



大气-海洋运动的可预报性: 思考与展望

穆穆^{1,2*}, 段晚锁^{3,4}, 唐佑民⁵

1. 复旦大学大气科学研究院, 上海 200433;
2. 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071;
3. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029;
4. 中国科学院大学地球科学学院, 北京 100049;
5. 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012

* E-mail: mumu@fudan.edu.cn

收稿日期: 2016-12-28; 接受日期: 2017-08-18; 网络版发表日期: 2017-09-28

国家自然科学基金项目(批准号: 41230420、41376018和41606012)资助

摘要 针对大气-海洋运动的可预报性, 本文回顾了对可预报性概念的认识, 讨论了更具一般意义的可预报性的定义. 对不同时空尺度天气-气候事件的预报(预测), 梳理出了可预报性研究中内禀可预报性上限(Intrinsic predictability limit, IPL)问题的一些未解难题. 本文也讨论了初始误差的空间结构与模式参数误差, 以及涉及的目标观测问题, 给出了未来需要进一步探讨的重要问题. 最后, 针对业务预报中广泛应用的集合(概率)预报方法, 讨论了集合预报-概率预报的可预报性问题及其研究的挑战性, 并强调了在随机动力系统中考虑IPL问题的重要性.

关键词 大气-海洋, 可预报性, 内禀可预报性上限, 集合预报

1 引言

大气-海洋的可预报性研究, 一般认为始于Thompson(1957)的研究. 该研究在模式准确的前提下, 考察了观测资料的初始误差如何影响数值天气预报的结果. 随后, Lorenz(1963)使用著名的Lorenz模型, 揭示了大气的混沌特性, Lorenz(1969)则进一步研究了大气运动的非线性多尺度相互作用, 提出了大气运动的内禀可预报上限(Intrinsic predictability limit, IPL)问题. 这些研究主要关注天气可预报性. 自20世纪80年代以来, 以厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)预测为代表的气候预测

问题逐渐受到国际社会与学术界的高度关注, 气候的可预报(测)性也因此成为了科学界的热点研究领域. 进入21世纪以来, 随着世界气候研究计划(WCRP)、国际气候变率与可预测性研究计划(CLIVAR), 以及全球观测系统研究与可预报性试验(THORPEX)计划的实施, 可预报性研究已逐步成为地球科学研究的中心问题之一.

什么是“可预报性”? 事实上, 要给出“可预报性”严格的科学定义是比较困难的, 这可能也是众多文献中关于可预报性的描述很难统一的重要原因(Mu等, 2004). 最新的联合国政府间气候变化专门委员会

中文引用格式: 穆穆, 段晚锁, 唐佑民. 2017. 大气-海洋运动的可预报性: 思考与展望. 中国科学: 地球科学, 47: 1166–1178, doi: [10.1360/N072016-00420](https://doi.org/10.1360/N072016-00420)
英文引用格式: Mu M, Duan W S, Tang Y M. 2017. The predictability of atmospheric and oceanic motions: Retrospect and prospects. Science China Earth Sciences, doi: [10.1007/s11430-016-9101-x](https://doi.org/10.1007/s11430-016-9101-x)

(IPCC)第五次评估报告认为,气候系统中的可预报性是物理系统自身的特性,而不是实际预测中做出的有技巧预报的能力(Kirtman等, 2013). 前者是不依赖预报预测所使用的模式和初始场而客观存在的,后者则取决于模式、初始条件,以及外强迫的精度. 在任何条件下,人们对所关注的物理变量、相关事件及其演变规律的认识都是不“完美”的,如任何观测都有误差,任何模式都不可能是所关注对象的完美重现. 因此,IPCC第五次评估报告中关于气候可预报性的表述可以稍加修改,形成适用于一般物理变量与事件的具有普遍意义的可预报性定义,即“可预报性”是大气-海洋系统中有关物理变量(如速度、温度、密度或盐度等)与各种相关的天气、气候事件(如龙卷、台风、暴雨、厄尔尼诺-南方涛动事件(ENSO)事件,海洋中尺度涡等)本身的物理属性,该属性随时间与空间变化,是多尺度相互作用的产物,其演变规律呈现非线性特征. “可预报性”度量了当前状态或系统的微小误差对未来状态的影响程度: 如果初始误差随时间发展迅速放大或概率密度分布迅速变宽,那么系统的可预报性较低;相反,系统的可预报性较高.

科学界大多数人认为, Lorenz(1963)关于“混沌”的经典工作使得气象界相信了大气的“可预报性”是客观存在的. 事实上,这是一种误解,正如最近 Palmer等(2014)指出的,不是Lorenz在1963年提出著名的三变量混沌模型,而是Lorenz(1969)关于大气中多尺度非线性相互作用的经典工作,提出了逐日的天气预报有IPL,进而使得人们接受了大气“可预报性”是客观存在的观点.

目前许多文献中经常把某一模式或某种预报方法的预报技巧混同于上述意义的“可预报性”. 事实上,采用某一度量(如矩平相关系数、均方根误差、信噪比等)去刻画预报误差时,某一模式(或方法)所体现出的预报技巧,应该被理解是对“可预报性”的一种估计,而可预报性可以理解为是预报技巧的上限. 不论采用何种模式与资料,可预报性都不会改变,但是随着科学认知水平的提高与技术条件的进步,预报技巧有可能提高. 这样我们也容易理解,为什么在使用不同的度量去刻画预报误差时,所表现出的预报技巧会有所不同.

Mu等(2004)定义了“可预报性研究”,即探讨研究预报结果不确定性(即预报误差)产生的原因和机

制,以及研究减小预报结果不确定性的方法和途径. Lorenz(1975)提出的两类可预报性问题,即第一类可预报性问题和第二类可预报性问题,也正是为了减小预报结果的不确定性,分别从初始误差和模式误差两个角度探讨预报误差产生的原因和机制,从而提高预报技巧,使“预报技巧”逼近“可预报性”. 因此,正如不应把可预报性与预报技巧混淆一样, Mu等(2004)强调了“可预报性”与“可预报性研究”是两个不同而又紧密关联的概念,不应混淆.

随着大气-海洋科学研究的发展与人类社会对天气-气候预报(测)认识的加深,科学家们对可预报性的理解在不断深入,关于可预报性的涵义也变得更加科学,不仅更加符合天气而且符合气候研究发展的需要. 尽管这样,可预报性及其研究仍存在很多具有挑战性的问题需要进一步探索. 作者将在余下的章节中梳理出若干问题,为读者研究天气和气候的可预报性提供参考.

2 关于内禀可预报性上限问题

上文已经提到, Lorenz(1969)提出了逐日天气预报存在IPL,该研究利用正压准地转涡度方程研究初始误差的发展,表明初始误差的空间尺度越小,它随时间的发展就越快(图1). 初始误差随着时间增大,导致天气尺度的信号会出现不可接受的预报误差,从而使得大气可预报期限存在一个上限, Lorenz(1969)称该上限为IPL. 随后的Leith和Kraichnan(1972)与其他一系列工作

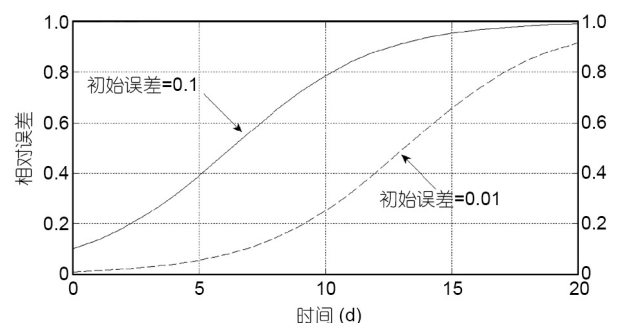


图1 不同大小初始误差导致的预报误差的均方根与大气气候态方差的均方根的比例,即图中的相对误差

初始误差越小,其增长越快;不同大小初始误差的相对误差均大约在两周左右超过0.5,此时天气信号完全被预报误差所掩盖,丧失可预报性,即数值天气预报的IPL约为两周左右(该图摘自 Kalnay(2011))

验证了Lorenz(1969)的工作, 从而使得大气科学界进一步接受了上述观点, 认为逐日天气预报存在IPL, 一般是两周左右(图1). 美国大气科学研究中心(NCAR)的Tribbia和Baumhefner使用NCAR的Community Climate Model Version 3(CCM3)模式与美国国家环境预报中心(NCEP)的资料, 使用超级计算机, 进一步考察了20世纪Lorenz(1969)这一影响深远的工作(Tribbia和Baumhefner, 2004). 渐渐地人们将这一“内禀可预报性上限”理解为逐日天气预报的“可预报性”. 特别是后来, 人们又把天气预报的“可预报性”与Lorenz著名的混沌模型相联系, 而逐步忘记了Lorenz(1969)的著名工作, 特别是该文中最重要的IPL概念(详见Palmer等(2014)).

