

近 5 年大气科学外场试验 及其重要成果

胡 英 贾朋群 高良成

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

提 要

回顾了近 5 年欧美等国实施的 4 次外场试验, 这些试验大都针对灾害性天气, 例如暴雨、洪水和强风等的预报问题而设计。外场试验期间, 建立了“目标观测”的概念并在试验中进行了实际应用。来自不同观测平台具有高时间和空间分辨率的传感器给出了大量大气运动实况的详细记录, 对其中包含的, 或许我们目前还不能完全理解的大气运动规律的认识, 是改进预报的重要途径。这些外场试验所收集的所有资料, 几乎都可通过 Internet 得到。

关键词: 外场试验 目标观测 天气预报

引 言

大气科学是典型的试验科学。由于复杂的大气圈层是大气科学的主要研究对象, 所以, 注定有相当多的研究者从事观测研究。近代大气科学的发展, 虽然已使许多研究和业务工作移至高性能计算机, 并且进行了许多重要的数值试验, 但是各种类型的大气科学外场试验从来也没有停止过, 其不可替代的重要意义也从来没有被忽视过, 这是因为:

(1) 由于大气科学研究对象的复杂性, 现代大气科学几十年的发展, 并没有能够全面和详细地描述所有天气和气候现象, 尤其是发生在大气层中的中尺度和微尺度物理过程, 而认识和掌握这些过程的规律是进行准确的天气预报的重要前提;

(2) 许多重要的大气科学现象和事件没能及时进行观测研究, 有很多情况或者是由于该现象或事件涉及的时空范围太大, 常规观测网无法进行很好的记录, 或者是由于已有的气象观测仪器还无法捕捉到这类现象或事件的主要特征。而外场试验是了解资料贫乏地区大气运动规律和检验新型探测仪器的

有效方法;

(3) 在数值模式逐渐成为天气和气候预报的主要工具的情况下, 数值模式性能的重要改进, 越来越依赖于对利用较常规气象观测网更为详细的外场观测事实所揭示出的物理机制的新认识。目标观测与模式同化系统相辅相成, 有望成为新世纪数值天气预报准确率再上一个台阶的有效途径;

(4) 以卫星、雷达和廓线仪为代表的先进大气探测设备, 也需要在试验中通过对比, 进一步认识其优、缺点, 提出合理的同化方案和新的观测方案, 使新的仪器观测信息科学地进入数值预报系统。

90 年代后期以来, 以天气学研究为目的的大气科学试验表明, 从试验的科学意义来看, 针对预报问题, 尤其是针对可引起各种灾害的气象事件的预报问题的试验增多; 而从试验的规模来看, 由 WMO 和(或)多个学术组织发起, 尤其是多国科学家共同参与的大规模试验数量增加。另外, 试验中大量先进探测设备和常规观测网站资料一起, 共同形成全方位、多观测平台的立体观测, 揭示出大量

的大气运动规律,一些新概念也在试验中产生。由 WMO 主持的持续时间较长的外场试验,我们将另文评述,本文集中描述近 5 年来由各国学术机构组织的几次重要的天气学研究外场试验。

1 1995 年以来的重要天气学外场试验

1.1 FASTEX——锋和大西洋风暴路径试验

中纬度气旋是气象学教科书中提及最多的天气系统,也是现代天气学的主要分析对象之一。影响欧洲和北美洲的中纬度气旋由于位于北半球西风带,分别在大西洋和太平洋上形成和发展,聚集了来自洋面的大量能量和水分,并向东移动。在欧洲大陆和北美洲西海岸登陆时,往往形成大量的降水和风暴。虽然给欧洲和北美带来丰沛的降水,但同时也会因强降水造成洪涝而导致人员和财产损失。锋和大西洋风暴路径试验以及下面介绍的加州登陆急流试验等便是针对这类天气过程而设计,同时特别强调了沿海地形与气旋和锋面等系统的相互作用及对常规预报方法的影响。

FASTEX 始于 1993 年法-英的一项大气合作项目^[1],到 1997 年 1~2 月进行外场试验时,已有加拿大、丹麦、法国、爱尔兰、冰岛、葡萄牙、西班牙、美国、英国等 11 个国家的人员及欧盟等单位参加了观测。FASTEX 试验瞄准影响欧洲的北大西洋中纬度气旋,观测区域覆盖了整个大西洋。试验的重点着眼于气旋生成理论、可预报性、中尺度云系统和海-气相互作用等问题。例如,通过试验,找到远海地区气旋系统的“放大器”机制,飞机的频繁远海穿越观测和船只随系统移动观测较好地完成了这项任务。气旋作为单体和整体与大尺度环流和气候系统相互作用,整体作用的结果还形成了大尺度气旋带特征,即气旋大致按照相似的路径运动,在大西洋上“铸造”了一条“风暴路径”。FASTEX 进行了

