO 事件的最优前期征兆(OPRs)与 ENSO 预报中增长最快的初始误差(OGEs)的空间结构相似性很高, 这说明在由它们的空间结构确定的敏感区内进行目标观测, 不仅可以更好地捕获 ENSO 事件的早期信号, 还可以减小初始误差, 进而减小预报误差. Wang 等(2013)利用条件非线性最优扰动方法, 研究了日本南部黑潮路径变异的目标观测敏感区确定问题, 结果表明初始误差的位置和空间结构对黑潮路径变异预报有重要影响, 这为进一步通过目标观测提高黑潮路径变异预报技巧打下了基础. 上述研究说明, 通过目标观测能够深化对海洋中某些现象的理解, 提高海洋环流变异的预报技巧, 因此进行海洋目标观测问题研究十分必要.

4 目标观测方法与效果的评价与检验问题

迄今为止, 没有任何一种目标观测方法能够保证每一次目标观测都一定能够提高预报技巧. 前面已经提及, Langland 等(1999)曾指出在大西洋和太平洋的外场试验中, 经过目标观测后, 有 20%~30%个例的预报技巧并没有明显提高, 甚至出现预报技巧

下降的个例. 这里原因是多方面的. 首先, 模式总是有误差的, 这种误差有时会导致敏感区确定出现偏差. 其次, 资料同化系统的不完善, 也会使得不能有效地使用目标观测资料. 还有, 任何时候, 我们只能知道观测资料的统计信息, 而不能确切知道误差. 不论是哪一种目标观测方法, 只能从统计的角度使用这种统计信息. 以 CNOP 方法为例, 它只是给出了在一定约束条件下(该条件是误差的统计信息的一种表征), 导致预报(模拟)效果最差的误差空间结构. 但是对于该天气(或气候)事件, 从已有的观测得到的初始场是否具有 CNOP 型的误差, 则是不得而知的. 由此可知, 通过由 CNOP 方法提供的目标观测, 我们可以使得出现预报结果特别糟糕的概率显著降低, 但是不能保证每一次都提高预报技巧. 再分析一下 ETKF 方法, 它只是给出了预报误差方差的估计, 方差不是误差, 估计也不是精确给出, 因而也同样不能保证每一次都提高预报技巧.

上述分析说明, 评价目标观测方法的效果只能用“统计”的方法, 而不能简单地用少数个例论事. 目前用于评价目标观测方法效果的方法主要有两种: OSSE 和外场试验. 所谓 OSSE 试验大体是如下进行的: 对于某一天气或气候事件, 用模式进行数值模拟, 产生表征该事件的“真值”. 然后, 在同一预报时段内, 使用同一模式, 分别进行两个预报, 一个预报是控制试验, 使用的初始场是由初始的“真值”叠加上某种误差得到. 另一个预报使用的初始场是这样产生的: 由初始的“真值”, 产生“模拟观测资料”, 然后将其同化到控制试验使用的初始场上. 将这两次的预报与“真值”进行比较, 得到预报误差, 则可通过评价这两个预报误差的情况, 评价所使用的目标观测方法的效果.

OSSE 试验将目标观测方法, 特别是敏感区的确定问题独立出来, 没有考虑诸如模式误差对试验效果的影响, 使得试验结果能够直接反映目标观测方法特别是敏感区的作用. 不难看出, OSSE 试验的结果与考虑了其他影响因子的实际情况存在一些出入.

外场试验利用真实的目标观测资料(可由下投式探空仪、船只和卫星等获得), 将其放入业务预报模式中进行同化, 与未使用目标观测资料的预报结果相比较, 从而评价目标观测效果. 这样的做法, 简单明了, 在这过程中不可避免的融入了模式误差、观测误差等一系列的不确定因素, 但其也最大程度地反映了实际情况.

