

中国关于积云参数化方案的应用

刘 一鸣

(北京大学地球物理系, 北京, 100871)

摘 要

文中简要评述并比较了 4 类积云参数化方案, 着重总结了各种积云参数化方案在中国的应用, 最后结合中国特点讨论了积云参数化方案在应用中存在的一些问题和改进途径。

关键词: 积云参数化, 闭合假设, 对流调整, 水汽辐合, 质量通量。

1 引 言

积云参数化是数值模式中最重要非绝热加热物理过程之一。积云是在大尺度环流强迫和控制下发生的, 它们发生以后又通过其感热、潜热和动量输送等反馈作用影响大尺度环流, 并在决定大气温度、湿度场的垂直结构中起着关键的作用, 因而是数值预报模式中必不可少的物理过程。但积云对流在时空尺度上是一般模式所不能分辨的次网格尺度运动, 加之没有直接的观测资料, 所以在数值模拟和预报中一般是用积云对流参数化的方法来估算的, 实质是用大尺度变量计算出积云加热的总效果, 而并不去研究和了解任意单个积云的发生地点和时间。

Betts^[1]从数值模拟的角度, 首次将积云参数化问题用 3 个术语来表示: 动力控制、积云反馈和静力约束。动力控制描述的是环境场对积云的制约, 积云反馈描述积云对环境场的影响, 静力约束是参数化中除闭合假设以外的一些假设, 通常决定于云内热力学、动力学特征。

积云参数化是从热力学方程和水汽方程出发, 求积云对环境加热、增湿的垂直分布及积云降水量, 但是未知量多于方程个数, 所以从数学上讲就存在闭合假设问题。如何选择数学上和物理上都最为适合的闭合假设就成了积云参数化的一个关键, 许多科学家从不同的方面研究了闭合假设问题。最常见的闭合假设是瞬时平衡假设、准平衡假设和质量、水汽辐合型假设。瞬时平衡假设是一种强约束, 可完全不用云模式就建立了潜热释放量与有效对流位能的联系; 而质量辐合和准平衡假设是两种较弱的假设, 需借助于云(或复杂的云谱)模式, 而且两者的潜热释放量是独立于有效浮力位能的, 方案更完善, 但更复杂。

文中简要评述并比较了 4 类积云参数化方案, 着重总结了各种积云参数化方案在中国的

初稿时间: 1997 年 4 月 11 日; 修改稿时间: 1997 年 6 月 11 日。

资助课题: 国家九五重中之重项目“短期气候预测系统研究”项目 95-906-02-05 专题以及国家自然科学基金委 49335061 项目的共同资助。

应用,最后结合中国特点讨论了积云参数化方案在应用中存在的一些问题和改进途径。

2 积云参数化方案的分类

积云参数化尝试始于 1950 年代中期,从现有积云对流参数化方案的发展过程考虑,程麟生^[2]将其大体分为以下 4 类:

第 1 类: 对流调整方案,其中包括干对流调整和湿对流调整方案^[3-5]。

第 2 类: 郭(晓岚)型方案^[6-9],这是一种广为应用的积云参数化方案。

第 3 类: 质量通量方案^[10,11]。

第 4 类: 中尺度模式积云参数化方案^[12-15],这类方案在中尺度数值模拟中有重要应用。

对流调整方案采用的是瞬时平衡假设,虽然对积云对流过程作了粗略的描述,但在一定程度上却表示了对流产生的原因和后果。积云对流是在环境空气饱和及条件不稳定层结下发生的,原先的层结被调整成湿中性状态,过饱和的凝结水作为对流雨量。在问题的处理上不是显式的,而是隐式的给出了调整后的最终状态。根据大气比湿或相对湿度的不同通常分为干对流调整和湿对流调整。对流调整方法是首先预报去掉凝结后的比湿和温度,然后,按热力学第一定律调整比湿和温度,以便消除超绝热直减率和过饱和。湿对流调整方案常低估降水量,加热层次过低,计算量小,多用于 GCM 模式。