19 次加密观测和 6 次稀疏观测共计 25 个样例。试验中机载 Doppler 雷达捕获到约 10 次成熟和发展中的云系统。下投式探空仪也在约 10 次成熟和发展中的云系统中成功取样观测。在大约一半的个例里,得到了至今为止实地观测中最细致的系统结构观测结果。由于许多观测是在气旋发生、发展的关键时期和贯穿整个气旋生命期,所以观测结果会对现代气旋理论中处于重要地位的气旋生命期研究作出重要贡献。

1.2 CALJET——加州登陆急流试验

当温带气旋从太平洋移到美国本土时,沿海山地地形的抬升、对低空风的阻挡、地表加热和摩擦作用的变化等因素,在气旋导致的中尺度降水强度、分布方面起着至关重要的作用。为了弄清这一作用的细节,1993 和 1995 年美国科学家在西北太平洋沿海成功地进行了名为 COAST(沿海观测和地形模拟)的外场试验,并基于试验数据进行了理论和模拟研究^[2]。

1998 年 1~3 月,美国再次实施了 CALJET^[3]。CALJET 的主要目标是:更好地了解沿海复杂山区导致暴雨和狂风的物理过程,为将来针对从资料匮乏的太平洋东部移来的冬季风暴登陆美国西海岸产生暴雨的短期(24 小时以内)定量预报和大风预报设计观测系统。重点放在低空急流和在移动的冷锋前海域发生的海-气相互作用。这次试验由 NOAA 的环境技术试验室主持,NOAA 的多家单位和天气局、美国空军和海军及大学都拿出最好的仪器设备参与观测和研究。

1.3 NORPEX-98——北太平洋试验 98

1998 年 1 月 14 日~2 月 27 日,几乎与 CALJET 同时实施了 NORPEX-98^[4]。虽然在组织方式和试验目的等方面与 CALJET 相比给人如出一辙的感觉,但前者针对的预报问题的时间尺度是 1~4 天而不是 0~

24h。所以 NORPEX-98 的观测范围更大些。另外,一些设计和实施 NORPEX-98 的美国科学家也在一年前参加了 FASTEX 试验,在那次试验中被首次实时开展的目标观测的概念在 NORPEX-98 中被发扬光大,成为试验中重点研究的问题之一(见下节详述)。

1.4 MAP—中尺度阿尔卑斯计划

欧洲大陆大西洋沿海复杂地形对各种尺度的大气环流有重要影响,欧洲一些阿尔卑斯国家在 1981~1982 年实施了以大气环流和各种天气系统(最小尺度为中- α)为研究重点的阿尔卑斯试验(ALPEX),随后又进行了研究阿尔卑斯山脉对锋面影响的 1987 年锋面试验(The Front Experiment 1987);1990 年秋天又在与阿尔卑斯邻近但地形较为简单的比利牛斯山进行了以动量收支和区域风系统为研究重点的比利牛斯试验(PYREX)。

1994 年 9 月 12~14 日在瑞士苏黎世召开了首次 MAP 研讨会,来自奥地利、克罗地亚、法国、德国、英国、匈牙利、意大利、斯洛文尼亚、西班牙、瑞士和美国等 13 个国家的机构代表和科学家在会上制定了 MAP 的科学目标:即重点研究受地形影响的各种湿过程和地形引起重力波和焚风,还要对高分辨率数值天气预报模式的可用性进行认证并改进数据,同时建立阿尔卑斯地区中尺度天气系统的气候学并在参与国之间加强非 GTS 数据的采集和交换。

MAP 外场试验进行之前,组织者花费 3 年时间,进行了大量的准备工作。在数值试验方面,MAP 数值试验的任务是,对阿尔卑斯地区强降水过程和地形引起的气流模式的预报技能和局限进行系统性评估;同时改进中尺度资料同化方法,重点是湿度和水汽变量的同化,并考虑应用非 GTS 资料及新观测系统(如雷达、风廓线仪等)的资料,同时协助设计外场试验,特别是确定出高密度观测网的具体区域。此外,还进行了水文学模式的开发