但正是由于这些实际观测数据的误差, 使得我们无法客观地评价目标观测敏感区的有效性. 以最常用的下投探空仪为例, 在探空仪脱离机体的下坠过程中, 无疑要受到气旋周围风区的影响, 从而偏离预先设计的投放点, 当气旋越强、风速越大时, 探空仪偏离的位置就可能越远, 这种观测位置的差异, 将会使得同化后在初始场产生异常的梯度, 造成预报的不准确. 在这样的情况下去衡量敏感区的有效性, 无法反映敏感区的真实效果, 因为真正导致预报出现偏差的是观测误差, 而不是敏感区定得不准.

由此可见, 目标观测是一个相当复杂且精细的工程. 各种目标观测方法确定的敏感区的优劣最终还是要放到实践中去检验; 但是在科学研究中, 为了客观地评价一种方法(敏感区的确定)的好坏, 通常需要假定其他所有条件都不变, 因而 OSSE 试验是不可或缺的. 总之, 不论是外场试验还是 OSSE 试验, 需要根据不同的目的, 合理地使用. 一般地, 对于一种新的目标观测方法, 应该首先进行 OSSE 试验, 确认其有效性后, 方可以开展外场试验, 进一步检验其效果.

5 目标观测的展望与思考

5.1 气象预报中目标观测业务化面临的问题

迄今为止, 只有中国台湾地区近十年来在台风频繁发生期, 开展了目标观测, 并且有效的将资料用于适时的台风业务预报. 如果将目标观测的业务化定义为业务部门时刻准备着, 根据每天的天气及其预报情况, 判断是否开展目标观测, 国际上还没有气象业务部门实现真正的目标观测业务化. 这里原因是多方面的.

首先, 目标观测方法的研究方面, 需要有新的突破. 在上文中指出, 现有的目标观测方法各有优缺点. ETKF 利用了背景误差的协方差信息, 但是其预报误差是在线性近似的假设下得到的. Wang 等(2011)在 CNOP 的计算中, 考虑了背景误差的协方差信息, 初步尝试利用这一信息. 如何把 CNOP 与 ETKF 两种方法的优点有效结合, 形成更为合理的目标观测方法, 是值得进一步深入研究的问题.

其次, 在目标观测方法的业务化方面, 时效问题也是要关注的. 以 CNOP 为例, 由于要求解相应的大规模非线性最优化问题, 高速有效优化算法起

着关键作用. 现在求解 CNOP 时, 大多借助于模式的伴随模式. 但是, 开发一个复杂的数值模式的伴随模式是一项很大的工程. Wang 等(2010)用集合的方法, 致力于研发不需伴随的求解 CNOP 方法, 这是一个需要地球科学领域的科学家与计算数学家共同努力的方向. 还有, 高效的并行算法研究等, 也是非常重要的.

另一方面, 应该着力开展实施目标观测前提条件的研究. 如何根据当前的天气形势, 判断对有可能出现的高影响天气、气候事件是否实施目标观测, 是提高目标观测有效性的重要途径. 如前所述, 2008 年 ECMWF, UKMO 和 Meteo-France 开展的业务化试验, 决定是否实施目标观测, 在一定程度上, 还依赖于经验. Qin 等(2013)研究了如何根据现在的信息, 决定是否实施台风目标观测. 对于其他高影响天气、气候事件, 类似的研究也是不可或缺的.

依笔者所见, 中国台湾地区成功开展台风目标观测方面的经验, 值得有关科学家及气象业务部门借鉴. 选取在相关季节本地区有可能经常出现的高影响天气、气候事件, 进行有针对性的目标观测研究, 然后实施, 应该是一条事半功倍的途径.

5.2 海洋目标观测

相对于大气的目标观测, 海洋目标观测研究起步较晚, 也没有开展大规模的外场试验. 考虑到海洋观测的巨大成本, 笔者相信, 随着科学研究的发展, 特别是人类社会对高影响海-气环境事件(如 ENSO、印度洋偶极子(IOD)和台风与风暴潮等等)的预报的需求, 海洋的目标观测研究与试验, 将会受到更大的重视, 并迅速发展.

