

文章编号: 1004-4965 (2008) 06-0732-05

当前对流参数化研究存在问题的讨论

左瑞亭^{1,2}, 王丽琼¹, 钱贞成¹, 侯志明¹

(1. 解放军理工大学气象学院, 江苏 南京 211101; 2. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘 要: 基于对流参数化的发展过程, 讨论了当前对流参数化方案中存在的问题, 着重分析了大尺度水汽辐合型和质量通量型方案的缺陷, 同时对东亚季风区和我国的研究现状进行了分析, 提出了通用对流参数化方案的设计思想和应该考虑的原则, 具有重要的参考借鉴意义。

关 键 词: 对流参数化; 数值模式; 物理过程

中图分类号: P43

文献标识码: A

1 引 言

作为数值预报模式中最重要非绝热加热物理过程之一, 对流参数化不仅是一个涉及到多种反馈机制和多尺度相互作用的复杂物理问题, 同时还是一个需要利用闭合假设来封闭方程求解的数学问题。虽然积云对流参数化方案正在被广泛应用于各种大气数值模式, 但不同模式采用的参数化方案却不尽相同, 模拟结果也差别很大。数值模式对对流参数化方案的选择极为敏感, 同一个模式换用不同的对流参数化方案, 模拟结果往往存在很大差异。这反映出一个严峻的事实: 在力求模式统一化的现阶段, 关于动力框架的理论和技术已经基本达成共识, 而物理过程参数化的统一就成为这一进程的最大障碍。

面对这一困窘, 人们大体上做出了两种反应: (1) “修正”, 即基于现有的对流参数化方案和实际需要, 考虑可能的改进和完善, 于是出现了各种修正方案; (2) “选择”, 即在众多的参数化方案中, 选择一个最优匹配方案, 于是出现了众多的敏感性试验研究。但是, 这并没有解决问题, 造成的结果就是出现了更多的参数化方案和仅适合特定数值模式的优选参数化方案。

另一方面, 在对流参数化的理论研究和应用中, 人们发现还有很多重要的本质问题急需研究和达成共识, 如: 积云对流中多尺度运动如何有效划分和表述? 如何设计合理的对流触发条件? 如何从物理上和数学上设计具有一般性和普适性的闭合假设? 同时还出现了一些新问题, 如: 热带洋面和中纬度地区的积云和对流的性质有什么差异? 积云参数化的相互作用和反馈机制的完备性如何? 参数化中对模式分辨率最为依赖的因子是什么? 如何引

入不确定性随机理论以描述积云的脉动特征?

面对这些困惑和未知问题, 如何才能避免重复性和低效的试验研究? 针对此, 本文并不是详细叙述各种参数化方案的理论方法, 而是着眼于各种方案的本质剖析和性能对比, 以期能为上述问题的解决提供一些有益思路。

2 当前主流方案及其发展

自 1960 年代起, 国外首先提出了对流参数化的三类经典方案, 即以 Manabe(1965)为代表的湿对流调整方案、以 Kuo(1965, 1974)为代表的大尺度水汽辐合方案和以 Arakawa(1969)、Arakawa 和 Schubert(1974)为代表的质量通量方案(简称 AS 方案), 奠定了对流参数化的基础。

湿对流调整方案的调整结果过于严格, 回避了基本的物理过程, 无法了解积云和大尺度对流之间的相互作用, 使其应用受到很大限制。相比之下, 水汽辐合方案和质量通量方案得到了很大的发展和应用。

2.1 大尺度水汽辐合方案的典型代表

郭晓岚最初提出的大尺度水汽辐合方案并不闭合, 没有给出总水汽辐合量再分配的重要参数——湿化系数 b 的具体表达式, 所以其后该类型方案的发展主要体现在设计了更合理的调整廓线和更复杂的湿润因子。在这当中 Anthes^[1]、Kuo 和 Anthes^[2]方案逐渐成为这种大尺度辐合型方案的主要代表, 与此同时, Betts^[3]、Betts 和 Miller^[4]基于全球大气研究计划大西洋热带试验(GATE)资料, 定义了对流区的特征温湿结构, 并且首次考虑了零度层的作用, 建立了一种松弛调整方案, 成为该型方案的最新改进, 这两种方案代替原始的 Kuo(1974)方案被广泛应用到数值模式中。

