

美国气象科技发展动向 的研究与分析

中国气象科学研究院情报所

序

实现党的十五大提出的具有伟大历史意义的宏伟目标——到下世纪中叶建国一百年时,基本实现现代化,建成富强民主文明的社会主义国家,必须推行“科教兴国”的战略。在发扬自力更生精神的前提下,学习、借鉴国外,特别是发达国家的现代先进科学技术是一个极为重要的方面。美国是科学技术高度发达的国家之一,在发达国家中具有代表性。从总体来看,美国的科学技术水平,包括它的气象科学技术发展水平,目前仍然处于世界领先的地位。分析美国气象科技发展的动向,预测其未来发展趋势,对于我国气象事业现代化具有重要的借鉴意义。

美国气象学会(AMS)每年举办一次年会,会上美国和来自世界各地的知名专家学者对气象科技的最新发展和研究成果进行交流研讨。年会实际上是一个具有国际性高水平的大气科学研讨会。对大会交流的科技成果进行分析研究是了解世界气象科技发展动向的重要途径。1998年1月11日—16日在美国亚利桑那州凤凰城举行的AMS第78届年会是一次世界气象科技工作者的友谊大交流、科研成果大交流和经验大交流的盛会。这次会议共有老中青专家2400多人参加,其中有300多名专家来自美国以外的国家。我有幸应邀率中国气象学会代表团参加了这次会议。我国出席会议的6位专家在会上宣读了他们的论文,向大会介绍了我国气象科技各个领域的一些最新研究成果。

这本《美国气象科技发展动向的研究与分析》论文集是由中国气象科学研究院气象科技情报研究所的情报研究人员和参加美国气象学会78届年会的我国专家,以年会论文集为基础,并参考大量其他资料,共同对美国气象科技发展动向和未来发展趋势进行的一项全面研究分析。其中既有战略性综合分析研究,也有针对具体学科和具体技术的专题分析;既有发展动向介绍,也有超前性和预见性的分析,并且在进行趋势分析和展望时考虑了未来发展的多种可能性和不确定性;同时还对美国人才培养和气象服务商业化等方面进行了较深入的调研。有些研究还将研究视野拓宽到技术层面之外,站在认识论和方法论层面的

高度上,结合我国国情探讨气象科技现代化与人的思维方式现代化以及人才队伍建设现代化之间的关系。可以毫不夸大地说,认识现代化和思维方式现代化乃是实现气象科技现代化的前提。在论文集的 12 篇研究论文中,有 6 篇是参加美国气象学会第 78 届年会的专家完成的;另 6 篇由气象科技情报研究所的同志完成。

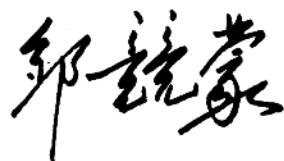
本论文集的分析研究成果有助于我们探讨我国当前气象科学技术发展中的主要矛盾是什么;有助于我们探讨我国现代气象科学技术的发展水平与持续、快速、健康的历史发展新阶段所提出的要求之间的差距;也有助于我们探讨和认识在气象科技装备的发展与维持两者之间的辩证关系。任何时候发展总是处于主导地位,而维持则属于从属地位。此两者之间的关系,正如同任何事物在发展过程中动与静、不平衡与平衡两两之间的关系所普遍遵循的辩证法则那样,前者总是处于常态,而后者则属于过程中的瞬时状态。通过与美国气象科技发展历史、现状、动态和未来趋势的对比,通过总结我国改革开放以来气象工作发展的经验,可以看出解决我国当前气象事业发展中的主要矛盾的关键是坚持不断地推进我国气象科技现代化。

气象科技情报工作在推动气象事业现代化的进程中起着不可替代的重要作用。中国气象科学研究院气象科技情报研究所建所 25 年来,在制定全国气象现代化发展纲要、建立气象枢纽、引进国外先进理论、方法、技术和设备,以及对外学术交流等方面,曾发挥过重要作用,有过自己的一段辉煌时期。气象情报分析研究更有其特殊的重要意义,同时,它所面临的任务也更艰巨,更富有挑战性。这种挑战性首先表现在气象科技情报分析研究应立足于战略的高度,研究和分析的结果应具有预见性和超前性。也就是说,不仅要对外国情况特别是发达国家的情况做客观的介绍,而且还要站在更高层次上对我国和发达国家气象科技的发展历史和现状进行对比分析,寻找彼此间气象科技总体水平的差距和专项技术差距,并对如何缩小差距提出分析建议。

科技情报研究人员要结合我国国情进行深入的分析,要有政治上的敏感性和科技上的敏锐性。带有方向性的苗头一出现,科技情报人员要敏锐地抓住,为领导掌握气象科技发展动向提供重要的信息和依据。希望气象科技情报研究人员今后继续密切注视发达国家气象科技前沿

领域中一些新的发展和动向,通过各种情报渠道,研究具有导向性的趋势,不断推出这种对气象部门各级领导和科研人员有重要参考价值的情报研究成果。担负领导职务,必须研究国外先进科技动向,一定要从科技情报研究成果中汲取营养,否则很难从世界范围的战略高度作出正确的重大科技决策。

我希望这本论文集的出版,将对我国广大气象科技工作者进一步扩大眼界,了解国外气象科技发展新动向提供比较客观的分析材料,也将为我国气象系统高层领导和各决策部门制定 2010 年中国气象事业发展规划提供依据。

A handwritten signature in black ink, reading '郑竞蒙' (Zheng Jiong), written in a cursive style.