郭型方案采用的是质量、水汽辐合型假设,对流发生在有深厚条件不稳定的层次和低层有大尺度辐合的区域;地面空气的凝结高度取为云底,湿绝热线与环境曲线相交的高度取为云顶;积云形成过程中卷入的环境空气不计;积云形成后立即通过侧向混合加热、增湿改变环境场的温度和湿度。云柱中净辐合的水汽一部分凝结作为积云降水,另一部分则用于湿润环境空气,加热率和增湿率正比于净水汽辐合率,并分别由云内外温度差和湿度差构造的垂直分布函数来分配其各层的量值。在该方案中,使空气柱增加水汽的大尺度水汽供应部分量值太大,结果降水量太小。改进的 Kuo 方案通过引进湿润因子 b ,可降低用于气柱增湿的水汽,增加潜热加热部分,由此算出的降水率比较接近实况。Kuo 方法的主要优点是仅用大尺度变量来直接决定积云尺度加热和水汽通量,而不必计算云的动力过程(如卷入、卷出和下曳气流)和云的微物理过程。Kuo 型方案预报效果较好,加热廓线较真实,计算量较小,常用于业务预报模式。

Arakawa-Schubert (A-S) 方案主要说明积云群和大尺度环境如何相互作用。它采用的是准平衡假设,是一种谱模式,在任一时刻都有不同尺度的云同时存在。该方案认为积云之间由对流引起的下沉运动是造成大尺度环境观测到的热量分布的主要原因。云中上升气流的绝热冷却及环境空气的卷入混合对凝结潜热起抵消作用,因积云上升而引起的周围空气补偿下沉的增温减湿作用以及云顶附近液态水的卷出蒸发使环境变冷变湿。A-S 方案的基本作法是:把大尺度环境分为云下混合层和其上部两部分;环境的时间变化是由上述两部分的热量和水汽收支方程以及混合层厚度的预报方程所控制;在混合层上部的环境中,积云对流影响大尺度温度场和水汽场是通过积云诱发的下沉运动和包含液态水饱和空气卷出并在环境中蒸发而起作用的;在云下混合层中,积云对流不直接影响其温、湿场,而是通过积云诱发的下沉运动影响混合层厚度来间接影响的。由于 A-S 方案对

湿物理过程考虑的较细, 因而在大尺度和中尺度过程的预报中, 效果是最好的, 但与 Kuo 型方案计算时间比较, 计算量较大, 多用于研究模式。

上述 3 类是适用于粗网格模式的参数化方案, 而对于中尺度模式, 积云参数化方案要同时描述积云和中尺度环境、大尺度系统的相互作用, 云模式相对要复杂些, 一般包含云的微物理过程和水汽相变过程。Kreitzberg 和 Perkey 首先提出了对流调整型方案, 该方案假设当格点上的条件不稳定性及不稳定厚度超过某临界值时发生积云对流, 通过一维拉格朗日非静力序列对流泡云模式方程确定夹卷率, 再按云内外静压力平衡的条件求得上升气流底部的质量通量, 最后得到积云与环境空气混合后网格区域平均的预报量。目前广泛采用的中尺度模式积云参数化方案是 Fritsch-Chappell 方案, 该方案的基本假设是: 积云对流活动在一定的时间内足以使其产生对流活动的有效浮力能(ABE)耗尽。该方案中既包含对流上升气流, 也包含对流下沉气流, 相应各有一个一维的卷流模式; 还包括了环境大气中的垂直运动及垂直风切变对下沉气流的影响; 此外也采用了简单的动量输送和混合方案。

表 1 4 类积云参数化方案的比较

方 案	动力控制与 闭合假设	云的反馈	加热率和增湿 率的计算	静力控制	预报效果、难易 程度及应用	
粗 网 格 模 式	湿对流 调整方案	层结为条件不 稳定	是对垂直对流 混合过程的简 单模仿, 使环境 空气上层变暖 变湿, 下层变冷 变干	隐式表示, 调整 层内相当位温 守恒, 调整前后 能量守恒	比较模糊	常低估降水量, 加热层次过低; 简单, 计算量 小; 物理图象模 糊; 多用于 GCM 模式
	Kuo 方案	层结为条件不 稳定, 气柱内有 净水汽辐合, 对 流活动正比于 净水汽辐合	经云壁侧向混 合加热, 增湿环 境空气, 积云塔 是直接“热塔”	显式表示, 正比 于净水汽辐合, 及云内外温度 差、湿度差	云内为湿绝热 线, 云下为干绝 热线	预报效果较好, 加热廓线较真 实; 较简单, 计 算量较小, 物理 图象较清晰; 常 用于业务预报 模式
方 案	A-S 型方案	层结为条件不 稳定, $m_B(\) >$ 0, 云功函数的 准平衡假定	云顶液态水卷 出使环境冷湿 化, 诱生的云间 下沉使环境干 暖化, 积云塔是 间接“冷塔”	显式表示, 正比 于云底质量通 量及卷出率	卷出率反比于 云高, 云底质量 通量决定于卷 出率	预报效果好; 复 杂, 计算量大, 物理图象清晰; 多用于研究模 式
中 尺 度 模 式 方 案	K-P 方案	层结不稳定性 及不稳定层厚 度超过临界值	经云壁侧向混 合加热增湿环 境空气, 层结稳 定度趋于临界 值	显式表示, 依赖 于卷出率、积云 质量通量和层 结稳定度	卷出率依赖于 上升气流半径, 复杂的云内微 物理过程	预报效果较好; 较简单, 计算量 较小, 物理图象 较清晰; 用于中 尺度模式

