

丑纪范先生关于资料同化的学术思想探讨和回忆

——写在丑先生80华诞之际

■ 郜吉东

2013年7月23日，是丑纪范先生80寿辰。最近我刚刚完成兰州大学为此出版的文集中两篇文章的校稿任务。百感交集，觉得非得写点什么，才能表达导师多少年来对我辛勤培育的感激。在丑先生的众多学生中，我是跟随先生时间最长（6年）、受益最大的学生之一。由于我的不善言谈、不善交际，总是觉得怎么说也难以表达清楚多年来先生对我的辛勤栽培，先生多年来对学生付出的劳动和汗水也确实是无法用语言能形容的。我只是先生众多学生中的一员，其他同门可能会有比我更多、更深刻的体会。在这里我想就先生多年来对数值预报资料同化方面的学术思想，结合我自己在这方面的研究体会做些简要的回顾。同时把我藏在内心深处多年来对先生的感激之情写出来。

从我1988年进入兰州大学成为丑先生的研究生到现在25年，我的研究领域一直在数值天气预报的资料同化方面，所以我想主要讨论一下在这个研究领域我对丑先生学术思想的粗浅认识。当然丑先生的主要研究方向是气候动力学，在这方面的贡献有待其他学生去研究和揭示。

一、学术思想的核心和学生配养

在先生的学术思想中，最为重要的是数值预报中多时刻资料的使用问题。1956年，丑先生以优异的成绩从北京大学物理系气象专业毕业，被分配到当时的中央气象局从事数值天气预报的研究工作。当时，数值天气预报在国际上还处于起步阶段，在中国更是一个超前的课题。他加入了一个由著名的老一辈气象学家顾震潮先生领导的数值预报研究团队。顾先生认为，数值天气预报有一个根本性的缺陷，就是只用一个初值，大量的历史资料没有被运用，实际上作为初值问题的数值预报与提为地面天气演变问题的外推预报是等价的。他鼓励丑先生下大工夫研究并思考如何克服此缺陷。丑先生以其坚实的数理基础对这个问题进行了创造性的研究，于1962年写成《天气数值预报中使用过去资料的问题》一文，将泛函分析引入数值预报问题中，从微分方程只是近似描述了大气实际过程的观点出发，通过把微分方程定解问题变为等价的泛函极值问题——变分问题的途径，推广了微分方程解的概念，引进新型的“广义解”，并利用希尔伯特空间的理论，论证了“广义解”比原来意义

【编者语】

2013年正值丑纪范院士80华诞，作者作为丑先生的学生特别撰写此文来回顾先生关于数值预报中资料同化的学术思想，以表对先生的感激之情。丑先生作为本刊名誉主编，为本刊的发展提供了很多宝贵意见，编辑部也借此机会向丑先生献上最真挚的祝福。

下的“正规解”更接近所描述的物理现象的“实况”。这实际上是二十多年后兴起的四维变分同化的理论基础。在这里需要指出国外关于把泛函分析引入数值预报问题中的系统性研究发表在1987年的英国皇家气象杂志上。

我认为在《天气数值预报中使用过去资料的问题》一文中，更为重要的是将数值预报方程中未曾观测到的物理量，通过使用蕴含着这种量的历史资料来加以考虑。给出了实际可行的使用多时刻资料的短期数值预报模式。这一提法当时在国际上也是领先的。和这一思想类似的研究直到1969年才由美国的著名气象学家，也是数值天气预报的创始人之一的Charney等提出。而丑先生和他的老师顾震潮先生以及他们的研究团队早在20世纪50年代末60年代初就已对此做了系统的研究，写出了论文并开始做数值试验。比美国相似研究的提出要早近10年。应该指出，丑先生《天气数值预报中使用过去资料的问题》一文是在1962年完成的，他当时把论文寄给顾先生，想在《气象学报》上发表。顾先生在回信中写道“……在数值天气预报中，你把历史资料考虑进去，好得很”。顾先生还向当时的中央气象局建议，把此论文列为保密材料，等到他的研究团队在实际数值天气预报应用中做出一定成果后再发表。但后来由于计算机条件的限制和十年动乱的影响等，这篇具有开创性的研究论



图1 1960年北京气象科学讨论会（左一为丑纪范先生，左二为纪立人先生，右二为陶诗言先生）



图2 丑先生与联合国世界气象组织现任秘书长(2004至今)雅罗先生(Michel Jarraud)的合影
雅罗先生曾自称丑先生是他心目中的导师。1974年,他在图书馆偶然看到《中国科学》杂志第6期上丑先生的《天气数值预报中使用过去资料的问题》一文,立即对气象学产生浓厚兴趣。这篇文章引领他进入数值预报研究,从此改变了他的一生。雅罗在他的毕业论文前言中写道:“在此,我谨向中国学者丑纪范致以敬意,他的理论为我们的研究奠定了理论基础。”

