

关于发展人工影响天气数值模式的一些问题^{*}

许焕斌 尹金方

Xu Huanbin Yin Jinfang

中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京,100081

State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

2016-06-22 收稿,2016-10-17 改回.

许焕斌,尹金方. 2017. 关于发展人工影响天气数值模式的一些问题. 气象学报, 75(1):57-66

Xu Huanbin, Yin Jinfang. 2017. Some key issues in developing the numerical model for artificial weather modification. *Acta Meteorologica Sinica*, 75(1):57-66

Abstract The scientific foundation of artificial weather modification is meso- and small-scale dynamics and cloud-precipitation microphysics. Artificial weather modification requires to realistically couple weather patterns, dynamical processes, and microphysical processes together. Now that the numerical models with weather dynamical characteristics have been widely applied to artificial weather modifications, some keys points, which must not be neglected, in developing specific numerical models for artificial weather modification are proposed, including dynamical equations, model resolution, cloud-precipitation microphysical processes, numerical computation method, and initial and boundary conditions. Based on several examples, approaches are proposed to deal with the problems. The key points are useful for developing specific numerical models for artificial weather modification. These key points, if considered in a numerical model, will make it further suitable for artificial weather modification.

Key words Artificial weather modification, Numerical model, Dynamical processes, Cloud-precipitation microphysical processes

摘要 人工影响天气的学科基础是中小尺度天气动力学与云降水物理学,需要将天气-动力-云降水物理耦合为一体。考虑到目前将天气动力学性质的基础数值模式用于人工影响天气中的问题,从数值模式动力方程、模式分辨率、云物理过程、数值求解方案、初边值条件等方面系统地探索了发展人工影响天气数值模式中一些需要重点解决、且不可忽视的特色问题,并举例对相关问题的提出了解决思路和方法。期望提出的问题有助于构思更适合于人工影响天气数值模式,使数值模式功能真正向满足人工影响天气的要求靠近一步。

关键词 人工影响天气, 数值模式, 动力过程, 云-降水微物理过程

中图法分类号 P48

1 引言

中国人工影响天气活动规模世界第一,项目多样,且正日趋于业务化。形成这种局面的主要因素是社会需求的推动,同时也是人工影响天气科学技术基本配套、可以实际试应用的表现。但是,目前人

工影响天气并不能满足社会在水资源、减(水、旱、雹等)灾、环境等方面的迫切需求。究其根源,就是目前对人工影响天气的基础科学问题的认识还存在局限性和盲目性。当然这需要深入、全面地了解自然云系的宏、微观过程,以及如何科学决策作业影响云系演化进程的措施。事实说明,单靠观测或理论只

^{*} 资助课题:国家自然科学基金项目(41405006)、财政部/科技部公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406003、GYHY201506002)、中国气象科学研究院基本业务专项(2014R016)和“东亚区域大气再分析”(2015Z003)。

作者简介:许焕斌,主要从事云-降水微物理学、人工影响天气、数值模式发展等方面的研究。E-mail: xhb@mail.iap.ac.cn

能提供结构和进程的“蛛丝马迹”或“环节”性结果,要再现整体图像还得依靠数值模式。原因是只有数值模式,不仅可以运用较少简化的接近于自然的原始方程组,而且能够容纳观测、理论、实验成果,并把其融合成一体去模拟各式各样的实例过程。所以,依据人工影响天气学科特点来发展新一代的人工影响天气数值模式是很有必要的。

郑国光等(2012)指出,随着计算机不断发展,将详细数值模式应用于人工影响天气的实际业务中已经成为可能,并强调数值模式可以在方案设计和论证、作业过程指导、作业后分析3个方面应用于人工影响天气。然而,尽管利用飞机、雷达、卫星等综合观测,结合中小尺度数值模式在人工影响天气过程中取得了较大的进展,但人工影响天气中尚有诸多待解决的科学问题和技术难题(刘奇俊等,2002)。

将数值模式应用于人工影响天气已做了多方面的努力(毛玉华等,1993;黄燕等,1994;洪延超,1998;洪延超等,2012;郭学良等,2013;Guo, et al, 2015)。中国国家气象中心利用包含详细云微物理和催化过程的GRAPES云模式,率先建立了GRAPES云系人工增雨条件预报模式系统(陈小敏等,2007;马占山等,2009)。北京市人工影响天气办公室基于系统设计研发了北京人工影响天气冷云催化潜力识别模式平台(嵇磊等,2014)。中国气象局人工影响天气中心建立了MM5-CAMS和GRAPES-CAMS模式实现了人工影响天气业务系统。结合数值模式为人工影响天气作业时机、空间范围、催化剂量等方案的设计提供了参考,同时也为人工影响天气作业效果检验提供了数值模拟手段。

目前,用于人工影响天气的数值模式是在一些中小尺度基础数值模式中添加了多种云-降水物理描述方案和人工影响作业模块发展而来的,这些数值模式已有可能逐步成为人工影响天气理论研究及引导人工影响作业的工具,但是这些基础模式是否能满足人工影响天气的模拟要求?所加的云物理模块是否适配,是否能再现各式各样的自然降水过程?在应用中已显露出一些问题。初步考察可以看出,人工影响天气基础模式的动力框架、数值计算方案、复杂云物理过程以及与动力框架的耦合技术等方面需要有针对性的更新或改进。

近20年来,中国在发展人工影响天气的基础模式方面已做了多项工作,以三维非静力全弹性模式

为例,如许焕斌等(1990)、王谦等(1990)、孔凡铎等(1990)、周晓平等(1996)的云模式。Guo等(2006)在三维云模式中加入了冰雹分档描述方案。

由于在构建用于人工影响天气基础模式中,大致还是沿着中小尺度天气动力学的发展和大尺度天气动力数值模式的计算数学的成果来设计的,在全盘引入的同时也将一些不甚合适的框框带了进来,功能性的不足业已呈现。如不细究这一情况势必带来隐患。为此,需要深入探讨人工影响天气的学科特点进而设计适用于人工影响天气的基础模式。由于人工影响天气是要在掌握自然进程的情况下来施加影响的,只有基础模式可靠了,才能去加人工影响模块来评估其效应。