1998 年 9 月

目 录

序	邹竞蒙	(I)
国际海-气相互作用研究成果分析	吴国雄 高良成	(1)
美国全球变化研究的现状与未来	罗 永	(8)
美国天气预报技术的发展	薛纪善	(17)
美国数值预报研究动态与业务进展	陈德辉	(22)
气象、海洋与水文交互式信息和处理系统的新发展	谭晓光	(29)
美国气象卫星和卫星气象研究现状及发展趋势展望	张文建 董超华	(42)
GPS 气象应用的研究现状与趋势	陈世范	(53)
人工智能在气象领域中的应用现状与前景展望	曾晓梅	(64)
美国热带气旋的研究和预报	周景林	(78)
从美国气象科技发展探讨气象科技现代化中的方法论问题	史国宁	(93)
美国气象教育的特点和气象人才队伍建设机制分析	赵希友	(105)
美国、欧洲中期天气预报中心和发达国家气象服务商业化 现状、问题和趋势分析	张云荣	(112)

国际海-气相互作用研究成果分析

吴国雄

高良成

(中国科学院大气物理研究所) (中国气象科学研究院情报所)

提 要

天气和气候对全球人类的社会和经济活动的影响越来越大,也越来越明显,而人类对自身生存环境的保护意识也逐步加强,因此,对天气和气候变化的关注达到前所未有的高度,这已成为不争的事实。海气相互作用不仅影响着风暴、气旋等天气过程,还影响着季风、大气涛动及年际变化等气候过程,其中如厄尔尼诺现象近年来已成为举世瞩目的关注热点。本文从气旋、NSCAT 成果、北大西洋涛动等七个方面重点介绍了国际上有关海气相互作用的最新研究成果。

关键词: 海气相互作用, 气候, 天气

1 气旋

Landsea 等(1996)指出,自本世纪中期以来,大西洋强飓风年发生数呈下降趋势。Chan 和 Shi(1996)发现,自七十年代中期以来,西北太平洋热带气旋数增多。Landsea 等认为,自 1969/1970 年以来,澳大利亚地区热带气旋年发生数减少,与 SOI 变化趋势一致,但强热带气旋($SLP < 970hPa$)发生数却增加。表明 SOI 可作为澳大利亚地区热带气旋发生数的一个好的预报指标,但却不可作为气旋强度的预报指标。

Vechi 等根据 1986 至 1997 年的资料,把西太平洋西风爆发事件(WWE)划分为四类。即 N 型,其地理区域为 5°N — 10°N , 150°E — 180°E 。WWE 爆发 10 天内无任何统计显著的赤道纬向风距平,爆发前 4 天到爆发后 2 天只有跨赤道南风距平明显。在爆发前 20 天该区域已存在一个大的暖水池(距平 $> 0.2^{\circ}\text{C}$),一直维持到爆发后 20 天。在距热带西北太平洋很远处有一小的冷水区,一直维持到爆发日。随后在该区域的南边有一小尺度增温波导并向南美海岸移动。赤道处最大距平超过 0.4°C ,在爆发后 60 天扩展到南美洲的西海岸。W 型:是位于最西部的赤道 WWE,其地理区域在 5°S — 5°N , 130°E — 155°E 。在此型整个过程中存在一个大的西风带,并有大的向赤道的经向入流以及向西传播的最大距平。W 型与一年前的 SOI 有明显关系(显著水平达 90%)。在该区域的东部原来就有一个大的 SST 距平并沿 5°N 纬线向东北传播。该区域及沿澳大利亚东海岸海表水温明显下降,一直维持到爆发日。爆发日之前入流主要来自澳大利亚,冷距平大于 -0.2°C 。这一冷的 SST 位于该海域的西部一直维持到爆发后 60 天,但其量级随时间逐渐减少。爆发后 20 天至 60 天期间沿赤道波导增温,最大的 SST 距平超过 0.5°C ,可

以到达 100°W 。C 型:地理区域为 5°S — 5°N , 155° — 180°E , 是位于 W 型之东的赤道 WWE, 此型在零滞后情况下与所有类型的 SOI 相关最强, 其赤道距平几乎完全是偏西风, 有一些来自高纬度的经向入流。爆发前 20 天、爆发日、爆发后 20 天、40 天和 60 天的 SST 距平具有相似的赤道型, 且非常类似于 ENSO 引起的 SST 距平。在该海域的西部为冷距平, 而沿波导和南美海岸为暖距平。有趣的是, 在日期线附近有一小的暖水区从赤道向东南沿伸, 且在该海域的东南部副热带海洋层云区有一 SST 距平的局部最小值。爆发日之后, 在波导以外并沿南美海岸有增温出现, 从 0.4°C 等值线的变化可以看出这一点。到爆发后 60 天时, 日期线以东沿南美海岸的距平超过 0.5°C 。在该型整个过程中距平的量级很大但没什么变化。SE 型:地理区域为 15° — 5°S , 180° — 150°W , 它的发展演变过程较为复杂, 包括赤道西风、跨赤道经向入流及该型的向东传播。SE 型与 SOI 也有显著相关(显著水平达 95%)。沿赤道原有一明显的 SST 距平, 在波导的大部分地区超过 0.3°C , 另外, 东南部有一暖距平。在爆发日, 该海域的西部偏冷, 爆发后 20 天该冷距平消失。该型中有两个暖距平区, 一个沿赤道波导; 另一个在东南部, 两者之间有一低的层状云区, 此云区内无任何明显的距平。赤道暖距平向东扩展, 在爆发日至 60 天期间加强, 其中有一个很大的距平超过 0.4°C 的区域, 并在爆发后 40 天到达南美海岸。另一东南部暖距平则是原存在该海域东南部的暖距平的西北向扩展, 距平不超过 0.3°C , 证明了 McPhaden 等 (1992) 提出的 WWE 与赤道正海温异常具有很好的对应关系。然而此四类 WWE 事件中, 只有两类位于赤道西太平洋上, 与 Kelvin 波激发有关; 另两类均发生在赤道外, 与 Kilvin 波激发无关, 说明赤道太平洋正海温异常不能简单地仅用 Kelvin 波激发去解释。