收稿日期: 2007-06-19; 修订日期: 2008-01-06

基金项目: 中国博士后科学基金项目; 中国科学院王宽诚博士后基金项目(20050923200954)共同资助

通讯作者: 左瑞亭, 男, 理学博士, 主要从事大气环流模式设计和气候数值模拟研究。E-mail: ratinzuo@126.com

2.2 质量通量型方案的发展

在质量通量型方案的研究中,主要的热点集中在闭合方案的选择和更精细云模式的完善方面,经过了由诊断性闭合发展到预报性闭合,再发展到随机闭合的过程。比较典型的如:Donner^[5]首先综合考虑了质量通量、对流尺度垂直速度和中尺度效应,发展了一个基于准平衡假设的诊断性闭合方案。Randall 等^[6]、Randall 等^[7]、Pan 等^[8]针对 AS 方案设计了一种预报性闭合条件,来显式地预报云谱中各云型的对流尺度总体动能。同时也出现了显式求解瞬变过程的完全预报闭合方案,如 Emanuel^[9]、Ding 等^[10]以及 Emanuel 等^[11],这些方案在每一时间步显式积分瞬变过程的同时,同步完成向准平衡态的调整。由于基于准平衡假设的参数化方法本身的统计性质,很难反映出积云的非确定性或脉动特征, Lin 等^[12]还着手于将随机效应引入到参数化中,并检验了通过垂直加热结构(VSH 方法)和云底质量通量的对流有效位能(CAPE-M_b 方法)这两种途径引入随机效应的差异。

2.3 综合型参数化方案的提出

此外,还有一些方案综合考虑了 Kuo 和 AS 方案的思想,逐渐形成了一种综合型方案。Grell 等^[13]采用半预报式闭合假设,将向平衡态的调整过程显式处理,而将大尺度强迫隐式处理,提出了一种瞬时调整方案。类似地, Frank 等^[14]、Frank^[15]在对流稳定区采用显式方案,在对流不稳定区采用部分显式和部分隐式的形式,发展了一种混合方案,把快过程和慢过程理想地分离成参数化形式和显式形式。Gregory 等^[16]用总体云模式代替云谱模式,基于浮力泡模型,利用对流层自由对流起始高度处的稳定性来决定初始对流质量通量,以此为简单闭合方案,设计了一个同时适用于深对流、浅对流和中等强度对流的方案。Ping 等^[17]、平凡等^[18]还将该方案引入到中国国家气候中心的 T₆₃ 全球谱模式中,但在英国气象局 11 层大气环流模式中对该方案进行检验时,却没有模拟出印度季风。

3 对传统思想的置疑与挑战

在各种参数化不断发展的同时,在众多的试验研究中,也有不少学者对经典方案的设计原理提出了大胆质疑,其中有不少问题相当尖锐,甚至有可能动摇某一类型方案成立的理论根基。

3.1 对大尺度水汽辐合方案的置疑

(1) Emanuel^[19]认为大尺度水汽辐合型方案的触发条件存在严重问题,他认为对流的增长只取决于与垂直运动有关的廓线是条件不稳定即可,即使不出现大尺度辐合或强地表强迫,大气廓线也会迅速地调整到稳定状态,对流也就随之停止。

(2) Kuo 型积云的加热是采用热塔效果通过湍流扩散直接加热环境大气,这与 Gray^[20]由实际观测资料得出

的积云塔直接冷却和依赖补偿下沉气流间接加热环境的方式不符。

(3) Kuo 型方案采用的通量式而非平流式的预报方程不适合强度量(如湿度、熵)的预报^[21],这是由于采用通量形式的收支方程会混淆质量辐合与预报量本身辐合的效果,从而掩盖了预报量本身的辐合作用对自身变化的影响。