应该指出, 天气、气候事件与物理状态变量(温度、风速等)的可预报性是事件与变量客观具有的属性, 这是20世纪60年代以后大气科学的研究成果, 毕竟不像速度、温度、质量等物理概念那样经典. 目前浩如烟海的关于可预报性研究的文献中, 正是Lorenz(1969)中关于“内禀可预报性上限”的工作, 使得我们从逻辑上接受了可预报性是变量与事件的客观属性这一概念. 但随之而来的问题是, 前人的工作只是讨论了天气尺度的IPL问题. 随着数值天气、气候预报预测的不断发展, 人们发现不同尺度天气、气候现象的预报技巧有很大不同(如暴雨、阻塞高压与ENSO事件). 为了进一步夯实“可预报性”的基础, 作者认为需要进一步深入探讨不同时空尺度事件的IPL问题.

毫无疑问, 探讨不同时空尺度的IPL问题需要利用数值模式, 并且模式误差不能太大. 模式误差太大时, 结果不能很好地反映不同尺度误差增长的动力学特征. 对于下面所提出的IPL问题, 数值模式都具有一定的模拟能力, 但大都难以确定模式误差的大小. 这种情况下, 能否尝试用数值模式研究IPL问题呢? 作者认为, 如果模式对该类现象具有一定的模拟能力, 则表明模式至少部分具备描述该类现象的主要物理与动力过程, 这时就值得尝试用模式研究IPL问题, 而不应该消极地等待模式的改进. 回忆起前人在20世纪60~70年代时, 模式误差很大, 但是并没有阻止Lorenz等对IPL问题的探索研究. 当然, 如何在考虑模式误差影响的前提下, 设计好IPL问题的数值试验, 对所得到的结果进行科学的分析, 得出有价值的结论, 是有难度与挑战性的.

2.1 中小尺度天气过程的IPL问题

关于逐日预报上限为两周的结论是针对天气时间尺度得到的. 天气时间尺度也可以分为大尺度、中尺度和小尺度天气过程. 大尺度天气过程空间尺度达到数千公里, 其IPL一般为两周左右. 关于中小尺度天气过程(如暴雨)的可预报性, 其IPL是否存在, 且具有多长时间, 目前尚未可知. 不过, 科学家们在不断努力着试图回答该问题(Zhang等, 2003; Zhang F, 2005). 特别地, Bei和Zhang(2007)考察了梅雨锋暴雨的可预报性. 他们将T106与欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的初始场的差作为初始误差, 然后把该误差分解为大、中、小三种空间尺度, 分别叠加到欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的初始场上, 进行24h后的3h累积降水以及36h后的24h累积降水预报. 结果表明, 小尺度误差增长最快, 而大尺度误差虽然增长慢, 但对总误差的贡献最大; 对于空间尺度小于400km的小尺度降水, 其有效预报时间为36h. 然而, 能否将此预报时效作为小尺度降水预报的IPL, 尚不得而知.

2.2 稳定的大气环流模态的IPL问题

关于天气尺度逐日预报上限为两周的结论是一定意义下“平均”的结果. 大气中存在一些稳定的长时间维持的大气环流模态(Dole和Gordon, 1983), 如阻塞系统, 这是中高纬度地区具有持续性和不确定周期的大尺度大气环流模态, 维持时间可超过10天(Rex, 1950). 阻塞的发生或者崩溃往往会导致大范围的灾害性天气, 如1991、1998年夏季中国江淮流域的特大洪水与乌拉尔地区的大气环流异常存在着密切的联系(Li等, 2001); 2008年1月中国南方发生了持续性的暴雪和冻雨, 在此期间, 欧亚中高纬也存在着长时间维持的阻塞系统(Sun和Zhao, 2010). 尽管针对太平洋地区阻塞的强度和频率的模拟已经有了很大的进步; 但对欧洲大西洋地区的阻塞, 模拟水平进步很小(Davini和D'Andrea, 2016). 此外, 国际上对阻塞维持的研究取得了比较好的结果, 对其发生和消亡的研究虽然有较大进展, 但目前大气环流模式仍不能很好地预报阻塞的发生与消亡, 具体位置与强度也有较大误差(Palmer等, 1990; Tibaldi等, 1994; Matsueda等, 2011). 那么, 对于如阻塞系统这样较长时间稳定的大尺度系统, 是否其IPL也是两周左右, 这是目前尚未解决且令人感兴

趣的问题.

2.3 季节内振荡的IPL问题

季节内振荡是周期为30~60天的大气振荡的统称. 在热带大气中, Madden-Julian Oscillation(MJO)是季节内振荡的主要表现形式. 它起源于热带西印度洋, 向东传播, 在东印度洋和西太平洋上空达到最大, 过了国际日期变更线后变弱, 但有时在热带大西洋会有所加强(Madden和Julian, 1971, 1972; Zhang C, 2005). MJO是全球最强的季节内振荡信号. MJO在传播过程中伴随着强烈的积云对流, 给热带印度洋和西太平洋带来强降雨, 而伴随的强风在热带印度洋引起赤道Kelvin波并在东印度洋造成海洋的季节内变化. 此外, MJO还有全球范围的影响, 如热带气旋、亚洲季风系统的爆发及季风期间的雨季和旱季的转换、中国南海夏季风爆发和南海(东亚)夏季风活动异常, 以及ENSO和北大西洋涛动等都受到MJO的重要影响(Liebmann等, 1994; Higgins和Shi, 2001; Chan等, 2002; Hendon等, 2007; Tong等, 2009; Jiang等, 2017). 因此, MJO的预报对全球的天气预报和气候变化预测具有重要意义(Zhang, 2013).

季节内振荡在时间尺度上处于天气尺度和气候尺度之间, 是连接天气现象和气候现象的桥梁. MJO预报是次季节到季节气候预测的关键, 对于实现从天气预报到季节气候预测之间无缝隙预报具有重要意义. 目前, 国际上各主要科研和业务机构针对MJO的逐日数值预报技巧可达到11~25天(Kang和Kim, 2010; Seo和Wang, 2010; Rashid等, 2011; Hudson等, 2013; Vitart, 2014), Ding等(2010, 2011)利用非线性局部Lyapunov指数(NLLE)方法, 基于观测资料研究指出MJO的可预报期限可达到5周左右, 比上述11~25天的数值预报技巧要长约2周. 那么, 该期限是否达到了MJO可预报期限的上限呢? 事实上, 我们目前尚不知道MJO是否存在IPL. 另外, MJO的可预报性研究能否照搬天气事件可预报性研究的框架, 还是必须给出全新的IPL概念, 这些都是目前尚未回答的问题.

2.4 不同时空尺度海洋运动及有关气候事件的IPL问题

海洋运动与大气一样, 由不同时空尺度的运动组成. 海洋的变化以及海洋与大气之间的相互作用, 极

大程度上决定了地球的气候. 由于观测资料的缺乏, 海洋运动的数值模拟及预报问题的研究进展较慢, 但是随着卫星观测资料与ARGO资料的大量获取, 这种情况正在改变. 特别地, 由于气候变化研究与气候预测需求的推动, 关于海洋运动及有关气候事件的预报预测的研究取得了令人鼓舞的成果, 最值得提及的是关于ENSO的预测. 自20世纪80年代人类首次成功预测1986/1987年El Niño事件以来, 目前人们已经可以提前半年对ENSO事件做出有价值的预报. 随之而来的问题是, 对于这些不同时空尺度的海洋运动及有关气候事件, 它们的IPL如何. 毫无疑问, 这方面的研究成果, 将会为开展海洋及有关气候事件的预报(预测)提供坚实的理论指导. 下面作者就列举该领域的一些重要问题, 供读者参考.