上述 4 类有代表性的方案虽然最终都求出了积云降水量及其对环境的加热和增湿

量,但是在动力控制与闭合假设、云反馈和预报效果等方面均有差别,陈伯民和钱正安^[16]曾对此作了比较,表 1 是他们的结果。

3 积云参数化方案在中国的应用

从 1970 年代后期,特别是 1980 年代以来,各种参数化方案的进展十分迅速,在中国也有很多学者对各类积云参数化方案进行了大量的研究和试验。

在对流调整型方案方面,Betts 和 Miller 在 1986 年提出了一种新的对流调整方案,称之为饱和点对流调整方案,他们根据大量观测事实提出由于积云对流的存在,局地热力结构受到对流强迫,将在一个时段内向观测到的一个准平衡热力学结构松弛,这个热力学参考曲线由假相当位温 θ_{se} 和饱和气压差的垂直分布廓线决定。由于 Betts-Miller 方案物理图象较清楚,计算上也不复杂,近年来得到较广泛的应用。沈如金、纪立人等人^[17]在饱和点对流调整思想的基础上,吸收 Kuo 型方案中水汽辐合的概念和处理方法,提出了一个修改方案,大气物理研究所开发的可用于陡峭地形下的有限区域 坐标数值预报模式也采用了 Betts-Miller 型对流参数化方案。何溪澄等人^[18]在参考 Betts-Miller 1986 年方案的基础上,结合模式调试预报中积累的一些实际经验,在热带有限区域数值天气预报模式上建立了一个修改的 Betts-Miller 型对流参数化方案。修改的方案除增加了云效^[19]的处理外,还有两处不同:一是用假相当位温 θ_{se} 代替了饱和相当位温 θ_{se} ,并且假定了参考廓线内 θ_{se} 的分布取决于环境 θ_e 和云底层 θ_{cl} 的线性组合;二是原方案采用的是平均订正方法,而修改的方案采用的是加权订正方法。从初步试验结果看,模式能较好地预报出台风的移动路径和降水过程的起始和终止,预报出的台风位置和降水分布都略优于 Kuo 型方案的预报结果。

对于 Kuo 型方案,不同版本之间的主要差别之一是如何选取湿润因子 b ,同时,暴雨系统的发展和雨区的分布对于加热廓线的垂直分布非常敏感。很多学者对 Kuo 方案作了改进,改进主要集中在增湿系数 b 和垂直加热分布函数方面。众所周知,Kuo 型方案最初是在研究热带天气系统中提出的,尽管历经了近 30a 的修改和演变,现在仍然是大多数业务数值模式的基本的积云参数化方案,然而,温差型的方案,在应用于中国副热带地区时,有时会出现一些缺欠。如对云底的确定,在温带地区有时提升凝结高度不是自由对流高度,会出现负温差,同时由于用温度差来计算湿润因子 b ,则出现虚假降水的情况。赵思雄等^[20]考虑到在暴雨发生时,湿度随时间有较大变化,而在中低层大气中变化尤其明显,就定义 b 为相对湿度的分段线性函数。对 1994 年汛期几场暴雨的数值预报及模拟试验的结果表明,加入湿度型方案后,在中纬度降水系统的预报上有改进,但在低纬度地区效果不明显,这可能由于 Kuo 方案最早提出时是用于描写热带系统的。刘孝麟等^[21]用 Kuo-Anthes 方案对梅雨锋暴雨过程和台风暴雨过程进行了数值模拟试验,结果表明基本上能模拟出发展、移动与减弱,相比之下,对梅雨锋暴雨过程的模拟比对台风暴雨过程的模拟要好,这除了不同暴雨系统的内在差别之外,海上观测资料的缺乏也是一个重要因素。钱正安等^[22]对郭型积云对流参数化方案中的垂直加热分布函数及增湿系数进行了对比试验,结果表明, θ_{se} 差方案主要加热出现在对流层高层,这使气柱渐趋稳定,最后抑制积云对流发展,预报的形势场和降水量较合理。以平均相对湿度的分段线性函数计算的 b 值分布合