当前的海洋目标观测研究主要集中在目标观测敏感区的识别, 以及利用简单的 OSSEs 试验评估目标观测的影响, 没有涉及利用同化系统将目标观测资料同化进数值模式, 进而从实际应用的角度考察目标观测对海洋状态估计和预报的影响, 这是海洋目标观测在业务应用之前所必须研究的问题. 未来可能需要建立一个完整的目标观测-资料同化-数值模式相结合的系统, 利用该系统评估目标观测所带来的影响, 为其业务实施奠定基础.

5.3 目标观测在减小模式误差中的应用

目前, 目标观测是根据天气或气候事件, 在特定的区域进行强化观测, 目的是减少在特定区域初始条件的不确定性, 从而降低预报结果的不确定性和提高数值预报的技巧(Mu 等, 2009). 模式和初始条件的不确定性是导致预报结果不确定性的两个重要的因子, 所以天气和气候的可预报性问题分为两类: 一类是与初始条件不确定性有关的第一类可预报性问题, 另一类是与模式不确定性有关的第二类可预报性问题. 经典的目标观测方法是解决第一类可预报性问题. 在第二类可预报性问题中, 模式中参数的不确定性是模式误差的主要来源之一. 笔者认为, 可以将目标观测方法应用于第二类可预报性问题. 其主要思想是: 用适当的非线性最优化方法, 优化选取模式中敏感的和重要的部分参数, 对它们进行强化观测, 减小这些参数的不确定性, 进而降低预报结果的不确定性. 这是减小模式误差, 提高数值预报技巧的一个有效的途径. 下面对该思路作一简要介绍.

一般地, 数值模式中的参数大体可分为三类: 第一类与模式的数值格式设计等有关, 例如与计算稳定性相联系的, 这些参数是与观测无关的; 第二类是通过某种直接观测可以确定的参数; 第三类则由间接观测可以确定的参数. 例如, 在著名的陆面过程 Lund-Potsdam-Jena(LPJ)模式中, 随机数种子参数属于第一类. Co-limitation shape parameter θ 可以通过观测直接获得(Collatz 等, 1990), 而 τ (表征 Q10 对温度的敏感性)可以通过间接观测获得(Zaehle 等, 2005). 数值模式中这些可以通过直接观测或间接观测确定的参数是目标观测方法中所关注的参数.

在一些数值模式中, 通过直接观测或者间接观测确定的参数的数量往往是巨大的, 例如 LPJ 模型中包含约 500 个参数. 对于海陆气耦合模式, 参数的个数可能更多. 如果直接对所有这些参数进行强化观测, 减少模式中参数的不确定性, 这将付出昂贵的人力与物力代价. 如果有办法寻找到模式中若干敏感的和重要的参数, 仅对这些参数进行强化观测, 降低预报结果的不确定性和提高模式预报的技巧, 将会大大降低观测代价, 得到事半功倍的效果. 显然, 如果把参数作为“变量”, 在这些变量组成的相空间里, 寻找这些对模拟或预报不确定性影响大的参数, 与经典的在地理空间中寻找初始条件的敏感区, 是对应的.

虽然已有一些工作探讨了如何确定数值模式中

参数的敏感性和重要性, 但是据笔者所知, 还没有人系统地提出关于参数的目标观测思想. 特别是, 已有的这些工作, 很难直接应用于关于参数的目标观测. 例如, Knorr(2000)提出的单参数的敏感性试验方法, 在参数合理的误差范围内, 通过单独改变参数值, 考察输出变量的变化. 该方法不仅计算量大, 而且不能考虑参数之间的非线性相互作用. 已有研究利用基于概率的方法, 例如 White 等(2000)用 factorial designs 方法和 Zaehle 等(2005)用蒙特卡洛分层样本方法, 探讨了参数的敏感性和重要性. 尽管这一类方法可以考虑参数之间的非线性相互作用, 但是该类方法确定的参数不一定是最优的参数组合, 因而不能保证最大程度地降低预报结果的不确定性和提高模式预报的技巧.

