进一步提高气象灾害的监测、预测和防控调度能力的前景

曾庆存

中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

E-mail: zqc@mail.iap.ac.cn

防治自然灾害是保障民生的头等大事, 而 80% 以上的自然灾害则是由气象条件直接造成或次生而成, 故也是气象业务部门和有关科学研究部门的头等大事。

翻开往史, 乃至考古以及古代传说及其神话化的表达形式, 一部东亚的有文字记载和无文字但为自然界记录下来的东亚文明史和中华民族发展史, 无不与克服天灾(大部分为气象灾害)和其后的重建和发展相关, 例如气势磅礴、感天动地的大禹治水事迹和精神, 自古至今的治理黄河水患(由气象灾害派生), 以及当今的防治江河水灾和沿海风灾, 其规模之大和动员人民之众, 都是世无与伦比的。我国人民在防治气象灾害中积累了丰富的经验。

说到防治气象灾害及其次生灾害本身, 首先就要对它发生的气象形势及可能致灾的形势监测准和预报准, 使救灾有足够的时间准备; 即使在救灾过程中, 也要不断有即时的监测和预测。第二, 必须为防灾、减灾、救灾和重建制定得出力有效的决策方案和调度措施, 以便在整个防灾救灾过程中能及时采取有效的动员、措施和行动。第三, 还要随着灾害演变和救灾效果的发展过程进行及时地了解而调整救灾方案和行动。所有这些, 都需要气象业务和科研全力以赴, 而且必须有相关的部门与其他科技研究密切配合, 方能解决, 这些也都是当代最迫切需要研究和解决的高新科技问题。

就灾害性天气-气候的监测来说, 靠常规的全球气象监测网是远不能满足要求的, 目前最重要、发展最快和比较有效的是遥感方法和技术, 尤其是天基的气象卫星遥感和地基的气象雷达遥感。而就天气和气候预测来说, 目前最重要和发展最快的是数值预测方法和技术, 即建立相应的动力学-物理学模式

曾庆存 1935 年 5 月生于广东, 1956 年北京大学物理系毕业, 1961 年在苏联科学院应用地球物理研究所获副博士(即 Ph.D)学位, 中国科学院大气物理研究所研究员。曾任中国科学院大气物理研究所所长(1984~1993); 中国科学技术协会副主席(1996~2006), 中国气象学会理事长(1998~2002)和名誉理事长(2002~)等

职务。是中国科学院院士(1980~), 世界科学院院士(1995~), 俄罗斯科学院外籍院士(1994~), 世界气候研究计划联合科学委员会委员(1993~1997)。2016 年获世界气象组织第 61 次 IMO 奖(最高奖)。致力于大气环流和地球流体动力学基础理论、数值天气和气候预测理论和方法、卫星气象遥感理论、气象灾害监测预测和防治、全球气候和环境变化和地球系统动力学模式以及地学数值模拟方法研究。

并在观测资料基础上进行求解, 做出未来时段的天气-气候预测和相应的灾害形势的预测。遥感(尤其是用卫星作遥感)和数值天气-气候预测是当今气象业务的两大重器, 而这二者又都与今日发展迅猛的超级计算(即高性能计算和通信, 以下简称“超算”)密切相关, 且不说遥感技术又与有关材料物理学的发展密切相关, 数值预测的基础是数学、力学和物理学, 而超算与计算数学和计算机科学密切相关, 因此, 在当代遥感、数值预测和超算的能力和水平就成为衡量气象部门和气象与大气科学水平的标志, 更是衡量气象灾害的监测、预测和防控调度能力和效果的主要标志。同时, 能否做好天气和气候(甚至包括相关的生态和环境)预测也成为衡量超算能力和计算机科学水平的重要标志。

在中国, 乃至在全球大多数国家, 当今对气象灾

害的监测、预测和防治的能力,与过去相比,已经有了飞跃式的进步.其原因,主要是依靠前述的遥测、数值预报、利用超算和通讯的进步^[1].由于还同时充分发挥了广大气象人员的经验和为人民服务的责任感这个巨大动力,中国的防治气象灾害工作成效尤为显著.但还有很大潜力待发挥,而且防灾减灾,灾后重建和改造更新,乃至为了人类社会可持续发展,还有更高和更新的要求,从而将有更多更新的问题需要研究^[2].另一方面,有关的科学技术的新进步新发展也必可以业务化,进一步提高人类对灾害监测、预测和防治的能力.下面谨就遥感监测、数值预测以及超算应用(包括灾害的防控调度)方面必须和可能的新发展问题进行讨论.