本研究试图着重就基础模式方面的一些带基础性的问题做些探讨,也就发展新一代人工影响天气数值模式中的一些具体问题,提了一点思路和参考方案。

2 人工影响天气模式的特点

人工影响天气数值模式的特点是由人工影响天气对模式功能的要求决定的。人工影响天气中期望得到伴随天气系统的云系(体)结构(初始状态)及演化路径(变化进程和终态),在此基础上视情况来施加人工影响使其向减灾增益方向转化。而云系结构和演化路径是云系(体)宏观动力学与云-降水物理学相互作用的结果,因而数值模式应该具有对宏、微观过程及相互反馈的描述接近自然的能力。需要强调的是这里所说的云系结构及演化是直接细致的描述,不是云-降水过程的总体效应。在气候模式中最关心的是云的辐射效应和水凝物相变潜热多少和垂直分布,可以不关心空中云的具体状况,只要把握好总体效应即可。然而,一般天气模式关心的是降水量,并不一定要掌握空中云状况,只要把握好地面降水强度和分布就行。

综上所述,人工影响天气数值模式有其自身特点,与其他数值模式(天气、气候、环境、单一云-降水微物理模式)有显著的差别。其他模式通常只关注云场、地面降水、云微物理、潜热加热廓线等,而人工影响天气模式需关心云场的结构、空中云-降水粒子场,追踪云粒子场的结构及演化路径等。因此,人工影响天气模式需要显式描述云。然而,云的结构和演变是云宏观场与云微物理场相互作用的结果,不

能靠简单或者固定的参数化来描述。因此,这对人工影响天气模式动力-热力框架和云-降水物理的显式描述功能要求更加严格。

3 对人工影响天气模式功能的总体要求

对大气精细结构的描述需要准确又保真的动力描述功能来支撑。即需要完全的三维动力方程组、保真的差分计算格式、高时空分辨率适配的物理过程、合适的初边条件、在分叉点有智能辨别演变途径的云-降水物理过程等功能,这些是人工影响天气数值模式的关键点。

云中水凝物的相态和空间分布是人工影响天气重点观察的重要参数。因此,人工影响天气模式应该能够合理地反映水凝物的主要演变特征,同时能够提供最佳撒播的定量条件和追踪撒播云的演变。此外,模式能够提供丰富的诊断物理量,为撒播效果的检验和评估提供参考。

4 实现总体要求的具体内容

4.1 完全的三维动力方程组

大气运动是三维的,所以数值模式中大气运动也应当是三维的。由于计算机能力的限制,数值模式发展早期通常采用了一维(z)和二维(x, z)模式。然而,这种考虑计算量问题所做的降维处理会引起一系列的歪曲。不能正确地考虑风场,歪曲了水平气流的辐合作用。一维模式难以考虑水平气流的作用,二维模式也只能描述一个正反方向上的水平运动,不能描述水平转动流,且二维模式限制了环境风场与对流环流的能量交换。因此,要正确地描述大气的各种现象,数值模式应当采取三维结构。如上所述,大气现象通常是三维的,在云尺度强对流现象的研究中尽可能多的考虑大气的可压缩性是有益的,发展一套可压缩大气的三维云尺度模式是十分必要的。因此,模式方程组应当是尽量不再简化(或非为提高功能而进行的转化)的、完全的、含有三相水物质的大气运动方程组。

大气运动方程可以采用欧拉式和拉格朗日式两种表达方式。选用哪种形式更好些呢?自然云的图像应当是在宏观动力、热力、水汽场框架下,一群水凝物粒子一边运动一边增长。水凝物粒子群运行状态由动力流场和粒子的运动特征(末速和影响末速的质量、形状、表面粗糙度等)决定,而增长状态则由

水汽、水凝物场和热力场决定。虽然粒子是成群存在的,但每个粒子的运动是由粒子本身的物性来控制的。大粒子的运动主要受自身属性和环境场的影响,而小粒子还可能受到大粒子运动的影响,但粒子间近距离相互作用在计算物理和实验测量上都是难题。一般情况下,假定单个粒子的运动不受周围同类粒子的约束。尽管水凝物粒子场是一个不连续场,但不是一个动力断裂场,不会阻拦云中宏、微观场的相互作用。为了尽可能地使数值模式结果接近实际大气运动的物理图像,可以做下列的选择:云的宏观场,用欧拉式来描述,对于可作为连续场处理的云水粒子背景场用半拉格朗日式来描述,而对降水性粒子群用全拉格朗日式来描述(许焕斌等, 2001; 许焕斌, 2012)。

4.2 高空间分辨率

既然人工影响天气模式需要细致地了解云系(体)的结构及演变,一种直接的措施就是提高模式的时空分辨率。首先能分辨当然是必要的,那么需要什么样的分辨率呢?这需要与当前主导观测手段的雷达产品的宏观探测精度相匹配。当前,雷达的观测分辨率是 200 m,因此模式的分辨率应与此观测精度相当。

提高分辨率的优点是:减少计算误差,增加小尺度信息,容纳并能够描述激发出的短波,扩展了模式对多波运动的模拟能力等。可是,中小尺度运动通常是三维的、非静力的、非线性的,在模式积分中难以驾驭。所以,提高时空分辨率不是单一技术性措施,还需解决相关的科学问题。