(4) Kuo 方案的加热方程和增湿方程可以分别变形为^[22]

$$\left(\frac{\partial s}{\partial t}\right)_c = \frac{(T_c - T)}{\langle T_c - T \rangle} (1-b) \frac{g}{p_B - p_T} LM_t \quad (p_T < p < p_B) \quad (1)$$

$$L \frac{\partial q}{\partial t} = \frac{(q_c - T)}{\langle q_c - T \rangle} b \frac{g}{p_B - p_T} LM_t \quad (p_T < p < p_B) \quad (2)$$

其中 $L \frac{\partial q}{\partial t} = L \left[\left(\frac{\partial q}{\partial t}\right)_c + \left(\frac{\partial q}{\partial t}\right)_{LS} \right]$, T 和 q 分别为环境温度和水汽混合比, T_c 、 q_c 分别为积云温度和水汽混合比, b 为增湿因子, L 为凝结潜热常数, s 为干静力能, p_B 、 p_T 分别为云底和云顶高度, p 为气压, g 为重力加速度, M_t 为气柱内总水汽辐合量, $(\partial/\partial t)_c$ 和 $(\partial/\partial t)_{LS}$ 分别是积云过程和大尺度过程引起的变率, $\langle \rangle$ 表示云体内气压权重的平均。由方程(1)、(2)可以看出,加热方程是反映积云体的,即将积云加热进行参数化处理,而增湿方程却是反映积云和环境的净效果,即参数化的净效果,其间存在着不协调和不平衡问题。

3.2 对质量通量型方案的置疑

(1) Gregory 等^[16]彻底否定了 AS 方案的准平衡假设闭合条件,认为对流调整和大尺度强迫并不是瞬时平衡的,即使没有出现大尺度强迫,对流一样可以出现,气块的浮力才是决定对流发展的唯一判断指标。

(2) Renno^[23]、Emanuel 等^[24]从热机理论发现 AS 方案的尺度划分标准($\sigma \rightarrow 0$, 其中 σ 为积云覆盖比)和准平衡假设($\tau_c/\tau_L \rightarrow 0$, 其中 τ_c 和 τ_L 分别是对流调整时间尺度和大尺度强迫时间尺度)间存在严重的相互矛盾。后来 Yano^[25]也从尺度分析的角度证实了这一点,认为只有在一个特定情况下,这两个量才能同时维持极小。

首先,空间尺度划分假设 $\sigma \ll 1$, 对单个云体或特定云型 λ , $\sigma_\lambda \ll 1$ 成立,但对所有云团的总覆盖率 $\sigma = \int \sigma_\lambda d\lambda$ 却不成立。

其次,积云调整的时间尺度可以写为^[25]

$$\tau_c \approx \frac{1}{\sigma w_c} \left(\frac{A}{N^2 H} \right) \quad (3)$$

其中 N 是 Brunt-Väisälä 频率, H 是积云对流的垂直尺度, w_c 是云内特征垂直速度, A 是云功函数。

若 A/w_c 与 σ 无关,则可有 $\tau_c \propto \sigma^{-1}$, 即积云调整的时间尺度 τ_c 将随着积云覆盖比 σ 的减小而增大。这意味着当积云覆盖比减小时,与大尺度调整过程相平衡的有效对流运动减弱,就需要更长的时间 τ_c 来达到调整平衡。

若 A/w_c 依赖于 σ , 则由尺度分析可得到 $\tau_c \sim \sigma^{-(1+\alpha/2)}$, 其中 α 为一个正常数。最终可以得到 $\tau_c \sim \sigma^{-4/3}$, 上述结论仍然成立。

