

揭开汛期降水变化的奥秘:厄尔尼诺回响曲

谢尚平¹, 马静²

1. 加利福尼亚大学圣地亚哥分校, 美国拉荷亚 92093
2. 南京信息工程大学, 南京 210044

摘要 20世纪中国长江流域3次特大洪涝均发生在厄尔尼诺次年夏季。介绍了短期气候预测的科学原理,回顾了人们对气候变化机理的探索历程,总结了汛期降水预测取得的最新进展和面临的挑战;最后分析2015年发生的超强厄尔尼诺事件给2016年中国汛期降水带来的影响。

关键词 气候变化;汛期降水;厄尔尼诺;西北太平洋反气旋;印度洋电容器效应

中国地处亚洲季风区,年降雨总量自东南向西北逐渐减少,降水时段主要集中在夏季,持续性强降水乃至洪涝灾害的发生与东亚夏季风的变化密切相关。近百年来,中国发生过多次严重洪涝灾害:1954年长江、淮河流域发生洪涝,死亡3万余人;1983年夏季,长江、汉江等流域发生严重洪涝,导致夏粮严重减产;1998年长江、嫩江、松花江、珠江等流域发生特大洪水(图1^[1]),全国受灾面积达3亿多亩,直接经济损失高达2500亿元。因此,气象预报直接关系人民福祉,准确的预报能够有效减免人员伤亡和经济损失。

人类在风暴、洪涝等恶劣天气气候现象中生活,懂得了敬畏自然,也心怀认识自然、趋利避害的愿景。正确认识并预测天气气候现象自古以来就是人类的迫切需求和殷切向往:安阳殷墟出土的甲骨文上记载了求雨的卜辞和风、云、

雨、雪、雹、虹、雷电等天气现象;天气谚语、二十四节气和七十二候等在中国的史料中也都有丰富的记载。二十四节气从两汉时期一直沿用至今,是中国古代订立的用于指导农事的补充历法,主要依据太阳在黄道上的位置进行划分。从气候研究的角度看,它是古代人民对年循环、季节变化的经验总结,是对气候平均态的朴素认识。然而古语有云:“天有不测风云”,天气气候最大的特点就是变化莫测,准确的预测不能仅依赖于经验,还需要对物理过程进行深入认识。

近百年来,气象学和海洋学取得了快速发展,人类对气候变化的规律有了一定的认识。目前,气候预测已开始业务化,并在防灾减灾中起着重要作用。本文介绍气候预测的基本原理,回望中国汛期降水研究的发展进程,并探讨厄尔尼诺对2016年汛期气候的影响。



图1 1998年中国长江流域大洪水
Fig. 1 1998 floods in the Yangtze River Valley

1 预测原理

19世纪,随着物理学的发展,人们认识到大气、海洋的运动和变化可以用流体力学和热力学方程描述,动力气象学逐步从流体力学中分离出来,形成一个独立的学科。1904年,挪威学者Bjerknes提出数值天气预报的概念,认为它是一个数学初值问题:从大气初始状态对大气动力学方程组进行时间积分,即可以预测未来天气。1950年,在美国普林斯顿高等研究所,Charney借助世界首台电子计算机成功进行了第1次天气预报(其实是对过去一个天气过程的后报模拟)。第1次实时预报则在1954年瑞典斯德哥尔摩实现,这是世界上第一套业务化的数值天气预报模式。中国在20世纪50年代也开始发展数值天气预报,并于50年代末成功制作了欧亚范围

收稿日期:2016-06-20;修回日期:2016-07-01

基金项目:国家重大科学研究计划项目(2012CB955600)

作者简介:谢尚平,教授,研究方向为气候变化、海气耦合动力学,电子邮箱:sxie@ucsd.edu

引用格式:谢尚平,马静. 揭开汛期降水变化的奥秘:厄尔尼诺回响曲[J]. 科技导报, 2017, 35(5): 17-23; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.05.001

的形势预报。

2015年《Nature》杂志发表综述文章《The quiet revolution of numerical weather prediction》，该文将数值天气预报的发展喻为一次寂静革命。目前，全球数值天气预报每天都在世界各地的业务预报中心运行，1~5天的预报已经相当准确。降水、气温预报告诉人们是否需要带雨伞、添加衣服；台风警报告诉人们是否需要以及何时需要撤离；降水预报告诉农民是否需要灌溉农田；风浪预报告诉船只出海航行是否安全。气象信息已成为日常生活工作不可缺少的一部分。