4.3 适配的显式描述的云-降水物理过程

人工影响天气期望能够看清云系(体)结构及具体的演化路径,因此,需要采用显式云物理方案来直接描述云-降水微物理过程。研究(Zhang, et al, 1988)表明,可细致描述云-降水物理过程的显式方案对于层状云降水有优势,而对于对流性降水系统则是隐式的对流参数化方案有优势。直接(显式)描述云降水过程的方案对具有简单动力结构的层状云降水适用性较好,而间接(隐式)描述云降水的参数化方案在低分辨率条件下(近来的结果显示,在高分辨率(小于 2 km)的情况下,对小尺度运动图像描述的也不好,这相当于对粗网格内次网格尺度运动的显式描述能力有缺失)反而对具有复杂动力结构的对流云降水较好,这到底是为什么呢?显式方案精

细描述云降水过程对大尺度、较均匀的云系具有优势,而对中小尺度、非均匀云体的描述能力反而不如参数化方案,这与发展显式方案的初衷相背,确实应当搞清楚。

一个可能的重要原因是采用显式方案直接描述云。显式描述虽然有可能刻画得细致,但支撑云发生、发展、衰亡的是动力框架,后者才是根本性的因素。只有动力框架合适,云结构的大体轮廓才会符合实际,在此前提下的细致描述才有意义。对于支撑大尺度、较均匀云系的动力框架中,其网格区的平均气流与格点的气流差别较小,支撑云系形成的气流接近于自然,所以云系结构大体上是合适的,在这一基础上用显式方案来做细刻画,效果就会好些。而对于中小尺度、非均匀云体来说,格点代表的网格平均气流与实际气流流态可能有很大差别,这样网格点给出的流场所支撑的云系(体)与实际流场支撑的云系(体)就会有明显差别,可以是对流云与层状云这样的云型上的差别,甚至是有云与无云的差别。有无云或云型的基本云场都无法把握,细致的描述就没有意义了。

次网格过程对目前尺度下的模式仍然是相当复杂和重要的物理过程,如次网格云的处理以及与相关尺度的相互作用,次网格重力波拖曳和湍流扩散的作用等。因此,显示云微物理方案需要与次网格物理过程相互协调才能较合理地描述大气中的真实物理过程。

举例来说,在网格区内的上升运动平均速度等于 0,这意味着不存在支撑云生成的动力框架,云应

当不生成。但是网格平均上升气流等于 0,并不是网格内没有上升运动,其可以是具有多种上升运动的分布情况下的平均结果。既然存在着上升运动就应当出现云(图 1)。同理,网格平均上升气流较小,按均匀上升运动来看其应当出现层云,但按非均匀上升运动流态来看,它又应当支撑积-层混合云或对流云生成(图 2)。因此,要描述好云场首先要描述好流场,即模式模拟的流场要与实际流场在流型上一致。

隐式描述方案有次网格运动的处理设计,并不单纯看格点平均上升运动来估计云的形成,各种对流参数化方案就是考虑这种次网格运动对云和降水影响的,也考虑了次网格垂直传输对气层温、湿结构的影响。从这点来看,参数化云-降水描述方案虽是隐式的,不直接描述云,是一种粗描述,但在物理上思考是比较齐全的。显式方案虽然在云物理过程上可以很细,但一定需要动力框架合理适配,否则就可能会出现虽细致但在物理上有重要缺失的现象。正因为如此,才出现了混合描述方案,即显式直接描述与隐式参数化描述并用的方案(Tiedtke, 1993; 谭超等, 2013)。但这要注意可能出现的“一笔开支,两次记账”的情况。

运用混合方案的试验研究还表明,当模式水平分辨率低于 5 km 时,隐式积云对流参数化的重要性显著降低(Zhang, et al, 1988; Yu, et al, 2010)。所以有学者建议,应尽量避免积云对流参数化方案的使用,所有的云-降水微物理过程采用显式描述(张大林, 1998)。

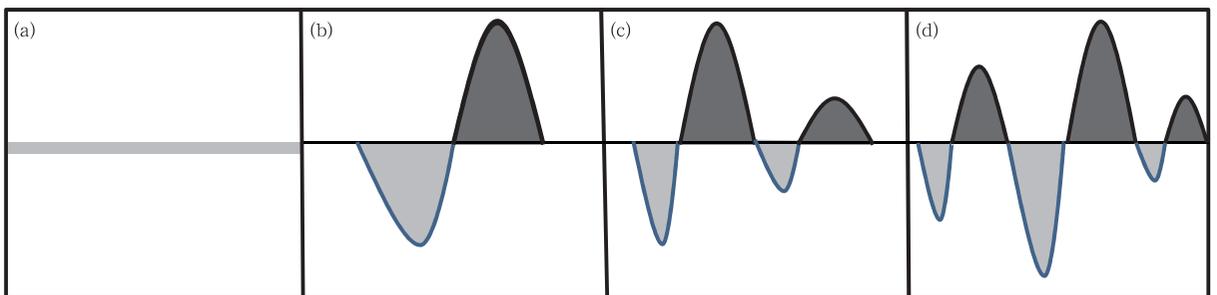


图 1 在网格内平均上升气流等于 0 的情况下,可能出现的上升运动和云分布

(a. 无云, b. 1 个云泡, c. 2 个云泡, d. 3 个云泡)

Fig. 1 Potential patterns of vertical motion and cloud distribution under the condition when the gridbox-averaged vertical velocity is 0 m/s

(a. no clouds, b. one cloud cell, c. two cloud cells, d. three cloud cells)

