

气象卫星探测资料在数值天气 预报中的应用

郑祚芳 沈桐立 张秀丽

(南京气象学院, 南京 210044)

提 要

卫星遥感技术和其他非常规观测技术的发展和成熟,提供了大量的非实时、非完全、准连续的观测资料。与其他非常规观测资料相比,卫星观测资料具有水平分辨率高,观测面广,测量误差易于掌握等优点。分析和总结了目前卫星观测资料在数值天气预报模式中的应用情况,并对其未来发展做了一些有益的探讨。

关键词: 卫星云图 反演 资料同化 数值模式

1 概 述

数值天气预报是以积分模拟大气四维时空运动的偏微分方程组为基础的,模式的初始场在时空上应尽可能的接近观测值且须满足真实大气的动力和统计关系。因此,积分初始条件的优劣直接影响着模式预报的准确性,然而直接引用各种未加处理的观测值或分析值作为初始场,易导致高频振荡,使计算不稳定。因而,早些时候数值天气预报使用的资料只是定时的常规观测资料,如探空、测风资料等。到了20世纪70年代,一方面随着数值天气预报技术的发展使得常规探测手段已不能满足需要,数值预报模式的空间分辨率的提高,使得500km间距的高空温、压、湿资料不能满足需要。由于探测点的稀疏,常规探空不能提供有足够精度的水平湿度梯度。而且无论从现实还是从经济上来说,以常规手段提供半球或全球的资料都不是件容易的事。另一方面随着卫星遥感技术和其他非常规观测技术的发展和成熟,为我们提供了大量的时空非实时、非完全、准连续的观测资料(不在标准观测时间内获取,为非模式变量,即不是同时给出质量和风场的垂直廓线观

测)。与其他非常资料相比,卫星观测资料具有明显的优点:一是水平分辨率高,观测面广,二是大量的资料来自于同一观测仪短时间的测量,因而使得测量误差易于掌握。如何充分利用这些资料,从中尽可能多的提取有意义的信息,改善数值模式的初始场,从而提高模式预报的准确率,是当前数值天气预报研究中的一大难点。目前方兴未艾的四维资料同化技术,是解决这一问题最有希望的工具。黄荣辉、吴津生^[1]指出,卫星资料和四维同化分析方法在短期和中期数值天气预报中有着广泛的应用前景。

2 四维变分资料同化方法

过去几十年发展起来的资料同化方法,可以归纳为三类。

第一类为多项式内插法^[2],其原理为寻找一个多项式所表示的曲面来逼近网格点周围区域观测的要素值,其优点是简单方便,但结果还远不能满足模式对初态的要求。

第二类为统计最优插值法^[3],是以气象要素的经验结构函数和相关函数的大量研究作依据,合理地确定权重函数,使得分析误差最小。实质上是一种均方差最小的线性插值

方法,它为处理不同来源的观测资料提供了一种实用的和内部一致的手段,是目前业务预报产生最好结果的方法,世界上主要的气象中心包括我国国家气象中心现今大都采用这种方法作间歇同化。其缺点在于对非线性模式,最优插值法外延到的时间尺度是一个困难的问题。由于采用统计方法,某些情况下它容易导致分析场的过度平滑,且动力约束和资料约束是分别进行的,不同时刻的资料是分别考虑的,观测以非线性方式影响当前分析,不能直接同化非模式变量。

第三类为变分分析法,最早由 Sasaki^[4,5]引入客观分析中,它将动力约束和资料约束以及不同时刻的观测资料统一考虑,其目的是使分析场与观测场的偏差达最小。在这一点上,它较其它方法有明显的优越性。LeDimet 和 Talagrand^[6]将不同形式的变分分析方法总结为两种:第一种方法是将原来的有约束问题转化为无约束问题,它包括惩罚性算法、对偶性算法和修正的拉格朗日算法,这种方法对于复杂的约束关系求解其控制方程(E-L 方程),目前在数学上还有很大的困难。第二种方法是近年来发展起来的伴随方法,它基于最优控制论原理,以数值预报模式为约束条件建立相应的伴随方程,该方法并不直接求解 E-L 方程,而以状态变量的模式结果与观测资料的差距(目标函数)为依据,利用与模式相对应的伴随方程和下降算法(如牛顿法,最速下降法,共轭梯度法),迭代调整模式中的未知量(控制变量),使得目标函数最小,从而获得优化的控制变量和相应的状态变量。在伴随模式的构造方面, Nicole^[7]研究了直接用数值模式码产生伴随码的方法,用此方法不必构造由共轭方程描述的伴随模式,而是直接从数值模式出发构造其正切线性码,再利用正切线性码的转置得到伴随码。