Moore 等研究了拉布拉多海上一次气旋发展过程中海面浮力通量的时空变化, 当系统通过时, 拉布拉多海大部分海区的浮力通量改变了符号, 这是由于两个完全不同的原因, 其一与所研究的气旋的结构有关, 它将该海区一分为二, 降水产生于强西北气流中, 由于海水淡化而产生一个正浮力通量。另外, 强的西北气流将冷-干的大陆空气携至暖海面上也引起了正的浮力通量(尽管向大气输送了显热和潜热), 而拉布拉多海冷的海表水温使热力强迫(即气-海显热和潜热的交换)影响浮力通量的效率降低。他指出, 由于海水状态方程的非线性特征, 在容易发生海洋对流的高纬冷水区, 降水减少了海水的膨胀系数, 从而大大地改变了表面浮力。其重要性可与表面海水冷却作用相比, 但具有相反的作用。

2 NSCAT 成果

Glenn, White 首先对三个业务中心(GEOS/GSFC, ERA/ECMWF 和 NCEP/NCAR) 1981—1993 年的再分析资料中的海洋表面通量进行比较。在此以前 Trenberth (1997) 曾分析全球平均表面能量收支, 发现在此三项再分析资料中, ERA 资料具有最好的表面能量平衡, GEOS 的不平衡最严重。White 的分析结果表明, 在陆面上, 三项再分析均具有较好的平衡。在洋面上其结论与 Trenberth 的结论一致, 而 NCEP 再分析中洋面反照率太高。

不少研究者对 NASA 的空载微波遥感散射计(NSCAT)的观测结果进行分析。NSCAT 的有源微波遥感元件能测定海浪的后向散射, 而只有波长为 $1\text{—}6\text{cm}$ 的短浪发出微波 Bragg 散射。这些短浪对风向、风速和大气稳定度的变化响应极为迅速。这种对风速和风向的迅速响应使得这些短浪成为确定风向、风速的理想观测对象。但它对大气稳定度的迅速响应又十分不利于风向和风速的确定。Bourassa 发展了一个模型去研究其原因, 初步分析表明, 大气稳定性能

显著影响海浪高度、生命史及张力波切断,当大气稳定时,这种影响更强,导致测风误差增大。

Weissman 通过比较 NSCAT 和墨西哥湾及美国西海岸浮标资料所计算的海洋表面风应力,检验原用于计算机载 Ku 波段散射仪海表摩擦速度的模式函数在用于 NSCAT 雷达剖面资料时的精度,因为除了风速外,海表摩擦速度对于海洋动力学的研究也是十分重要的。比较结果表明两者有很好的 consistency,说明这种新的计算方法是可行的。Legler 等提出“交叉验证”(cross validation, CV)法作为特殊的映射技术去获取 NSCAT 表面风资料,得到印度洋和太平洋上不同事件尺度的格点资料。W Timothy Liu 等则利用 NSCAT 资料去分析南海冬、夏季风的爆发和年际变化。根据地面风的变化可以看出冬季季风的爆发比夏季季风爆发时间要更早一些,而到了春季,该海域整个地区的海表风几乎同时发生变化。夏季海表风常常被季内活动所打断,而冬季的海表风则更为稳定一些。还发现季风季节变化引起了海洋环流的变化,即由夏季的反气旋性环流变为冬季的气旋性环流。在海表风季节变化的同时伴随有海面温度和大气可降水分的变化。Quannan Zeng 等则利用 NSCAT 得到的风资料去研究热带大气的辐合带。发现热带海洋的大气辐合带结构和强度的普遍特性:1) 任何时段(特别是冬季),太平洋中东部和大西洋的 ITCZ 辐合值最大;2) 其分布对赤道来说是南北非对称的,在太平洋,位于北半球太平洋中东部纬向分布的 ITCZ 的主体具有非常狭窄的经向结构和大的辐合强度,而只有在某些季节才能观测到的太平洋东南部较小的 ITCZ 似乎更靠近赤道。太平洋西部的 ITCZ 要比其东部的 ITCZ 范围大得多,但也弱得多;3) 所有的大气辐合带的结构、强度及位置都具有季节变化。Zuojun Yu 等检验了 NSCAT 风场的可靠性,并用其去驱动一个数值模式,成功地模拟了 1997 年的 El Nino 事件的发生。Hawkins 等研究了用 ERS/NSCAT 资料去映射热带气旋风场的可行性和局限性。Kessler 等利用 NSCAT 观测到的墨西哥的山脉风资料去强迫海洋模式,得到了与 1996—1997 观测相一致的东太平洋 SST 流型。而 Brown 则用 NSCAT 等资料对中纬度的风暴系统进行了有效的分析。

3 北大西洋涛动(NAO)

Gray 提出一个假设,认为北太平洋的温盐环流的变化能影响东西半球的能量平衡,从而诱发气候年代际变化,当北大西洋温盐环流减弱时,且东半球热带海洋用于平衡海洋涌升需要的能量较少时,东半球尤其是西太暖池有能量堆积,此能量堆积必须定期释放,一般是通过 El Nino 的出现(每 4—6 年)来完成的,因此,这一时段 El Nino 频发且较强,反之亦然。Kushnir 等用近百年的 SLP 和 SST 资料分析了北大西洋年际变化的时空特征,发现大西洋气候变化的特征是 8—16 年时间段的海洋和大气距平的相关特别强。这种相关包括从副热带南大西洋到北半球的极地地区。中纬和副极地的北大西洋具有持续性的 SST 演变,这种演变可能解释了象这样的低频气候变化。在这一现象中不能排除副热带大西洋 SST 距平的作用。赤道两侧的大西洋 SST 变化对于萨哈勒和巴西东北部半干旱地区热带雨量的变化有重要意义。毫无疑问,NAO 是北半球最重要的气候征兆之一。Mizoguchi 等则用 CEOF 的方法分析了 1947—1992 年北大西洋 SST 的变化特征。Bresch 用资料分析和模拟对 NAO 变化进行敏感性研究。在资料分析中使用了 SVD 方法将某些关键时段的 NAO 分离出来,然后用一个有限区域气候模式进行模拟以确定 NAO 对 SST 距平的敏感性的某些特征。结果表明,北大西洋风暴轴对纽芬兰外海上 SST 的梯度非常敏感。