理, 预报效果也好。丁一汇和朱彤^[23]对 1983 年 4 月 25–26 日一次华北气旋爆发性发展的过程进行了动力学分析和数值试验。通过对其热量和水汽收支的分析发现, 在气旋强烈发展时刻, 垂直加热剖面中的峰值不断下降到 500 hPa 附近的高度上。根据该结果, 他们将 Kuo 型积云参数化方案的对流加热剖面函数进行了修正, 使加热峰值从 300 hPa 下降到 500 hPa 左右, 试验表明改进后的方案能更好地模拟气旋的爆发性发展。杨志伟等^[24]利用改进的 MM2 模式, 用干、湿过程模拟了一次夏季华北锋面过程。干模式仅能模拟出大尺度特征和明显偏弱的锋面环流, 而湿模式可模拟出某些重要的中尺度流场特征。表明只要具有合理的模式物理过程, 使用大尺度资料, 也可以在一定程度上模拟出中尺度系统。对流参数化的试验表明, 湿润因子 b 和增湿廓线的选择对系统演变和降水预报十分敏感。在此基础上, 设计了考虑下沉气流的积云参数化方案, 初步结果表明, 这种方案使降水量预报有改进。同实况相比, 最初 6 h 所预报的雨量偏大, 但随后的 6–12 h, 12–18 h 和 18–24 h 这 3 个时段的雨量与实况相当吻合。陈伯民和钱正安^[25]结合青藏高原地区积云活动的特点, 应用修改了的 Krishnamurti 多元回归方法, 考虑中尺度水汽辐合, 由该地区的散度、层结稳定度拟合了增湿系数 b 和中尺度水汽辐合参数, 改进了高原和中国东部地区的降水及形势场的预报, 同时, 高原地区的增湿系数 b 和对流加热、增湿垂直廓线也更为合理。

在质量通量型方案方面, 最近又出现了一些综合型的质量通量方案, 如 ECMWF 现行的 Tiedtke^[26]方案, 它是 Kuo 型和 A-S 型两种方案的结合, 其预报效果既优于前者, 而又不如后者复杂。陈伯民^[27]对 P 坐标下该方案的总体云模式作了某些改动: 如有组织的质量卷出仅发生在云顶附近的一层, 不考虑浅层积云, 积云下沉由环境空气的侵入引起等, 然后植入兰州区域气象中心的业务数值预报模式中进行了半预报和预报试验。结果显示, 方案能较合理地给出积云上升质量通量 M_u 和下沉质量通量 M_d 的廓线及视热源 Q_1 和视水汽汇 Q_2 的垂直分布; 预报的积云降水中心和主要落区与实况暴雨中心基本吻合, 但受大尺度降水预报误差的影响, 预报的总降水量偏大; 方案也能预报中国西部地区上空大范围的环流形势, 但高原以东系统的移速偏慢。陈伯民^[28]对该方案和原 Kuo 方案进行了共 13 例 48 h 的批量对比试验, 结果显示, 质量通量方案能给出比 Kuo 型方案更合理的积云降水落区; 质量通量方案对模式预报 10.0 mm 的降水有一定的改进, 并提高了各种降水等级的预报效率评分值。闫之辉利用国家气象中心有限区模式, 使用业务实时资料对目前模式中使用较广泛的 Kuo^[7]方案、Betts-Miller 方案和质量通量方案进行了对比。该质量通量方案是王超根据 Geleyn^[9]的方案改进而成的, 并已在 T42 中期预报模式中进行了试算。在引入有限区模式时, 在算法上进行了一些修改。结果表明, 不管是对降水落区预报, 大尺度降水与对流降水的比例, 温度反馈的垂直分布, 还是对垂直速度场的影响, 质量通量方案的计算结果均优于 Kuo 方案和 Betts-Miller 方案。