变分分析的一个重要性质是某一时刻的

资料能够影响先前时刻的分析结果,所以这种逼近是真正的四维同化,当模式或向前插值是非线性的和距离函数不是二次的,则资料和分析之间的关系是非线性的,由于最后的分析值是模式解,在动力和物理方面是平衡的,利用它做预报可大大减小目前中尺度数值模式中常遇到的 spin-up 问题(当初始时刻已经发生降水,而模式降水要在积分数小时之后才发生)。变分分析能够抑制不真实的重力波,在预报开始前,不需要初值化调整过程,它可以为我们提供与模式动力学精度一致的场的时间序列。变分分析适合于同化非常规资料(如卫星资料等),这对于弥补模式中海洋地区资料不足和形成更精确的模式初值,从而提高模式对低纬地区系统和对流性天气系统的预报能力都是十分有利的,目前四维变分同化已投入准业务实验。

3 国内外对卫星探测资料的同化应用

对于卫星云图资料的处理,首先要将其反演成大气状态变量如温度、湿度等,一些学者对此作了许多研究,并已取得了一定的成果,如 Rodgers(1976)提供迭代法来处理反演上数值计算的问题,Smith(1985)等^[8]提出了同时物理反演法,可同时求出地表(或云顶)温度和垂直温湿剖面,而无须假设其中某项为已知,并且具有计算快速,可以纳入其它辅助观测资料及对初始猜测场温度不敏感的优点。Chedin 等^[9]提出了改进的初始化反演法。Adler(1988)等^[10]指出利用一维云模式,可以建立对流核心的云顶亮温与降水率和降水面积之间的关系,他们利用经验方法在红外云图上寻找对流核心。

由于云图反演的是整个大气从低层到高层的总效果,它受到高山积雪等因子的干扰,同时考虑到云图资料受到大气、云及仪器本身的影响,再加上灰度场与温度场(湿度场)之间存在着较大的非线性,因此依据上述线性回归模型用灰度场反演出的温度场和湿度

场存在一定的误差,而这些误差对模式预报会带来负面影响。因此必须设法把有用的信息分离出来,对非常规资料场进行合理的订正,这就是质量控制,质量控制工作的好坏将直接影响到云图资料反演的效果。目前对于反演值误差的订正方案有用测站值订正和用分析场格点值订正两种方案,沈桐立等^[11]的研究证明在多数情况下用常规分析场格点值订正优于用测站值进行订正。

随着数值预报模式的不断改进和发展,传统的卫星观测反演的探空资料逐渐受到考验。W. L. Smith^[12]从 ECMWF 的 Norris 数值预报时效延伸趋势图上得出,自 1986 年以来探测和反演方法的发展,没有跟上数值模式模拟和数据同化技术的发展,相对于其它信息而言,卫星数据的信息量趋于减少。传统的回归反演资料有其局限性(在测站少的地方对预报有正贡献,反之则为负贡献),目前在实践中,卫星反演数据对北半球数值天气预报的负影响难以消除,原因是卫星观测的频道权重函数过宽且相互重叠,因而使反演的探空廓线的垂直分辨率远差于传统探空及数值模式的垂直分辨率,此外,由于反演本身在数学上为非适定问题,依赖于初估值,有无数条大气温湿廓线对应同一组辐射探测值,因而需要加入适当的约束条件从中挑选合适的廓线,即参数估计。因此,人们在积极改进探测器的垂直分辨率和全天候探测能力的同时,寻找数值天气预报中应用卫星探测信息的新途经。

变分分析方法可作参数估计,随着伴随方法在变分分析中求解目标函数梯度的有效应用,变分分析受到了广泛的关注。Eyre (1989)^[13]以模拟研究讨论一维变分反演法运用于 TOVS 资料的可行性,并将这个方法用于 GALE (Genesis of Atlantic Lows Experiment) 实验中进行真实资料的个例测试,结果显示在传统观测资料密集的地区反

演方法对温湿剖面的改进有帮助,上层水汽场的改进尤其明显。并指出较精确的云参数初猜场可降低一维变分反演云量视场时计算的迭代次数,甚至对反演能否收敛亦有影响。1993 年 Eyre^[14]结合一维变分法与最佳内插法同化 TOVS 辐射资料,证实卫星资料确能改进北半球地区的预报质量,并将变分法推广至三维(四维)资料同化系统研究中。Anderson 等^[15]在采取可抑制重力波产生的适当风场和质量场平衡的条件下,同时分析质量场、风场和水汽场,使得反演、分析与初始化过程合而为一。在三维变分分析 TOVS 资料的研究中,所得的结果与先用一维变分再结合最佳内插方法所得的结果一致,至于四维变分的应用,则是可以加入模式的动力约束来进行的。