海洋深水环流是温盐环流的主要影响因子,而世界上发生深水环流的海区极为稀少,如拉布拉多海、格棱兰、冰岛和挪威海区以及 Weddell 海。这种深水环流形成的主要原因是海水的浮力通量,而它又受到一些大气变量的重要影响,如显热和潜热通量、短波和长波辐射以及降水。Satiyamoorthy 和 Moore 利用位于拉布拉多海中心的海洋气象站 Bravo 24 年的观测资料,分析了浮力通量的变化特征,指出浮力通量的月均值与方差大小相当,因此在研究海气相互作用时,必须应用日均值,方能正确描述瞬变天气过程的重要作用。

4 大气-海洋可预报性

由于神经网络具有模拟非线性相关的能力,Tangang 等利用热带太平洋 SLP 距平场和 SST 距平场的 EOF 分量作为预报因子,构造了实时后报设值(real time retroactive forecast setting)法,用神经网络模式预报热带太平洋海温,发现在赤道中太平洋地区,0.6 距平相关的可预报性可达 6 至 12 个月。用该方法在 6 个月前模拟预报 El Nino 事件时,正确地预报出 1986/87、1991/92 的 El Nino 和 1988 的 La Nino,但错误地将 1994/95 的 La Nino 预报为 El Nino,它还未能预报出 1997/98 El Nino 的发生。Jensen 以及 Harrison 和 Rosati 研究了表面通量强迫对海洋环流和模式模拟结果的重要性。他们利用 NOAA 的 GFDL MOM2 海洋模式分别分析了动量通量、淡水通量和热量通量对海洋模式预报的影响。其中,动量通量的强迫使东北大西洋较强东风引起的东-西走向斜温的坡度最大且出现北-南的槽脊系统。淡水通量的强迫则使海平面高度及盐度发生变化。热量通量造成了 SST 年均值出现明显误差;如热带东太平洋出现大的 SST 正误差区;北太平洋和北大西洋分别出现程度不等的双极结构 SST 距平;环极海洋的正 SST 误差以及北非、南美及澳大利亚西海岸的负 SST 误差。为了描述次网格对流尺度系统在增加 GCM 中表面通量的作用,Redelsperger 等提出了一个计算通量时用到的表面风速的参数化方案。该方案将边界层自由对流与降水性深厚对流的作用区分开来,如下式:

有降水深厚对流时

$$\bar{U}^2 = (U_a)^2 + (U_G)^2$$

否则:

$$\bar{U}^2 = (U_a)^2 + (\beta\omega_a)^2$$

式中, U_a 为 GCM 显式预报的平均风速

$$(U_a = \sqrt{\overline{U^2}})$$

β 为 0.6,而 ω_a 为自由对流速度。 U_G 为降水性对流引起的阵风速度。Kitoh 等则用一个耦合的大气-混合层海洋模式去研究 SST 变化及其机制。结果表明,热带太平洋的 SST 变化很大,温带海洋的 SST 年际变化方式是最重要的。这种温带海洋的 SST 年际变化主要是由热量通量驱动的,而热量通量本身则是由热带 SST 距平通过大气环流变化所驱动。Shang-Ping Xie 等则通过模拟研究了 Walker 环流和赤道冷舌的形成原因。在包括了安第斯山和跨赤道南风时,纬向风与海洋涌升之间的 Bjerkness 反馈在冷舌产生和发展中起了重要作用,这种外部东风和南风引起的 SST 纬向变化使东风更强,因而使东太平洋 SST 变得更低。尽管 Bjerknes 反馈对赤道冷舌的形成发展极其关键,但北半球 ITCZ 引起的南风在使该反馈机制起作用的过程

中是重要的。王斌等利用充分耦合海-气模式,发现印度洋和西太平洋利于高频不稳定模发展而不利低频 SST 模增长;赤道东太平洋则与之相反。还发现耦合高频模是由大气中湿 Kelvin 和 Rossby 波引起;只有西风使耦合模趋于不稳定,而海浪动力学对耦合非稳定性几乎没有什么影响;大气-海洋混合层热力耦合使 SST 增加,与大气增温之间为一明显的正协方差,这两者都使非稳定模获得有效位能;暖池系统耦合高频模的特点与实测的 MJO 非常接近,这表明,除了大气内部动力非稳定性以外,与大气发生相互作用的海洋混合层中各种热力学过程在维持 MJO 过程中起了重要作用。Anderson 等利用 GFDL 全耦合海-气模式的集成积分结果,研究了 SST、300hPa 高度及纬向风应力等的“潜在可预报性”,结果表明,该全耦合海-气模式的潜在可预报能力非常之低,即使在热带也是如此。热带 SST 的潜在可预报性在前几个月中迅速下降,这部分地是由于大气风使模式产生了大量噪音,而这些风本身的潜在可预报性更低,即使是在前几个月 SST 潜在可预报性还很高时也是如此。如果真实系统也是这样的话,那末在 6 个月之前预报 SST 型的详细情况是很困难的。当然,这种情况也许是本研究所用的大气模式不能逼真地响应给定的 SST 型所致。Gordon 利用 GFDL 的气候模式研究热带地区对层状云的敏感性,结果表明,热带东太平洋的层状云不仅导致直接的海水辐射冷却,还通过加强东南信风在动力上增加东太平洋的上涌使 SST 冷却。因此,那里的层状云与赤道海水冷却之间存在正反馈。Kelly 等在研究云辐射效应时发现它能使模拟到的热带气候区域稳定,得到平衡态。这表明目前许多辐射-对流模式中未能包括对气候有如此之强影响的种种云辐射效应是不合适的。Benyang Tang 则用神经网络模式去预报中纬太平洋的 SST,发现在 3—6 个月的预报时段上比持续法有一定改善。对于热带太平洋来说,改进模式和资料质量及覆盖肯定会作出成功的 SST 预报,但对中纬太平洋来说,控制 SST 变化的动力学要复杂得多且尚未了解清楚,因此,目前还没有用于中纬太平洋的耦合海气模式。但神经网络模式作为一种统计方法,仅仅依赖于资料就可以建立(用神经网络的行话说,即可训练出来),则不需要对动力学机制做全面的了解。冰-反照率反馈效应是气候变化中以及海-气相互作用中的一个重要因子,当气候变暖时,雪和冰盖减少,导致地表反射率减小而使得地球表面吸收更多的太阳辐射,因而引起进一步增温。这种气-海反馈被认为对全球气候变化有重要意义。但至今这一机制未得到任何科学的验证。朱伯承等通过模拟研究证明,在一个没有冰-反照率反馈效应的模式中,极地将会显著增温,使赤-极温差减小,大气中的输送过程及活动中心也随之减弱。