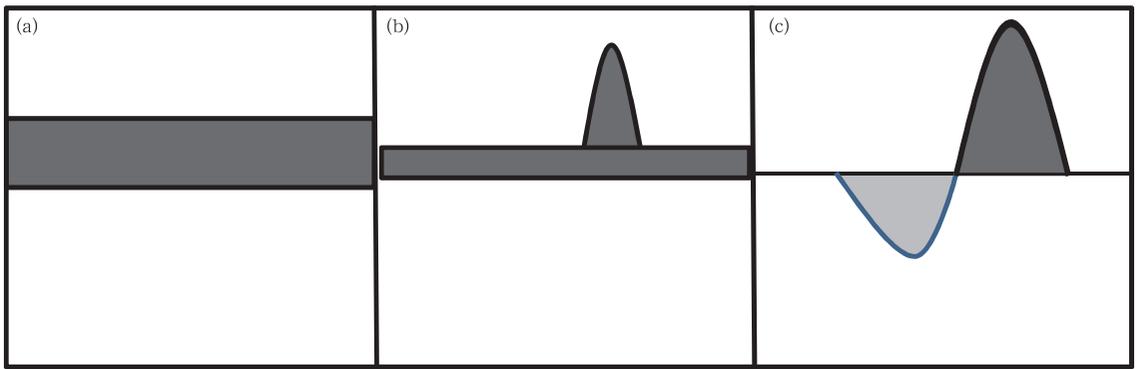


图2 在网格内平均上升气流大于0的情况下,可能出现的实际上升运动的图像及相应可能出现的云型
(a.层云, b.层-积混合云, c.积云(对流云))

Fig.2 Potential patterns of vertical motion and cloud types under the condition when the gridbox-averaged vertical velocity is greater than 0 m/s

(a. stratiform cloud, b. stratiform and cumulus mixed cloud, c. cumulus (convective) cloud)

由上述分析和图示可以看出,当网格平均运动与实际运动差别甚小时,模式给出的运动样式与实际相近,即动力框架是准确、可靠的。用良好的显式云-降水方案,就会得到较好的结果(宏、微观场都精确)。当宏观动力场不合适时,次网格运动在隐式对流参数化描述方案中能够粗略体现次网格运动的作用,但它还是不能给出具体的次网格运动的图像。这就需要提高模式分辨率来尽可能地将次网格运动变化为网格可分辨运动,减小次网格运动的影响程度。

但是,进一步的研究试验指出,随着模式分辨率的不断提高,尤其是分辨率到1 km时,提高模式分辨率却未能改善模式模拟效果(Schwartz, et al, 2014; Seiki, et al, 2015)。这是为什么呢? 这是否暗示现有的动力框架的设计及计算方案有问题,不能正确描述空间分辨率小于2 km的运动图像了呢? 这是有可能的。因为方程组是非线性的,需要数值求解,这就要合适的数值积分方案,其中有一些守恒要求,如质量守恒、能量守恒等。对于天气、气候模式而言,在分辨率小于2 km时可能已满足这样的要求,但对于人工影响天气数值模式,在分辨率小于2 km的情况下可能还得有其他要求,如组成这些量的成份是不是合适。动量守恒表示所有出现的运动尺度包含的动量不变。然而,当较大尺度的运动量偏大些,较小尺度运动量偏小些,总动量可以守恒;反之,亦然。但组成动量的运动成分变了,运动的特征或主导尺度就变了,运动的性质变了,造成

运动图像失真。这就需要增加数值积分中的“保真性”要求。

对于模式分辨率,除需要考虑模式动力过程与云微物理过程适配问题外,还需要考虑模式分辨率对云微物理参数化本身的影响。如在几十千米的水平格距时,可能相对湿度70%即认为是饱和了,超过部分可处理凝结成云,而在分辨率达到千米量级时,此相对湿度的饱和判据则会提高至100%。此外,在千米量级,甚至更高分辨率条件下,还需考虑湍流对云微物理过程的影响。

4.4 保真的差分计算格式

在最初的基础模式设计中,许焕斌等曾注意到在运用已有差分格式时,应尽可能选择对短波衰减小的,并注意控制二倍格距波的干扰,起到了一点防范作用,还没有从“保真”这个思路来探讨新的计算物理方案。

如何能把流场模拟好呢? 还需要从模式的动力框架入手,虽然通常认为改进动力框架有困难,甚至觉得“油水”不大。这对于大、中尺度的模式来说可能是个知难而退的托词,但是对人工影响天气模式的动力学要求来说,不论“油水”大或小,皆是值得迎难而上去挖掘的。起码可以看出,单有全而好的方程组还不行,还得有个能保真求解方程组的差分计算格式。钟青(1992)、Zhong等(2002)提出了一种空间离散方案构造原则——全能量保真数值的思路 and 方案,很值得重视并应用。

在 Zhong(1992)设计的非静力保真模式(F-

Model; Fidelity-Model^①) 动力框架差分离散方案构造中, 采用了全能量物理保真算法。新方案针对实际大气中能量转换的特点, 从能量平衡角度入手, 重建离散微元内部动能、重力势能、内能和潜热能等能量分量相互转换和制约机制及各微元间能量分配机制, 能够保持微元能量和质量特性。相对于目前已有的其他非静力模式动力框架, 新方案有效地抑制了离散后由于能量平衡破坏造成的虚假源、汇而出现的“毛刺”, 虽然“保真”方案要真实的短波, 但这些

虚假的小“毛刺”一旦发展可能带来计算不稳定。图3所截取的是一个误差最小的剖面, 其为具有最少截谱的洛伦兹非线性模型。可以看出, 保真格式就可以做到比较严格的守恒。然而, 常规方案虽有能量和拟能等守恒功能, 但计算格式的问题只可达到总体守恒, 难得时时处处守恒。常规数值解中出现了很多“毛刺”, 这些虚假的小“毛刺”不仅歪曲了物理图像, 而且一旦发展可能带来计算不稳定。