1 遥感监测和气象探测网

气象卫星等遥感手段是全球气象探测网的重要组成部分(<https://public.wmo.int/en/programmes/globalatmosphere-watch-programme>; <https://public.wmo.int/en/programmes/wmo-space-programme>),可补充常规气象探测网之不足,尤其是在广大的海洋上空和如沙漠等人迹难到的陆地地区.遥感还可以提供用常规手段得不到的气象资料,例如在危险地区和造成灾害的气象资料,尤应发展和提高,下面拟分几点阐述.

1.1 提高现有的全球气象卫星监测网的水平

现有的全球气象卫星监测网有极轨卫星(“太阳同步”轨道)和地球静止卫星(星下点的地理位置是固定的)两类,如中国的FY-3系列和FY-2系列.当今世界,前者由中国、欧洲、美国、俄罗斯的数颗卫星组网而成,主要提供沿轨道星下点带一定宽度范围内的温度湿度垂直分布和云量观测,后者由中国、美国、欧洲、日本等的数颗卫星组成,大体上提供了南北纬50°以内地带的云量云状观测,还可提供一“云迹风”资料,也计划提供一定范围和一定程度的温湿垂直分布的资料.世界气象组织(WMO)已就此有详细周密规划(<https://public.wmo.int/en/programmes/globalatmosphere-watch-programme>; <https://public.wmo.int/en/programmes/wmo-space-programme>),大体上可满足中短期数值预报资料每6h作全球三维资料同化(data assimilation)的需要.现有的FY-2系列即将由时空分辨率和精度都更高的FY-4系列代替,且有更多的探测功能.而未来的FY-3系列亦有很大的改进和具有

更多的探测功能.FY-2(包括FY-4)和FY-3亦已纳入全球气象卫星监测网,为世界气象监测作出重大贡献.至于遥感原理和实际应用技术问题,在文献[3,4]有系统的论述.不过,从理论和技术上说,还有新的问题需要研究解决,例如提高遥感的垂直分辨率仍是个重要但尚未解决的问题.

1.2 组建热带和低纬地区气象遥感小卫星网

热带和低纬地区可定义为40°N~40°S以内的地带.在中国乃至全球,主要的气象灾害如台风、暴雨、El Niño和南方涛动等,或直接发生或主要源于此区.目前,数值天气预报(尤其是气象灾害的预报),其时效和精度除受模式自身的局限外,主要也在于热带和低纬地区观测资料缺乏、时空分辨率低和精度不够.目前的极轨卫星和地球静止气象卫星(不妨称之为高轨或大卫星)也难于满足要求,而建立由低轨道运行于该地区的小卫星网则正好满足数值预报对资料的要求和对灾害性气象系统较精准监测的需要^[2].

这样的小卫星倾角为40°(轨道局限于40°N~40°S内),高度在500~600km间,每颗卫星只需装备一台红外或微波光谱仪(或辐射仪),用以遥感星下点及横扫一小地区的温度和湿度垂直分布和地面温度;还可有一些只装有极高分辨率仪器以观测云的精细结构.只要小卫星组成网,不难提供数值天气预报所需的气象要素观测资料时空分辨率的要求,且若用到数值预报产品与观测资料作同化的方法,则可以提供该地区四维时空几乎连续的资料.至于此地区以外,大体上由目前已有的大卫星(加改进)组成的网就够了.

小卫星网的成本比现有的大卫星网要低得多,其寿命主要取决于遥感仪器的寿命,可由中国独立也可由国际合作完成.至于小卫星组网的个数、轨道参数等都应经过数值模拟规划好.这样的小卫星网所缺的是云量观测,恰好由地球同步卫星提供.小卫星还可用以作特定的科学试验观测,例如对台风和暴雨等危险天气系统地进行深入细致的观测,测到其三度空间结构,这是迄今其他观测所难以做到的.

利用卫星按掩星法(Occultation)原理可测高层大气的臭氧垂直分布^[3,5].现已有利用小卫星和全球地理定位系统(GPS)结合并按掩星法类似的原理作对流层高层水汽垂直分布的遥感,不过其水平分辨率似乎未能满足数值预测对资料的要求.

此外,对云雨而言,其遥感的量化还有一个校准问题.为此,需要再有一个测雨卫星(这已列入FY-3的未来计划之中了),将其测得的雨量和由小(及大)卫星非直接测得而是由水汽分布等推得的雨量相校准,而测雨卫星测得的雨量则可通过个别地面测雨站(校准的)实测的作标度.