5 淡水通量

Nystuen 利用水下声谱分析法研究洋面上的波破碎和降水,得到三个月的降水资料,由此去研究降水对海洋表面特征的影响。发现在和风细雨持续阶段,1 米深海水盐度出现大的异常;而在大雨强风的场合,由于较强的混合过程,使表层海水盐度变化不大。海洋中盐度变化对动力学的影响一直为许多研究者所关注,越来越多的证据表明,为了更好地了解海洋上层结构,盐度效应是绝不可忽视的。杨崧和刘家铭等利用海洋环流模式研究降水等对热带太平洋上层海洋结构的影响。发现 1983 年降水增加使热带太平洋东中部的 SST 明显增大,另使西太平洋 SST 有中等程度的增加。但整个太平洋东中部的季平均 SST 增加了大约 0.5°C ,这一数值大约是 El Nino 时期实测的 SST 距平的 10%—20%(因为此 SST 距平主要受风应力作用的影响)。而在 1985 年的 La Nino 时段,太平洋东中部出现了降水负距平,使 SST 减少(约 1°C),但

与 1983 年相比,该降水负距平要小,但引起的 SST 距平却比 1983 年大,这说明海洋对降水距平的响应是非线性的。Gronin 和 McPhaden 利用 TOGA-COARE 资料研究西太平洋暖-淡水池表层海洋的热量和淡水平衡,发现海洋中的混合过程总是对表面热通量和淡水通量起补偿作用,因此,水平平流对表层盐度的变化起着控制的作用。

6 季风

Zhen Huang 等分析了过去 100 年美国西南部季风的多年际变化,发现存在 40—50 年周期的干旱循环,季风环流也存在 40—50 年循环,但领先于降水 5 年。随着全球变暖,季风长期变化的频率加快,与印度季风相似。Gutzler 研究了美国西南部降水的变化与热带太平洋 SST 的关系,指出夏季北美降水变化与 ENSO 的关系并不明显,而冬季的 SST 变化对下一个夏天的降水却有直接影响,北美陆面通过异常雪盖对随后的陆面增温的影响,“记忆”了异常的冬/春降水。本研究虽未能弄清楚陆面对夏季气候可预报性的影响,但却证实了冬季 SST 与夏季降水这种滞后相关明显地强于 SST 与降水的同季节(夏季)相关。Higgins 等则分析了北美季风爆发的年际变化。他使用 AZNM(亚利桑那/新墨西哥)、NWMEX(墨西哥西北部)及 SWMEX(墨西哥西南部)日降水指数来确定各年夏季季风爆发日期,发现各区的季风爆发日期基本上彼此无关,且季降水量的变化也与爆发日期早晚无太大关系。Mo 等试图寻找美国西南部季风前期冬季加州及东太平洋 SST 异常的预报征兆。发现,对于一个 7—9 月湿西南季风来说,加利福尼亚 1—3 月季平均降水趋于稀少,而 SST 距平的综合分析表明,有一正的 SST 距平从太平洋中部向东北方向延伸至美国西海岸,另一正距平从太平洋东部穿过中美延伸至大西洋;负距平则从太平洋西部延伸至太平洋北部,另一个负距平覆盖了整个墨西哥湾。而干的西南季风的情况刚好相反。Gouley 利用 GOES 红外卫星云图资料等分析了夏季墨西哥上空深对流云的变化。发现具有日变化的中尺度环流如海-陆风和山-谷风在产生和维持一个持续性深厚对流区的过程中起了重要的作用。而 Swanson Jr. 等则通过对东太平洋地区进行有限区域模拟试验去研究墨西哥季风的物理机制和水汽源。

Inoue 等通过分析 NOAA 极轨卫星、AVHRR 资料研究印度季风期间阿拉伯海的海-气相互作用,发现后者对前者有重要影响;印度南部雨量与阿拉伯海的水汽量和风速关系很好。

7 暖池动力学

利用 TOGA COARE IOP 资料,Johnson 等分析了西太平洋暖池混合层的日变化,发现层顶高度 Z_i 为 $515 \pm 155\text{m}$,且正如所预期的那样,在晴空和微风条件下,混合层最厚且其日变化也最大, Z_i 的变化范围为 470m (夜间)至 640m (午后);而在 ISO(季内振荡)的对流活跃期混合层最浅。 Z_i 呈现 30—60 天的低频振汇。Maes 则分析了暖池能量平衡过程中的各种物理过程并进行模拟,指出在长时间尺度上,暖池从大气得到的能量通过扩散在斜温层顶传出;而在短时间尺度上,西风爆发(WWB)使整个能量平衡重新调整。Waliser 等利用耦合和非耦合的模式研究低频振荡特征,发现在耦合场合,MJO 的功率谱增长 40%,振幅增大,更有组织性,在东太平洋移速减慢近半等,更接近实际观测。Chidong Zheng 利用 TOGA TAO 资料研究大气中的 MJO 对赤道西太平洋上部海洋热力结构和混合层收支的影响,发现其作用非常重要。指出只考虑表面热通量的扰动并不能解释热带 SST 的变化。Aidong Chen 等和 Iacobellis 等则

