厄尔尼诺-南方涛动研究新进展

陈大可^{1,2,3*}, 连涛^{1,3}

1. 自然资源部第二海洋研究所, 卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 杭州 310012;

2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 珠海 519000;

3. 上海交通大学海洋学院, 上海 200240

* 联系人, E-mail: dchen@sio.org.cn

Frontier of El Niño-Southern Oscillation research

Dake Chen^{1,2,3*} & Tao Lian^{1,3}

¹ State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China;

² Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519000, China;

³ School of Oceanography, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

* Corresponding author, E-mail: dchen@sio.org.cn

doi: 10.1360/TB-2020-1219

厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)是地球气候系统中最强烈的年际振荡,对包括我国在内的全球大部分地区的天气及气候有举足轻重的影响,因而长期以来一直是海洋与大气科学研究的焦点.在*National Science Review*(《国家科学评论》)2018年第5卷第6期的ENSO专题上,多位科学家对ENSO的理论、预测、影响等方面的研究进展做了全方位的综述^[1-3],并探讨了ENSO在古气候和全球变暖背景下的变化、ENSO与热带气旋的相互作用、ENSO观测系统的建设与改进等前沿科技问题^[4-7].ENSO研究的先驱Mark Cane教授也在专题中分享了他的科学洞见和不同寻常的科研经历.该专题发表以来,受到国内外学术界的广泛关注,期间又涌现出一批颇具挑战性的研究成果.我们对这些最新成果作一个简略的梳理,重点介绍ENSO动力学、副热带太平洋对ENSO的影响、基于机器学习的ENSO预测等研究方向的重要进展,并对今后应该关注的问题提出一些看法.

在经典ENSO理论中,其演变受控于热带太平洋的海气正反馈过程^[8]以及上层海洋热含量的变化^[9,10].其中热含量的变化通常超前一年,因此被认为是预测ENSO的重要前期信号.Hu等人^[11]最近指出,在1979、2004、2014及2018年厄尔尼诺期间,热带太平洋大气环流罕见地没有因为厄尔尼诺的发生而表现出大范围异常,特别是赤道太平洋对流区没有东移到赤道日界线附近.这是因为这些事件发生时赤道太平洋纬向海表温度(SST)异常梯度较小,从而难以激发大尺度大气环流.考虑到此类非耦合型厄尔尼

诺对气候系统的影响与传统的耦合型厄尔尼诺截然不同,在评价模式模拟和预测水平时除了几个传统的ENSO指标外,也应考虑纬向SST异常指标.在ENSO期间热带太平洋上层海洋热含量变化的问题上,Neske和McGregor^[12]通过海洋模式试验发现,西边界反射和即时风场对热含量变化的贡献相当,这说明仅凭年初热含量的信息不足以准确预测当年ENSO的强弱.Larson和Pegion^[13]利用耦合模式集合试验进一步指出,无论年初热含量是增加还是减少,模式预测的ENSO都有非常大的不确定性.因此,海洋的初始热状态对于ENSO预测也许不像经典理论预示得那么重要.

关于副热带太平洋对ENSO的影响,Amaya等人^[14]发现北太平洋SST异常信号可以通过风-蒸发反馈^[15]和Gill型响应^[16]影响赤道海表风场,进而影响ENSO演变.Chakravorty等人^[17]也指出,在北太平洋振荡的正相位期间,其所伴随的副热带西风异常会通过减弱信风的方式促进厄尔尼诺产生.Ding等人^[18]发现,当考虑北太平洋和南太平洋的内在模态时,能改进ENSO预测效果.Hou等人^[19]则利用多个耦合模式的资料从可预报性最优误差增长的角度,验证了北太平洋和南太平洋模态对ENSO预测的重要性.Hua和Su^[20]指出模式在东南太平洋的初始冷误差会通过局地海气相互作用放大,而造成预测失误.此外,西太平洋热带气旋与ENSO之间的跨尺度相互作用也是近年来的研究热点.Wang等人^[21]通过数据分析发现西太平洋热带气旋能增强厄尔尼诺强度.Lian等人^[22]指出,有超过50%的西太平洋热带气旋能通过增强赤道西风异常的方式将局

地信风反转;当把热带气旋风场加入到耦合模式中后,模拟的ENSO呈现出明显的不规则性及非对称性(图1). 尽管模式中海洋热含量的“充-放”依然与ENSO指数高度相关,但每一次ENSO事件的强度甚至冷暖位相都明显受热带气旋个数与发生时刻的影响. 这些结果证实西太平洋热带气旋与ENSO之间存在强相互作用,因而ENSO预测系统应当考虑西太平洋热带气旋的跨尺度作用.