1.3 探索和研制能分辨云水微物理结构的雷达

雷达号称是监测危险天气的眼睛,它能在100~200 km内探测到带来雷雨和暴雨的天气系统.现代的双偏振多普勒雷达^[6]比以前的雷达大大进步了,能区分出云水的相态(冰晶还是水滴)及其相应波段的回波强度^[7].不过,该回波强度只是反映云水微物理结构(如滴谱分布及其垂直廓线)的某种“等效”的综合指标,而不能给出滴谱的分布;其次,由回波强度推出的降水量与实际的含水量和降水量有时可有相当大的差别.从而利用这些回波资料和由数值预报模式间接算得的“回波强度”作同化处理并不能很好匹配,从而减小数值预测误差有限,有时甚至可能使误差反而增大.

探索和研制新一代雷达使之能较精确和精细探测出云水相态及其微物理结构状态,是提高气象灾害监测和提高数值天气预报精度所必需的.比如采取多波段探测或其他方法.相应的方法似也可用于测雨卫星,只不过那是被动遥感,难度更大些.

1.4 目标区的精细探测

由于大气状态的时空不均匀和多尺度特性,人们不可能作广大地区的精细气象探测,因而为了得到某个特定的危险天气系统的精细结构或提高某一特定地区特定时段的气象预报,人们提出了探测“目标区观测”(targeted observation)的概念和方法^[8].显然,就前者来说,目标区就是该危险天气系统所在的地区空间;而就后者来说,则应由数值预报模式加上某种优化条件而计算设计出来,即要求在观测目标区观测资料改善后能使预测得到最优改善.目标区还可以是随时间而变的.但无论如何,所用的观测系统及其实施的工具(探测手段)应是可移动性的,例如1.2节所述的小卫星网(甚至适时发射的单个小卫星)可以使用,车载雷达、可变轨变址的卫星以及无人机或载人机等更是可以使用.

1.5 其他

余下一个最大问题是三维大气流场的探测.就单站来说,利用低空风廓线仪,系留气艇垂下的超声风温仪,以及探测中高空的激光雷达测风仪,都可作气流垂直廓线的探测,但需大大改进.不过,就一个地区,尤其一个较广大地区而言,布一个光雷达站网是不现实的,但利用卫星作光雷达测三维气流的可能性现已提出来了,这是一个有待研究的问题.

2 数值预报模式的更新和理论新探索和创新

灾害性天气系统和气候形势的演变过程是复杂的多时空尺度过程和强非线性相互作用的结果,其中既有决定性的过程,也有类似偶然性和随机性的过程.就决定性过程来说,是可预测的,但预测精度(或误差,或曰不确定度)和预报时效(或翻译为可预报性)受初始条件和边值条件以及模式中所含物理过程的数学表达精度和参数精度影响,而且灾害气象过程往往是发生于物理学过程的临界状态附近.穿过临界态,会发生剧变或混沌和分叉,从而使预报失效和不可信.

在数值天气和气候预测的实践历史中,人们早已发现,确有不少的个例是如此,所以有些事件是难于甚至是不可预测的,初始场差之毫厘,预报场差之千里.如再考虑到自然界中无处不在的随机性过程,尤其是模式中有很多所谓参数化公式(即将较小尺度过程或随机过程的影响用大尺度决定性过程的状态变量来表达)及参数的不确定度,使得这些临界状态的位置及其稳定性状都会发生变化.即使单由自然界本身的不确定度,就使得有些危险性天气和灾害气候是不可预测的或预报时效很短,这不足为怪.如果加上变成计算数学问题处理时,又再加上了新的误差,那就更不足怪了.我们的任务,科学发展的任务,一是尽量使由于人们知力不足而引起的附加不确定度减小到最低,二是预测好自然界过程本是可预测的那些天气-气候形势.

因此,进一步提高灾害性天气-气候的数值预测的水平,就必须对相关模式作发展和更新,同时对其有关的基础问题作研究,即进行理论新探索和创新.下面仅择普适的或重要而未弄清的问题进行讨论.