和研制,为了安排外场试验的实施细节,进行了气候学调研,其结果用于确定特殊观测时段(SOP)的位置、时间及长度。对于常规的观测站网来说,对象重力波破碎及切变线这样的一些中尺度特性进行观测是很困难的。在进行外场试验之前,应用数值模拟方法确定出阿尔卑斯区域最易出现这些现象的地点以利于风廓线仪或其它遥感系统的安装。还有一项不可或缺的工作就是提高业务预报员的水平,所有阿尔卑斯国家的业务预报员都参加了 MAP 工作组,成为 MAP 有关课题的专家,他们将与 MAP 研究科学家共同工作以利相互取长补短。

MAP 的外场试验较原计划的 1998 年 8 月 15 日至 1999 年 11 月 15 日推迟了一年进行,SOP 从 1999 年 9 月 7 日开始到 11 月 15 日结束,历时 70 天。

而在 SOP 期间,常规观测站网的密度增加,观测的重点是对流、重力波和焚风。为实现此目的 SOP 又分为两个小时段,即阿尔卑斯北部和中部的深厚对流的观测和焚风过程以及阿尔卑斯南侧的强对流和上坡降水过程的观测。由于前期研究准备工作十分充分,选定的目标区和实施时段都非常恰当,加上现场安排和协调也很合理。因此,SOP 及其嵌在其中的 17 个加强观测时段(IOP)进行得十分顺利和成功。

2 试验仪器和设备

外场试验的成功与否在很大的程度上决定于投入观测的仪器设备,尤其是为试验设计的特种观测仪器设备的性能和规模。大规模的外场试验更是各种先进仪器和观测手段及理念大展示的舞台,应该说先进国家在试验中应用的新仪器设备,一般能在经过试验的考核和效果显著性的验证后,很快成熟,其中相当一部分会在不久的将来进入业务观测体系。

本文介绍的 4 次试验,有 3 次的观测区

域涉及海洋和陆地,参与国的有关研究机构结合常规观测站网,共同组成全方位、多种观测平台的海上和陆上观测体系。以观测仪器使用种类较多的 CALJET 为例,美、加两国近 10 个科研和业务机构参与的这次试验,在沿海区域投入的观测设备和进行的观测项目有:

NOAA P-3 飞机:持续作业时间为 9~10 小时,观测范围 3700~5700km,飞行速度 $110\sim 145\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。飞机上装有 3cm 双 Doppler 雷达,用于观测地表风的 C-SCAT, GPS 下投式探空仪和实地阵风探头等。

浮标站:由美国国家天气局(NWS)部署了 30 个有效探测时限为 270 天的浮标站。

RASS(radio acoustic sounding system, 无线电声学探测系统)风廓线仪:设在 Catalina 岛,由 NOAA 环境技术实验室提供,频率为 915MHz;可对边界层内 0.3~3km 的风和 0.3~1km 的虚温廓线进行连续观测。

AXBT(airborne expendable bathythermograph,空投不回收式温度深度测量仪):给出海表面温度及随深度的变化。

在沿岸陆地上配备的特种仪器有:

可移动雷达:Oklahoma 大学车载 3cm Doppler 雷达两部,沿海岸观测,对 50km 范围内呈双 Doppler 雷达覆盖。

NOAA/ETL 降水雷达:垂直指向 3cm 雷达,有低和高敏感性两种模式,专门用于对雨区的追踪探测。

RASS 风廓线仪和地面仪器(包括翻斗式雨量站):在多达 16 个地点安装,其中 4 处属空气质量监测网,1 处为国家廓线网(频率为 449MHz),其他 11 处是 ETL(10 处)和美国海军(1 处)专门为此次试验安装。

另外,所有试验,都充分利用了卫星观测资料,包括 ERS-2、NOAA-12、NOAA-14 和 DMSP F10 至 F13 极轨卫星,GOES-8、Meteosat 地球静止卫星等。这些卫星资料不仅能得到云系分析、水汽含量等要素,还能得到风场资料。在 NORPEX 其间,Wisconsin

大学气象卫星研究合作研究所与 NOAA/NESDIS 合作,提供整个北太平洋每 6 小时的风场卫星反演资料,成为实施目标观测的重要基础。

3 试验取得的重要成果

外场试验一般都归属于某一个科研项目,所以一次外场试验能否顺利进行,往往是项目能否达到预期目的的重要前提。而围绕试验取得资料的分析研究工作则会贯穿项目始终,甚至会延续到后续项目或结合其他课题的研究展开。