2.4.1 海洋中尺度涡

海洋中尺度涡, 是海洋中的一种无处不在的“天气尺度”涡流. 它是具有生命周期数十天, 水平尺度上百公里, 垂向影响深度可达几百米的涡旋. 中尺度涡是一种短暂而强烈的, 类似于台风移动的海洋信号, 它的“旋转速度”可到数米每秒, 比大洋的特征流速高出一个量级, 其动能占据了整个海洋里大、中海流动能的90%以上, 这种强烈的海洋信号, 对海洋的物理、化学以及生物环境势必造成不可忽视的影响, 对于海洋热量、盐度、CO₂、营养盐等物质与能量的输送与再分配也起着至关重要的作用, 从而可以通过物质输运造成全球范围内可观的气候变异(Fuglister, 1972). 目前中尺度涡的研究已成为物理海洋领域的研究热点, 但由于观测的匮乏, 以及人们认识和理解中尺度涡的水平限制, 对很多问题的研究还处于初步阶段(Chelton等, 2007, 2011a, 2011b). 目前的数值模式也因为上述原因, 以及模式较低的分辨率, 使得其对于中尺度涡及其物质传输未能给出合理的模拟(Zhang等, 2016), 尤其由于观测的缺乏, 很多情况下研究者们也不清楚模拟出的中尺度涡是否真实, 其表现出的特征是否正确, 从而造成研究者们面临非常尴尬的局面. 海洋中尺度涡的预测及其IPL需要借助模式和观测, 而观测的匮乏以及模式较低的模拟水平无疑限制了海洋中尺度涡IPL问题的探讨, 这也向海洋学家们提出了一个挑战.

2.4.2 ENSO事件

ENSO是暖位相-厄尔尼诺和冷位相-拉尼娜之间不

规则交替振荡且伴随着热带太平洋底层大气压东西呈现一个反相跷跷板现象的一种海气耦合现象(Philander, 1990). ENSO是仅次于季节变化的最强年际气候变率信号, 它虽然发生在热带太平洋, 但通过大气遥相关过程, 对全球天气、气候产生重要影响(Cane, 1983; Trenberth等, 1998; McPhaden等, 2006; Ham等, 2014). ENSO是目前已知的全球大气环流和天气、气候异常最主要的引导源和贡献者, 及时、准确地预报ENSO事件的发生、发展和演变是目前科学家乃至政府部门、社会公众十分关注的重要问题.

虽然国际上关于ENSO的预测从不同角度开展了许多可预报性研究(Moore和Kleeman, 1996; Kleeman和Moore, 1997; Mu等, 2007a, 2007b; Duan和Zhao, 2015), 现在也可以提前半年至一年对ENSO开展实时预报, 但是预测结果仍然存在着很大的不确定性, 不能满足防灾减灾的需求(Kirtman等, 2002; Jin等, 2008; Luo等, 2008). 尤其是20世纪90年代以来, 一种区别于传统El Niño事件(即东太平洋型El Niño事件)的新型El Niño事件(即中太平洋型El Niño)的频繁发生使得ENSO的预测变得更加复杂, 其实时预报水平也面临了更大的挑战. Chen等(2004)通过回报试验研究发现, 可以提前两年对ENSO事件做出有价值的预报, 而Hendon等(2009)在提前一个月预报El Niño事件多样性时, 却很少能够获得成功, 即使Jeong等(2012)使用集合预报技术, 也最多在提前4个月预报时可以获得有技巧的预报. 那么, 究竟可以提前多长时间成功预报ENSO事件, 或者ENSO预测的IPL是多少? 从上述讨论看, 该问题的解决仍是非常具有挑战性的课题, 对于天气预报和气候预测, 以及防灾减灾来说, 该问题又是非常重要且亟须回答的一个问题.

2.4.3 印度洋偶极子事件

印度洋偶极子事件(Indian Ocean Dipole, IOD)是热带印度洋地区的一种年际变率的海气耦合现象. 一个正IOD事件表现为赤道西印度洋出现正海温异常, 赤道东南印度洋出现负海温异常, 而负IOD事件中各物理量场的分布和正IOD事件大体相反. 当正IOD事件发生时, 将给东非带来显著的降水增加, 而给印度尼西亚和澳大利亚地区带来严重的干旱(Ansell等, 2000; Ashok等, 2001; Behera等, 2005), 负IOD事件的影响大体相反. IOD事件不仅可以通过调制季风(Annamalai和

Murtugudde, 2004; Vecchi和Harrison, 2004)来影响附近区域(Saji和Yamagata, 2003)的天气和气候, 还可以通过遥相关影响较远地区(Ansell等, 2000; Guan和Yamagata, 2003).

国际上关于IOD的预测尚处于探索研究阶段. 研究表明, 虽然目前可以提前一个季节预报IOD事件, 但预测结果仍存在很大的不确定性, 尤其IOD的预报技巧受到了冬季预报障碍的限制(Wajsowicz, 2004; Luo等, 2005, 2007; Shi等, 2012); 受到ENSO的影响, IOD预测也常常发生显著的春季预报障碍现象. Feng等(2014a)等研究表明, 在GFDL-CM2p1模式中, 正IOD事件的发展位相和衰减位相都存在冬季预报障碍现象, 而具有东、西偶极子结构的初始海温误差最容易导致冬季预报障碍现象的发生. 相应地, 观测中正IOD事件的发展位相和衰减位相存在着冬季持续性障碍现象, 该持续性障碍现象表明了IOD事件本身在冬季具有强的动力学不稳定性, 从而导致由初始误差导致的预报误差在冬季快速增长, 因而IOD预测发生显著的冬季预报障碍现象. 冬季预报障碍现象是IOD预测的一个显著特征. Feng等(2014b)表明, CMIP5模式对冬季预报障碍特征的模拟能力取决于模式对与冬季障碍有关的气候态的模拟能力. 尽管存在上述关于IOD可预报性的研究, 但就作者了解的文献情况看, 关于IOD的IPL问题尚未有人触及, 这是IOD可预报性研究中值得系统和深入探讨的一个难题.

2.4.4 太平洋年代际振荡

太平洋年代际振荡(Pacific Decadal Oscillation, PDO)是一种类似于ENSO的具有年代际生命史的太平洋气候变率强信号(Mantua等, 1997; Zhang等, 1997; Minobe, 1999). PDO可分为冷、暖位相(或称为PDO冷、暖“事件”). 在PDO暖位相时, 热带中东太平洋异常暖, 北太平洋中部异常冷, 而沿北美西岸却异常暖; 反之, 则为PDO冷位相. 典型的PDO事件可持续20~30年, 主信号在北太平洋, 次信号在热带太平洋. PDO对调节北太平洋及其周边地区的气候有重要作用, 它是年际变率的重要背景, 对年际变化(如ENSO及其影响)具有重要的调制作用. CMIP5模式能够重现PDO的海温结构, 也能够较好地抓住PDO信号对北美气候的影响, 但是PDO的模拟能力, 尤其是对PDO的变率的模拟仍然有很大的提升空间(Sheffield等, 2013). 在

CMIP5的年代际预测试验中,一些模式虽然对PDO有一定的回报和预报能力,但其总体的回报和预报技巧仍然很低(Pohlmann等, 2009; Fyfe等, 2011; Chikamoto等, 2012; Kim等, 2012; Mochizuki等, 2012). 那么, 是否PDO的IPL本身就很低? Ding等(2015)用观测资料与线性统计方法分离不同时间尺度的思路, 估计PDO可预报期限约为9年. 考虑到不同时间尺度变率非线性相互作用对PDO可预报期限的影响, PDO的IPL仍然悬而未决. 是否可以参照年际变率, 甚至是天气尺度现象的框架确定PDO的IPL? 这些问题都是PDO预测研究中非常令人感兴趣且对PDO预测具有重要指导意义的课题.