文直到1974年才在《中国科学》第6期上发表。

丑先生的另一个非常重要的学术思想是动力模式和统计方法相结合的概念。这一观点是多时刻历史资料使用问题的延伸。他在《为什么要动力—统计相结合?——兼论如何结合》一文中指出,对于同一天气预报问题,一般存在着动力和统计两种基本预报方法,二者各有其优点和缺陷。动力方法基于物理定律的初值(边值)问题,认为未来状态是现在状态和制约其变化的物理规律所确定的必然结果,但没有利用或没有充分利用已有的实况历史资料。统计方法则利用了实况资料,承认未来状态有不确定性,期望依据现在状态和近期演变对未来做出概率推断,但没有利用或没有充分利用已掌握的物理知识。承认了各自的优缺点后就应该探索新的方法,将两者结合起来。为能既充分利用已有的物理规律,又能合理使用时间演变的历史资料所包含的信息,就需要把数值预报提为模式方程的反问题。具体就是,假如数值预报模式方程中有些系数是未知的,或有些变量的初值是没有观测的,那么反问题就是利用数值模式、定解条件(已知的部分)和其他所有已知的条件,来确定未知量,求解反问题。等得到了反问题的数值解以后,再解正问题(积分数值模式)做出预报。当时这个观点主要是围绕长期数值预报提出的。多年来丑先生指导学生在这个方面做过很多研究。反问题的研究只是动力模式和统计方法相结合的一个方面,但后来资料同化的发展证明这一提法具有开创性的意义。在第二节我还将进一步论述。

1986年,丑先生和郭秉荣先生、杜行远先生一起发表了他们的合著《大气科学中数学方法的应用》一书,

系统介绍了大学中所用到的一些数学方法。这本著作的特点之一是非常系统地介绍了共轭方程(或伴随算子)理论。为此,几个老先生在20世纪70年代末、80年代初付出了很多辛勤的劳动,翻阅了大量俄文数学和气象科学杂志,并结合他们自己的研究写成此书。此书中详细阐述了如何推导数值模式的共轭方程,以及该理论在数值预报中的应用。客观地讲,这个理论本身是前苏联学者于1974年首先提出来的。后来丑先生和他的学生们关于反问题的研究,以及再后来学术界关于四维变分方法的发展都与共轭方程的理论和应用很有关系。我认为《大气科学中数学方法的应用》这本书的出版对中国关于资料同化研究的开展和对气象科学研究生的培养也做出了较大的贡献。因为它帮助读者从物理意义上理解了什么是共轭方程(或用它的另一个名字,伴随算子)。

实际上,回顾近30年来资料同化方面研究领域的一些进展,和丑先生早期学术思想的理论框架是完全吻合的。我认为先生对数值天气预报的最主要贡献可用一句话来概括,那就是:在国际上较早认识到资料同化是解决数值预报的一个关键所在,并提出了解决这一问题的理论基础。后来欧洲中期数值预报中心(ECMWF)的发展及成就证明他的学术思想和预见是正确的。正如我的同门龚建东在本刊2013年第3期发表的题为《同化技术:数值天气预报突破的关键》一文中所揭示的,ECMWF一直是全球中期数值天气预报技术研发与业务应用的领头羊,究其原因,资料同化技术的突破是其中最为关键的一环。20世纪80年代中后期兴起的以三维和四维变分同化理论为主的技术的日益成熟和丑先生早期提出的理论的预见是不谋而合的。

在变分资料同化方面，丑先生在兰州大学培养的学生中很多都做出了一些重要贡献，例如，在雷达资料同化领域有邱崇践、孙娟珍、龚建东、刘海霞和我本人；在海洋资料同化领域有李志锦和余军；在卫星资料同化领域有张邦林、蒲朝霞和张华。我们一起在国内外重要学术期刊上发表过数百篇学术论文。仅我本人，自师从丑先生后，在资料同化方面（主要是雷达）已经写出和发表了近60篇学术论文，大部分刊登在美国气象学会的期刊上。