用单气柱模式(SCM)分别研究了 TOGA-COARE 区域的海气相互作用及对云参数化进行评估。在西风爆发期间, SST 逐渐减小且有小的日变化,而在西风爆发后 SST 的日变化变大。西风爆发前海洋混合层的厚度为 10—15 米,在强西风爆发期间可厚达 60—70 米。西风爆发使斜温层变厚,使混合层变冷,降水增加的海洋淡水向下混合可达 30 米之深。Iacobellis 的研究结果表明,使用 Tiedtke 云方案的试验产生的积云比使用 Slingo 云方案的试验产生的积云要薄,而对流云的情况则相反。Yanping He 等利用 TOGA TAO 的资料研究了表面潜热通量和 SST 及风速的关系。在风速较小情况下,潜热通量受到了风速和海-气温差和湿度差的影响,就平均而言,在风速 < 6.5 米/秒、 6.5 米/秒 $<$ 风速 < 10.5 米/秒及风速 > 10.5 米/秒情况下,潜热随风速增加的速率分别为 13、19 和 $27\text{W}/\text{m}^2$ 。当海表温度 $< 28.3^\circ\text{C}$ 时,潜热通量随温度增加的速率为 $10\text{W}/\text{m}^2$,而当海表温度 $> 28.3^\circ\text{C}$ 时,潜热则随温度减少。曾旭斌则利用不同观测资料比较了计算总体动力学通量的 6 种不同方案。指出在风速很小和很大时,其结果差异较大,主要因为各方案中使用的计算粗糙度长度的方程不同,且在风速很小时湍流方案中对自由对流的处理也不同,另外还忽略了盐度对海表饱和比湿的影响。

后语: 本文根据美国气象学会所组织的“第九届海-气相互作用会议”(Ninth Conference on Air-Sea Interaction)之摘要文集整理而成,以供我国学者参考。由于参考文献太多,在此一概略去。有兴趣者可到中国气象科学研究院情报所查阅原文。

美国全球变化研究的现状与未来

罗 勇

(国家气候中心)

提 要

美国的全球变化研究主要由美国全球变化研究计划(USGCRP)支持,重点资助季节—年际尺度气候变率,十年—百年尺度的气候变化,臭氧、UV 辐射以及大气化学的变化,土地利用以及陆地、海洋生态系统的变化等四个领域。当前,水汽与云仍是全球变化研究中不确定性较大的一个方面,因而受到关注。关于气候变化的信号检测以及成因分析也是一个研究热点。气候模拟研究是全球变化研究的一个主要方法。卫星资料在全球变化研究中的应用取得了大量成果。近期美国在全球变化研究领域的重点是气候模拟,短期气候预测,十年—百年尺度的气候变化,臭氧、UV 辐射以及大气化学的变化,地表以及陆地、海洋生态系统变化,对全球变化的区域尺度估计,卫星资料的应用,气候变化影响的国家级评估等 8 个方面。

关键词: 美国, 全球变化, 研究现状, 发展方向

在美国气象学会第 78 届年会期间,举行了有关全球变化研究和气候预报现状及前景的第九次科学讨论会,反映出当前在这个领域中取得的显著成果。本文主要根据该科学讨论会的论文集等写成。

1 美国全球变化研究计划

美国的全球变化研究主要由 USGCRP(美国全球变化研究计划)资助。该计划设立于 1989 年,并于次年作为优先项目开始实施。其目的是:1) 提出地球系统变化的主要不确定性,包括自然的和人为的变化;2) 监测、认识和预报全球变化;3) 为国内、国际有关全球变化问题的决策提供坚实的科学基础。美国国家科学技术委员会(NSTC)下属的一个机构—环境和自然资源委员会(CENR)中的部门间全球变化研究分委员会(SGCR)负责对该计划进行指导,并负责组织实施。几年来,该计划致力于加强主要科学问题的研究,并在地球系统内部的过程和相互作用方面取得了显著的进展。由该计划资助的研究成果在世界范围的科学评估中起了重要作用,包括对气候变化和平流层臭氧减少的评估。近年来 USGCRP 的重点资助领域为以下四个方面。

1.1 季节—年际尺度的气候变率

该研究领域的目的是认识短期气候振荡的预报技巧和可预报性,并用于解决美国国内和国际上与社会和经济发展有关的问题。

1.1.1 厄尔尼诺事件预报的进展

许多基于数值模式的预报方法成功地预报出 1991—1995 年厄尔尼诺事件的结束和 1996 年赤道东太平洋 SST 冷位相的开始。赤道东太平洋海温的这一变化造成美国西南地区的干旱和美国西部地区冬季的强降水。目前在大多数情况下可以提前一年制作出年际气候振荡的预报。另外,已经开始在更长的时间尺度上研究厄尔尼诺的演变过程,以确定为什么 90 年代发生的厄尔尼诺事件会持续多年,而 70 和 80 年代的厄尔尼诺事件大多只持续一年。为了提高厄尔尼诺事件的可预报性,目前正在努力发展更复杂的数值模式,以便全面地反映海气相互作用过程,以及大气与陆地表面、植被和水文过程之间的相互作用。作为热带海洋—全球大气(TOGA)计划的一部分,在热带太平洋上布设的观测阵对厄尔尼诺事件预报技巧的提高起了重要作用。目前由卫星遥感资料获得的海面高度资料和海表风应力资料也被应用于厄尔尼诺事件的预报。上述实时观测的进展使得我们对于海洋条件变化的认识扩展到整个热带太平洋地区和更高的纬度,为提高厄尔尼诺事件的预报提供了基础。

1.1.2 全球降水分布型

由于降水会影响水资源管理、农业以及旱涝的发生,因而是与社会经济有关的重要气候变量之一。进行降水预报的前提是准确地认识全球降水的分布型以及分析降水同其它气候变量的关系。季节—年际尺度气候预报是否成功的一个标志就是降水量和降水落区预报能力的提高。USGCRP 继续综合现场观测和卫星资料制作出更好的全球降水分布型。由美国和日本合作,1997 年发射的 TRMM(热带降水观测计划)卫星将提供南北纬 35°之间整个地区高质量的降水遥感观测资料。这一资料也是进一步认识厄尔尼诺与降水的关系,以及热带的其它变化如何影响全球大气环流,如何在中高纬地区产生气候异常的基础。