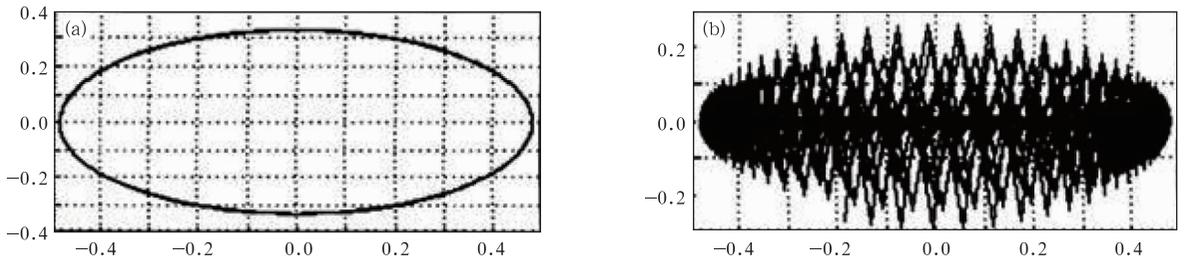


图3 保真方案(a)与常规方案(b)比较(钟青, 私人通讯)

Fig. 3 Comparison of a conservative scheme (a) and a conventional scheme (b) (Zhong Qing, personal communication)

由此看来, 在网格点 (i, j, k) 上满足局地能量转换关系的保真要求, 而不是只在全计算域来实现某种守恒(图4)。这个思路是很有道理的, 在一个个网格内满足局地能量转换关系的守恒(保真)性要求, 就有可能在每个格点内不明显地失真生乱, 这才有可能做到全场总体上保真不乱。

保真模式离散设计中, 在网格点 (i, j, k) 上满足局地能量转换关系

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho(K + \Phi + c_v T)]_{i,j,k} = -\nabla \cdot [\rho(K + \Phi + c_p T)V]_{i,j,k} + [\rho(F \cdot V + Q)]_{i,j,k} \quad (1)$$

式中, K 为动能, Φ 为重力位势, T 为温度, F 为运动方程中的外力, V 为速度, Q 为比湿, c_v 为定容比热, c_p 为定压比热, ρ 为空气密度。

由于能在保证计算稳定的同时, 也保持了网格微元的能量特性, 这就能更真实地描述中小尺度成分和多尺度结构, 也避免了过度使用数值平滑、额外耗散引起的人为性衰弱带来的组分变异弊病。钟青的初步对比试验表明, 由于改善了网格的能量转换的保真性, 可以做到离散积分的稳定性从满足必要条件提高到满足充分条件, 其有效分辨率达到3—4格, 而WRF为5—7格, MM5为8—9格, EC为10格。为此, 人工影响天气模式的构建者, 应该将这方面的研究试验进行下去。

4.5 运动尺度组分失真、过度数值平滑和额外耗散可能带来的弊端

大气运动时而平静时而剧变, 在这样的转换

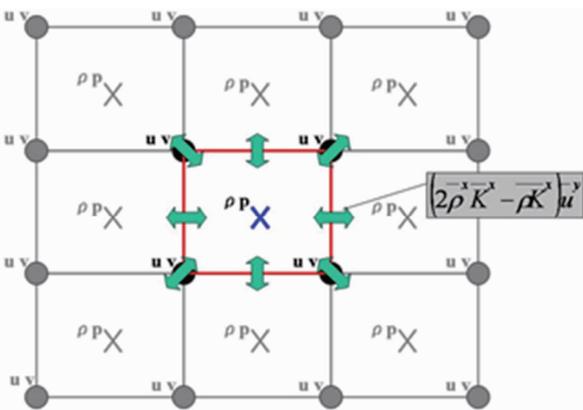


图4 网格点 (i, j, k) 满足局地能量转换关系的保真方案(钟青, 私人通讯)

Fig. 4 Flowchart of a conservative scheme for local energy transfer at the grid (i, j, k) (Zhong, personal communication)

^① 钟青, 私人通讯。

中常伴有次级小尺度运动,这些小尺度运动由于难以处理,过去通常认为没有天气意义或没有动力意义而被削除。事实的确是这样的吗?看来不是,现举一个例子说明之。

图5所示的为闭合流线和失真可能流型的举例。可以看出,在气块有浮力上升中出现了“闭合对流环流”,在运动尺度上它是一个新组分,它属于小尺度运动(图5a)。如果在计算中将其当作“噪声”消除,那么启动对流发生的“锥形对流环流”可能

就被扼止,即使不被清除,由于处置不当或失真等,也可能使原来闭合对流的运动图像演化成“开口对流环流”或“波动”(图5b,c)。从流型的结构特征可以看出,这3种流型在性质上有本质的区别。例如,其各自的维持、发展机制和优势条件有区别;能收集利用的不稳定能量范围是不同的;发展演化的终态和伴随的天气现象会有明显差异等。如果事实如此的话,这可是个很有动力学意义的课题。

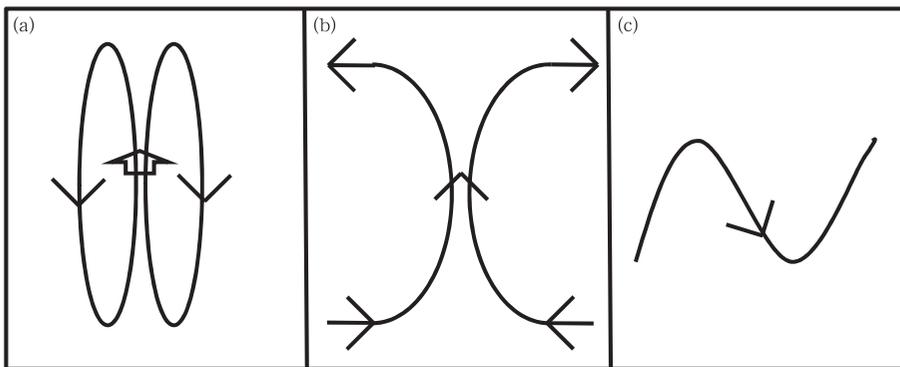


图5 闭合型对流流场(a),开口型对流流场(b),波式上升型流场(c)