2.1 不同分辨率模式的双向嵌套问题

对于灾害性天气-气候的数值预测来说,当今一

般是采用不同分辨率模式的嵌套方法,即先采用一个分辨率相对较低的全球模式预报全球气象形势,嵌套一个非全球但覆盖较大区域的模式预报大尺度过程形势,再嵌套一个可随危险性天气系统移动的精细分辨率模式预报所需预报的地域及其相对应的灾害性天气-气候系统.姑且不论下一个模式需要上一个模式提供侧边界条件,而它们只能通过插值法或人为方法获得,从而可能引入了附加的内部不协调性和附加的误差.单就不同分辨率模式相嵌套本身来说,就有一个封闭性假设问题.无论是用谱函数展开方法得到的“谱模式”(spectral model),还是用差分法或有限元方法得到的“格点模式”(gridpoint model),如用正交基(谱函数)展开,都是相当于截取有限个谱.如将上一个分辨率较低的模式和下一个分辨率较高的模式所得的气象状态变量各表示为 $\bar{f} \equiv (\bar{f}_1, \bar{f}_2, \dots, \bar{f}_n)$ 和 $\bar{f} + \bar{f}' \equiv (\bar{f}_1 + f'_1, \bar{f}_2 + f'_2, \dots, \bar{f}_n + f'_n)$, 则在上一个模式中变量 $\bar{f}$ 的演变过程包含有二阶矩项,即 $\overline{f_i f'_j}$, 例如雷诺应力.初一看,似乎只有最高分辨率的那个模式,必须用参数化表示这些二阶矩,例如用湍流黏性、湍流混合等表示,这就是一个最简单的封闭性方法,但这有时也会出问题,例如非经典湍流就不是正黏性或扩散(而可能是组织起来).至于分辨率不是相差很大的相邻两个模式,二阶矩可以直接计算,但方程的非线性项很多,往往不容易协调,这也需要另一种封闭性假设,比如说保持能量为正定量,且具有可加性和守恒性,这样在方程中就必须加入相应的项或引入相应的变化(文献[9]中给出了一些这样的例子和方法).若人为地设二阶矩服从某种统计模式,或简单地作光滑处理等,如果处理不好,必然先引起上一个预报场的误差,从而逐一下传,引起所有不同分辨率的预报误差.这个问题必须解决,才能使嵌套模式复合体是自洽的,可作长时段预测使用.

2.2 动力学和物理学过程的参数化问题

无论是采取单一分辨率的模式,还是采取多分辨率模式嵌套的复合模式,都出现许多需要参数化公式表达的过程,它们是原模式本身未考虑的(即未知的)过程,一般是较小时空尺度的过程对较大尺度过程的影响.通过一些理论考虑,将这些影响用原模式中的变量来表达就是所谓参数化方法,如对流参

数化、边界层参数化等.此外,也有一些是模式中变量的输出量(数学上称为“泛函”(functional)),其公式往往非常复杂,如云量、降水量等,而且无法直接计算或计算不准,从而也引入某些理论或经验考虑而间接计算之,即采取参数化方法处理.

当今的模式,包含有很多参数化公式,以致于人们常把模式分为“动力框架”和“物理过程参数化”两大部分,参数化成为理解预报模式的极重要部分^[10].

需要参数化处理的过程或输出量,由于时空尺度较小,只需计算及其统计效果,常用“统计分布模式”处理.问题就出在它们不完全是随机的,不完全服从于统计物理学和统计学上的“典型”模式,用它们硬套到自然界的大气过程中难免不合适.众多的实践经验表明,参数化公式的不当使用往往是造成预测误差的主因.需要从理论上加深研究,而且需要针对不同强度和不同地理环境等加以区别对待,才能进一步提高预测精度,做好气象灾害防治工作的保证.

2.3 台风和暴雨以及龙卷风和阵风的预测问题

台风和暴雨,以及中高纬度的大风、爆发性气旋和暴雪,是灾害性最大的天气过程^[11~13].目前,无论中国还是全球,由于有了气象卫星遥感和数值天气预报,台风路径和登陆地点3天内的预报精度已大大提高^[14],如中国气象局、上海台风研究所和广东省区域数值天气预报重点实验室^[15]的预报已大体上可满足防灾要求.但在数值预测中,预测的台风强度、风强和台风的不对称性还不如人意,需天气预报员按经验作修正.至于暴雨和特大暴雨,在雨强很大和骤发时,雨强和落区的预报都尚不如人意,还须在理论和模式上有相当大的进步才能进一步提高预测能力.其实,当今所用的台风区的初始场大多是由观测资料迭加上人为假设的台风涡旋模式组合而成;而大暴雨来前的低空风场和水汽场大都不够准确,且大多数雨团尺度又小,受地形影响极大,触发机理未明,除必须极高分辨率和合适计算格式的模式外,尚需要很深入的理论研究.必须指出,在热带和低纬地区特大暴雨多发生于崎岖陡峭的地形附近,计算格式不应以气压作垂直坐标,尤其是直立的高原或高山侧壁,似应回复到高度坐标,甚至采用有限元及自适应网格,而与区外所用的正规网格不同,如此就还有

一个异构网格的接合问题. 在全球气候模式中, 北极和南极点邻近的极地区域也有类似问题, 既处理好极点为坐标奇异点, 又使极区内与其外计算格式接合得好. 这些虽基本上是计算数学问题, 但须有很恰当和巧妙的方法.