二、资料同化研究与应用领域的一些回顾和进展

由于我是做雷达资料同化研究的，故先从这方面举几个例子。20世纪90年代，曾师从丑先生的兰州大学邱崇践先生在美国俄克拉荷马大学发展了一套很有创见的、简单有效的雷达资料四维变分同化技术。此技术利用多时刻雷达径向风观测反演强天气系统的二维和三维风场结构。90年代初，邱崇践先生和时任俄克拉荷马大学高级研究员（senior research scientist）的许秦先生合作，发表了多篇很有影响力的研究论文。1982年从兰州大学毕业的孙娟珍于90年代初在美国俄克拉荷马大学发展了一套四维变分同化技术，利用多时刻的雷达径向风和反射率资料，不仅能够反演风场，而且能够反演出温压场的三维结构，完全验证了丑先生关于合理使用多时刻资料来改进数值预报的学术思想。这是因为在中小尺度资料同化中，由于人力物力的限制，使得观测资料的分布一方面在给定时刻空间分布与模式变量有关的资料太少（例如雷达，只有径向风、反射率，没有三维风场、温度场的观测）；而另一方面，由于雷达卫星等先进仪器的使用，使资料的时间密度较大。把这两个问题结合起来考虑，希望把资料所包含的时间演变信息转化



图3 1994年，丑先生60岁生日时与一些学生的合影
有20世纪70年代跟随他的学生游兴恬（后排左四）；80年代的学生李维京（后排左三），谢志辉（前排左二），钱维宏（后排左二），管玉平（前排右一）和作者（后排左一）；其余为90年代的学生谷湘潜（前排左一），张培群（前排右二），李建平（后排右二），张红亮（后排右一）和祝从文（后排右四）

为要素场的空间分布状态，并反演出没有观测到的要素的空间结构。孙娟珍的工作正好解决了在中小尺度资料同化中这一非常重要的研究课题。此后的二十多年里，她在雷达四维变分同化领域做出了很多开创性的研究成果。

我从20世纪90年代中期来美国后，利用两部或多部多普勒雷达的观测和质量连续性方程作为弱约束，在变分同化的框架下分析强风暴的三维风场结构。由于此种方法避开对质量连续性方程在垂直方向上的积分，使得垂直方向的风能更精确地反演出来并且对边界条件不敏感。考虑到强风暴系统的快速演变特征，近年来在此基础上发展了一套能快速完成计算，实时的暴雨分析系统。此种系统能利用数值模式提供的背景场和多部雷达观测快速反演出强风暴系统的三维风场结构。这套系统被应用于美国NOAA灾害性天气试验基地（Hazardous Weather Testbed）。这几年的应用证明很受预报员的欢迎。在此限于篇幅不再一一列举。所有这些成就的取得是与丑先生多年来的思想熏陶和辛勤教育分不开的！

资料同化中，丑先生的另一个非常重要的学术思想是动力模式和统计方法相结合的概念。在这里有必要做进一步的阐述。直到现在我还清楚地记得他在课堂上和文章中讲述“为什么要动力和统计相结合”。因为只有这样才能最大限度地利用已知的动力模式的信息和观测资料的统计信息，对分析场做出更为合理准确的估计。至于如何结合，几十年来，这一直是个非常重要的研究课题。他和学生们做过很多尝试。虽然他那时强调的主要是长期数值预报或短期气候预报的问题，但是这对于短期数值预报的问题同样具有指导意义。

近10年来，国际上关于资料同化方法研究的进展也正好验证了这一预见。近年来在资料同化方法的研究中出现了名为集合卡尔曼滤波（Ensemble Kalman Filter）的同化方法。这种方法利用20~100个集合预报成员来统计得到同化系统中所用的背景场协方差矩阵。最初把这种方法用于数值预报的资料同化，效果并不理想。这是由于集合预报的数量远远少于模式自由度的数量引起的。近年来在美国气象学会的期刊上发表了很多关于改进集合卡尔曼滤波的研究文章。这些研究由于引用了一些特殊的处理方法来解决集合数量少的问题，使得集合卡尔曼滤波同化方法的应用逐渐普遍化和合理化。尽管很多数值试验证明这种方法优于三维变分同化，但是它仍然存在着一些问题。首先，像四维变分同一样，这种方法过于耗费计时（尽管Gao和Xue 2008年的研究已部分解决了这个问题）。其次，由于这种方法偏重于用统计方法来表征数值模式的动力学特征，过于依赖于模式背景场的协方差矩阵，当数值模式的误差较大时容易发生滤波发散、解不收敛的情况。基于这种情形，近年来出现把三维或四维变分方法和集合卡尔曼滤波同化方法相结