马群飞等^[29]在 Fritsch-Chappel 和 Zhang-Fritsch^[30]的基础上, 对判别标准作了一些相应的改动, 并改进了用迭代法计算上升和下沉气流温度的过程, 引入有限区域暴雨数值预报模式中, 并进行了试算, 结果表明, 对于描写较强的降水(尤其是 25 mm/d 以上大到暴雨的过程)有较好的能力。

邱炳焕和丁一汇^[31]在研究江淮地区的积云时曾指出: 梅雨降水云系上主要是双层

云,即层云与积云共同存在。不同云滴谱的两种云(即层云和积云)将因胶性不稳定增长而加快积云内部的冰晶成长,使积云降水加强。黄美元等^[32]和洪延超等^[33]也都发现:由于层状云的存在,积云的降水效果被加强,积层混合云系可能是产生大雨和暴雨的一种重要机构,这与梅雨锋里锋区混合云系常产生暴雨的观测事实比较符合。他们的成果表明:中纬度的积云降水必须考虑层云的作用。洪延超^[34,35]用积云对流速度场叠加辐合场的方法建立了一个二维平面对称积层混合云数值模式,云中微物理过程考虑了6种水质并使用来研究暴雨积层混合云的演变过程、两种云的相互作用、云体结构及降水特征。数值试验说明,积层混合云是一非常有效的降水系统,层状云给积云提供良好的发展条件,饱和的环境及伴随层状云的辐合场使对流云具有长生命期、产生持续性的高强度降水和间歇性的特高强度降水。许习华和丁一汇^[36]设计了一种适合中纬度地区的积云对流参数化方案。该方案通过考虑积云内部的微物理结构及降水机理,增加了在积云降水过程中起很大作用的冰晶胶性不稳定增长过程及碰并降水等过程。用该方案对长江流域梅雨期6次暴雨过程进行了数值模拟,发现其预报效果有明显的改进,尤其是对流云与层云混合存在的条件下,效果更好。朱彤等^[37]对1991年7月吉林省连续出现的两次较大的、不同性质的降水过程进行了诊断分析与数值模拟。分析发现,纯积云降水和积层混合云降水的加热峰值所在的高度不同,前者较高,在250 hPa左右,后者较低,在500 hPa左右。在数值试验中发现,对不同性质的降水过程,由于加热高度的不同,必须采用不同的积云参数化方案,这样才能较好地模拟出这两次过程。由于这两种积云降水过程都有可能在不同的天气过程中出现,因此可以在积云参数化方案中引入新的判别因子,自动区分纯积云降水和积层混合云降水,并选取不同的参数化方案。

4 讨论和结论

积云参数化在近30a来已经取得了明显的进展,国内学者也提出了很多种方案,并进行了大量的研究和对比试验。但是,很多积云参数化方案的重点是深厚积云,而在中国,积云和层状云组成的积层混合云是一种主要的降水云型,大范围的暴雨和特大暴雨(如1991年江淮暴雨)基本上是由较为深厚的层状云和嵌入其内的对流云组成的混合云产生的,梅雨锋区也主要是积层混合云降水,这种对流云通过积云对层云的播撒作用可以提高层云的降水率,而宽广湿润的层状云又有利于积云生命史的延长。所以要结合中国特点来仔细考虑积层混合云的作用,并在过去工作的基础上,发展一种适合中国季风条件下的积云参数化方案,并对其进行数值模拟研究。

积云参数化方案的效果检验方法的研究也是改进积云参数化方案的基本依据之一。检验方法通常有3种:诊断法、半预报法和预报法,最注重的检验要素是降水预报。要想改进积云参数化方案在中国的应用,除了常规检验外,还必须针对中国的典型降水系统,如台风、梅雨和西南涡等作进一步的研究分析,了解它们的降水特点,据此作出对整个降水天气系统的降水预报检验,这样才能完整地判断积云参数化方案的优劣和问题。另一方面,在检验中也需要注意区分对流降水与大尺度降水的实际分配问题。众所周知,总降水量是由积云降水分量和大尺度降水分量组成,在模式的调试和不同种积云参数化方案的对比试验中,有时积云降水分量增加了,大尺度降水分量则要减小,虽然总降水量可能变