按照 AS 自己的估算, 若取 $A \approx 10^3 \text{ J/kg}$, $\sigma \approx 10^{-1}$, $w_c \approx 1 \square 10 \text{ m/s}$, $N \approx 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, $H \approx 10^4 \text{ m}$, 由式 (3) 可估算出 $\tau_c \approx 10^3 \square 10^4 \text{ s} \approx 20 \text{ min} \sim 3 \text{ h}$, 但此时 $\sigma \approx 10^{-1}$, 即 $\sigma \ll 1$ 已很难成立。

(3) 最近, Yano 等^[26]对质量通量型参数化方法也提出了置疑。由于一般的对流变量在某一区域内的分布非常随机和广泛, 所以其垂直输送应该由该变量的极值而不是由平均值来决定。传统的质量通量算法都是借助于区域平均, 由于采用了“部分常值近似”, 从而严重低估了深对流对热量、水汽和动量的垂直输送^[27], 并提出了一种考虑极值权重有效值来计算质量通量的新方法。

3.3 大胆的尝试与挑战

尤为值得一提的是, 近年来, 云可分辨模式 (CRM) 得到了广泛应用, 基于此, Grabowski 等^[28]、Grabowski^[29]提出了超级参数化 (CRCP) 的概念和方法, Arakawa^[22]还提出了准三维 CRM 与 GCM 的耦合, 从而构建全球准三维多尺度模式框架 (MMF) 的设想。这些观点和方法很具有新意, 但却间接回避了上述和目前参数化中存在的问题, 而且需要耗费庞大的计算资源, 尤其是对于我国现有的计算条件而言, 实现起来难度较大。

4 适于东亚和中国的对流参数化方案研究

国内由于数值模式起步较晚以及观测资料和计算条件的限制, 对积云对流参数化的研究主要体现在敏感性研究和适于东亚季风区方案的探索方面。许习华^[30]、陈伯民等^[31]、刘一鸣^[32]、林文实等^[33]对积云对流参数化都做过重要评述, 并指出了发展适于东亚和中国特点的参数化的必要性。许习华等^[34]设计了一个考虑积云与层云相互作用的对流参数化方案, 许习华^[30]指出: 中纬度的参数化必须考虑这种积云和层云的相互作用以及冰相粒子的作用。刘金良^[35]采用 Krishnamurti 的具有明确物理意义的对流参数, 改进了 Kuo 型方案。赵思雄等^[36]根据时空加密观测资料对 Kuo 型方案也进行了改进, 提出了适于东亚的调整廓线分布。邓崧等^[37]研究了适于低纬高原地区的 Kuo 型分布廓线和湿润系数。陈德辉^[38]采用非准平衡假设, 对对流质量通量 Mc 进行预报, 提出了预报性对流质量通量参数化方案。薛建军等^[39-40]参考国外研究, 将下曳气流引入质量通量积云参数化中。Guang 等^[41]指出: 直接用对流有效位能 (CAPE) 来闭合对流参数化时, 模拟的对流是连续的, 缺乏观测的间断现象, 并提出了有效的改进方法。王鹏云等^[42]、Wang 等^[43]基于摄像探空观测, 分析了梅雨锋暴雨中冰相降水元的重要作用。辜旭赞^[44]还在参数化中引入考虑凝结作用的连续性方程。余斌等^[45]分析了热带对

流活动与低频波流相互作用, 强调热带地区对流活动的差异。李兴良等^[46]还讨论了非静力模式中垂直坐标选择对垂直速度计算的影响, 进而影响模式降水和对流活动, 这种效应对高分辨模式尤为突出。王鹏飞等^[47]利用 MM5 的湿物理过程显式方案研究了云中过冷水和冰粒子的分布特征。