既然对大气动力学方程组进行积分可以得到唯一确定的计算结果，那是否可以用这个方法无限制地准确预报将来的情境呢？20世纪70年代，洛伦兹发现了现在人们熟知的蝴蝶效应，否定了无限制准确预报的可能。洛伦兹发现，预测结果对初始条件具有极为敏感的依赖性，初始条件的微小偏差会引起结果的极大差异，正所谓“差之毫厘，谬以千里”。数值天气预报过程中噪音的非线性增长导致有效天气预报时限仅为2周，那么，1个季度之后的气候变化是否可以预测呢？

气象预报可划分为3种类型：天气预报、短期气候预测和气候变化预估。短期气候预测主要是指月、季、年时间尺度的气候预测，它和天气预报有明显的区别。天气预报的对象是可实际感受到的气象状态，而气候预测的对象则是一段时间的天气统计状态。人们出门穿什么衣服由天气决定，但是冬、夏季要预备什么衣服则由当地气候决定。

1974年，世界气象组织和国际科学理事会提出“气候系统”的概念，这一概念的提出改变了天气预测的观念。气候的变化除了受大气自身因素的影响外，也会被大气以外的因素调控。海洋的热容量、密度均比空气大，大气变化快，记忆短，而海洋则变化慢、记忆长。因此，先前天气系统对后期天气系统的影响可以通过海洋来传递，海洋的这种记忆能力是突破洛伦兹混沌理论上限的重要依据。洛伦兹指出的预测上限仅根据初始条件对大气圈的影响得到，而短期气候预测则依赖大气圈以外的气候系统成员的调制。例如：海洋和耦合海气系统的低频变化以及海冰、土壤条件、雪盖等的变化。混沌理论也指出，虽然混沌系统中的个别轨迹不可预测，但其统计特征的变化是可预测的。应用到短期气候预测中，虽然1个季节后的某个风暴何时形成、到达无法准确预报，但通过海表面温度等边界条件的缓慢变化，可以预测风暴的总体强度和位置。因此，大气的底边界条件成为短期气候预测成败的关键。

在初始扰动中，海气耦合系统的正反馈作用会选择性放大某个信号，这个被放大的信号又被称为气候模态，是气候预测捕捉的对象。厄尔尼诺就是一个典型的气候模态。海陆气耦合系统的相互作用不仅包括变量之间的局地直接作用，也包括远距离的遥相关作用。遥相关作用能够把1个地区的可预测性传递到另一遥远地区^[2]。虽然厄尔尼诺发生

在热带太平洋，但海气耦合遥相关可以把它的影响传送到遥远的亚洲大陆。

气候预测还要考虑大气内部变率，它是指没有海温等外强迫作用下大气自身的随机变化，与冷暖锋面、风暴等活跃的天气变化有关系。海洋等对大气的强迫作用和无规则的大气内部变率的关系可以用遛狗来进行类比(图2^[3])。人可以控制整体的轨迹，而狗在主人周围跑动具有很大的不可预测的随机性，类似于内部变率的作用。可预测性随区域变化，在热带最强。热带的大气内部变率较低，海气耦合作用强，产生厄尔尼诺等可预测信号。随着纬度的增加，内部变率增大，可预测信号经常被大气内部变率所掩盖。

近50年，科学界对短期气候变化的认识取得突破性的进展，发现了海洋慢变化的重要性，最终结晶于对厄尔尼诺现象的成功预报上。中国处于中纬度地区，大气内部变率的噪音大，增大了气候预测的难度。欧美科学家极少涉及东亚季风研究，在探索热带对东亚气候影响、寻找有效预报因子这一重大研究领域，中国科学家做出了开创性的贡献。

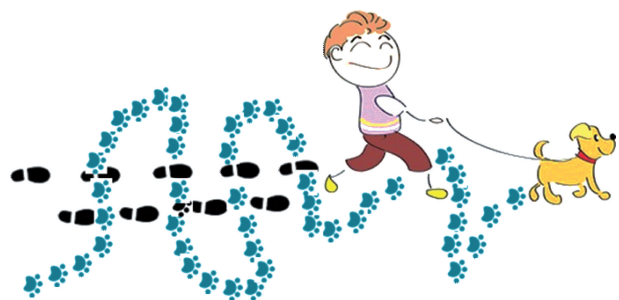


图2 遛狗时人的直线轨迹与狗的随机轨迹

Fig. 2 Straight-line trajectory of a man and the stochastic trajectory of a dog during dog walking

2 厄尔尼诺与南方涛动

厄尔尼诺是西班牙语译音，原意圣婴，指发生在圣诞节前后南美秘鲁太平洋沿岸海水异常增暖的现象。20世纪初，时任印度气象局局长的英国气象学家Walker发现，相隔万里的澳大利亚达尔文港与中南太平洋塔希提岛的海平面气压变化此起彼伏，呈现反相关，由此提出了南方涛动的概念。后来的几十年，南方涛动的研究陷入低潮。直到1969年，美国学者小Bjerknes发现，海洋的厄尔尼诺变化其实是与大气的南方涛动紧密相连的，它们之间的相互作用产生正反馈效应，形成海气耦合振荡。人们现在将厄尔尼诺和南方涛动合称ENSO(El Niño-Southern Oscillation)，ENSO研究促进了海洋科学与大气科学研究的革命性融合，开启了海气耦合动力学的新篇章。