1.1.3 北美的气候变率

GEWEX 的大陆尺度国际计划(GCIP)正在进行 5 年(1995 年 10 月—2000 年 9 月)的加强观测期。GCIP 正在收集外场观测资料和模式输出,这些资料将被用于发展改进区域大气模式、区域水文模式和区域陆气耦合模式。在未来的 2 年内,GCIP 的研究将集中在以下 3 个方面:1)改进气候模式中陆面过程格式在冷季的代表性;2)加强对暖季密西西比河流域降水型与更大尺度的外部过程联系的研究;3)加强与水文管理部门的联系,将改进的降水和土壤湿度预报应用于水文方面。一个泛美气候研究特殊计划(PACS)也已经开始,其主要目的是进一步认识北美季风发展和撤退中的关键过程。北美季风的进退是中美洲、墨西哥和美国西南部地区在季节和年际尺度上的重要事件。GCIP 和 PACS 的一个共同的目的是研究北美地区夏季降水的年际变率的可预报性有多大。

1.1.4 经改进的厄尔尼诺预报的应用

专门从事气候预报的国际研究院(IRI)已于 1996 年开始建立,目前正在采取措施争取国际支持,以发展研究中心的国际性网络,并开展预报信息的应用研究。IRI 的目标是:

- 1) 利用全球和区域的海—陆—气耦合模式进行季节—年际尺度的气候预报,并发布试验性预报结果;
- 2) 为受到与厄尔尼诺有关气候变率影响的国家和地区提供预报指导;
- 3) 根据一些地区的特殊条件和需求制作全球和区域性的预报。

IRI 正在研究如何在不同经济部门的管理和决策中应用改进后的预报结果。例如,已经发展了在美国西北太平洋地区的大马哈鱼产业管理中分析应用厄尔尼诺预报的方法。通过全面考虑与物理、生物、经济和管理有关的各个方面,可以提供如何在可能的厄尔尼诺影响下进行更为有效渔业管理的策略。USGCRP 的另一项研究分析了如何在全国的农业部门应用经改进的气候预报,以及如何确定可能的作物产量并减小成本。对气候变量与农作物病虫害发生和传播的关系也进行了研究。

1.2 十年—百年尺度的气候变化

预测人口、能源利用、土地利用以及其它自然和人为因素的变化,为社会提供了解这些变化所需的科学信息,以达到认识、预报和评估这些变化的目的。

1.2.1 气候变化的过程

温室气体排放的继续增加不可避免地造成大气中温室气体浓度的继续增加。要想停止大气中二氧化碳浓度的增加,需要下个世纪显著减小二氧化碳的排放。有关碳循环的研究目的是确定大气中二氧化碳和其它温室气体浓度的变化率和程度。作为一个例子,研究表明森林吸收了大约三分之一的二氧化碳排放,特别是在森林可再生的地区,如北半球的中纬度。但是,目前尚不清楚森林的这种吸收作用能够持续多久。目前的研究,包括云上和云下的同时观测试图给出有关在有云的天空中太阳辐射吸收的统一的理论解释。不同反馈机制之间的耦合过程也被重新重视起来。例如,计划在高纬度进行一些观测试验,研究当温度升高时,低空层状云的形成会在多大程度上调节极区海冰的变薄和融化。制定这一观测计划的原因是由于极区的气候变化在决定深海环流的强度方面起着极其重要的作用,而深海环流的强度变化会反过来显著影响中纬度地区(包括北美和欧洲地区)的气候。

1.2.2 气候变化的预报模式

过去的气候变化的研究对确定由模式预报的气候变化的可信程度非常重要。所有关于地质时期气候变化的模式模拟结果均表明,气候系统对各种外部强迫相当敏感。气候模式能够模拟出在上个冰期的冰川极大值时(大约2万年前),热带陆地上的显著低温。最近的古气候研究结果与这些模式的结果相当一致。目前的计算机模式有了相当大的改进,可以用来进行全球气候的模拟研究,并用来预报未来的气候变化。最近一个新的高分辨率的海洋模式首次成功地进行了北冰洋的海洋环流的数值模拟。这一区域海洋模式和相应的全球海洋模式正在与美国国家大气研究中心(NCAR)的高分辨率大气模式进行耦合。该耦合模式包含了更加完整的气候强迫效应,将对模拟最近的气候变化和预报下个世纪的气候变化起到重要作用。

1.2.3 气候变化的影响评估

新的海洋模式还可以用来对全球变暖所引起的可能的海平面上升作进一步评估。研究表明,海平面的上升将对沿岸地区的社会经济产生显著的影响。海平面上升将使由台风引起的风暴潮的影响更加严重。改进的植被模式可以用来进行对植被、土壤湿度和径流变化的评估,以及长期气候变化影响的进一步研究。正在发展中的综合气候评估模式将改进这些模式模拟气候变化对社会影响的能力。一个非常重要的问题是如何模拟全球气候变化对区域尺度的影响,以及如何模拟对不同自然资源和经济部门,包括对公共健康的影响。一项对气候变化社会影响的国际性评估即将完成,将为社会提供对气候变化重要性的新认识。

1.3 臭氧、UV 辐射以及大气化学的变化

该领域的目的是认识和刻画全球大气化学变化的特征及其对人类的影响。

1.3.1 大气中使臭氧减少的化学物质的变化趋势

大气平流层氯化物和氟化物浓度的卫星监测证实,观测到的平流层使臭氧减少的氯化物浓度显著增加的原因是人类活动排放的氯氟化碳(CFC)和氢氯氟化碳(HCFC)。这些观测结果对全面了解平流层氯化物的源非常重要。观测结果否定了平流层氯化物的增加可能源于自然源的假设。如果与最近对流层氯化物的累积首次出现下降的观测事实联系起来,上述观测进一步加强了这一结论,即国际社会在蒙特利尔协定中终止 CFC 排放的决定将会随时间逐渐使平流层的臭氧层得到恢复。