龙卷风在多大程度上是可预测的? 目前理论上还难以回答, 知道的只是龙卷风可能发生的背景的必要条件的大概, 但其出现既是小概率事件, 具有偶发性; 且不是群发的, 具孤单性; 范围小且寿命不长. 虽能在模式中模拟到拟似的这种形式的偶发的孤立的涡旋, 似乎单凭数值预测模式, 而不加其他观测和预警手段及当地预报员的经验, 是难于预测准的.

阵风的危险性和破坏性极大, 不单是阵风最大值, 而且与阵风有关的一些要素如阵风的平均振幅、平均周期、间歇性等, 对工程、交通、建筑物、风能电站等影响巨大, 应该成为预报的对象. 目前数值预报模式无法预报阵风, 也没有阵风生成和演变的理论模式, 有待建立, 但有一些由实测资料得到的经验参数化公式^[16~19], 也许可以试用.

2.4 海气耦合模式的发展问题

短期气候数值预测(月际至年度)自世界气候研究计划(World Climate Research Program, WCRP) (<https://public.wmo.int/en/programmes/world-climate-research-programme>)提出后, 中国最早试验成功^[20,21], 今在世界各地主要气象研究和业务中心都已作为准业务预测. 主要是预测 ENSO 的发生及其引发的气候距平和气候灾害, 或直接预测夏季旱涝等, 这对中国尤为重要. ENSO 和季风有复杂的相互作用. 先用特殊的而非大气海洋全耦合的模式作 ENSO 的预测^[22], 再加上和中国夏季雨量异常的关系, 以预测旱涝灾害, 已取得很好成果. 不过也有 ENSO 预测不准和 ENSO 预测虽好而旱涝形势不匹配的例子, 这说明必须建立好大气海洋完全相耦合模式, 从而得到气候系统(再加上陆表层过程模式^[23])和地球系统模式(由气候系统模式再耦合考虑了生态系统模式^[24]及气溶胶和大气化学过程和生物地球化学过程的相互作用而成^[25])(又可参见 <https://www.gfdl.noaa.gov/earth-system-model/>; <http://www.cesm.ucar.edu>), 并用之作短期气候预测, 是将来的方向.

目前已有的大气海洋耦合模式, 即使模拟当代的平均气候状态, 也有系统性的偏差而需引入订正.

最主要的原因可能在于对海洋过程认识不足和模拟不够好, 从而引起大气和海洋的匹配有偏差, 这一方面在于对斜温层及其下的深海过程的认识不足, 另一方面在于大气和海洋耦合时, 上下两边界层也是耦合且有相互作用的, 非常复杂, 不能简单地将风、浪、流分开处理. 台风等灾害性天气系统来说尤其如此, 此时边界层中的湍流有很大部分是非经典湍流, 浪也是大浪, 形成飞沫传热传质, 这又影响海洋上空云底很低的云和可向海洋深处传输的各种内波, 更不用说还有陆地边界、非常崎岖的海底地形和潮汐的影响, 以及对盐循环过程的认识不足. 要提高灾害性气候预测和台风强度等的预测, 必须有全新的海气耦合模式, 目前已有一些可喜的尝试结果, 值得继续努力.

2.5 关于资料四维同化及其他

毫无疑问, 数值预告的好坏首先取决于所用的初始场和边界条件的完整性和准确性. 有两类资料可使用, 一类是实测资料, 另一类是模式在计算过程中产生的各时刻的预报场, 二者都在一定程度上有误差和缺陷. 将这二者融合成为较完整而更接近“实际”的资料就是四维同化(4D data assimilation)的任务. 其中实测资料有两种: 一种是模式要直接计算和预报的气象要素(如温度、湿度、压力、风速); 另一种是遥感资料, 大多不是气象要素自身. 用这两种资料进行同化时要用不同的数学方法. 例如, 把遥感得到的信息先反演成气象要素, 再与模式产生的相应气象要素融合; 或者由模式产生相应的遥感信息, 而与实测得到的相融合. 无论哪一种, 都需要有补充信息和接下来需要作迭代运算求出“最优”值. 先作反演者要利用到气象要素的实有的(虽带有一定误差)统计相关性^[4,5]; 而直接与遥感信息融合者则必须加上其他方程和假定才能由预报的气象要素算出相应的遥感信息. 鄙意以为, 像卫星遥感温湿的辐射资料, 有较准确的辐射传输方程, 以用反演法得到的变量比用预报变量作初次猜值(first guess), 再作同化迭代为好; 而像雷达回波, 则无论实测得的回波本身或由模式产生的回波都依赖于未知的滴谱分布, 只好先假定一个滴谱而由模式计算回波, 再迭代. 更合适的同化方法只好待有新一代雷达能提供滴谱资料再说(参照 1.2 节).