3.1 目标观测及其重要作用

目标观测(Targeted Observation, 也称适应观测 adaptive observation),在多次试验中被成功应用并逐步完善,有望逐步业务化。目标观测的概念不同科学家给出的定义略有不同,但基本思想完全一致。实际上,目标观测的目的,就是确定分析误差能够快速增加的区域并在该区域实施观测。FASTEX 是第一个包括了目标观测可行性实时验证的外场试验项目,共在 20 个个例中实施了目标观测试验。虽然在对预报评分的检验中,加入目标数据使预报技巧得分有的上升,也有下降,但个例研究表明,当系统的可预报性很低时,目标观测的有效性较为明显^[5]。在随后进行的 NORPEX 试验中,目标观测又得到了加强。由于针对海上气旋登陆这一天气现象的目标观测是在海上完成的,观测方式以飞机空投下投式探空仪和卫星反演风场资料为主。另外位于太平洋的 NORPEX 目标区域也远大于位于大西洋的 FASTEX 目标区域。NORPEX 的目标观测大约用掉 700 个 GPS 下投式探空仪,飞行时间约 365 小时。

针对 FASTEX 的 20 个锋和气旋个例的研究表明^[5],仅有一个个例在开始阶段的预报误差就很大,但没有再扩大,而其它个例开始预报误差较小,后来被放大。目标观测的结果可以有效地用于不让开始较小的预报误差被放大或使放大的幅度减小。加入目标观测资料,总体误差减少了 10%,这在短期数值

天气预报中,是一个相当不错的成绩。

3.2 对大气科学经验公式的修正

这方面的进展包括了卫星和雷达资料反演,边界层过程研究和云微物理过程研究等多个领域。例如,在通过雷达反射率反演降水强度时,大多依据马歇尔-帕尔默雨滴谱分布($E=200R^{1.6}$)。在 CALJET 试验期间,捕捉到一次过程降水量达 200~250mm,并导致了飓风和巨浪的登陆风暴过程。对本次降水过程进行加密观测的 S-波段雷达安装的专门硬件,可以给出强降水和云区的反射率。通过绘制反射率时间-高度剖面图,并结合测站记录,能确定不同的相对稳定的降水时段,并得到这次降水过程的反射率/降水率(E-R)关系图(图略),通过分析中尺度风场信息可以确认,上坡气流在这次暴雨过程中通过增加低层小雨滴的数量使地形降水得到加强,而马歇尔-帕尔默关系低估了降水强度。

同样是在 CALJET 期间,1998 年 2 月 2 日低空急流区域内飞机探测到 4 个层次上各要素 10 分钟平均的垂直廓线。这些要素包括:虚位温(q_v)、等效位温(q_e)、风速、混合比(q)和理查逊数。海洋表面温度由 AXBT 得到,而地表潜热通量则根据地表资料和最低层数据由总体方法估计得到,廓线显示低空急流区为弱静力稳定而位势不稳定,即云底以上绝对不稳定。云底以下的大气最底层 400m 范围发生机械混合,在强风条件下,总体方法低估了潜热通量,实际值/估计值=139/75 \approx 1.8。由于总体法在边界层理论中占有重要地位,这一结果将导致特殊天气条件下,即对预报问题产生激烈挑战的恶劣天气形势下总体方法的重要修正。

3.3 大西洋和太平洋气旋变化的对比研究

本文重点介绍的四次外场试验,有三次试验的主要目标之一是研究海上气旋生成理论及其对灾害性天气产生的作用,这也是为什么这些试验动用了大量的船舶和飞机进行

探测的原因。在欧洲沿岸和北美西海岸,气旋的生成可以造成较大危害并且极易在预报中被忽视的是所谓“第二代”气旋的生成,即使气旋系统(经常是在发展晚期)上重新生成的独立气旋。在这类气旋中存在的“炸弹式”加深(“bomb-like” deepening, 24 小时地面降压 24hPa 及以上)过程更是危害巨大又让预报人员束手无策。FASTEX 和 CALJET 以及之前的 COAST 试验表明^[6],无论是在大西洋还是在太平洋,利用机载 Doppler 雷达和下投式探空仪,可以全天候地对发生在这类系统中的多尺度过程进行探测。比较在 FASTEX 和 COAST 试验(在后来的 CALJET 及 NORPEX 中也可发现)中采集到的在大西洋和太平洋“炸弹式”加深系统个例,发现它们在中尺度结构和气旋特征上有很多相似之处,如降水强度和层次,水平风的量级,垂直涡度的垂直分布和水平气压和温度梯度的量级等。而两者的不同之处也很明显,且主要由太平洋气旋独有的暖塞闭过程有关。太平洋系统云头内的上升运动更加强烈,地转和非地转过程的相长作用对气旋加深作用也更加明显。