2.4.5 大西洋多年代际振荡

北大西洋多年代际振荡(Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO; Schlesinger和Ramankutty, 1994; Kerr, 2000)是发生在北大西洋区域空间上具有海盆尺度, 且时间上具有数十年尺度的海表温度准周期性冷暖异常变化的气候现象. AMO周期大约为50~70年(Kushnir, 1994; Enfield等, 2001), 海温振幅为0.4℃. AMO是海洋影响气候的一个主导因素(Chylek等, 2014), 它不仅通过影响北极海冰调节气候变化, 而且在南北极气温的显著负相关关系形成中扮演重要角色(Polyakov等, 2003; Chylek等, 2010; Frankcombe等, 2010); AMO对亚洲, 乃至中国气候也有深远的影响, 如AMO常常被认为是东亚气候增暖、夏季风增强, 以及冬季风减弱的重要原因(Lu等, 2006; Li和Bates, 2007; Wang等, 2009; Si和Ding, 2016); 尤其近来一些研究表明, AMO的正位相对过去30年的全球变暖有显著贡献(Chylek等, 2014), 而与其相关的北大西洋经圈翻转环流(AMOC)的减弱可能是随后全球变暖停滞的主要原因之一(Song等, 2014). AMO的预测对全球气候预测具有重要意义. AMO预测的可预报性记忆可能主要来自于次表层海洋, 因而海洋资料初始化有助于提高预报技巧(Keenlyside等, 2008; Chikamoto等, 2013). 不同版本耦合模式MIROC的多模式集合预报技巧高于单模式预报技巧, 说明用CMIP5多模式集合也会提高AMO的预报技巧(Chikamoto等, 2013), 然而从CMIP3到CMIP5模式比较计划, 对AMO的SSTA模态模拟技巧并没有显著提高(Ruiz-Barradas等, 2013), 不过在AMO的预测方面, 与PDO相比, 北大西洋AMO具有更高的预报技巧(Meehl

等, 2014). 尽管存在这些关于AMO的预测研究, 但关于AMO的IPL问题研究的报道很少. 近来, Ding等(2015)研究指出AMO的可预报期限为11年, 但是他们并没有回答该可预报期限是否代表了AMO的IPL. 考虑到AMO对全球气候, 以及全球变暖等的调制作用, AMO的IPL问题也是非常值得探讨的重要问题之一.

2.4.6 海洋环流变异(如黑潮路径变异)

黑潮是北太平洋副热带环流系统中的西边界流, 其流速快, 流量大, 并具有高温高盐等特性. 日本南部黑潮的两种模态, 非大弯曲路径与大弯曲路径对局地气候变化产生影响(Xu等, 2010); 影响渔业生产和航海安全. 黑潮的路径模态可能维持几年到十几年, 但从一种路径过渡为另一种路径仅需要几个月(Kawabe, 1986, 1995). 黑潮路径变异会对局地及周边气候产生重要影响. Xu等(2010)研究发现当大弯曲路径发生时, 黑潮和日本海岸之间形成的冷水团通过海气相互作用影响大气环流, 最终导致局地风速减小以及降水减少. 侍茂崇(2004)表明黑潮路径变异对中国长江流域降水有很大影响. 此外, 黑潮路径变异也与中国渔业生产和国家安全紧密相关. 因此, 提供具有一定技巧的黑潮路径变异的预报, 具有重要的意义.

日本海洋科技中心(Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, JAMSTEC)一直在进行黑潮路径变异预报试验(Miyazawa等, 2009). 黑潮路径变异行为十分复杂, 其物理机制尚未完全弄清, 海洋上高时空分辨率的观测资料也非常缺乏, 所有这些造成黑潮路径变异的预报结果具有很大的不确定性. 因此, 探讨黑潮路径变异的IPL问题, 为研究黑潮路径变异的物理机制与开展目标观测研究, 是有挑战但值得努力的重要问题.

3 初始误差问题与模式参数误差问题

可预报性问题一般分为两类: 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(Lorenz, 1975). 本文上述讨论主要涉及第一类可预报性问题, 该类问题对于天气、气候等不同时间和空间尺度的预报预测都是难以回避的问题, 共性色彩较浓; 第二类可预报性问题主要考虑模式误差的影响, 需要探讨数值模

式的具体动力、物理过程的不确定性, 而这对于不同的天气和气候事件来说可能具有不同的特点, 因而更具“个性”. 但是对于模式误差的主要来源之一, 即数值模式中参数的不确定性, 却是天气、气候预测的一个共性问题. 本节将主要讨论这些共性色彩较浓的初始误差与模式参数误差问题.

3.1 初始误差问题

如前所述, 初始误差导致的预报结果的不确定性问题是经典的第一类可预报性问题, 其中一个核心问题即是要回答: 怎样的初始误差相对发展快, 随之导致较大的预报误差? 人们一般可能认为初始误差越小, 预报结果越好, 但无论是理论研究, 还是预报实践, 都发现问题远非想象的那样简单. 事实上, 在一些情形下, “小”的误差可能导致较大的预报误差(Lorenz, 1969), 而“大”的误差未必导致大的预报误差, 这与误差的空间结构有紧密联系(Mu等, 2003). 研究表明, 如果使用同样的度量(如能量范数), 虽然初始误差“大小”相同, 但具有不同空间结构的初始误差导致的预报误差可能大相径庭(Moore和Kleeman, 1996; Mu等, 2007b). 因此, 可预报性研究需要探讨具有何种结构的初始误差对预报误差具有重要影响. 另外, Lorenz关于“蝴蝶效应”的混沌理论, 也使得我们必须深入考察随机初始误差的影响.

在20世纪50年代数值天气预报发展的初期, 气象学家们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). 利用类似的思想, 科学家们于20世纪90年代后期提出了目标观测的观测策略方法, 即为了使将来时刻(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_0 , $t_0 < t_1$)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(图2). 进入21世纪后, 全球观测系统研究与可预报性试验(THORPEX, Rabier等, 2008)的开展, 使得可预报性研究与目标观测紧密相连. 在目标观测的研究与具体应用中, 隐含着这样一个假定, 即对于特定的天气或气候事件, 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得慢. 换言之, 由于动力与物理机制的作用, 使

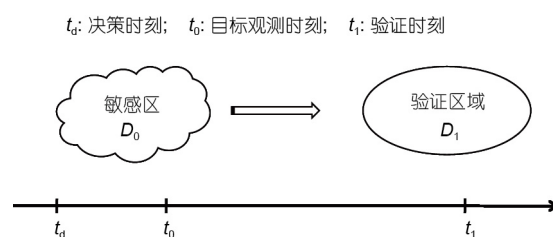


图2 目标观测示意图

得某种特定空间结构的初始误差, 在某个特定的空间区域, 它的发展要比其他类型误差(特别是随机误差)发展得快. 容易看出, 这一假定是目标观测及其敏感区概念的基础.

作者及其合作者利用自己提出的条件非线性最优扰动(CNOP; Mu等, 2003)方法, 对台风、ENSO事件、IOD事件以及日本南部黑潮路径变异等高影响海气环境事件开展了可预报性研究(Wang等, 2013; Mu等, 2009; Yu等, 2012a, 2012b; Feng等, 2014a; Hu和Duan, 2016), 证实了上面的假定, 即具有一定空间结构的初始误差, 相对于空间的随机误差, 的确会导致显著的预报误差. 该结论为开展上述天气、气候事件的目标观测, 提供了坚实的理论基础.

对于其他类型的天气、气候事件, 虽然我们猜测上述结论仍然成立, 但是需要深入而且是艰难的探索. 如主要表现为风生环流的北太平洋区域各海洋变量的预报, 是否具有特定结构的初始误差较随机误差导致更显著的预报误差仍未可知(Duan和Wu, 2015; Wu等, 2016); 在大气的中小尺度对流系统中, 两种误差导致的预报误差是否有显著区别, 也亟待深入探索等.