除四维同化外, 像集合预测法和利用气候统计资料作出误差订正系统^[21]等无疑也是很重要和需要

进一步研究而加以提高的。

3 救灾规划和实施调度的全流程以及超算的重要作用

气象灾害的监测和预测只是整个救灾事务的前期准备基础,更重要的是此后的流程,即必须有自然灾情形势的预测、灾情的人文社会影响的预估,根据以上二者而作出救灾规划,到救灾实施行动调度,以及灾后的重建规划和行动等,所有这些就形成一个完整的流程(图1)^[1]。

图1为天气灾害情况,气候灾害者基本相同,只是行动规划和行动时间更长,牵扯面更广,更复杂。灾后重建也是要很好规划的,不过那是紧急救灾后的事,在框图中未涉及。

3.1 自然界灾情的形势预测

仅以天气灾害为例说明。有了较准确的天气预测,就可作成灾的自然界形势预测。目前各国业务上所用的是按人们的实践经验估算出来的,将来应做

定量的估算,为此应该建立相应的灾情的自然界形势预测。考虑到成灾后的陆表层过程对气象反馈作用很小,可以天气预报作为输入,按自然界成灾的数值预测模式作出定量预测即可。以城市水灾过程为例,地形、街道、建筑物、河流和排水沟及地下排水系统,就具体某个城市来说是给定的,成灾的数值模式就是以降水及城市外水流的流入量为输入,计算地面水位和水流,这是一个二维的浅水动力学方程,但具有非常复杂的几何形状,要分辨出街道甚至楼房门窗,故必须网格距非常小,计算量非常大。

3.2 人文社会灾情预估

按成灾的自然界形势预测,再应用地理信息系统(GIS)输入人口、产业、财产(及产值)的分布资料就可给出人文社会灾情即损失的预估。这里说预估,是因为GIS信息往往不全不细,人们社会的活动也不是很确定的,多有偶然性和带有抽样统计特性,故对损失只可能是估计,甚至是概率估计。已有的方法多是主观经验方法估算,应发展为相应的数学模式作定量计算。现有许多像保险公司之类的力量,可以加以

图1 气象灾害的监测、预测、救灾规划和实施调度全流程

Figure 1 The scheduling process of meteorological disaster monitoring and prediction, disaster relief planning and implementation dispatch

利用,作政府性的公益部门力量的补充。

3.3 救灾规划实施方案的制定

有了自然界灾情预估和人文社会灾情预估(甚至还要用到遥感监测和气象探测网以及数值预报模式),就可作出救灾规划,目标是“损失”最小化,在数学上是求优化问题的解。现在业务上多是半定性半定量的估算,将来应将“目标”、“损失”等用数学公式定量表达,用数学计算方法求出“损失”最小的救灾规划。再按“规划”在电脑中作组织实施方案的数值模拟,求出实施之最优方案。显然,由于遥感监测和气象探测网、数值预报模式、自然界灾情预估和人文社会灾情预估有误差,自然界灾情预估和人文社会灾情预估有概率因素,故“规划”和“实施方案”也必定带有概率因素,可以提出数套方案,供救灾领导人员判断采纳。

3.4 救灾行动的适时调整

由于前期的遥感监测和气象探测网、数值预报模式有误差,导致在救灾行动中自然界灾情预估和人文社会灾情预估也有误差,需要有当时当地的观测资料,适时检验遥感监测等资料和数值天气预测、自然界灾情预估和人文社会灾情预估,因此应随实际情况适时调整救灾规划实施方案的规划及救灾行动调度方案。在数学上,如果不是出现大的变化的话,