这些研究结果对现有的基于热带太平洋海气正反馈及上层海洋热含量变化而构建的ENSO理论及预测模式提出了严峻挑战. 那么,是否可以避免理论的尴尬,发展完全基于数据但不同于传统统计模式的预测方法? 随着近年来迅速发展的大数据及机器学习方法,一些学者开始尝试利用机器学习提高ENSO预测技巧. Ham等人^[23]基于再分析和模式资料中的全球SST和海洋热含量数据,通过卷积神经网络方法训练模式,获得了比目前主流气候模式更高的ENSO预测技巧, NINO3.4指数提前12个月预测的相关系数超过0.65. Petersik和Dijkstra^[24]利用神经网络方法训练小数据量的ENSO指数和海洋热含量,也得到了类似的预测能力. 最新一项工作则是结合经验模态分解与时序卷积神经网络方法,进一步将NINO3.4指数提前12个月的相关系数提高到0.83^[25]. 尽管基于机器学习的ENSO预测模型看似达到了相当可观的水平,但其本质还是数据驱动统计训

练,很大程度上依赖于数据样本的大小. 问题是实际观测的ENSO样本太少,只能依靠替代资料和动力耦合模式的输出结果来进行模式训练. 这类基于机器学习的模型虽然可以节省计算资源,但其预测能力原则上很难突破动力模式的上限. 此外,机器学习难以从动力和机制上揭示预报误差的来源.

上述研究进展表明,ENSO研究领域仍然充满活力,仍有很多悬而未决的问题需要深入探索. 我们认为,今后的研究应利用最新的观测和再分析数据,结合模式试验,进一步深化对ENSO动力机制和可预测性的理解. 具体来说,至少应该在以下几个方面发力: 第一,定量分析热带太平洋海气正反馈、上层海洋热含量这两个在传统意义上对ENSO演变最为重要的过程;第二,揭示副热带太平洋以及其他大洋通过大气桥和海洋通道对ENSO的影响,并将这些影响从理论上纳入ENSO动力框架之中;第三,阐明海气耦合气候模式中系统性偏差的成因,并通过动力过程矫正和资料同化^[26,27]消除这些偏差来提高模式的可靠性和预测能力;第四,将一些近年来发现的对ENSO有重要影响的跨尺度海气耦合过程,比如热带气旋与ENSO的相互作用,纳入到机器学习的训练集合中,一方面增加基础数据的自由度,另一方面将机器学习和物理认知相结合,从而构建更加科学的人工智能预测模型.

图 1 海气耦合模式中赤道区域(5°S~5°N)平均海表温度异常的演变. (a) 控制试验; (b) 热带气旋试验. 热带气旋从第 11 年开始加入, 黑实线是气旋在赤道上的投影. 热带气旋对ENSO强度、不规则性和非对称性的影响显而易见

Figure 1 Evolution of equatorial (5°S–5°N) SST anomalies in the Control (a) and TC Full (b) runs. The TCs are added from model year 11. Black lines in (b) denote TC-related wind stresses. The influence of TCs on ENSO magnitude, irregularity, and asymmetry is obviously seen

致谢 感谢国家自然科学基金(41690121, 41690120)资助.