变分法目前已被大量使用,并推广至三维、四维资料同化系统中,然而一维变分反演仍具有实用价值,目前欧洲中心采用一维变分反演法作质量订正方法。Eyre (1993)^[14]指出只有在一维变分反演过程中收敛的卫星资料才可被用于三维变分同化系统中,另外一维变分反演可提供模式变量以外其它变量的资料,如模式顶以上地区的温度资料。

在卫星反演降水上,Smith 等(1998)^[16]在系统的理论研究基础上搞清楚了对流性风暴和热带气旋云雨的微物理性质是如何决定卫星辐射计所测量的微波通道亮温的。1998 年 Andrew^[17]用变分法发展了一个卫星资料同化方案来改进中尺度模式的湿度场;最近 Frank^[18]在此基础上用卫星资料做同化对比实验并证明利用其可提高模式预报效果。目前,日本已将 GMS 卫星云图导出的湿度场用于准业务数值预报,并认为在热带地区应用是有益的。

当前中尺度数值模式对暖季定量降水预报尤其是对暴雨强度的预报仍是一个难点,原因就是 spin-up 问题。问题的产生是由于

在头几个小时积分中没有足够的潜热加热,其原因可归结为没有适当的初始散度场、湿度场和热力场相配合。由于用于客观分析的常规观测资料密度不够,使湿度场的分析往往过于平滑,从而导致了辐散场、非绝热加热和湿度场之间的初始场缺少一致性。Wolcott^[19]也证明,如果没有足够水汽的湿度场配合,与初始辐散场相应的上升运动将得不到潜热释放的支持。因而,将卫星云图中的湿度场信息提取出来用于中尺度模式,对预报效果将会有改善。Mills等(1987)^[20]从红外图象资料和湿度场的联系,也论证了用GMS红外卫星数值图象和探空资料建立的对流层湿度廓线对改善区域模式预报的作用,最近Alan等^[21]通过调整湿度场和模式的辐射参数化,使得多云条件下有关云特征的卫星反演资料对初始场预报产生积极作用。

国内学者在卫星云图资料四维同化方面也作了一些有益的研究,早在20世纪50年代就提出过在数值预报中考虑历史演变信息的观点,并由丑纪范^[22]将利用多时刻资料信息等价的提为求解微分方程的反问题,同时引入广义解的概念;王诗文、杜行远^[23]研究指出,最优同化频率不仅与观察资料误差有关,而且还与整个同化过程的长短有关;郜吉东、丑纪范等^[24]系统考察了共轭梯度等下降算法的作用原理,总结了同化过程的特点和流程;龚建东等^[24]进一步考察了当模式、初值及边界条件都有误差的情况下,四维变分同化的特点;朱国富^[26]研究了资料同化与有限区域模式初期降水预报的关系。黎光清等(1993)^[27]根据适应反演理论,针对反演问题的欠定性,考虑东亚大陆包括青藏高原地形高度和探空测站分布,对引起统计回归反演误差的主要因素作了系统的数值实验和内部比较研究,并由此建立了适于东亚地区温、压、湿参数的自治物理同步反演模式和改进

的同步物理反演方法。其总的平均均方根误差已达到2K,并突破了在有云条件下统计回归反演方法不能反演湿度廓线的限制,对流云低层温度反演精度也有明显的提高。

在对卫星云图资料的同化分析方面,沈桐立、闵锦忠等(1996)^[11]对有限区域常规探空资料和非常规云图资料进行了变分分析和模拟,发现在加入云图信息后,能明显改善模式降水预报;李尚武等^[28]利用一维变分及迭代法进行了数值模式直接使用卫星观测资料的测试,结果表明变分反演法可以依据卫星观测来修正背景剖面而减小其误差。景学义、江敦春(1998)等^[29]探讨了卫星对流云团资料在局地暴雨数值模拟预报中的应用,表明用实时卫星对流云团图象资料增强局部初始湿度场后,可使暴雨及其邻近地区对流层中低层气流的辐合上升运动增大,从而使模式模拟的早期4~6小时的降水率加强,使模式甚短时暴雨预报在强度和落区上同实际情况较为接近。张菊芳等^[30]的研究表明变分分析能充分体现常规探测与非常规探测的优势,使得天气系统得到更精确的表示。洪景山(1999)^[31]指出卫星探空资料在低对流层有较差的垂直分辨率,其对客观分析的影响随高度场的增加而增大,在云雨系统中会使高对流层的高度场有系统性增高的趋势,并建议在有限区域预报模式中500hPa以下及云雨区的卫星探空资料应避免使用,以减少因观测误差而影响模式的分析结果。张守峰、王诗文^[32]的研究表明卫星云导风资料作为观测资料进入模式后对减小台风路径预报误差效果明显,用云导风形成人造台风模型非对称风场可进一步提高台风路径预报精度。1999年翁永辉、徐祥德^[33]等首次在测站稀少的高原地区引入经变分技术处理的卫星探空资料,使用中尺度MM5模式对高原地区降水数值预报难点进行了研究,表明变分法处理后的卫星探空资料可显著地提高高原初始