200多年前，电和磁被认为是完全不同的现象。1831年法拉第的电磁感应实验揭示了他们之间的相互作用，1865年麦克斯韦基于实验结果建立的电磁耦合方程预测了电磁波

的存在。ENSO 研究的发展与电磁波的发现有相似之处, 1969年 Bjerknes 将似乎无关、相隔万里的海洋厄尔尼诺现象和大气南方涛动视为耦合系统, 这彻底改变了人们对气候变化的认识。与电磁波渗透于现代社会的每一个角落一样, 厄尔尼诺的影响也遍布世界各地, 是短期气候预测最主要的预报因子。

图3给出了厄尔尼诺成熟期海表温度异常的典型分布, 显著海温正异常出现在赤道中东太平洋。厄尔尼诺的季节锁相特征显著, 于夏季开始发展, 最强增暖出现在冬季, 在次年春季或夏季衰减(图4)。赤道东太平洋(Nino3.4区: 5°N~5°S, 170°W~120°W)的区域平均海温异常是监测厄尔尼诺强度的常用指数。1951年以来, 共发生14次厄尔尼诺事件, 其中3次达到超强级别, 分别是1982/1983年、1997/1998年和

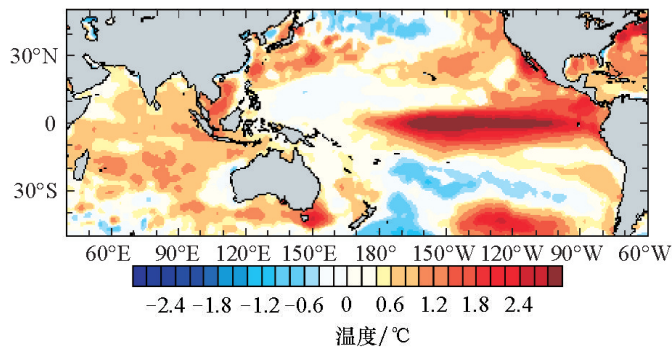
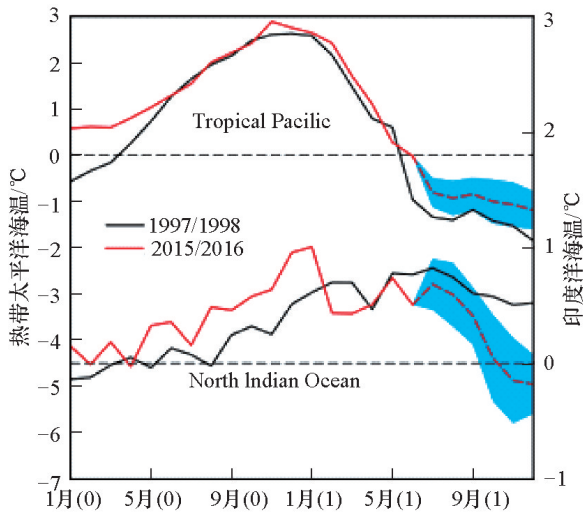


图3 2015年冬季海表温度异常

Fig. 3 Sea surface temperature (SST) anomalies in 2015 winter



左侧纵坐标为赤道东太平洋区域海表温度异常; 右侧纵坐标为北印度洋区域(0°N~20°N, 80°E~120°E)海表温度异常的演变; 红色粗虚线为美国环境预报中心(NCEP)耦合预报系统模式预测的平均海表温度异常; 蓝色阴影表示预测的不确定性; 横坐标中(0)和(1)分别表示厄尔尼诺发展(当)年和衰减(次)年。

图4 海表温度异常的演变

Fig. 4 Evolution of SST anomalies

2015/2016年的厄尔尼诺事件。图5给出1996—2015年冬季赤道东太平洋平均海温和南方涛动指数(已乘-1)的际年序列, 由图可见二者显著的相关关系, 这表明赤道东太平洋平均海温增暖(变冷)时, 塔希提岛海平面气压降低(升高), 而达尔文港的海平面气压升高(降低), 二者差值减小(增大)。1997/1998年和2015/2016年的2次强厄尔尼诺事件, 在图5中表现为赤道东太平洋显著的升温和南方涛动指数的显著异常。