Mu 等(2010)提出了与参数有关的条件非线性最优扰动(CNOP-P)方法, 该方法用非线性最优化方法, 寻找一类最优的参数误差组合. 这种误差组合在优化时刻对预报(模拟)结果影响最大. 如果能有效地消除(或破坏)这种最优的参数误差的模态, 将极大地改进预报(模拟)效果. 与处理初始条件的目标观测问题类似, 在参数空间构成的相空间里, 寻找其“敏感区”, 亦即利用 CNOP-P 方法确定敏感的和重要的参数(但不是全部的参数), 对这些参数进行强化观测, 可以以事倍功半的方式, 减少模式中参数误差, 为改进预报(模拟)结果和提高数值模式的预报技巧服务. 这是一个值得探索的课题, 也是笔者研究组正在开展的工作.

在大气与海洋科学的研究中, 一些数值模式需要边界条件, 如海洋模式中上边界需要风应力、热通量和淡水通量等. 这时, 除了模式中的参数误差外, 模式中边界条件的不确定性是产生模拟(预报)不确定性的另一重要来源. 如有研究表明, 在海洋环流模式中, 这些不确定性对海洋环流的模拟具有重要影响(Large 等, 1997; Kamenkovich 和 Sarachik, 2004), 进而影响海洋环流的状态估计和预报. 因此, 如何利用目标观测, 减小模式中边界条件的不确定性, 进而提高模拟和预报的准确性是一个值得研究的重要问题. 这也是一个具有挑战性的问题: 边界条件往往随时间变化, 与此相关联的非线性最优化问题, 不仅维数更高, 而且更加复杂. 现有的关于初始条件的目标观测方法, 是不能处理该类问题的. 因此, 需要有勇气、有创新力的科学家, 特别是不同领域的专家共同努力, 协同创新.

6 结语

天气与气候的数值预报、预测是一个系统工程, 不仅需要性能优越的数值模式, 也需要较好地描述当前大气、海洋与陆面等状态的初始场. 为了发挥目标观测的功效, 性能优越的数值模式与同化系统是必不可少的. 同样, 一个性能优越的目标观测策略, 也使得模式与同化系统能更好的发挥作用. 模式、同化系统与目标观测, 从科学研究的角度, 都是非常重要的, 没有孰轻孰重的问题. 对于气象业务工作而言, 则应该从系统工程的角度, 抓住主要矛盾. 例如, 如果由于模式误差的原因, 一个数值模式对局地强对流降水的模拟能力较差, 则不能期望用该模式实施目标观测通过改善初始条件来提高预报技巧. 还有, 如果同化系统不好, 不能有效利用大量的卫星资料, 则应大力发展同化系统. 但是, 这些也不应该成为忽视目标观测的理由. 笔者相信, 通过模式、同化系统与目标观测方面科研人员的共同努力, 在有关业务部门的统筹协调下, 天气与气候的数值预报、预测水平, 一定会有新的显著提高.

致谢 衷心感谢在写作过程中, 周菲凡、秦晓昊、孙国栋与王强博士给予的帮助与支持.

参考文献

穆穆, 王洪利, 周菲凡. 2007. 条件非线性最优扰动方法在适应性观测研究中的初步应用. 大气科学, 31: 1102–1112

Aberson S D, Majumdar S J, Reynolds C A, et al. 2011. An observing system experiment for tropical cyclone targeting techniques using the global forecast system. Mon Weather Rev, 139: 895–907

Aberson S D. 2011. The impact of dropwindsonde data from the THORPEX pacific area regional campaign and the NOAA hurricane field program on tropical cyclone forecasts in the global forecast system. Mon Weather Rev, 139: 2689–2703

Baehr J, McInerney D, Keller K, et al. 2008. Optimization of an observing system design for the North Atlantic Meridional overturning

circulation. J Atmos Ocean Technol, 25: 625–634

Bishop C H, Toth Z. 1999. Ensemble transformation and adaptive observations. J Atmos Sci, 56: 1748–1765

Bishop C H, Etherton B J, Majumdar S J. 2001. Adaptive sampling with the ensemble transform Kalman filter. Part I: Theoretical aspects. Mon Weather Rev, 129: 420–436

Bowler N E, Arribas E A, Mylne K R, et al. 2008. The MOGREPS short-range ensemble prediction system. Q J R Meteorol Soc, 134: 703–722