场信息的可靠性。朱民、郁凡(2000)等^[34]的研究认为引入卫星反演湿度场能较好地反映出实际湿度场的水平中尺度结构,尤其是有效地增加了对降水有重要影响的高湿区的分析,且与实际探空资料更为接近,并有使预报前期(0~6h)的降水场向观测场逼近的作用。最近闵锦忠、沈桐立^[35]等对云图资料的客观定量处理作了进一步的研究,证明将卫星云图资料进行变分同化后引入模式,可明显改善模式降水预报的强度和区域。

4 结 语

由于观测仪器的改善和反演同化资料技术的改进,卫星探测资料对初始场分析的重要性日益加大。变分方法是将卫星云图资料同化到数值模式中的有效途径,尽管许多学者已对此作了大量的研究,但它离实际应用还有一段较长的距离,问题主要在于:

(1)目前反演廓线的垂直分辨率较差,受云的干扰全天候探测能力弱,遥感反演温、湿廓线的精度,特别在高原地区,不能完全满足实用要求,地表和云顶温度反演有困难,以及低层水汽测不准。

(2)质量控制的优劣对预报有直接的影响,选择合理的质量控制方案必不可少。

(3)有必要对目标函数的构造和下降算法作进一步的研究,合理的目标函数和有效的下降算法有助于提高其收敛速度,节省计算费用,这对于开发实际应用的同化系统是非常重要的。

(4)目前的伴随同化系统都是利用伴随码技术构造的,但伴随码技术在处理湿物理过程时存在一定的缺陷,因而需要寻找一种好的数学方法来开发复杂的伴随方程。

参考文献

1 黄荣辉,吴津生. 卫星资料在数值天气预测中的应用与四维同化分析方法的若干进展. 国家卫星气象中心, 卫星气象文集, 北京: 气象出版社, 1987: 23~26.

- 2 Cressman, G. P. An operational objective analysis system. *Mon Wea Rev*, 1959, 87: 365-374.
- 3 Ghil, M., Cohn, S., Tavantzis, J., Bube, K. and Isaacson, E. Applications of estimation theory to numerical weather prediction in dynamical meteorology data assimilation methods. Bengtsson, L., Kallen, E. Springer-Verlag, NEW York, 1983: 139-224.
- 4 Sasaki, Y. An objective analysis based on variational method. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1958, 36: 77-88.
- 5 Sasaki, Y. Some basic formalisms in numerical variational analysis. *Mon Wea Rev*, 1970, 98, 875-883.
- 6 LeDimet, F. X and Talagrand. Variational algorithms for analysis and assimilation of meteorological observations theoretical aspects. *Tellus*, 1986, 38A: 97-110.
- 7 Nicole Rostaling, N, et al. Automatic differentiation in odyssey. *Tellus*, 1993, 45A: 558-568.
- 8 Smith W L, Woolf H M, Hayden C M, Schreiner A J. The simultaneous export retrieval package. 2nd International TOVS Study Conf. Igls, Austria, 18-22, Feb. 1985. 224-253.
- 9 Chedin A, Scott N A, Wahiche C, Moulinier P. The improved initialization inversion method: a high resolution physical method for temperature retrievals from the TIROS-N series. *J. Climate Appl. Meteor.* 1985, 24: 128 - 143 Winston, C Chao and Lang-ping Chang Development of a four-dimension variational analysis system using the adjoint method. Part 1: Dynamics. *Mon Wea Rev* 1992, 120: 1661-1673.
- 10 Adler, R. F and A, J. Negri. A satellite infrared technique to estimate tropical convective and stratiform rainfall. *J Appl Meteor.* 1988, 27: 31-51.
- 11 沈桐立, 闵锦忠, 吴诚鸥. 有限区域卫星云图资料变分分析的实验研究. *高原气象*, 1996, 15(1): 58~67.
- 12 Smith W L. Atmospheric soundings from satellites-false expectation or the key to improve weather prediction. *Q. J. Roy. Met. Soc.* 1991, 117: 267-297.
- 13 Eyre J R. Inversion of cloudy satellite sounding radiances by nonlinear optimal estimation, I: Theory and simulation for TOVS. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 1989, 115: 1001-1026.
- 14 Eyre J R. et al. Assimilation of TOVS radiance information through on dimensional variational analysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 1993, 119: 1427-1463.
- 15 Anderson, E. J. Paillenx, J-N. et al. Use of cloud-