3.2 模式参数误差问题

一般地, 数值模式中的参数大体可分为两类. 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, 这些参数与观测无关; 第二类是通过某种直接观测或间接观测可以确定的参数. 如何减小第二类参数的不确定性, 是可预报性研究中的一个重要问题.

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. 在著名的陆地生态系统Lund-Potsdam-Jena模式(LPJ; Sitch等, 2003)中, 大约包含500个参数, 而在海陆气耦合模式中, 涉及参数更多. 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, 将付出昂贵的人力与物力

代价。穆穆(2013)在传统的目标观测的基础上,提出了关于参数的目标观测思想:如果把参数作为“变量”,在这些变量组成的相空间里,寻找参数误差“敏感区”,亦即确定敏感的和重要的参数(但不是全部的参数),与传统的在地理空间中寻找初始条件的敏感区是对应的。在参数空间构成的相空间的上述“敏感区”内,对这些参数进行强化观测,进而减少模式中的参数误差的影响,降低预报结果的不确定性、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。

显而易见,开展关于参数的目标观测工作的核心在于如何确定数值模式中参数的敏感性和重要性。已有不少工作探讨了这一问题(Bastidas等, 2006; Demaria等, 2007; Razavi和Gupta, 2015)。但是这些方法的主要问题是:不能考虑模式参数的非线性组合效应对预报结果不确定性的影响。作者及其合作者正在尝试利用Mu等(2010)提出的与参数有关的条件非线性最优扰动(CNOP-P)方法,寻找一类最优的参数误差组合(Sun和Mu, 2011, 2013, 2017)。这种误差组合在优化时刻对预报(模拟)结果影响最大。与之相关的关于参数的目标观测问题研究也在进行之中。

还应指出,由于可预报性依赖于时空尺度,受多个外强迫的控制,因而研究不同外强迫及其不确定性引起的模式误差对可预报性的影响,对理解大气、海洋的可预报性也是非常重要的,也是一个值得深入研究的一个具有挑战性的问题(Duan和Zhou, 2013; Duan和Zhao, 2015; Li和Ding, 2015)。

4 集合预报(概率预报)的可预报性问题

自20世纪90年代以来,集合预报已经成为国际上数值天气预报与数值气候预测的主流方法(Leith, 1974; Leutbecher和Palmer, 2008; 图3),如ECMWF、NCEP、JMA等都发布了该类预报产品。但是,与集合预报有关的可预报性问题,相关研究不论在理论层面,还是应用层面,尚未出现像Lorenz 20世纪60年代那样影响力的工作。实际上,由于集合预报是概率预报的一种具体(近似)的实现形式,在可预报性问题研究中,需要把确定性系统的概念作相应推广。例如,所预报的物理量风场、降水等,应该看作随机变量。预报结果的不确定性,应该用所预报的这些随机变量场与观测(这时观测的对象,也是随机变量,用其概率密度分布描

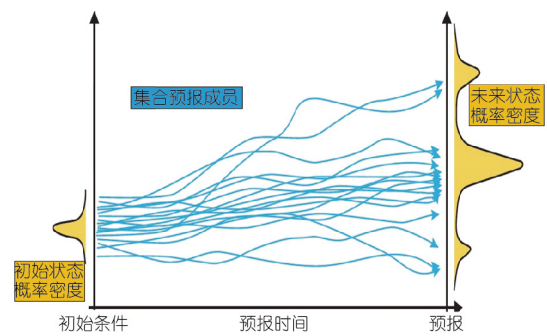


图3 集合预报示意图

该图源于 http://old.ecmwf.int/about/corporate_brochure/leaflets/EPS-2012.pdf

述)的差加以刻画。如何评价这类“差”的大小,也要在随机动力系统的体系下进行。

按照上文我们建议采用的“可预报性”的定义,IPCC第五次评估报告中将集合预报中概率密度的快速演变也作为物理变量或事件可预报性的一个表征。由此不难理解,集合预报或概率预报只是提供了新的预报方法,其结果并不能改变所预报对象的“可预报性”,而只能提高预报技巧。

作者迄今尚未见到在随机动力系统的框架下,如何研究其IPL问题。这牵涉到如何在概率密度分布的概念下,如何选取不同空间尺度的扰动,以及如何考察其演变与非线性相互作用。这里一个非常具有吸引力的问题是:在描述大气-海洋运动的非线性随机动力系统中,还会像非线性确定性动力系统一样,出现空间尺度越小的扰动,随时间增长越快,因而存在“intrinsic predictability limit”吗?如果答案是否定的,则是对如何理解“可预报性”是事件和物理变量的固有属性的根本挑战。笔者猜测,关于该问题的答案是肯定的。开展这一研究工作,不论在理论层面,还是进而指导实践,都是重要的。

5 讨论和总结

本文回顾了国际上关于可预报性概念的讨论,将前人提出的天气、气候可预报性定义,拓展到适用于大气、海洋及其耦合系统的一般物理变量与事件的具有普遍意义的可预报性定义。该可预报性定义分三个层面描述:(1)可预报性是大气-海洋系统中有关物理变量,以及有关天气和气候事件的物理属性,该

属性依赖时间与空间的变化,是多尺度相互作用的产物,其演变规律呈现非线性特征;(2)可预报性描述当前状态或系统的微小误差对未来状态的影响程度;(3)可预报性可用初始误差随时间发展的比例或者概率密度分布随时间变宽的比例来度量:如果初始误差迅速放大或概率密度分布迅速变宽,那么系统的可预报性较低;相反,系统的可预报性较高。在上述可预报性定义的基础上,作者针对不同时空尺度的天气、气候现象,梳理并提出了它们存在的极具挑战性且亟待解决的IPL问题、初始误差和模式误差及其相关的目标观测问题,以及集合预报中概率预报的可预报性问题,同时强调了上述问题在理论和实践中的重要意义。

预测未来是人类永恒的追求之一,预测结果的不确定性,也是人类永恒的烦恼之一。对于任何一类事关国计民生的高影响事件,在准业务与业务化预测或预报之前,必须开展可预报性研究。这时要回答的问题是:在目前的科学认知水平与技术条件下,预报的误差有多大?预报时效有多长,能否开展有社会经济效益的预测预报。业务化预报实施后,也要分析产生预报误差的原因与机制是什么,寻找减小预报误差的方法与途径。不断改进预报模式、提高预报技巧,提供更好的预报产品。

可预报性研究发展的历程告诉我们,可预报性研究贯穿了所关注学科的全部过程,从观测、理论分析与机制研究、数值模式研制与模拟直至最后开展预报预测。可预报性研究涉及非线性科学、湍流、数学,也与数值模式与观测系统设计等紧密相连。因此,不论是从事基础研究,还是应用研究的科技人员,都可以从中找到感兴趣且重要的课题。可预报性研究需要从事大气、海洋、物理、力学、数学与计算机科学与技术等学科的专家的有效合作,共同努力,方能不断取得新的或突破性的进展,进而在实际预报中提高预报技巧。