Buizza R, Cardinali C, Kelly G, et al. 2007. The value of targeted observations Part II: The value of observations taken in singular vectors-based target areas. Q J R Meteorol Soc, 133: 1817–1832

Chen B. 2011. Observation system experiments for typhoon Nida (2004) using the CNOP method and DOTSTAR data. Atmos Ocean Sci Lett, 4: 118–123

Chen B, Mu M. 2012. The roles of spatial locations and patterns of initial errors in the uncertainties of tropical cyclone forecasts. Adv Atmos Sci, 29: 63–78

Chou K H, Wu C C, Lin P H, et al. 2011. The impact of dropwindsonde observations on typhoon track forecasts in DOTSTAR and T-PARC. Mon Weather Rev, 139: 1728–1743

Collatz G J, Berry J A, Farquhar G D, et al. 1990. The relationship between the Rubisco reaction mechanism and models of photosynthesis. Plant Cell Environ, 13: 219–225

Hamill T M, Snyder C. 2002. Using improved background-error covariance from an ensemble kalman filter for adaptive observations. Mon Weather Rev, 130: 1552–1572

Kamenkovich I V, Sarachik E S. 2004. On reducing errors in temperature and salinity in an ocean model forced by restoring boundary conditions. J Phys Oceanogr, 34: 1856–1869

Kim H M, Kim S M, Jung B J. 2011. Real-Time adaptive observation guidance using singular vectors for typhoon Jangmi (200815) in T-PARC 2008. Weather Forecast, 26: 634–649

Knorr W. 2000. Annual and interannual CO_2 exchanges of the terrestrial biosphere: Process-based simulations and uncertainties. Glob Ecol Biogeogr, 9: 225–252

Köhl A, Stammer D. 2004. Optimal observations for variational data assimilation. J Phys Oceanogr, 34: 529–542

Köhl A. 2005. Anomalies of Meridional Overturning: Mechanisms in the North Atlantic. J Phys Oceanogr, 35: 1455–1472

Kramer W, Dijkstra H A, Pierini S, et al. 2012. Measuring the impact of observations on the predictability of the Kuroshio extension in a Shallow-Water model. J Phys Oceanogr, 42: 3–17

Langland R H, Rohaly G D. 1996. Adjoint-based targeting of observations for FASTEX cyclones. Proc Seventh Conf on Mesoscale Processes. Reading, United Kingdom. Amer Meteor Soc. 359–371

Langland R H, Toth Z, Gelaro R, et al. 1999. The North Pacific experiment (NORPEX-98): Targeted observations for improved North American weather forecasts. Bull Amer Meteorol Soc, 80: 1363–1384

Large W G, Danabasoglu G, Doney S C, et al. 1997. Sensitivity to surface forcing and boundary layer mixing in a global ocean model: Annual-Mean Climatology. J Phys Oceanogr, 27: 2418–2447

Lorenz E N, Emanuel K A. 1998. Optimal sites for supplementary observation sites: Simulation with a small model. J Atmos Sci, 55: 399–414

Majumdar S J, Bishop C H, Etherton B J, et al. 2002. Adaptive sampling with the ensemble transform Kalman filter. Part II: Field program implementation. Mon Weather Rev, 130: 1356–1369

Majumdar S J, Aberson S D, Bishop C H, et al. 2006. A comparison of adaptive observing guidance for Atlantic tropical cyclones. Mon Weather Rev, 134: 2354–2372

Morss R E, Battisti D S. 2004. Evaluating observing requirements for ENSO prediction: Experiments with an intermediate coupled model. J Clim, 17: 3057–3073

Mu M, Duan W S, Wang B. 2003. Conditional nonlinear optimal perturbation and its applications. Nonlinear Process Geophys, 10: 493–501

Mu M, Duan W, Wang Q, et al. 2010. An extension of conditional nonlinear optimal perturbation approach and its applications. Nonlinear Process Geophys, 17: 211–220

Mu M, Zhou F F, Wang H L. 2009. A method for identifying the sensitive areas in targeted observations for tropical cyclone prediction: Conditional nonlinear optimal perturbation. Mon Weather Rev, 137: 1623–1639