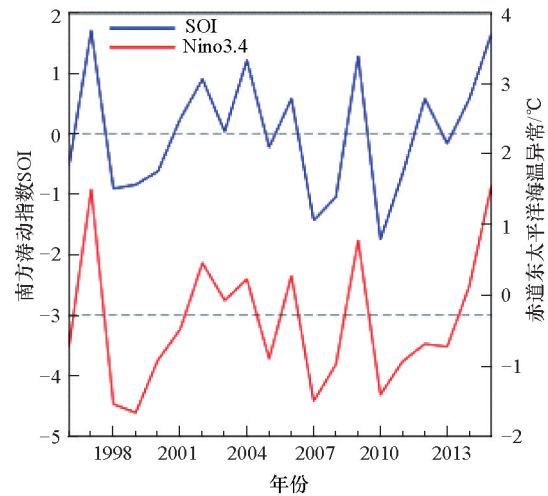


图5 1996—2015年冬季南方涛动指数和赤道东太平洋海温异常

Fig. 5 Evolution of the winter Southern oscillation index and equatorial eastern Pacific SST anomalies for 1996—2015

厄尔尼诺对环赤道太平洋地区的气候影响最为显著。在厄尔尼诺年, 从赤道中太平洋到南美西岸多雨, 而太平洋西部(印度尼西亚、澳大利亚等)则出现干旱。印度尼西亚的干旱容易引发森林大火, 继而给当地乃至邻国马来西亚、新加坡等国家带来严重的烟霾天气, 对民众健康、公共交通等造成极大影响。据报道, 2015年的强厄尔尼诺事件中, 印尼有超过13.5万人感染呼吸道疾病, 民航航班大面积延误, 学校停课。图6为2015年10月印度尼西亚的烟霾天气^[4], 人们感叹“烟霾如世界末日般笼罩”。

16—21世纪的400多年时间里, 智利的阿塔卡玛沙漠没有一丝雨水滴落, 被称为“全世界最干的地方”, 美国航空航天局(NASA)还将这里模拟成火星来做探测器试验。而在



图6 2015年10月印度尼西亚烟霾

Fig. 6 Indonesian fire haze in October 2015

2015年10月,这片沙漠天降甘霖,浇灌了沉睡在地下多年的种子,使得贫瘠的土地很快成为花海(图7^[5]),厄尔尼诺效应在这一览无余。

世界著名的斯克里普斯(Scripps)海洋研究所坐落在美国加利福尼亚州的拉荷亚(La Jolla)海岸,这里受厄尔尼诺影响也极为显著。图8是2016年3月拍摄的拉荷亚海岸照片,2015/2016年的厄尔尼诺增强了北太平洋的风暴,拍击海滩的海浪能量加强,加快了沙滩侵蚀,以致常年被沙滩覆盖的岩石大量裸露。这是自1999年以来该岩石的第一次露头,上一次露头是1998年的强厄尔尼诺事件,因此,当地科学家称其为尼诺岩(Rock Nino)。

1986年,美国学者Cane等借助简化的海洋大气耦合数值模式,首次成功预测了该年的厄尔尼诺事件。此后,人们又发展了统计模式和更加精确的海气耦合环流模式(也叫气候模式)。目前,这些模式能比较准确地预测厄尔尼诺事件的爆发与演变,以此为基础的短期气候预测已成为世界各地气象部门的常规业务,为各国经济等多方面活动服务。

尽管厄尔尼诺是发生在热带太平洋的局地海温异常现象,但它对气候的影响却是全球性的。1981年,欧美科学家



图7 2015年11月智利阿塔卡玛沙漠的花海
Fig. 7 A mallow field in full bloom in the Atacama Desert, Chile



图8 2016年3月美国加州拉荷亚海滩上裸露的岩石
Fig. 8 Rocks exposed on the La Jolla, California Beach in March 2016

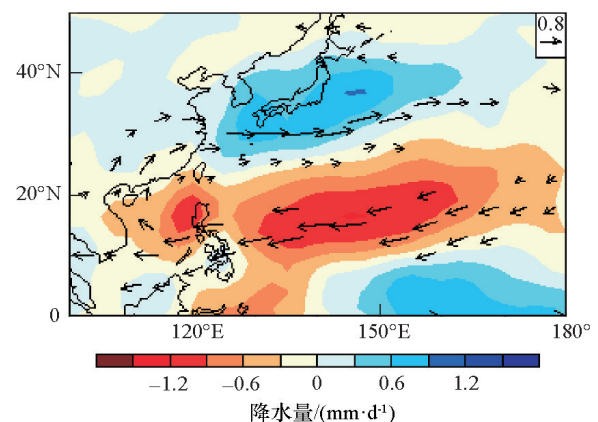
发现,厄尔尼诺发生的冬季,暖海水能够通过激发大气波列影响北美地区的气候,由此加强的西风急流为加利福尼亚州带来更多降水;厄尔尼诺次年夏季,西北太平洋上台风的生成数量明显减少,中国华南地区出现高温,东北则受到低温冷害影响。日本同样受到厄尔尼诺现象的影响,最典型的例子是1993年夏季的极端低温和多雨导致水稻严重减产,迫使日本开放了其本土的大米市场。