参考文献

- 1 Wang C. A review of ENSO theories. *Natl Sci Rev*, 2018, 5: 813–825

- 2 Tang Y, Zhang R, Liu T, et al. Progress in ENSO prediction and predictability study. *Natl Sci Rev*, 2018, 5: 826–839
- 3 Yang S, Li Z, Yu J, et al. El Niño-Southern Oscillation and its impact in the changing climate. *Natl Sci Rev*, 2018, 5: 840–857
- 4 Lu Z, Liu Z. Examining El Niño in the Holocene: Implications and challenges. *Natl Sci Rev*, 2018, 5: 807–809
- 5 Lian T, Chen D, Ying J, et al. Tropical Pacific trends under global warming: El Niño-like or La Niña-like? *Natl Sci Rev*, 2018, 5: 810–812
- 6 Chen D, Smith N, Kessler W. The evolving ENSO observing system. *Natl Sci Rev*, 2018, 5: 805–807
- 7 Chen D, Lian T. Interaction of western Pacific tropical cyclone with El Niño diversity. *Natl Sci Rev*, 2018, 5: 803–804
- 8 Bjerknes J. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Mon Weather Rev*, 1969, 97: 163–172
- 9 Wyrski K. El Niño—The dynamic response of the equatorial Pacific Ocean to atmospheric forcing. *J Phys Oceanogr*, 1975, 5: 572–594
- 10 Jin F. An equatorial ocean recharge paradigm for ENSO. Part I: Conceptual model. *J Atmos Sci*, 1997, 54: 811–829
- 11 Hu Z, McPhaden M J, Kumar A, et al. Uncoupled El Niño warming. *Geophys Res Lett*, 2020, 47: e2020GL087621
- 12 Neske S, McGregor S. Understanding the warm water volume precursor of ENSO events and its interdecadal variation. *Geophys Res Lett*, 2018, 45: 1577–1585
- 13 Larson S M, Pegion K. Do asymmetries in ENSO predictability arise from different recharged states? *Clim Dyn*, 2020, 54: 1507–1522
- 14 Amaya D J, Kosaka Y, Zhou W, et al. The North Pacific pacemaker effect on historical ENSO and its mechanisms. *J Clim*, 2019, 32: 7643–7661
- 15 Xie S P, Philander S. A coupled ocean-atmosphere model of relevance to the ITCZ in the eastern Pacific. *Tellus*, 1994, 46: 340–350
- 16 Gill A E. Some simple solutions for heat-induced tropical circulation. *Quart J Roy Meteorol Soc*, 1980, 106: 447–462
- 17 Chakravorty S, Perez R, Anderson B, et al. Testing the trade wind charging mechanism and its influence on ENSO variability. *J Clim*, 2020, 33: 7391–7411
- 18 Ding R, Tseng Y, Li J, et al. Relative contributions of North and South Pacific sea surface temperature anomalies to ENSO. *J Geophys Res Atmos*, 2019, 124: 6222–6237
- 19 Hou M, Duan W, Zhi X. Season-dependent predictability barrier for two types of El Niño-Southern Oscillation events revealed by an approach to data analysis for predictability. *Clim Dyn*, 2019, 53: 5561–5581
- 20 Hua L, Su J. Southeastern Pacific error leads to failed El Niño forecasts. *Geophys Res Lett*, 2020, 47: e2020GL088764
- 21 Wang Q, Li J, Jin F, et al. Tropical cyclones act to intensify El Niño. *Nat Commun*, 2019, 10: 3793
- 22 Lian T, Ying J, Ren H, et al. Effects of tropical cyclones on ENSO. *J Clim*, 2019, 32: 6423–6443
- 23 Ham Y, Kim J, Luo J. Deep learning for multi-year ENSO forecasts. *Nature*, 2019, 573: 568–572
- 24 Petersik P, Dijkstra H. Probabilistic forecasting of El Niño using neural network models. *Geophys Res Lett*, 2020, 47: e2019GL086423
- 25 Yan J, Mu L, Wang L, et al. Temporal convolutional networks for the advance prediction of ENSO. *Sci Rep*, 2020, 10: 8055
- 26 Tao L, Duan W. Using a nonlinear forcing singular vector approach to reduce model error effects in ENSO forecasting. *Weather Forecast*, 2019, 34: 1321–1342
- 27 Tao L, Duan W, Vannitsem S. Improving forecasts of El Niño diversity: A nonlinear forcing singular vector approach. *Clim Dyn*, 2020, 55: 739–754