Mu M, Yu Y S, Xu H, Gong T T. 2013. Similarities between optimal precursors for ENSO events and optimally growing initial errors in El Niño predictions. Theor Appl Climatol, doi: 10.1007/s00704-013-0909-x

Palmer T N, Gelaro R, Barkmeijer J, et al. 1998. Singular vectors, metrics, and adaptive observations. J Atmos Sci, 55: 633–653

Prates C, Richardson D, Sahin C. 2009. Final report of the preview observation data targeting system (DES). ECMWF Technical Memoranda

Pu Z X, Kalnay E, Sela J, et al. 1997. Sensitivity of forecast errors to initial conditions with a quasi-inverse linear method. Mon Weather Rev, 125: 2479–2503

Qin X, Mu M. 2011. Influence of conditional nonlinear optimal perturbations sensitivity on typhoon track forecasts. Q J Roy Meteorol Soc, 138: 185–197

Qin X, Mu M. Duan W. 2013. Conditions under which CNOP sensitivity is Valid for tropical cyclone adaptive observations. Q J Roy Meteorol Soc, in press

Rabier F, Gauthier P, Cardinali C, et al. 2008. An update on THORPEX-related research in data assimilation and observing strategies. Nonlinear Process Geophys, 15: 81–94

Riehl H, Haggard W H, Sanborn R W. 1956. On the prediction of 24-hour hurricane motion. J Meteor, 13: 415–420

Snyder C. 1996. Summary of an informal workshop on adaptive observations and FASTEX. Bull Amer Meteorol Soc, 77: 953–961

Szunyogh I, Toth Z, Morss R E, et al. 2000. The effect of targeted dropsonde observations during the 1999 Winter Storm Reconnaissance Program. Mon Weather Rev, 128: 3520–3537

Szunyogh I, Toth Z, Zimin A, et al. 2002. On the propagation of the effect of targeted observations: The 2000 winter storm reconnaissance program. Mon Weather Rev, 130: 1144–1165

Wang B, Tan X. 2010. Conditional nonlinear optimal perturbations: Adjoint-free calculation method and preliminary test. Mon Weather Rev, 138: 1043–1049

Wang H L, Mu M, Huang X Y. 2011. Application of conditional nonlinear optimal perturbations to tropical cyclone adaptive observation using the Weather Research Forecasting (WRF) model. Tellus, 63A: 939–957

Wang, Q, Mu M, Dijkstra H A. 2013. The similarity between optimal precursor and optimally growing initial error in prediction of Kuroshio large meander and its application to targeted observation. J Geophys Res Oceans, 118: 869–884, doi: 10.1002/jgrc.20084

Weissmann M, Harnisch F, Wu C C, et al. 2010. The influence of assimilating dropsonde data on typhoon track and midlatitude forecasts. Mon Weather Rev, 139: 908–920

White A, Cannell M G R, Friend A D. 2000. CO_2 stabilization, climate change and the terrestrial carbon sink. Glob Change Biol, 6: 817–833

Wu C C, Lin P H, Aberson S D. 2005. Dropwindsonde observations for typhoon surveillance near the Taiwan Region (DOSTAR): An overview. Bull Amer Meteorol Soc, 86: 787–790

Yu Y S, Mu M, Duan W, et al. 2012. Contribution of the location and spatial pattern of initial error to uncertainties in El Niño predictions. J Geophys Res, 117: C06018, doi: 10.1029/2011JC007758

Zaehle S, Sitch S, Smith B, et al. 2005. Effects of parameter uncertainties on the modeling of terrestrial biosphere dynamics. Glob Biogeochem Cycle, 19: GB3020, doi: 10.1029/2004GB002395

Zhang R, Ni Y, Liu L, et al. 2011. South China Heavy Rainfall Experiments (SCHeREX). J Meteo Soc Japan, 89A: 153–166

Zhang R, Koike T, Xu X, et al. 2012. A China-Japan cooperative JICA atmospheric observing network over the Tibetan Plateau (JICA/Tibet Project): An overviews. J Meteor Soc Japan, 90C: 1–16