致谢 作者衷心感谢孟智勇、杨海军、丁瑞强、吴波、王强、周非凡、孙国栋、姜智娜、冯蓉、武于洁博士等提供的帮助。

参考文献

穆穆. 2013. 目标观测的方法、现状与发展展望. 中国科学: 地球科学, 43: 1717–1725

- 侍茂崇. 2004. 物理海洋学. 济南: 山东教育出版社. 462
- Annamalai H, Murtugudde R. 2004. Role of the Indian Ocean in regional climate variability. *Earth Clim*, 147: 213–246
- Ansell T, Reason C J C, Meyers G. 2000. Variability in the tropical south-east Indian Ocean and links with southeast Australian winter rainfall. *Geophys Res Lett*, 27: 3977–3980
- Ashok K, Guan Z, Yamagata T. 2001. Impact of the Indian Ocean dipole on the relationship between the Indian monsoon rainfall and ENSO. *Geophys Res Lett*, 28: 4499–4502
- Bastidas L A, Hogue T S, Sorooshian S, Gupta H V, Shuttleworth W J. 2006. Parameter sensitivity analysis for different complexity land surface models using multicriteria methods. *J Geophys Res*, 111: D20101
- Behera S K, Luo J J, Masson S, Delecluse P, Gualdi S, Navarra A, Yamagata T. 2005. Paramount impact of the Indian Ocean dipole on the East African short rains: A CGCM study. *J Clim*, 18: 4514–4530
- Bei N, Zhang F. 2007. Impacts of initial condition errors on mesoscale predictability of heavy precipitation along the Mei-Yu front of China. *Q J R Meteorol Soc*, 133: 83–99
- Cane M A. 1983. Oceanographic events during El Niño. *Science*, 222: 1189–1195
- Chan J C L, Ai W, Xu J. 2002. Mechanisms responsible for the maintenance of the 1998 South China Sea summer monsoon. *J Meteorol Soc Jpn*, 80: 1103–1113
- Chelton D B, Gaube P, Schlax M G, Early J J, Samelson R M. 2011a. The influence of nonlinear mesoscale eddies on near-surface oceanic chlorophyll. *Science*, 334: 328–332
- Chelton D B, Schlax M G, Samelson R M. 2011b. Global observations of nonlinear mesoscale eddies. *Prog Oceanogr*, 91: 167–216
- Chelton D B, Schlax M G, Samelson R M, de Szoeke R A. 2007. Global observations of large oceanic eddies. *Geophys Res Lett*, 34: L15606
- Chen D, Cane M A, Kaplan A, Zebiak S E, Huang D J. 2004. Predictability of El Niño over the past 148 years. *Nature*, 428: 733–736
- Chikamoto Y, Kimoto M, Ishii M, Mochizuki T, Sakamoto T T, Tatebe H, Komuro Y, Watanabe M, Nozawa T, Shiogama H, Mori M, Yasunaka S, Imada Y. 2013. An overview of decadal climate predictability in a multi-model ensemble by climate model MIROC. *Clim Dyn*, 40: 1201–1222
- Chikamoto Y, Kimoto M, Ishii M, Watanabe M, Nozawa T, Mochizuki T, Tatebe H, Sakamoto T T, Komuro Y, Shiogama H, Mori M, Yasunaka S, Imada Y, Koyama H, Nozu M, Jin F. 2012. Predictability of a step-wise shift in Pacific climate during the late 1990s in hindcast experiments using MIROC. *J Meteorol Soc Jpn*, 90A: 1–21
- Chylek P, Folland C K, Lesins G, Dubey M K. 2010. Twentieth century bipolar seesaw of the Arctic and Antarctic surface air temperatures. *Geophys Res Lett*, 37: L08703

- Chylek P, Klett J D, Lesins G, Dubey M K, Hengartner N. 2014. The Atlantic multidecadal oscillation as a dominant factor of oceanic influence on climate. *Geophys Res Lett*, 41: 1689–1697
- Davini P, D'Andrea F. 2016. Northern hemisphere atmospheric blocking representation in global climate models: Twenty years of improvements? *J Clim*, 29: 8823–8840
- Demaria E M, Nijssen B, Wagener T. 2007. Monte Carlo sensitivity analysis of land surface parameters using the variable infiltration capacity model. *J Geophys Res*, 112: D11113
- Ding R Q, Li J P, Seo K H. 2010. Predictability of the Madden-Julian oscillation estimated using observational data. *Mon Weather Rev*, 138: 1004–1013
- Ding R Q, Li J P, Seo K H. 2011. Estimate of the predictability of boreal Summer and Winter intraseasonal oscillations from observations. *Mon Weather Rev*, 139: 2421–2438
- Ding R Q, Li J P, Zheng F, Feng J, Liu D Q. 2015. Estimating the limit of decadal-scale climate predictability using observational data. *Clim Dyn*, 46: 1563–1580
- Dole R M, Gordon N D. 1983. Persistent anomalies of the extratropical Northern Hemisphere wintertime circulation: Geographical distribution and regional persistence characteristics. *Mon Weather Rev*, 111: 1567–1586
- Duan W S, Wu Y J. 2015. Season-dependent predictability and error growth dynamics of Pacific decadal oscillation-related sea surface temperature anomalies. *Clim Dyn*, 44: 1053–1072
- Duan W S, Zhao P. 2015. Revealing the most disturbing tendency error of Zebiak-Cane model associated with El Niño predictions by nonlinear forcing singular vector approach. *Clim Dyn*, 44: 2351–2367
- Duan W S, Zhou F F. 2013. Non-linear forcing singular vector of a two-dimensional quasi-geostrophic model. *Tellus Ser A-Dyn Meteorol Oceanol*, 65: 18452
- Enfield D B, Mestas-Núñez A M, Trimble P J. 2001. The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U.S. *Geophys Res Lett*, 28: 2077–2080
- Feng R, Duan W S, Mu M. 2014a. The “winter predictability barrier” for IOD events and its error growth dynamics: Results from a fully coupled GCM. *J Geophys Res-Oceans*, 119: 8688–8708
- Feng R, Mu M, Duan W S. 2014b. Study on the “winter persistence barrier” of Indian Ocean dipole events using observation data and CMIP5 model outputs. *Theor Appl Climatol*, 118: 523–534
- Frankcombe L M, von der Heydt A, Dijkstra H A. 2010. North Atlantic multidecadal climate variability: An investigation of dominant time scales and processes. *J Clim*, 23: 3626–3638
- Fuglister F C. 1972. Cyclonic rings formed by the Gulf Stream 1965–1966. In: Gordon A, ed. *Studies In Phys Oceanogr*. New York: Gordon and Breach. 137–168
- Fyfe J C, Merryfield W J, Kharin V, Boer G J, Lee W S, von Salzen K. 2011. Skillful predictions of decadal trends in global mean surface temperature. *Geophys Res Lett*, 38: L22801
- Guan Z, Yamagata T. 2003. The unusual summer of 1994 in East Asia: IOD teleconnections. *Geophys Res Lett*, 30: 1544
- Ham Y G, Sung M K, An S I, Schubert S D, Kug J S. 2014. Role of tropical atlantic SST variability as a modulator of El Niño teleconnections. *J Atmos Sci*, 50: 247–261
- Hendon H H, Lim E, Wang G, Alves O, Hudson D. 2009. Prospects for predicting two flavors of El Niño. *Geophys Res Lett*, 36: L19713
- Hendon H H, Wheeler M C, Zhang C. 2007. Seasonal dependence of the MJO-ENSO relationship. *J Clim*, 20: 531–543
- Higgins R W, Shi W. 2001. Intercomparison of the principal modes of interannual and intraseasonal variability of the North American monsoon system. *J Clim*, 14: 403–417
- Hu J Y, Duan W S. 2016. Relationship between optimal precursory disturbances and optimally growing initial errors associated with ENSO events: Implications to target observations for ENSO prediction. *J Geophys Res-Oceans*, 121: 2901–2917
- Hudson D, Marshall A G, Yin Y H, Alves O, Hendon H H. 2013. Improving intraseasonal prediction with a new ensemble generation strategy. *Mon Weather Rev*, 141: 4429–4449
- Jeong H I, Lee D Y, Ashok K, Ahn J B, Lee J Y, Luo J J, Schemm J K E, Hendon H H, Braganza K, Ham Y G. 2012. Assessment of the APCC coupled MME suite in predicting the distinctive climate impacts of two flavors of ENSO during boreal winter. *Clim Dyn*, 39: 475–493
- Jiang Z N, Feldstein S B, Lee S. 2017. The relationship between the Madden-Julian oscillation and the North Atlantic oscillation. *Q J R Meteorol Soc*, 143: 240–250
- Jin E K, Kinter Iii J L, Wang B, Park C K, Kang I S, Kirtman B P, Kug J S, Kumar A, Luo J J, Schemm J, Shukla J, Yamagata T. 2008. Current status of ENSO prediction skill in coupled ocean-atmosphere models. *Clim Dyn*, 31: 647–664
- Kalnay E. 2011. *Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability*. Cambridge: Cambridge University Press. 341
- Kang I S, Kim H M. 2010. Assessment of MJO predictability for boreal winter with various statistical and dynamical models. *J Clim*, 23: 2368–2378
- Kawabe M. 1986. Transition processes between the three typical paths of the Kuroshio. *J Oceanogr Soc Jpn*, 42: 174–191
- Kawabe M. 1995. Variations of current path, velocity, and volume transport of the kuroshio in relation with the large meander. *J Phys Oceanogr*, 25: 3103–3117
- Keenlyside N S, Latif M, Jungclauss J, Kornbluh L, Roeckner E. 2008. Advancing decadal-scale climate prediction in the North Atlantic sector. *Nature*, 453: 84–88