20世纪长江流域的3次特大洪涝均发生在厄尔尼诺事件的衰减期。1953/1954年的厄尔尼诺事件使得1954年长江、淮河流域发生严重洪涝;1982/1983年的超强厄尔尼诺事件导致1983年6—7月长江中下游地区出现持续性暴雨,长江许多测站水位达历史最高;1997年发生的厄尔尼诺事件造成1998年夏季长江流域发生多次持续性暴雨,引发了特大洪涝灾害,黑龙江、嫩江和松花江也全线告急。那么,厄尔尼诺事件影响中国次年夏季降水的物理机制是什么?厄尔尼诺事件的较强可预测性是否意味着中国汛期降水预测也有较高的准确度呢?

3 厄尔尼诺回响曲:寻找汛期降水的海洋记忆信号

1987年,日本学者新田(Nitta)^[6]发现,热带西太平洋暖池(简称西太暖池)上空对流活动强弱对东亚夏季旱涝起着重要作用,提出了PJ(Pacific-Japan)遥相关型:西太暖池对流活动减弱(增强)时,东亚梅雨锋区降水增强(减弱)。1995年,时为筑波大学的研究生植田(Ueda)^[7]发现,西北太平洋降水的突然增多伴随着梅雨雨季的结束和中国北方雨季的开始,为PJ遥相关提供了又一有力佐证。图9给出了该遥相关型的主要特征,可以看到,西太暖池和梅雨锋区的降水异常呈反相关关系。该遥相关波列的热带分支是西北太平洋反气旋(简称西太反气旋,见图9风矢量,彩色区域为线性回归到PJ遥相关指数的降水异常),它是亚洲夏季风系统的重要成员。在气象学中,反气旋指顺时针旋转的流动系统。

PJ遥相关型的发现将东亚与热带区域的环流变化联系



箭头为低层风异常,单位: $m \cdot s^{-1}$

图9 PJ遥相关型的主要特征

Fig. 9 PJ teleconnection pattern

起来,为中国汛期降水的预测提供了重要的理论依据。1989年,中国气候学家Huang等^[8]发现,在厄尔尼诺发展期和衰减期的夏季,中国降水异常有显著差别。中国汛期降水变化复杂,除了热带影响外,还包含很强的大气内部变率成分,极大地限制了降水的可预测性。20世纪末开始,科学家们开始将注意力转向可预测性强的热带变化,特别是西太反气旋的变化。1996年,博士毕业不久的青年学者Zhang等^[9]发现,西太反气旋异常在厄尔尼诺盛期(冬季)开始出现,之后的研究表明该反气旋可以持续到夏季,影响中国汛期降水。

厄尔尼诺衰减期异常西太反气旋的发现是亚洲季风研究的一大重要进展。然而,这一发现引发了重大困惑:厄尔尼诺次年夏季,中东太平洋海温异常已消退,无法直接影响西太及中国气候。持续到夏季的西太反气旋异常必须由别处海洋的记忆信号来驱动。然而,海洋信号的探寻之路并非一招致胜,经历了颇多曲折。

21世纪初,华裔学者Wang等^[10]提出,西太平洋东北信风区的海气相互作用可以维持西太反气旋的发展,为解决海洋记忆信号的困惑迈出了重要一步。然而,热带西太平洋的海温异常与西太反气旋的耦合机制依赖于低层东北风,而东北风在夏季东退,该耦合过程受到抑制。

在厄尔尼诺成熟期,印度洋海温显著增暖,但该区域的大气对流反而受到抑制。因此,在很长一段时间内,人们普遍认为印度洋的变化受制于太平洋,处于被动地位。但是,该传统观点在近期受到了有力挑战。2009年,中科院青年学者Du等^[11]发现,北印度洋海温异常出现2次峰值,第1次峰值对应厄尔尼诺的成熟期,第2次峰值则出现在厄尔尼诺次年夏季,此时,中东太平洋区域海温异常已消退,无法引起印度洋的此次增温。进一步研究表明,印度洋海温的第2次增暖源于赤道南侧缓慢传播的海洋波动(图10(a))。在解决海洋记忆信号这一困惑的过程中,另一重要进展来自于中国海洋大学的刘秦玉团队^[12],他们发现在厄尔尼诺次年夏季,北印度洋海温的持续增暖通过激发大气波动增强西太反气旋,将厄尔尼诺的影响延续至次年夏季,担负着“你方唱罢我登场”的重要角色(图10(b))。该工作打破了印度洋被动无功的传统观念,受到广泛关注。