一般可用微扰方法求出对原规划和方案的调整。当然,如果有大变化,例如江河决口突然出现,救急方案要另行考虑。

3.5 超算的重大作用

综上观之,每一个环节计算量都非常巨大;时限急促,高性能的超级计算是起着非常巨大作用的,以致数值天气预报已成为超算的复杂巨系统工程^{[1,26,27]1)}。再加上救灾过程中,从监测、预测、救灾的规划、决策到实际救灾行动,每个环节也都需高速高效计量,要用到应用数学和计算机科学各个方面,例如领导者乃至一般工作人员都需及时了解当时的全面实际情况,从而必须有随时间变化的图像和影像,有随时更新的图表,这些都需及时计算并加以显示,即可可视化。可以说没有超算就不可能有有效的救灾^[1]。

4 结语

防治自然灾害和灾后重建既是民生大事,也是科技界多学科通力合作的大事。从灾害的监测、预测、救灾方案的规划到实施行动的制定和及时调整,还有灾后重建和发展,是一个完整的科学流程,有许多科学新问题需要研究,以便进一步提高处理灾害的能力。

推荐阅读文献

- 1 Zeng Q C. Without mathematics and supercomputings, no effective risk reduction of natural disasters. In: Proceedings of the 8th ICIAM. 2015
- 2 Zeng Q C. The prospect of meteorological disaster monitoring, forecasting and prevention: The major role of remote sensing and supercomputers (in Chinese). In: The 33rd Chinese Meteorological Society Annual Meeting. 2016, [曾庆存. 气象灾害监测、预报和防治的前景: 遥感和超算的重大作用. 见: 第33届中国气象学会年会, 2016]
- 3 Zeng Q C. The Principle of Atmospheric Infrared Remote Sensing (in Chinese). Beijing: Science Press, 1974 [曾庆存. 大气红外探测原理. 北京: 科学出版社, 1974]
- 4 Dong C H, Li J, Zhang P, et al. The Principle and Application of Satellite High-Spectral-Resolution Infrared Atmospheric Remote Sensing (in Chinese). Beijing: Science Press, 2013 [董超华, 李俊, 张鹏, 等. 卫星高光谱红外大气遥感原理和应用. 北京: 科学出版社, 2013]
- 5 Rawcliffe R D, Meloy G E, Friedman R M, et al. Measurement of vertical distribution of ozone from a polar orbiting satellite. J Geophys Res, 1968, 68: 6425-6429
- 6 Doviak R J, Znríc D S. Doppler Radar and Weather Observations. 2nd ed. New Yorks: Academic Press, 1993
- 7 Ryzhkov A V, Terry J S, Donald W B, et al. The joint polarization experiment: Polarimetric rainfall measurements and hydrometeor classification. Bull Amer Meteorol Soc, 2005, 86: 809-824

1) Simmons A, Kelly G, Thépaut J N, et al. The ECMWF forecasting system: data impacts and prospects for ADM-Aeolus. The ADM-Aeolus Workshop, 2006. http://esamultimedia.esa.int/docs/4-4_Simmons.pdf