3.4 试验数据的收集和开放

本文介绍的这几次试验,在策划阶段就明确了资料共享的原则,为了达到这一目的,每个项目都利用 INTERNET 网,介绍项目的科学意义并开放资料。FASTEX 期间,FASTEX 非常规资料通过 TEMP 报头气象报,实时进入 GTS,项目的主要参与国,如英国、法国和美国均在 INTERNET 网上制作了专题主页,介绍和发布 FASTEX 观测资料,数值分析产品。实验结束后 3 周,实验资料便在 INTERNET 上面向更大范围的研究团体公布(不仅限于 FASTEX 的参与单位)。公开的资料包括多种数据:10000 多条贯穿气旋全过程的探测数据;大量遥感资料和完整的加入了观测场信息的分析场资料。在

CALJET 的网页 <http://www7.etl.noaa.gov/programs/CALJET/index.html>, 可以得到本次试验的几乎所有数据资料, 图形或原始探测资料。在 MAP 项目的网页上 (<http://www.map.ethz.ch>), 不仅能得到各类资料, 组织者还编辑了网上刊物《The MAP newsletter》, 该刊 1995 年 11 月问世, 至今已出版 12 期, 以通讯方式交流项目的研究成果和进展。

大规模的外场试验得到的大量资料怎样面对更多的科学家和大众? 几个项目的做法代表了 21 世纪整个科学界的共识。花费了大量金钱得到的资料, 能够为更多的科学家从不同的研究角度加以利用, 肯定是放大了试验本身的意义, 更是还不能直接取得更多外场试验的发展中国家的科学家的幸事。

另外, 4 次试验还开展了多领域的研究, 例如同目标观测相适应的数值预报模式的同化系统的改进。在中尺度及微尺度研究方面, 如 FASTEX 期间开展了云系和微尺度研究, FASTEX 及 CALJET 和 NORPEX 试验全面研究了海岸的地形作用, 而 MAP 试验揭示的是在复杂山地区域, 地形对中尺度天气过程的发展和走向起至关重要的作用。限于

篇幅本文不再详述。

参考文献

- 1 Joly Alain, et al. Overview of the field phase of the Fronts and Atlantic Storm-Track Experiment (FASTEX) project. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1999, 125(561): 3131~3163.
- 2 Bond, N. A. et al. The coastal observation and simulation with topography (COAST) experiment, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1997, 78(9): 1941~1955.
- 3 Ralph F. M., et al. Blocking by Coastal Mountains in land-falling Pacific winter storms, Preprint, Third Conference on Coastal Atmospheric and Ocean Prediction and Processes, 368~373, 3~5 November 1999, New Orleans, Louisiana.
- 4 Langland R. H. et al. The North Pacific experiment (NORPEX-98): Targeted observations for improved North American weather forecasts. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1999, 80(7): 1363~1384.
- 5 Bergot, Thierry. Adaptive observation during FASTEX: A systematic survey of upstream flights. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1999, 125(561): 3271~3298.
- 6 Lemaitre Y, Protat A. and Bouniol D. Pacific and Atlantic "bomb-like" deepening in mature phase: A comparative study. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1999, 125(561): 3513~3534.

Outlines of the recent field programmes and their results for weather research

Hu Ying Jia Pengqun Gao Liangcheng

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract

Four field programmes conducted in recent 5 years were reviewed. These field experiments were selected since they were designed to address the prediction problems of severe weather systems, such as torrential rain/flooding and strong winds. The concept of targeted or adaptive observation was established and tested operationally during the field experiments. The important improvement could be expected in the disaster weather prediction as the results of these field experiment, during which advanced sensors from different platforms with high spatial and temporal resolution recorded a lot of details of the truths in atmospheric movements that may not be properly understood yet. And even more, almost all these details collected in these field programmes could be shared through Internet.

Key Words: field programme targeted observation weather forecast