厄尔尼诺次年,北印度洋在西太反气旋发展中的作用类似于电容器效应,即厄尔尼诺盛期为印度洋“充电”,印度洋在夏季“放电”,影响西太反气旋。异常反气旋环流西侧的偏南气流能够加强孟加拉湾和南海上空水汽的向北输送,从而使得长江流域的梅雨维持时间较长,导致长江流域夏季经常发生持续性暴雨和洪涝灾害。从图10可以直观地看到,自厄尔尼诺盛期到其衰减期,气候异常的“舞台”从东太平洋转移到了印度洋和西北太平洋区域,这两个海区储存着前期厄尔尼诺的信号,成为中国汛期降水重要的可预测性来源。

西北太平洋暖池为季风区,海气耦合模式季节转折显著。冬春季盛行东北信风,王斌提出的局地海气相互作用机制,在维持西太反气旋中起着重要作用。而夏季西南季风盛

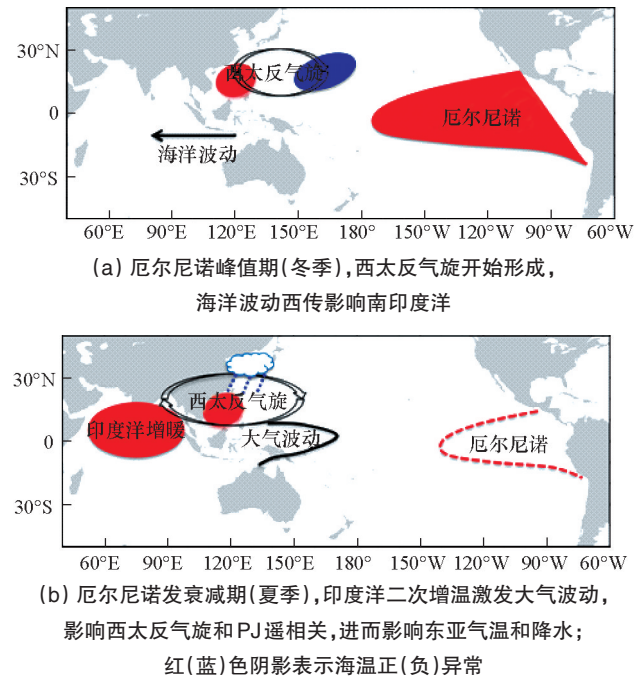


图10 厄尔尼诺发展、衰减期印度洋—太平洋区域的主要海洋大气异常示意

Fig. 10 Oceanic and atmospheric anomalies over the Indo-Pacific Oceans in the peak and decay phases of El Niño

行,造成印度洋海温异常与西太反气旋之间的耦合。Xie等最近的综述研究^[13]进一步发现,前期冬春季东北信风中的海气相互作用可以触发夏季耦合模式,表明随着季节的迁移,西太反气旋与海洋的耦合从西北太平洋转移到印度洋。印度洋—西北太平洋的联合电容器(IPOC)效应体现了印度洋在气候变化中的主动作用,解开了海洋记忆的困惑,解释了为什么夏季的厄尔尼诺“回响曲”萦绕在印度洋—西北太平洋地区。

4 2016年夏季气候异常的预测

取用观测资料作为初始场,耦合全球气候模式(CGCM)能够提前几个月有效预测厄尔尼诺次年夏季的IPOC模式,包括北印度洋和南海的海温增暖和西太反气旋。由于PJ遥相关的存在,热带区域异常能够影响东亚中纬度区域,因此,模式对厄尔尼诺次年夏季中国东部和日本南部的降水增多和西南风增强有一定的预测技巧。

2015—2016年,全球气候变化的“领衔主演”是超强厄尔尼诺事件,在美国,人们形象地称其为“Godzilla”怪兽(图11)。随着厄尔尼诺在热带太平洋主舞台的谢幕,人们开始将目光转向印度洋—西北太平洋,并着重关注IPOC效应及中国汛期降水的预测问题。此次厄尔尼诺事件是否会给中国造成严重的洪涝灾害?这里通过美国环境预报中心(NCEP)的预测数据(2016年6月起报)将2015—2016年的结果与1997—1998年进行对比。



图 11 “Godzilla”厄尔尼诺
Fig. 11 “Godzilla” El Niño

图 4 比较了 1997—1998 年、2015—2016 年热带东太平洋与北印度洋海温异常的逐月演变特征。由图可见, 2015 年热带东太平洋区域的海表温度异常与 1997 年相当, 高达 2.9℃。海温异常的平均预测结果由红色虚线表示, 蓝色阴影表征预测的不确定性。此次厄尔尼诺事件预计在夏季转为拉尼娜位相, 强度略弱于 1998 年。北印度洋上, 2015—2016 年平均海表温度异常与 1997—1998 年增温相当, 而且 2 次增温现象显著, 夏季的再次增温有利于西太反气旋的增强发展, 中国汛期降水可能会显著增强。