Fig. 5 Patterns of (a) closed convective airflow, (b) opened convective airflow, and (c) wavy upstream airflow

4.6 显式方案的检验和系统演化分叉点的智能化走向判别

在改进动力框架的基础上,尚需检验现有显式描述云方案是否合适及如何改进。高分辨率模式中可能有3方面的原因引起模拟结果偏差:(1)模式动力过程与模式微物理进程是否适配。(2)云微物理参数化方案的参数取值与模式分辨率是否匹配。为何会出现不匹配呢?(3)即使加入模式的云微物理环节是齐全的,由这些环节组合起来的过程链是多样的,模式规定的是否与自然的一致?这种不一致会产生多大的影响?因此,结合外场科学试验综合观测、雷达观测、卫星观测等多源资料,勾画出自然云-降水过程的轮廓,再与数值模拟比较,探讨两者出现差异的原因,寻求如何适配、如何匹配的规律,并结合模拟结果的诊断信息,为智能化辨别演化走向提供依据。

对现有云微物理方案如何评估呢?评估模式云微物理描述方案最简单、最常用的方法是对比模式降水与地面观测降水。然而,这种方法只能了解云

微物理过程的终态,无法认识云和降水过程发生、演化路径。雷达和卫星观测一定程度上弥补了地面观测时间和空间上的不足。这就需要比天气、气候模式更深入探讨雷达、卫星、地面自动站和飞机探测资料的应用问题。

灾害性中小尺度天气系统是宏、微观场相互作用的产物,必然会有相互反馈,而且云微物理过程及与动力场的反馈是强烈的,对系统演化方向是起主导作用的,反馈的图像可以是多样的。对于描述云-降水过程来说,显式方案可以列出齐全的各个环节和环节间的多种连贯路径,哪个环节起主导作用以及其向哪个下游环节演变,也是多样的。具体的自然演变路径是多种可能组合出的路径中的一种,而走哪条路径对演化终态可以有重大差别。因而难以采用某一云微物理参数化方案来描述所有的云-降水微物理过程。这或许正是导致云微物理过程及其反馈机制引起模拟结果不确定性的主要原因。

Yin等(2015)指出,为了更好地提高数值模式对强降水过程发生、发展的模拟能力,有必要揭示出

形成灾害性天气系统的水粒子场的主导云微物理过程的演变规律,发展“智能化”云微物理描述方案,实现从目前的“硬性规定”向将来的“自然转换”靠拢,朝这个方向努力看来是必要的。众所周知,云-降水的演变途径是多变的,而数值模式中往往只根据少数的个例观测、理论研究或试验结果来限定云-降水的演变途径和方式,会大大地限制云-降水的自然发展。因此,有必要结合多类型天气的多源综合观测资料,分析出不同宏、微观条件下云-降水的演变规律。在此基础上,在云-降水的描述方案中可设计多种选项,利用云-降水的宏、微观特征作为判据,实现云-降水发生、发展的多途径演变。

4.7 如何来分类水凝物粒子群

水凝物粒子群包含云滴、雨滴、冰晶、雪、霰和冰雹等。如果不分类而单按质量(或尺度)分档时,相态、形状、质量密度就难以考虑其影响。为了分辨相态是否只需将粒子分成水粒子和冰粒子两部分?水粒子可以按准球形来处理,质量密度等于水;冰粒子的形状太多样,难以细究,但可以用干湿增长条件来判断冰粒子是干或是湿(含水)并诊断出其质量密度。冰粒子中是否是冰晶、雪、霰或冰雹粒子可用所在档的尺度、质量密度等来判别?而不必按设计者定出指标硬性地吧冰粒子分成冰晶、冻滴、雪、霰和冰雹?因为这样分类增加了描述方程的数量,繁琐了相互作用,而且阻碍了冰粒子间的自然转换。

4.8 合适的初边条件

人工影响天气模式还需要具有比天气、气候模式更合适的初边条件的给定方案。在获得初始场时,客观分析关注中、小尺度系统的结构特点,场值的网格化取值要就近舍远。图6显示的是近点资料拟合(或近点资料的扫寻权重插值)示意图,从图中可以看出,近点拟合能够反映出中、小尺度的特征。

对于一个区域模式来说,有边界处理问题。特别对于人工影响天气模式来说,描述的运动尺度谱更宽,保真性要求高,需严防假波混入兴风作浪,祸及全局,边界处理更需周到。经试验一些常用的边界处理方案皆不够完善,为此设计了悬浮边界和递解边界。边界流入场为较大运动尺度的输入,可能在边界受到阻滞,可采用悬浮边界(许焕斌等,1988)。对于流出边界常可发生寄生短波或波反射或驻波,可采用递解边界方案把假波递解出境(许焕斌,2014)。

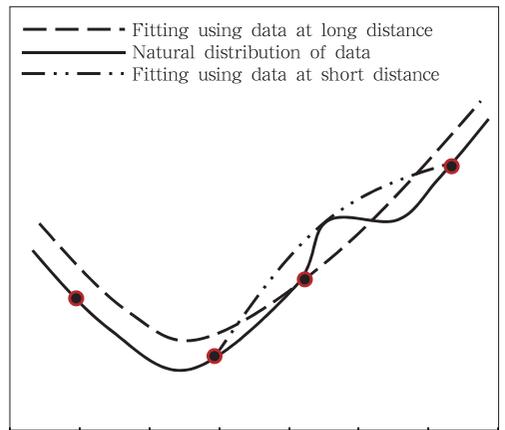


图6 自然分布区域(实线)及用远(虚线)、近(点划线)资料点拟合的分布曲线示意

Fig. 6 Schematic diagram of natural distribution of data (solid line), and the fitting curves using data at long distance (dash line) and at short distance (dot-dash line), respectively