- Kerr R A. 2000. A north Atlantic climate pacemaker for the centuries. *Science*, 288: 1984–1986
- Kim H M, Webster P J, Curry J A. 2012. Evaluation of short-term climate change prediction in multi-model CMIP5 decadal hindcasts. *Geophys Res Lett*, 39: L10701
- Kirtman B, Power S B, Adedoyin J A, et al. 2013. Near-term Climate change: Projections and predictability. In: Stocker T F, Qin D, Plattner G K, Tignor M, Allen S K, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley P M, eds. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press
- Kirtman B P, Shukla J, Balmaseda M, Graham N, Penland C, Xue Y, Zebiak S. 2002. Current status of ENSO forecast skill: A report to the climate variability and predictability numerical experimentation Group. CLIVAR Working Group on Seasonal to Interannual Prediction
- Kleeman R, Moore A M. 1997. A theory for the limitation of ENSO predictability due to stochastic atmospheric transients. *J Atmos Sci*, 54: 753–767
- Kushnir Y. 1994. Interdecadal variations in North Atlantic sea surface temperature and associated atmospheric conditions. *J Clim*, 7: 141–157
- Leith C E. 1974. Theoretical skill of Monte Carlo forecasts. *Mon Weather Rev*, 102: 409–418
- Leith C E, Kraichnan R H. 1972. Predictability of turbulent flows. *J Atmos Sci*, 29: 1041–1058
- Leutbecher M, Palmer T N. 2008. Ensemble forecasting. *J Comp Phys*, 227: 3515–3539
- Li J P, Ding R Q. 2015. Seasonal and interannual weather prediction. In: North G, Pyle J, Zhang F, eds. *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*. 2nd ed. London: Academic Press and Elsevier. 303–312
- Li S L, Bates G T. 2007. Influence of the Atlantic multidecadal oscillation on the winter climate of East China. *Adv Atmos Sci*, 24: 126–135
- Li S L, Ji L R, Lin W T, Ni Y Q. 2001. The maintenance of the blocking over the ural mountains during the second Meiyu period in the summer of 1998. *Adv Atmos Sci*, 18: 87–105
- Liebmann B, Hendon H H, Glick J D. 1994. The relationship between tropical cyclones of the Western Pacific and Indian Oceans and the Madden-Julian oscillation. *J Meteorol Soc Jpn*, 72: 401–412
- Lorenz E N. 1963. Deterministic nonperiodic flow. *J Atmos Sci*, 20: 130–141
- Lorenz E N. 1969. The predictability of a flow which possesses many scales of motion. *Tellus*, 21: 289–307
- Lorenz E N. 1975. Climatic predictability in the physical basis of climate and climate modeling. WMO GARP Publ. Ser No, 16: 132–136
- Lu R, Dong B, Ding H. 2006. Impact of the Atlantic multidecadal oscillation on the Asian summer monsoon. *Geophys Res Lett*, 33: L24701
- Luo J J, Masson S, Behera S, Shingu S, Yamagata T. 2005. Seasonal climate predictability in a coupled OAGCM using a different approach for ensemble forecasts. *J Clim*, 18: 4474–4497
- Luo J J, Masson S, Behera S, Yamagata T. 2007. Experimental forecasts of the indian ocean dipole using a coupled OAGCM. *J Clim*, 20: 2178–2190
- Luo J J, Masson S, Behera S K, Yamagata T. 2008. Extended ENSO predictions using a fully coupled ocean-atmosphere model. *J Clim*, 21: 84–93
- Madden R A, Julian P R. 1971. Detection of a 40–50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *J Atmos Sci*, 28: 702–708
- Madden R A, Julian P R. 1972. Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40–50 day period. *J Atmos Sci*, 29: 1109–1123
- Matsueda M, Kyouda M, Toth Z, Tanaka H L, Tsuyuki T. 2011. Predictability of an atmospheric blocking event that occurred on 15 December 2005. *Mon Weather Rev*, 139: 2455–2470
- Mantua N J, Hare S R, Zhang Y, Wallace J M, Francis R C. 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bull Amer Meteorol Soc*, 78: 1069–1079
- McPhaden M J, Zebiak S E, Glantz M H. 2006. ENSO as an integrating concept in Earth science. *Science*, 314: 1740–1745
- Meehl G A, Goddard L, Boer G, Burgman R, Branstator G, Cassou C, Corti S, Danabasoglu G, Doblas-Reyes F, Hawkins E, Karspeck A, Kimoto M, Kumar A, Matei D, Mignot J, Msadek R, Navarra A, Pohlmann H, Rienecker M, Rosati T, Schneider E, Smith D, Sutton R, Teng H, van Oldenborgh G J, Vecchi G, Yeager S. 2014. Decadal climate prediction: An update from the trenches. *Bull Amer Meteorol Soc*, 95: 243–267
- Minobe S. 1999. Resonance in bidecadal and pentadecadal climate oscillations over the North Pacific: Role in climatic regime shifts. *Geophys Res Lett*, 26: 855–858
- Miyazawa Y, Zhang R, Guo X, Tamura H, Ambe D, Lee J S, Okuno A, Yoshinari H, Setou T, Komatsu K. 2009. Water mass variability in the western North Pacific detected in a 15-year eddy resolving ocean reanalysis. *J Oceanogr*, 65: 737–756
- Mochizuki T, Chikamoto Y, Kimoto M, Ishii M, Tatebe H, Komuro Y, Sakamoto T T, Watanabe M, Mori M. 2012. Decadal prediction using a recent series of MIROC global climate models. *J Meteorol Soc Jpn*, 90A: 373–383
- Moore A M, Kleeman R. 1996. The dynamics of error growth and predictability in a coupled model of ENSO. *Q J R Meteorol Soc*, 122: 1405–1446
- Mu M, Duan W, Wang Q, Zhang R. 2010. An extension of conditional