IPOC 效应是中国今年汛期降水预报的主要根据。国家防汛抗旱总指挥部在 2016 年 6 月 8 日的会商上表明: “受厄尔尼诺事件影响, 前汛期南方降水过程多, 强度大, 覆盖广。”入汛以来, “南方主要江河水位均高于常年和 1998 年同期, 长江、太湖、西江等南方江河当前水位较常年偏高 0.73~3.05 m, 其中, 长江中下游干流及洞庭湖、鄱阳湖区域较常年偏高 2.53~3.05 m, 较 1998 年同期偏高 2.49~3.68 m; 太湖水位较常年偏高 0.73 m, 为仅次于 1954 年同期的第 2 高水位。”

夏季东亚—西太平洋间大气桥的发现, 为中纬度地区气候的可预测性提供了一定的理论基础, 数值模式对厄尔尼诺次年夏季东亚降水有一定的预测技巧。但中纬度地区大气内部变率很强, 特别是沿西风急流传播的丝绸之路波列, 可以影响中国汛期降水, 其位相变化与海温异常没有显著联系, 缺乏可预测性。该波列预测的不确定性极大地限制了东亚气候的季节预测水平。2010 年是厄尔尼诺衰减年, 西太、印度洋气候异常有利于东亚地区冷夏的出现, 但由于丝绸之路波列的影响, 该年夏季东亚地区出现了空前的热浪天气。

5 结束语

每个人的童年都对奇妙多变的天空、广袤神秘的大海充满了疑问和幻想: 谁在雨后的蓝天上挂起了彩虹, 又是谁点燃了热烈的晚霞(图 12)? 天上的云彩、海里的浪花, 是诗人画家永久的旋律。英国诗人雪莱笔下的云鲜活灵动:

我为焦渴的鲜花, 从河川, 从海洋,
带来清新的甘霖;
我为绿叶披上淡淡的凉荫, 当他们
沉浸在午睡的梦境。



图 12 谁持彩练当空舞(加州拉荷亚海岸的晚霞)
Fig. 12 Sunset off the La Jolla coast

自然揽尽柔情之美、刚毅之气, 也尽显摧枯之功、拉朽之力, 深深震撼人类的心灵。历史的车轮滚滚向前, 探索自然却是人类永恒的追求。在楚辞《天问》中, 屈原问天地万象之理: “何所冬暖? 何所夏寒?” 屈子一问, 流转经年, 直到两千多年后的今天, 我们才略有斩获, 聊以应答。

从天气的“变化莫测”到“风云可测”, 其间凝聚了人类的非凡智慧和不懈努力。以观测、理论、预测验证三位一体为根本, 气候研究的发展带动了观测方法、理论研究以及数值模拟的不断革新。与天气预报一样, 短期气候预测是自然科学谱写的又一光辉篇章, 可以追溯到航海时代的大气海洋观测记录, 1757 年欧拉推导的流体力学方程组, 以及 1950 年 Charney 在普林斯顿小镇上实现的数值天气预报。

工业革命以来, 人类为了追求经济发展, 不断向大气排放二氧化碳等温室气体, 地球气候系统因此发生了显著变化, 全球平均温度从 20 世纪初开始已增暖 1℃ 左右^[14]。随着温室气体的继续增加, 全球气温预计在 21 世纪末会再升高 2~5℃。在全球变暖背景下, 厄尔尼诺事件的强度、频率以及影响中国的大气桥效应都会发生变化。全球增暖的空间不均匀驱动大气环流变化来影响区域气候, 引发区域性极端气候事件, 如 2008 年南方的大范围雨雪冰冻灾害、2012 年夏季北京的特大暴雨、以及 2015 年席卷印度高达 51℃ 的热浪(图 13^[15])。研究表明, 全球变暖下热浪事件会普遍增加。其他应对气候变化的重要科学问题包括: 未来中国降水分布将会发生怎样的变化, 登陆台风又会如何变化。



图 13 2015 年 5 月印度新德里高温引起的路面标示变形
Fig. 13 Distorted road markings as the asphalt melted due to high temperatures in New Delhi

与厄尔尼诺等气候系统的自由振荡不同,全球变暖是温室气体增加引发的强迫变化。预测全球变暖引发的区域变化,需要认识强迫响应的物理规律,这是气候研究面临的新挑战,也为学科发展带来了新机遇^[6]。在全球变化国家重大科学研究计划支持下,谢尚平研究组正以海气耦合过程为切入点,摸索区域气候变化的特征和机理^[7]。在这个刚刚起步的国际前沿领域,该年轻团队已取得一些重要进展:全球变暖下,热带太平洋的增温不均匀性会加强厄尔尼诺引起的气候异常,进一步强化热带传向中高纬度的大气桥效应,以帮助提高中国汛期降水的预测精度。