合的方法，名字统称为混合（hybrid）集合变分方法。这种方法能把动力模式的演变信息和统计信息结合起来，真正使资料同化的效果达到最优。这种方法的提出正好从另外一个角度验证了丑先生早年关于动力模式和统计方法相结合的学术构想。但是由于集合卡尔曼滤波同化方法和四维变分同化方法计算代价都很昂贵，在现代计算机的条件下，很难应用于对流尺度的高分辨数值预报中的业务，尤其对于计算机条件落后的国家和地区。即使对于计算机设备较为发达的美国，由于大量非定时雷达、卫星资料的涌现，运用这种混合技术仍然存在着很大的挑战，对于暴雨尺度的资料同化问题更是如此。

由于高分辨率数值模式自由度高并且雷达资料的空间和时间密度都很高，必须应用计算效率较快的三维变分同化系统。很多研究集中在对三维风场的研究上，但如何同化雷达反射率资料仍有很多研究空间。丑先生关于多时刻资料的使用，以及动力统计相结合的学术思想多少年来深深地印在我的脑海中。很多研究者认为对三维变分同化的研究已过时，原因是在传统的三维变分同化中的背景协方差矩阵是从气候资料统计得到的，不能体现背景协方差矩阵随数值模式演变的特征。但是传统的思维方式是可以改变的。我认为只要沿着如何巧妙地把动力模式信息和统计信息相结合的思路，把集合卡尔曼滤波同化方法和四维变分同化方法的先进特点引入到三维变分中来，同时仍然保留三维变分同化计算快速简洁的特点，是能够在暴雨尺度的雷达资料同化中做出一些开创性的研究的。但具体如何去做，当然需要有很多研究课题的支撑。这里仅举一例。四维变分把数值模式当强约束植入目标泛函中。我的一个研究课题是如何把数值模式作为一个弱约束植入到目标泛函。这样不需要模式积分，大大降低计算量。仍然保持一些四维变分同

化的优点。在这方面，我已经取得一些研究进展，在未来几年会陆续发表一些研究论文。

三、对学生的言传身教

作为一名气象教育学家，丑先生呕心沥血，培养出了许多优秀的气象人才。在长期的研究工作中，丑先生形成了一种独特的思维方式，他要求学生不仅要有扎实的理论基础，在自己的研究领域特别精通，同时要有简化问题，抓住问题主要机制的能力。作为一名研究人员，对问题要深入浅出。所谓的“深入”就是要对问题钻得透，要有自己独特的见解，避免浮在上面，做浅层次的简单重复。所谓的“浅出”就是对问题的理解要融会贯通，再复杂的问题也要能用通俗的语言讲清楚，哪怕是对外行讲也应该能让他们明白。对这些要求他务求自己首先做到。先生在非线性大气动力学方面很有研究，提出并研究了大气动力学方程组的定性理论，即大气长期演变的渐进性质动力学理论，系统揭示了非线性大气动力学方程组的整体和全局行为，这是从动力学观点研究气候形成和气候变化的基础理论，并著有《大气动力学的新进展》一书。非常抽象复杂的非线性动力学理论经他在课堂上一讲，都会变得生动形象、妙趣横生、通俗易懂。他的学生在课堂上往往变得异常活跃。学生们常常把听他的课变成了一种享受，而不是一种负担。

许多师承丑先生的研究生，都感到经过导师的严格训练后，即使在科研上碰到再大的困难也能一步步克服。丑先生特别注重因材施教，根据每个学生的不同性格、特长等，帮助他们确定不同的研究课题，以使他们充分发挥自身潜力。这里以我自己为例来说明。应该说我1994年从兰州大学获得博士学位后的近二十多年里，在雷达资料同化方面的研究收获不小。如前所述，我取得的研究成果和将来会发表的研究成果是和我做学生时丑先生对我的教导分不开的。

六年的研究生生活确实是我生命中最为宝贵也是最愉快的一章。记得刚刚做丑先生的硕士研究生时我不怎么爱说话，也不常去请教他，还老想躲着他。他的确没有一点架子，反过来关心我，找到我沟通。估计他那时已知道我的性格，不善言谈，但比较用功勤奋，需要多加点拨。他还常对我说，因为我们硕士研究生刚刚起步，还不知道如何做科研，他要对我指导得更具体一些。所以他亲自给我挑选了很多在变分同化中非常经典的文献。例如，两位法国气象学家 Courtier 和 Talagrand 的关于四维变分同化的开创性论文，那时我都读了很多