- nonlinear optimal perturbation approach and its applications. *Nonlin Processes Geophys*, 17: 211–220
- Mu M, Duan W S, Wang B. 2003. Conditional nonlinear optimal perturbation and its applications. *Nonlin Processes Geophys*, 10: 493–501
- Mu M, Duan W S, Chou J F. 2004. Recent advances in predictability studies in China (1999–2002). *Adv Atmos Sci*, 21: 437–443
- Mu M, Duan W S, Wang B. 2007a. Season-dependent dynamics of nonlinear optimal error growth and El Niño-Southern Oscillation predictability in a theoretical model. *J Geophys Res*, 112: D10113
- Mu M, Xu H, Duan W S. 2007b. A kind of initial errors related to “spring predictability barrier” for El Niño events in Zebiak-Cane model. *Geophys Res Lett*, 34: L03709
- Mu M, Zhou F, Wang H. 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
- Palmer T N, Branković, Molteni F, Tibaldi S. 1990. Extended-range predictions with ECMWF models: Interannual variability in operational model integrations. *Q J R Meteorol Soc*, 116: 799–834
- Palmer T N, Döring A, Seregin G. 2014. The real butterfly effect. *Nonlinearity*, 27: R123–R141
- Philander S G. 1990. El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation. London: Academic Press
- Pohlmann H, Jungclauss J H, Köhl A, Stammer D, Marotzke J. 2009. Initializing decadal climate predictions with the GECCO oceanic synthesis: Effects on the north Atlantic. *J Clim*, 22: 3926–3938
- Polyakov I V, Alekseev G V, Bekryaev R V, Bhatt U S, Colony R, Johnson M A, Karklin V P, Walsh D, Yulin A V. 2003. Long-term ice variability in Arctic marginal seas. *J Clim*, 16: 2078–2085
- Rabier F, Gauthier P, Cardinali C, Langland R, Tsyrulnikov M, Lorenc A, Steinle P, Gelaro R, Koizumi K. 2008. An update on THORPEX-related research in data assimilation and observing strategies. *Nonlin Processes Geophys*, 15: 81–94
- Rashid H A, Hendon H H, Wheeler M C, Alves O. 2011. Prediction of the Madden-Julian oscillation with the POAMA dynamical prediction system. *Clim Dyn*, 36: 649–661
- Razavi S, Gupta H V. 2015. What do we mean by sensitivity analysis? The need for comprehensive characterization of “global” sensitivity in Earth and Environmental systems models. *Water Resour Res*, 51: 3070–3092
- Rex D F. 1950. Blocking action in the middle troposphere and its effect upon regional climate. *Tellus*, 2: 275–301
- Riehl H, Haggard W H, Sanborn R W. 1956. On the prediction of 24-hour hurricane motion. *J Meteorol*, 13: 415–420
- Ruiz-Barradas A, Nigam S, Kavvada A. 2013. The Atlantic multidecadal oscillation in twentieth century climate simulations: Uneven progress from CMIP3 to CMIP5. *Clim Dyn*, 41: 3301–3315
- Saji N H, Yamagata T. 2003. Structure of SST and surface wind variability during Indian Ocean dipole mode events: COADS observations. *J Clim*, 16: 2735–2751
- Si D, Ding Y. 2016. Oceanic forcings of the interdecadal variability in East Asian summer rainfall. *J Clim*, 29: 7633–7649
- Schlesinger M E, Ramankutty N. 1994. An oscillation in the global climate system of period 65–70 years. *Nature*, 367: 723–726
- Seo K H, Wang W. 2010. The Madden-Julian oscillation simulated in the NCEP climate forecast system model: The importance of stratiform heating. *J Clim*, 23: 4770–4793
- Sheffield J, Barrett A P, Colle B, Nelun Fernando D, Fu R, Geil K L, Hu Q, Kinter J, Kumar S, Langenbrunner B, Lombardo K, Long L N, Maloney E, Mariotti A, Meyerson J E, Mo K C, David Neelin J, Nigam S, Pan Z, Ren T, Ruiz-Barradas A, Serra Y L, Seth A, Thibeault J M, Stroeve J C, Yang Z, Yin L. 2013. North American climate in CMIP5 experiments. Part I: Evaluation of historical simulations of continental and regional climatology. *J Clim*, 26: 9209–9245
- Shi L, Hendon H H, Alves O, Luo J J, Balmaseda M, Anderson D. 2012. How predictable is the Indian Ocean dipole? *Mon Weather Rev*, 140: 3867–3884
- Sitch S, Smith B, Prentice I C, Arneth A, Bondeau A, Cramer W, Kaplan J O, Levis S, Lucht W, Sykes M T, Thonicke K, Venevsky S. 2003. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Glob Change Biol*, 9: 161–185
- Snyder C. 1996. Summary of an informal workshop on adaptive observations and FASTEX. *Bull Amer Meteorol Soc*, 77: 953–961
- Song Y, Yu Y Q, Lin P F. 2014. The hiatus and accelerated warming decades in CMIP5 simulations. *Adv Atmos Sci*, 31: 1316–1330
- Sun G D, Mu M. 2011. Nonlinearly combined impacts of initial perturbation from human activities and parameter perturbation from climate change on the grassland ecosystem. *Nonlin Processes Geophys*, 18: 883–893
- Sun G D, Mu M. 2013. Understanding variations and seasonal characteristics of net primary production under two types of climate change scenarios in China using the LPJ model. *Clim Change*, 120: 755–769
- Sun G D, Mu M. 2017. A new approach to identify the sensitivity and importance of physical parameters combination within numerical models using the Lund-Potsdam-Jena (LPJ) model as an example. *Theor Appl Climatol*, 128: 587–601
- Sun J H, Zhao S X. 2010. The impacts of multiscale weather systems on freezing rain and snowstorms over Southern China. *Weather Forecast*, 25: 388–407
- Thompson P D. 1957. Uncertainty of the initial state as a factor in the predictability of large scale atmospheric flow patterns. *Tellus*, 9:

275–295

- Tibaldi S, Tosi E, Navarra A, Pedulli L. 1994. Northern and Southern Hemisphere seasonal variability of blocking frequency and predictability. *Mon Weather Rev*, 122: 1971–2003
- Tong H W, Chan J C L, Zhou W. 2009. The role of MJO and mid-latitude fronts in the South China Sea summer monsoon onset. *Clim Dyn*, 33: 827–841
- Trenberth K E, Branstator G W, Karoly D, Kumar A, Lau N C, Ropelewski C. 1998. Progress during TOGA in understanding and modeling global teleconnections associated with tropical sea surface temperatures. *J Geophys Res*, 103: 14291–14324
- Tribbia J J, Baumhefner D P. 2004. Scale interactions and atmospheric predictability: An updated perspective. *Mon Weather Rev*, 132: 703–713
- Vecchi G A, Harrison D E. 2004. Interannual Indian rainfall variability and Indian Ocean Sea surface temperature anomalies. *Earth's Climate*, 147: 247–259
- Vitart F. 2014. Evolution of ECMWF sub-seasonal forecast skill scores. *Q J R Meteorol Soc*, 140: 1889–1899
- Wajsowicz R C. 2004. Climate variability over the tropical Indian Ocean sector in the NSIPP seasonal forecast system. *J Clim*, 17: 4783–4804
- Wang Q, Mu M, Dijkstra H A. 2013. Effects of nonlinear physical processes on optimal error growth in predictability experiments of the Kuroshio Large Meander. *J Geophys Res-Oceans*, 118: 6425–6436
- Wang Y, Li S, Luo D. 2009. Seasonal response of Asian monsoonal climate to the Atlantic Multidecadal Oscillation. *J Geophys Res*, 114:

D02112

- Wu Y J, Duan W S, Rong X Y. 2016. Seasonal predictability of sea surface temperature anomalies over the Kuroshio-Oyashio Extension: Low in summer and high in winter. *J Geophys Res-Oceans*, 121: 6862–6873
- Xu H M, Tokinaga H, Xie S P. 2010. Atmospheric effects of the Kuroshio large meander during 2004–05. *J Clim*, 23: 4704–4715
- Yu Y, Mu M, Duan W S. 2012a. Does model parameter error cause a significant “spring predictability barrier” for El Niño events in the Zebiak-Cane Model? *J Clim*, 25: 1263–1277
- Yu Y S, Mu M, Duan W S, Gong T T. 2012b. Contribution of the location and spatial pattern of initial error to uncertainties in El Niño predictions. *J Geophys Res*, 117: C06018
- Zhang C. 2005. Madden-Julian oscillation. *Rev Geophys*, 43: RG2003
- Zhang C D. 2013. Madden-Julian oscillation: Bridging weather and climate. *Bull Amer Meteorol Soc*, 94: 1849–1870
- Zhang F. 2005. Dynamics and structure of mesoscale error covariance of a winter cyclone estimated through short-range ensemble forecasts. *Mon Weather Rev*, 133: 2876–2893
- Zhang F, Snyder C, Rotunno R. 2003. Effects of moist convection on mesoscale predictability. *J Atmos Sci*, 60: 1173–1185
- Zhang Y, Wallace J M, Battisti D S. 1997. ENSO-like interdecadal variability: 1900–93. *J Clim*, 10: 1004–1020
- Zhang Z G, Wang W, Qiu B. 2016. Oceanic mass transport by mesoscale eddies. *Science*, 345: 322–324