雪霁霜消云诡谲,
波移涛涌声激越。
拓新登高开望眼,
风易雨临景肯确。

参考文献 (References)

- [1] AFP. World's most expensive natural disasters: In pictures[EB/OL]. 2011-03-15 [2016-06-30]. <http://www.telegraph.co.uk/finance/newsbysector/banksandfinance/insurance/8383643/Worlds-most-expensive-natural-disasters-in-pictures.html?image=7>.
- [2] 丁一汇. 季节气候预测的进展和前景[J]. 气象科技进展, 2011, 1(3): 14-27.
Ding Yihui. Progress and prospects of seasonal climate prediction[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2011, 1(3): 14-27.
- [3] 立木. 遛狗的男孩[EB/OL]. (2016-03-06) [2016-06-30]. <http://588ku.com/suca/645320.html>.
- [4] 印尼烟霾严重到什么程度? [EB/OL]. (2015-10-21) [2016-06-30]. <http://www.daliulian.net/cat37/node669701>.
- [5] Greshko M. El Niño Paints the World's Driest Place with Color[EB/OL]. (2015-11-03) [2016-06-30]. <http://news.nationalgeographic.com/2015/11/151103-atacama-desert-flower-bloom-el-nino>.
- [6] Nitta T. Convective activities in the tropical western Pacific and their impacts on the Northern Hemisphere summer circulation[J]. Meteor. Soc. Japan, 1987, 65(3): 165-171.
- [7] Ueda H, Yasunari T, Kawamura R. Abrupt seasonal change of large-scale convective activity over the western Pacific in the northern summer[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, Japan, 1995, 73(4): 795-809.
- [8] Huang R H, Wu Y F. The influence of ENSO on the summer climate change in China and its mechanism[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 1989, 6(1): 21-32.
- [9] Zhang R, Sumi A, Kimoto M. Impact of El Niño on the East Asian monsoon: A diagnostic study of the '86/87 and '91/92 events[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 1996, 74(1): 49-62.
- [10] Wang B, Wu R G, Li T. Atmosphere-warm ocean interaction and its impacts on Asian-Australian monsoon variation[J]. Journal of Climate, 2003, 16(8): 1195-1211.
- [11] Du Y, Xie S P, Huang G, et al. Role of air-sea interaction in the long persistence of El Niño-induced north Indian Ocean warming[J]. Journal of Climate, 2009, 22(8): 2023-2038.
- [12] Yang J L, Liu Q Y, Xie S P, et al. Impact of the Indian Ocean SST basin mode on the Asian summer monsoon[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(2).
- [13] Xie S P, Kosaka Y, Du Y, et al. Indo-western Pacific ocean capacitor and coherent climate anomalies in post-ENSO summer: A review[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2016, 33(4): 411-432.
- [14] IPCC. Summary for Policymakers in climate change 2013: The physical science basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 1-30.
- [15] Tyagi H. India's extreme heat wave, in pictures[EB/OL]. 2015-05-29 [2016-06-30]. <http://www.telegraph.co.uk/news/worldnews/asia/india/11636124/Indias-extreme-heat-wave-in-pictures.html?frame=3321129>.
- [16] Xie S P, Deser C, Vecchi G A, et al. Towards predictive understanding of regional climate change[J]. Nature Climate Change, 2015, (5): 921-930.
- [17] 全球变化研究国家重大科学研究计划项目办公室. 太平洋印度洋对全球变暖的响应及其对气候变化的调控作用[EB/OL]. (2012-01-01) [2016-06-30]. <http://globalwarming973.ouc.edu.cn>.
Office of the national key scientific research program for global change research. The response of the Pacific Ocean to global warming and its role in the regulation of climate change in India[EB/OL]. (2012-01-01) [2016-06-30]. <http://globalwarming973.ouc.edu.cn>.

Probing mysterious summer rainfall variations in China: El Niño's last echo

XIE Shangping¹, MA Jing²

1. University of California San Diego, La Jolla 92093, USA

2. Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

Abstract Major floods in the Yangtze River Valley tended to occur in post-El Niño summers. A major El Niño took place in 2015 and was decaying rapidly in the equatorial Pacific. What impacts did this El Niño have on rainfall in China during the 2016 summer? This paper presents the physical basis for climate prediction, reflects the journey to understand and predict climate variability, and ends with a discussion of challenges ahead.

Keywords climate change; summertime rainfall; El Niño; Northwest Pacific Anticyclone; Indian ocean capacitor effect

(编辑 韩丹岫)