化不大;各方案间的积云降水量差别不大,可大尺度降水相差很大。这也会影响检验结果,这种复杂的积云和大尺度降水之间的分配关系问题都需在降水预报检验中注意。

大气环流模式是模拟全球气候和气候变化的一种有力工具,但现有的大气环流模式分辨率一般较粗,不能适当地描述复杂地形、地表状况和某些物理过程,因而对于一个地区的预报,尤其是降水预报不够准确,这也是大多数 GCM 气候模式的共同问题。另一方面,区域气候模拟和预报是近几年发展起来的研究有限区域气候及气候变化的有效方法。目前国际上发展较为成熟的一种区域气候模式是美国 NCAR 的 RegCM2,其中已加入了目前所提出的如 Kuo-Anthes, Grell 等多种积云方案,但中国的降水有明显的特点,受东亚季风气流的明显影响,降水多以混合型为主,因而应发展能正确描述这种降水过程的云参数化方案。希望在今后的研究工作中,将 Betts-Miller 参数化方案、Tiedtke 方案等几种方案进行对比研究,并结合中国的特点对其进行改进,使其预报的降水量和降水落区更切合实际。

综上所述,积云参数化问题是气象学家们长期以来所致力解决的一个复杂而又重要的物理过程。从其最初的出现到现在的发展过程考虑,可分为对流调整方案、郭型方案、质量通量方案和中尺度方案,各方案在动力控制、闭合假设、云反馈和预报效果等方面均有差别。从 1980 年开始,出现了一些互相结合的综合型方案,使积云参数化方案之间的分类更不明显。中国学者对各类积云参数化方案进行了大量的研究和试验,并结合中国特点进行了很大的改进,取得了明显的成绩。今后如何发展适合东亚季风降水区的积云参数化方案是中国气象工作者的一个重要任务。

参考文献

- 1 Betts A K. The scientific basis and objectives of the U.S. subprogram for the GATE. Bull Amer Meteor Soc, 1974, 55: 304 ~ 313
- 2 程麟生. 中尺度大气数值模式和模拟. 北京: 气象出版社, 1994. 164 ~ 169
- 3 Manabe S, et al. Simulated climatology of a general circulation model with a hydrological cycle. Mon Wea Rev, 1965, 93: 769 ~ 798
- 4 Betts A K. A new convective adjustment scheme, part 1: observational and theoretical basis. Quart J Roy Meteor Soc, 1986, 112: 677 ~ 691
- 5 Betts A K and Miller M J. A new convective adjustment scheme, part 2: single column tests using GATE wave, BOMEX, and arctic air-mass data sets. Quart J Roy Meteor Soc, 1986, 112: 693 ~ 709
- 6 Kuo H L. On formation and intensification of tropical cyclones through latent heat release by cumulus convection. J Atmos Sci, 1965, 22: 40 ~ 63
- 7 Kuo H L. Further studies of the parameterization of the influence of cumulus convection on large scale flow. J Atmos Sci, 1974, 31: 1232 ~ 1240
- 8 Anthes R A. A cumulus parameterization scheme utilizing a one-dimensional cloud model. Mon Wea Rev, 1977, 105: 270 ~ 286
- 9 Geleyn J F. On a simple, parameter-free partition between moistening and precipitation in the Kuo scheme. Mon Wea Rev, 1985, 113: 405 ~ 408
- 10 Arakawa A and Schubert W H. Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large scale environment, part 1. J Atmos Sci, 1974, 31: 674 ~ 701
- 11 Arakawa A and Chen J M. Closure assumptions in the cumulus parameterization problem. J Meteor Soc Japan,