图4 2013年，丑先生80岁生日时与他的夫人张庆云合影

遍，这为我后来20年的研究工作打下了一个坚实的基础。

当我于1991年刚刚转为他的博士研究生时，他又教导我，现在你已经是博士生了，要能够独挡一面，必须学会自己提出问题，自己解决问题。他那时鼓励我申请科研基金。虽然我那时对此没有多大把握，但居然在他的指导和帮助下，成功拿到了一个国家教委高等学校博士点专项科研基金的项目。这对我的鞭策是不言而喻的，使我对科学研究和自己的能力增添了一份信心，为我后来在美国的研究工作的进行、科研项目的申请打下了初步的基础。我不再把申请科研项目看做是高不可攀的事情，总觉得别人能做的事我也一定能做得到，即使道路再曲折，申请失败了，也没什么可怕的，重新再来就是了。

以上所述只是在研究工作方面丑先生对我的培养。更使我铭记终身的是我的师母张庆云老师在生活中对学生无微不至的照顾。也许丑先生的很多学生都想说同样的话，都有很多故事要写。因为我知道，很多家境贫寒的学生都得到过他们在生活上的接济和照顾。但我是跟丑先生时间最长的学生之一，也许是受益最大的学生之一。永远无法忘记师母做的美味佳肴红烧肉、梅菜扣肉的味道。有一段时间我假期没回家，几乎三天两头被邀请到他们家去做客。当时我也觉得不好意思，怕给他们增添太多麻烦，但经不住师母的热情邀请。那时师母在图书馆工作，我也经常在图书馆学习，一到下班她就喊我去她家一起吃饭。那段美好的时光我会永远永远记在心里。现在回忆这些，心里有说不出的滋味。有时觉得自己是否辜负了老师和师母培育之恩，因为在后来很多时候我由于忙于工作和生活中的琐事，经常忘了多给老师和师母写个信、打个电话，说声感谢、道个祝福。虽然我也知道他们会体谅我，正如父母对孩子的感情，那种付出永远都不要回报。我们这些学生，每一个都是丑先生和师母的另一个儿女，大家一起组成了一个和睦的大家庭。在丑先生80华诞之际，我代表全体学生祝先生生日快乐，健康长寿，福如东海，寿比南山！

(作者单位：NOAA国家强风暴实验室)

深入阅读

- Charney J, Halem M, Jastrow R. 1969. Use of incomplete historical data to infer the present state of the atmosphere. *J Atmos Sci*, 26: 1160-1163.
- Gao J, Xue M, Shapiro A, et al. 1999. A variational analysis for the retrieval of three-dimensional mesoscale wind fields from two Doppler radars. *Mon Wea Rev*, 127: 2128-2142.
- Qiu C J, Xu Q. 1992. A simple adjoint method of wind analysis for single-doppler data. *J Atmos Oceanic Technol*, 9: 588-598.
- Sun J, Flicker D W, Lilly D K. 1991. Recovery of three-dimensional wind and temperature fields from simulated Doppler radar data. *J Atmos Sci*, 48: 876-890.
- Talagrand O, Courtier P. 1987. Variational assimilation of meteorological observations with the adjoint vorticity equation. I: Theory. *Quart J Roy Meteor Soc*, 113: 1311-1328.
- 丑纪范. 1974. 天气数值预报中使用过去资料的问题. *中国科学*, 1974, 17(6): 635-644.
- 丑纪范. 1986. 为什么要动力—统计相结合? ——兼论如何结合. *高原气象*, 5(4): 367-372.
- 丑纪范. 1990. 大气动力学的新进展. 兰州: 兰州大学出版社.
- 丑纪范, 郗吉东. 1995. 长期数值天气预报(修订版). 北京: 气象出版社.
- 郗吉东, 丑纪范, 李自锦. 1995. 一中利用气象场时空信息确定其空间分布状态的方法及数值模拟研究. *大气科学*, 19(3): 257-269.
- 龚建东, 李维京, 丑纪范. 1999. 集合预报最优初值形成的四维变分同化方法. *科学通报*, 44(10): 1113-1116.
- 顾震潮. 1958. 作为初值问题的天气形势预报与由地面天气历史演变作预报的等值性. *气象学报*, 29: 93-98.
- 邱崇践, 丑纪范. 1987. 改进数值天气预报的一个新途径. *中国科学:B辑*, 17(8): 903-910.
- 邱崇践, 丑纪范. 1989. 天气预报的相似—动力方法. *大气科学*, 13(1): 22-28.
- 邱崇践, 丑纪范. 1990. 预报模式的参数优化方法. *中国科学:B辑*, 20(2): 218-224.
- 任宏利, 丑纪范. 2005. 统计—动力相结合的相似误差订正法. *气象学报*, 63(6): 988-993.
- 张培群, 丑纪范. 1997. 改进月延伸预报的一种方法. *高原气象*, 16(4): 376-388.