- cleared radiances in three/four-dimensional variational data assimilation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1994, 120: 627-653.
- 16 Smith E A et al. Result of wetnet PIP-2 project. *J Atmos Sci*, 1998, 55(9): 1483-1536.
- 17 Andrew S, Jones I C C, Thomas H. Data assimilation of satellite-derived heating rates as proxy surface wetness data into a regional atmospheric mesoscale model, Part I; *Meteorology. Mon Wea Rev*, 1998, 126: 634-645.
- 18 Frank, H. Assimilation of satellite imagery data and surface observations to improve analysis of circulations forced by cloud shading contrasts. *Mon Wea Rev*, 2000, 128: 434-448.
- 19 Wolcott S W, Warner T. A mixture analysis procedure utilizing surface and satellite data. *Mon Wea Rev*, 1981, 109: 1989-1998.
- 20 Mills G A, Davidson N E. Tropospheric moisture profiles from digital IR satellite imagery: system description and analysis/forecast impact. *Aust Meteor Mag*, 1987, 35(3): 109-118.
- 21 Alan et al. Assimilation of visible-band satellite data for mesoscale forecasting in cloudy conditions. *Mon Wea Rev*, 1999, 127: 265-278.
- 22 丑纪范. 天气数值预报中使用过去资料的问题. *中国科学*, 1974, 6: 635-644.
- 23 王诗文, 杜行远. 气象观测误差和四维同化数值模拟实验. *气象学报*, 1984, 42(4): 459-465.
- 24 郜吉东, 丑纪范等. 数值模式的初值敏感性程度对四维同化的影响——基于 Lorentz 系统的研究. *气象学报*, 1995, 53(4): 471-479.
- 25 龚建东, 丘崇践. 区域四维变分同化的数值实验. *气象学报*, 1999, 57(2): 131-141.
- 26 朱国富. 观测资料同化与有限区域模式初期降水预报. *北京大学学报, 自然科学版*, 1999, 35(1): 81-88.
- 27 黎光清等. 东亚地区气象参数同步物理反演方法的数值实验: SPRM 和 ISPRM. *大气科学*, 1993, 17(4): 489-498.
- 28 李尚武. 卫星观测辐射资料之一维变分反演法. *大气科学(台湾)*, 1997, 25(3): 337-356.
- 29 景学义, 江敦春. 对流云团资料在局地暴雨数值模拟预报中的应用. *南京气象学院学报*, 1998, 21(4): 662-669.
- 30 张菊芳. TOVS 卫星反演资料变分分析的实验研究与应用. *气象科学*, 1999, 19(2): 206-212.
- 31 洪景山. 卫星探空资料(SATEM)在中央气象局有限区域预报系统之客观分析模组的应用. *大气科学(台湾)*, 1999, 27(1): 61-74.
- 32 张守峰, 王诗文. 在台风业务系统中使用卫星云导风资料的实验. *气象*, 1999, 25(8): 22-25.
- 33 翁永辉, 徐祥德. TOVS 资料的变分处理方法在青藏高原地区的数值实验. *大气科学*, 1999, 23(6): 703-712.
- 34 朱民, 郁凡等. 卫星反演湿度场及其在暴雨预报中的初步应用分析. *气象学报*, 2000, 58(4): 470-478.
- 35 闵锦忠, 沈桐立等. 卫星云图资料反演的质量控制及变分同化数值实验. *应用气象学报*, 2000, 11(4): 410-418.

Application of Satellite Data to Numerical Model

Zheng Zuofang Shen Tongli Zhang Xiuli

(Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044)

Abstract

The development of satellite remote sensing technique give more and more no-real and no-complete quasi-continue research data. Comparing with other conventional observations, satellite data have higher horizontal precision and wider research area. It is more easily to control measure errors. The applications of satellite data to numerical model were analyzed, and some meaningful study results for the development of satellite data assimilation were presented.

Key Words: satellite image retrieval data assimilation numerical model