5 结语和讨论

建立功能齐全的通用模式确实尚存在着一些困难。由于对人工影响天气模式的要求高,很难像以往那样再去“搭车”获取天气、气候模式的新成果。所以人工影响天气的研究者应当自己动手做起来,可先针对不同类型的人工影响天气问题对数值模式有针对性地来设计和构建专用人工影响模式。如分别建立适用于理论或原理性探讨,个例的精细模拟(再现、观测资料的融合、个例物理模型的勾画等),效果评价等的模式。人工影响天气数值模式应具备以下特点:

(1)模式动力框架采用三维、可压缩大气,含有三相水物质的大气运动方程组。云的宏观场,用欧拉式来描述,对于可作为连续场处理的云水粒子背景场是用半拉格朗日式来描述,而对降水性粒子群用全拉格朗日式来描述。边界流入场为较大运动尺度的输入,可能在边界受到阻滞,可采用悬浮边界;对于流出边界常可发生寄生短波或波反射或驻波,可采用递解边界方案把假波递解出境。

(2)模式水平分辨率应与雷达观测分辨率(200 m)相当,能够较好地描述大气运动的非均匀性。在高分辨率条件下,发展保真的差分方案,以保证动量守恒的同时,使组成动量的运动成分合理演变。

(3)人工影响天气模式中需采用显式云物理方案来直接描述云-降水微物理过程,可根据需要对其中的部分粒子进行分档处理。构建云物理参数化方案过程中,应结合模式的动力过程、模式分辨率等属性。

构建起具有如上所述的功能的模式后,为模拟或预测自然云系结构及演化提供了有效的工具,可利用模式再现实例的演化过程,并判断是否能开展什么样的人工影响措施,使天气过程向人们期望的方向和终态转变。有了这样的基本模式,再配合观测实况中给出实例天气的“体”,能为人工影响天气“量体裁衣”。因为实施人工影响天气的措施是要针对具体天气系统的实体结构,不可“大而化之”,而需“量体裁衣”才能取得可靠的效果。

当然,基础模式应具有较强的资料同化和云分析能力,同时具备完备催化物理过程和催化数值技术方案。其实完善基础模式的功能也有助于提高资料同化和云分析的质量。在此基础上才会有较好应用性的云宏观和微观场产品,提供有关键云参数化预报量的诊断和检验模块。

致 谢:衷心感谢多位相关同仁给予的帮助和提供的宝贵意见。

参考文献

陈小敏,刘奇俊,章建成. 2007. 祁连山云系云微物理结构和人工增雨催化个例模拟研究. 气象, 33(7): 33-43. Chen X M, Liu Q J, Zhang J C. 2007. A numerical simulation study on microphysical structure and cloud seeding in cloud system of Qilian Mountain region. Meteor Mon, 33(7): 33-43 (in Chinese)

郭学良,付丹红,胡朝霞. 2013. 云降水物理与人工影响天气研究进展(2008~2012年). 大气科学, 37(2): 351-363. Guo X L, Fu D H, Hu Z X. 2013. Progress in cloud physics, precipitation, and weather modification during 2008-2012. Chinese J Atmos Sci, 37(2): 351-363 (in Chinese)

洪延超. 1998. 三维冰雹云催化数值模式. 气象学报, 56(6): 641-653. Hong Y C. 1998. A 3D hail cloud numerical seeding model. Acta Meteor Sinica, 56(6): 641-653 (in Chinese)

洪延超,雷恒池. 2012. 云降水物理和人工影响天气研究进展和思考. 气候与环境研究, 17(6): 951-967. Hong Y C, Lei H C. 2012. Research advance and thinking of the cloud precipitation physics and weather modification. Climatic Environ Res, 17(6): 951-967 (in Chinese)

黄燕,徐华英. 1994. 播撒碘化银粒子进行人工防雹的数值试验. 大气科学, 18(5): 612-622. Huang Y, Xu H Y. 1994. Numerical experiments on hail suppression by AgI seeding. Chinese J Atmos Sci, 18(5): 612-622 (in Chinese)

嵇磊,周珺,李宏宇等. 2014. 基于BJ-RUC系统的人影冷云催化潜力识别模式平台设计. 气象, 40(8): 981-991. Ji L, Zhou J, Li H Y, et al. 2014. Cold cloud seeding potentials recognition platform of weather modification based on the BJ-RUC system. Meteor Mon, 40(8): 981-991 (in Chinese)

孔凡铀,黄美元,徐华英. 1990. 对流云中冰相过程的三维数值模拟 I: 模式建立及冷云参数化. 大气科学, 14(4): 442-453. Kong F Y, Huang M Y, Xu H Y. 1990. Three-dimensional numerical simulation of ice phase microphysics in cumulus clouds. Part I: Model establishment and ice phase parameterization. Chinese J Atmos Sci, 14(4): 442-453 (in Chinese)

刘奇俊,楼小凤. 2002. 人工增雨的需求、现状和某些科学技术问题. 科学导报, (3): 53-55, 64. Liu Q J, Lou X F. 2002. Demands, status and scientific and technical problems on rain enhancement. Sci Technol Rev, (3): 53-55, 64 (in Chinese)

马占山,刘奇俊,秦琰琰等. 2009. 利用 TRMM 卫星资料对人工增雨云系模式云微观场预报能力的检验. 气象学报, 67(2): 260-271. Ma Z S, Liu Q J, Qin Y Y, et al. 2009. Verification of forecasting efficiency to cloud microphysical characters of mesoscale numerical model for artificial rainfall enhancement by using TRMM satellite data. Acta Meteor Sinica, 67(2): 260-271 (in Chinese)