Special Volume, 1987, 107 ~ 131

- 12 Kreitzberg C W and Perkey D J. Release of potential instability, part 1: the mechanism of convective/ mesoscale interaction. *J Atmos Sci*, 1977, 34: 1569 ~ 1595
- 13 Fritsch J M and Chappell C F. Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure systems. part 1: convective parameterization. *J Atmos Sci*, 1980, 37: 1722 ~ 1733
- 14 Fritsch J M and Chappell C F. Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure systems, part 2: mesoscale model. *J Atmos Sci*, 1980, 37: 1734 ~ 1762
- 15 Frank W M. A cumulus parameterization scheme incorporating subgrid scale convective forcing. 15th Technical Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology (A M S). 1984. 183 ~ 190
- 16 陈伯民, 钱正安. 关于积云参数化问题. *高原气象*, 1992, 11(2): 213 ~ 221
- 17 沈如金, 纪立人等. 第五次全国数值天气预报会议论文摘要汇编. 北京: 中国气象学会数值天气预报委员会, 1990. 52 ~ 53
- 18 何溪澄, 沈如金, 王康玲. Bettes-Miller 型对流调整方案在热带数值天气预报中的初步试验. 台风、暴雨数值预报新技术的研究. 北京: 气象出版社, 1996. 38 ~ 44
- 19 Janjic Z I. The step mountain eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Mon Wea Rev*, 1994, 122(5): 927 ~ 945
- 20 赵思雄等. 根据时空加密观测资料对 Kuo 型方案的改进试验. 台风、暴雨数值预报新技术的研究. 北京: 气象出版社, 1996. 1 ~ 9
- 21 刘孝麟, 李林等. Kuo-Anthes 参数化方案对梅雨锋暴雨和台风暴雨的比较试验. 台风、暴雨数值预报新技术的研究. 北京: 气象出版社, 1996. 17 ~ 22
- 22 钱正安, 颜宏, 何驰. 郭型积云对流参数化方案的对比试验及潜热加热效应. *高原气象*, 1989, 8(3): 217 ~ 227
- 23 丁一汇, 朱彤. 陆地气旋爆发性发展的动力学分析和数值试验. *中国科学(B 辑)*, 1993, 23(11): 1226 ~ 1232
- 24 杨志伟, 丁一汇, 王鹏云. 对流凝结加热对华北夏季锋面影响的数值模拟研究. *气象学报*, 1994, 52(1): 49 ~ 59
- 25 陈伯民, 钱正安. 一个适合青藏高原地区的修改了的郭型积云参数化方案. *高原气象*, 1992, 11(1): 1 ~ 11
- 26 Tiedtke M. A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale schemes. *Mon Wea Rev*, 1989, 117: 1779 ~ 1800
- 27 陈伯民. 修正的 ECMWF 质量通量积云参数化方案对中国暴雨的初步预报试验. 台风、暴雨数值预报新技术的研究. 北京: 气象出版社, 1996. 23 ~ 31
- 28 陈伯民等. 修正的 ECMWF 质量通量积云参数化方案的预报试验. *高原气象*, 1996, 15(1): 37 ~ 47
- 29 马群飞等. 能量型云模式积云参数化方案的试验. 台风、暴雨数值预报新技术的研究. 北京: 气象出版社, 1996. 32 ~ 37
- 30 Zhang D L and Fritsch J M. Numerical simulation of the meso-scale structure and evolution of the 1977 Johnstown flood, part 1: model description and verification. *J Atmos Sci*, 1986, 43(18): 1913 ~ 1943
- 31 邱炳焕, 丁一汇. 中国科学院大气物理所集刊第 7 号. 北京: 科学出版社, 1979. 23 ~ 33.
- 32 黄美元, 洪延超等. 层状云对积云发展和降水的影响——一种云与云之间影响的数值模拟. *气象学报*, 1987, 45(1): 72 ~ 77
- 33 洪延超, 黄美元等. 梅雨锋云系中尺度系统回波结构及其与暴雨的关系. *气象学报*, 1987, 45(1): 56 ~ 64
- 34 洪延超. 积层混合云数值模拟研究(I)——模式及其微物理过程参数化. *气象学报*, 1996, 54(5): 544 ~ 557
- 35 洪延超. 积层混合云数值模拟研究(II)——云相互作用及暴雨产生机制. *气象学报*, 1996, 54(6): 661 ~ 674
- 36 许习华, 丁一汇. 一种考虑云相互作用的积云对流参数化方案及其在降水预报中的应用. *中国科学(B 辑)*, 1990, 9: 998 ~ 1008
- 37 朱彤, 汪秀清, 朱蓉. 纯积云降水与积层混合云降水加热剖面的差异. 中尺度天气和动力学研究. 北京: 气象出版社, 1996. 254 ~ 259

APPLICATION OF CUMULUS PARAMETERIZATION SCHEMES IN CHINA

Liu Yiming

(Department of Geophysics, Peking University, Beijing, 100871)

Abstract

In this paper, four kinds of cumulus parameterization schemes are reviewed and compared. The application of all kinds of cumulus parameterization schemes in China is summarized. At last, taking the realistic conditions in China into account, some suggestions about the application of cumulus parameterization schemes are made.

Key words: Cumulus parameterization, Closure assumption, Convective adjustment, Moisture convergence, Mass-flux.