- 8 Mu M. Methods, current status, and prospect of targeted observation. *Sci China Earth Sci*, 2013, 56: 1997–2005
- 9 Zeng Q C. Mathematical Physics Foundation of Numerical Weather Prediction (Vol. 1) (in Chinese). Beijing: Science Press, 1979 [曾庆存. 数值天气预报的数学物理基础(第一卷). 北京: 科学出版社, 1979]
- 10 Sternsrd D J. Parameterization Schemes: Keys to Understanding Numerical Weather Prediction Models. Cambridge: Cambridge University Press, 2007
- 11 The China Meteorological Administration. Yearbook of Meteorological Disasters in China (in Chinese). Beijing: Meteorological Press, 2005–2015 [中国气象局. 中国气象灾害年鉴. 北京: 气象出版社, 2005–2015]
- 12 The China Meteorological Administration. Yearbook of Tropical Cyclone (in Chinese). Beijing: Meteorological Press, 1949–2015 [中国气象局. 热带气旋年鉴. 北京: 气象出版社, 1949–2015]
- 13 The China Meteorological Administration. Yearbook of Heavy Rain (in Chinese). Beijing: Meteorological Press, 2004–2015 [中国气象局. 暴雨年鉴. 北京: 气象出版社, 2004–2015]
- 14 Brunet G, Jung T, Gordon N, et al. The World Weather Research Programme: A 10-year vision. *WMO Bull*, 2015, 64: 16–19
- 15 Feng Y R. Recent advances in regional typhoon model in Guangdong meteorological service. In: International Symposium on Tropical Meteorology and Marine Science and Technology, 2016
- 16 Cheng X L, Wu L, Hu F, et al. Parameterizations of some important characteristics of turbulent fluctuations and gusty wind disturbances in the atmospheric boundary layer. *J Geophys Res*, 2012, 117: D08113, doi: 10.1029/2011JD017191
- 17 Cheng X L, Huang J, Wu L, et al. Structures and characteristics of the windy atmospheric boundary layer in the South China Sea region during cold surges. *Adv Atmos Sci*, 2015, 32: 772–782
- 18 Cheng X L, Wu L, Song L L, et al. Marine-atmospheric boundary layer characteristics over the South China Sea during the passage of strong Typhoon Hagupit. *J Meteorol Res*, 2014, 28: 420–429
- 19 Song L L, Pang J B, Jiang C L, et al. Field measurement and analysis of turbulence coherence for typhoon Nuri at Macao Friendship Bridge. *Sci China Tech Sci*, 2010, 53: 2647–2657
- 20 Zeng Q C. Experiment of seasonal to extraseasonal predictions of summer monsoon precipitation. In: WCRP-84, Proceedings of the International Conference on Monsoon Variability and Prediction, 1994. 452–459
- 21 Zeng Q C, Lin Z H, Zhou G Q. Dynamical extraseasonal climate prediction system IAP DCP-II (in Chinese). *Chin J Atmos Sci*, 2003, 27: 289–303 [曾庆存, 林朝晖, 周广庆. 跨季度动力气候预测系统 IAP DCP-II. 大气科学, 27: 289–303]
- 22 Zheng F, Zhu J, Zhang R H, et al. Successful prediction for the super El Niño event in 2015 (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2016, 31: 251–257 [郑飞, 朱江, 张荣华, 等. 2015年超级厄尔尼诺事件的成功预报. 中国科学院院刊, 2016, 31: 251–257]
- 23 Dai Y J, Zeng X B, Robert E D, et al. The common land model. *Bull Amer Meteor Soc*, 2003, 84: 1013–1023
- 24 Zeng X D, Li F, Song X. Development of the IAP dynamic global vegetation model. *Adv Atmos Sci*, 2014, 31: 505–514
- 25 Zeng Q C, Lin Z H. Recent progress on the earth system dynamical model and its numerical simulations (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2010, 25: 1–6 [曾庆存, 林朝晖. 地球系统动力学模式和模拟研究的进展. 地球科学进展, 2010, 25: 1–6]
- 26 Zeng Q C. Weather forecast—From empirical to physico-mathematical theory and super-computing system engineering (in Chinese). *Physics*, 2013, 42: 300–314 [曾庆存. 天气预报——由经验到物理数学理论和超级计算. 物理, 2013, 42: 300–314]
- 27 Palmer T. Build high-resolution global climate models. *Nature*, 2014, 515: 338–339

Summary for “进一步提高气象监测、预测和灾害的防控调度能力的前景”

Monitoring, prediction and management of meteorological disasters

ZENG QingCun

Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China
E-mail: zqc@mail.iap.ac.cn

Reducing the risk associated with natural disasters is very important for the protection of people's lives and welfare. In this paper, some problems in whole links of monitoring, prediction and disaster management of meteorological disasters are identified and potential improvements are discussed. In the monitoring aspect, issues discussed include: needs in improving the accuracy and vertical resolution of meteorological elements using existing polar-orbiting and geostationary operational meteorological satellites; setting up small satellite networks to enhance monitoring in the tropics and lower-latitudinal zones, to provide necessary data for improved numerical weather prediction and for early detection of hurricanes, typhoons and other disastrous weather systems; improving Doppler radar to provide more cloud and rain structure information and micro-physical parameters; and using the so-called targeted observations in urgent situations for obtaining dense and detailed data using movable observation equipment. In the prediction aspect, there are problems with using bidirectional nesting of multiple models with different resolutions; parameterizing smaller scale processes and some diagnostic variables (output from the model predictions, such as precipitation); using the coupled atmospheric-oceanic model and its complex coupled boundary layer; and methods for assimilating 4D data. There are also new and unsolved problems concerning predictions of typhoons, heavy rains, tornados and wind gusts. In the disaster-management aspect, requirements include: development of numerical models for predicting disaster situations and the related risks of losses and the mathematical formulations and numerical models for optimal management decisions and actions for risk reduction of disasters, as well as real-time regulation. For efficient management of meteorological disasters, supercomputing plays a key role, and close cooperation with other branches of science and technology are very important.

meteorological disaster, weather monitoring, remote sensing, numerical weather and climate predictions, numerical prediction of disaster situation, disaster management, supercomputing

doi: 10.1360/N972016-01427