毛玉华,胡志晋. 1993. 强对流云人工增雨和防雹原理的二维数值研究. 气象学报, 51(2): 184-194. Mao Y H, Hu Z J. 1993. The 2-D numerical study of rain-enhancement and hail-suppression principles on convective clouds. Acta Meteor Sinica, 51(2): 184-194 (in Chinese)

谭超,刘奇俊,马占山. 2013. GRAPES 全球模式次网格对流过程对云预报的影响研究. 气象学报, 71(5): 867-878. Tan C, Liu Q J, Ma Z S. 2013. Influences of sub-grid convective processes on cloud forecast in the GRAPES global model. Acta Meteor Sinica, 71(5): 867-878 (in Chinese)

王谦,胡志晋. 1990. 三维弹性大气模式和实测强风暴的模拟. 气象学报, 48(1): 91-101. Wang Q, Hu Z J. 1990. Three-dimensional elastic atmospheric numerical model and the simulations of a severe storm case. Acta Meteor Sinica, 48(1): 91-101 (in Chinese)

许焕斌,王思微. 1988. 二维冰雹云数值模式. 气象学报, 46(2): 227-236. Xu H B, Wang S W. 1988. Two-dimension hailcloud model. Acta Meteor Sinica, 46(2): 227-236 (in Chinese)

许焕斌,王思微. 1990. 三维可压缩大气中的云尺度模式. 气象学报, 48(1): 80-90. Xu H B, Wang S W. 1990. A three-dimensional cloud-scale model suitable for compressible atmosphere. Acta Meteor Sinica, 48(1): 80-90 (in Chinese)

许焕斌,段英. 2001. 冰雹形成机制的研究并论人工雹胚与自然雹胚的“利益竞争”防雹假说. 大气科学, 25(2): 277-288. Xu H B, Duan Y. 2001. The mechanism of hailstone's formation and the hail-suppression hypothesis: "Beneficial Competition". Chinese J Atmos Sci, 25(2): 277-288 (in Chinese)

许焕斌. 2012. 强对流云物理及其应用. 北京: 气象出版社, 340pp.

- Xu H B. 2012. *The Physics of Severe Convective Storms and Its Application*. Beijing: China Meteorological Press, 340pp (in Chinese)
- 许焕斌. 2014. 人工影响天气动力学研究. 北京: 气象出版社, 145pp. Xu H B. 2014. *The Studies of Dynamics in Weather Modification*. Beijing: China Meteorological Press, 145pp (in Chinese)
- 张大林. 1998. 各种非绝热物理过程在中尺度模式中的作用. *大气科学*, 22(4): 548-561. Zhang D L. 1998. Roles of various diabatic physical processes in mesoscale models. *Scientia Atmos Sinica*, 25(1): 22(4): 548-561 (in Chinese)
- 郑国光, 郭学良. 2012. 人工影响天气科学技术现状及发展趋势. *中国工程科学*, 14(9): 20-27. Zheng G G, Guo X L. 2012. Status and development of sciences and technology for weather modification. *Eng Sci*, 14(9): 20-27 (in Chinese)
- 钟青. 1992. 论发展问题保真计算格式的一般构造原理和若干应用. *计算物理*, 9(4): 758-764. Zhong Q. 1992. A general inverse formulation principle of perfect conservative scheme and its applications. *Chin J Comput Phys*, 9(4): 758-764 (in Chinese)
- 周晓平, 王东海. 1996. 短时风暴数值预报模式研究 I. 模式的理论框架. *大气科学*, 20(1): 1-11. Zhou X P, Wang D H. 1996. Study on the very short-range storm numerical forecasting model. Part I: Theoretical frame. *Scientia Atmos Sinica*, 20(1): 1-11 (in Chinese)
- Guo X L, Zheng G G, Jin D Z. 2006. A numerical comparison study of cloud seeding by silver iodide and liquid carbon dioxide. *Atmos Res*, 79(3-4): 183-226
- Guo X L, Fu D H, Li X Y, et al. 2015. Advances in cloud physics and weather modification in China. *Adv Atmos Sci*, 32(2): 230-249
- Schwartz C S, Romine G S, Smith K R, et al. 2014. Characterizing and optimizing precipitation forecasts from a convection-permitting ensemble initialized by a mesoscale ensemble kalman filter. *Wea Forecasting*, 29(6): 1295-1318
- Seiki T, Kodama C, Satoh M, et al. 2015. Vertical grid spacing necessary for simulating tropical cirrus clouds with a high-resolution atmospheric general circulation model. *Geophys Res Lett*, 42(10): 4150-4157
- Tiedtke M. 1993. Representation of clouds in large-scale models. *Mon Wea Rev*, 121(11): 3040-3061
- Yin J F, Wang D H, Zhai G Q. 2015. An attempt to improve kessler-type parameterization of warm cloud microphysical conversion processes using Cloudsat observations. *J Meteor Res*, 29(1): 82-92
- Yu X, Lee T Y. 2010. Role of convective parameterization in simulations of a convection band at grey-zone resolutions. *Tellus A*, 62(5): 617-632
- Zhang D L, Hsie E Y, Moncrieff M W. 1988. A comparison of explicit and implicit predictions of convective and stratiform precipitating weather systems with a meso- β -scale numerical model. *Quart J Roy Meteor Soc*, 114(479): 31-60
- Zhong Q. 1992. The formulation of a perfect square conservative semi-implicit time difference scheme and its preliminary check. *Chin Sci Bull*, 37(6): 497-502
- Zhong Q, Chen J T, Sun Z L. 2002. Elimination of computational systematic errors and improvements of weather and climate system models in relation to baroclinic primitive equations. *Adv Atmos Sci*, 19(6): 1103-1112