1.3.2 与气候变化有关的臭氧减少

数值模拟研究表明,观测到的最近 10 年以来发生在平流层低层的冷却现象的纬向分布型与平流层低层的臭氧减少是一致的。由于臭氧减少与人类活动引起的卤碳化物排放有关,因而臭氧的减少以及全球大气平流层低层温度的变化事实就成为政府间气候变化专门委员会 1995 年科学评估报告所指出的“可识别的人类活动对全球气候影响”的主要内容之一。在过去的十年中,由于臭氧减少引起的大气平流层低层冷却的程度明显超过了工业革命以来由其它温室气体排放所引起的辐射冷却。臭氧减少引起的冷却作用部分抵消减小了由温室效应引起的全球对流层的增暖。预计在未来的十年中臭氧层将得到恢复,因而其冷却作用将逐渐消失,温室气体的增暖效应很可能将明显增强。

1.3.3 地表 UV 辐射的观测

由卫星上的总臭氧映射光谱仪(TOMS)观测到的全球臭氧减少,以及观测到的云和气溶胶的变化,可以用来测算地表紫外(UV-B)辐射的增加。1979—1992 年期间南北半球纬度高于 40°地区的地表 UV 辐射显著增加,通过了统计显著性检验。地表 UV 辐射增加最大的季节是高纬度的冬季和春季。例如据测算在过去的 20 年中,在春季的 45°N 地区可造成 DNA 损伤和红皮病的辐射量每十年分别增加了 8.6%和 5.1%。在人口分布非常密集的 55°N 地区辐射量的增加更大,全年平均分别达到了每十年增加 6.8%和 4.3%。这些观测结果定量地给出了平流层臭氧减少所引起的地表 UV 辐射的增加量,使人们进一步认识到蒙特利尔协定要求采取保护臭氧层措施的重要性。

1.3.4 UV 辐射对人类健康的影响

由于 UV 辐射是人类的一个致癌因素,研究主要集中在 UV 辐射是如何诱发或加重癌症的。最近的研究证据表明,有一种特别的基因可以防止最常见的皮肤癌(基底细胞癌)的发生,这种基因的损伤会导致皮肤癌。UV 辐射可以导致这种基因发生突变,现已发现这种突变会加重基底细胞癌的病情。其它一些研究成果可以用来解释为什么不同肤色的人患皮肤癌的危险性不同。

1.4 土地利用以及陆地、海洋生态系统的变化

目的是为认识、预报和评估由人为和自然影响产生的陆地和海洋生态系统变化的原因及后果提供更有力的科学基础及对策。

1.4.1 陆地生态系统与碳循环

对大气中氧的浓度和二氧化碳的 ^{13}C 与 ^{12}C 比率变化的观测和分析支持了这样一种假设,即90年代北半球中纬度的陆地生态系统是重要的“碳汇”,吸收了大约三分之一的化石燃料燃烧所排放出的碳。如果没有这样一个“碳汇”,大气中碳的积累会更高。目前正在进行的周期观测将能够提高对年际气候变率如何影响陆地生态系统和大气之间碳交换的认识。陆地生态系统模式是更大尺度的地球系统模式的重要组成部分之一,而上述观测的结果可以用来发展并检验基于过程的生态系统模式。这些模式是全球变化科学和评估的主要研究工具。利用Landsat卫星产品制作出的新的陆地覆盖资料,包括南美洲、东南亚以及美国大陆等地区,可以使人们进一步了解这些地区森林砍伐的速度,以及与森林消失所产生的地气之间碳通量的变化。美国大陆的地表覆盖资料有1公里的分辨率,可以为资源管理的区域尺度规划提供重要信息。

1.4.2 生态系统对大气二氧化碳增加的响应

随着化石燃料的继续使用,至少在下个世纪中大气二氧化碳的浓度将会继续明显上升。长期以来,人们利用温室、上开式实验箱和其它一些精密控制的二氧化碳增加的环境条件进行了大量的二氧化碳增加的实验研究,现已清楚地认识了在高二氧化碳浓度的大气中固碳过程的生理学响应。但是相对来说,目前仍然缺乏整个生态系统如何对二氧化碳增加进行响应的资料。最近一个外场试验网已经建立起来,可以用来测算在预期的未来十年大气二氧化碳浓度增加条件下陆地植物和生态系统的响应。从作物和森林试验初步得到的资料显示,当植物生长在增加的二氧化碳浓度的环境中,多年生植物的生态系统将会增加净的碳吸收。这些外场试验将长期进行,可以为加深对未来由化石燃料燃烧所造成碳排放后果的认识提供科学基础。另一个用来进行二氧化碳吸收和释放试验的测站网将要扩展为包括更具代表性的自然生态系统和不同的土地利用和陆地覆盖类型。扩展后的观测网将与过程研究以及气候和人为因子对陆地系统影响的研究相协调。该研究可以加深对控制植物和土壤净的碳吸收过程的科学认识,并提高对未来大气二氧化碳浓度的预报准确性,还能够为制定稳定大气二氧化碳浓度所应采取的必要措施提供科学基础。

1.4.3 气候变化对陆地生态系统的影响

大尺度生态系统的模拟研究已经取得了重大进展。模式可以模拟出气候变化以及大气成份变化的生态学响应,包括气候变化所引起的陆地植物群的分布变化。研究结果表明全球变暖和气候变率的增大均可以增加山地的火险。在过去的400年中,科罗拉多州洛基山地区火灾的次数与气候变率的关系及其密切。全球变暖的一个预期后果是海平面升高。在过去的50年中,美国东南部沿海地区湿地的减小呈加速的趋势。目前正进一步研究海平面的持续上升所带来的湿地生态系统的综合变化。

1.4.4 海洋生态系统

最近对热带太平洋的研究指出,在近海相对丰富的铁对海盆中部海洋生物的初级生产力的营养作用可能非常有限。通过一系列外场试验,科学家们发现由于浮游生物的大量繁殖,相应地降低了其它过营养物质。这些结果表明需要加强对世界海洋中初级生产力、碳循环以及海洋—气候响应的控制因子的研究。