但对适于东亚的参数化研究并没有达成共识, 甚至出现了一些相互对立的观点。如陈安宁等^[48]、Huang 等^[49]认为 Kuo 方案比 AS 方案更适合于东亚降水的模拟。与此相反, 彭新东等^[50]认为 AS 方案更适合梅雨锋暴雨过程。刘一鸣等^[51-52]发展了一个质量通量型积云对流参数化方案 MFS, 并移植到 NCAR Reg CM2 中, 与 Kuo 和 Grell 方案进行对比, 发现该方案能更好地模拟东亚对流活动。Ping 等^[17]、平凡等^[18]提出了新的看法, 认为 Gregory 方案能比 Kuo 方案更好地给出东亚的降水落区。

5 展 望

当前对流参数化研究现状和一些甚至矛盾的结论启示人们: 现有的参数化方案太过于依赖具体的数值模式或针对特定的对流问题, 甚至有可能忽略了某些重要的积云性质, 对积云对流的复杂物理过程考虑还不全面。于是, 一种广义的、考虑相对完备过程的通用对流参数化研究就显得十分必要。

5.1 对流参数化应该具有新的思想理念

积云对流参数化的思想源于 1960 年代, 其主要目的是为了解释热带气旋的增长过程。当时, 由于非均匀基流中积云对流的自协调理论尚不存在, 所以被迫采用了对流参数化来代替实际的对流过程, 以表述积云对热量和水汽的垂直输送。

而今, 积云对流参数化的广泛应用表明, 对流参数化的研究对象已经发生了重大转变, 即已经由单纯的热带气旋演化为广义的对流运动, 研究对象的地理范畴也由热带洋面扩展到全球所有可能的对流区, 包括中纬度的陆面和洋面。对流参数化的本质已不再是简单的温湿调整输送, 而是对实际大气不稳定的重要和主要负反馈机制^[22]。虽然研究目标发生了如此重大变化, 但现行的参数化基本思想和理论方案却没有随之发生应有的本质变化, 仍然滞留于三类经典方案的修正或相互组合, 这就导致了目前面临的困惑状态。在这种情形下, 针对这种广义的对流运动, 基于“不稳定复杂负反馈”的新理念, 通用对流参数化的研究具有重要的科学意义。

5.2 对流参数化应当反映出多尺度复杂反馈的物理本质

对流, 尤其是深厚的积云对流是大气对自身不稳定状态进行反馈调整的有效运动形式, 也是一个不稳定能量得以释放的过程。这一过程主要包括: 促使不稳定能量积累

的大尺度过程、启动对流的中尺度扰动过程、对流能量释放的中、小尺度过程和释放的能量使大气增温、增湿的过程。在能量的释放过程中,通过凝结、蒸发和感热、潜热以及动量的再分配,积云和大尺度大气动力以及水文过程建立反馈作用;通过云粒子的反射和吸收,积云和辐射过程建立反馈作用;通过降水和蒸发,积云和边界层以及陆表水文过程建立反馈作用;通过垂直运动和夹卷,使得积云单体之间发生反馈作用等等。

由此,积云对流的物理本质是一个“复杂的多尺度相互作用及反馈过程”。但是,由于早期观测技术和资料的限制,使得现有的参数化基础都只是部分地或片面地考虑了积云的这种复杂多尺度相互作用及反馈本质。通用对流参数化研究正是要在观测资料和数值试验的基础上,充分认识大气对流运动的复杂特征结构,从而通过参数化构建这种物理本质,这对完善大气环流理论和数值预报理论,无疑都具有重要的理论意义。

5.3 对流参数化应该尽可能实现通用性

通用是现代数值模式发展的要求和标准,也是模块化

参数化方案的可推广性和生命力之所在。对流参数化的这种“通用”性主要应该体现在物理适用性上。

(1) 地理通用性:不仅适合于热带洋面的深厚积云对流,还要适合于中纬度陆面和洋面上的对流活动,尤其是季风区对流运动。

(2) 分辨率通用性:同时适合于较粗分辨率的大气环流模式和较细分辨率的中尺度模式。

(3) 积分时效通用性:同时适合于气候预测模式和天气预报模式。

(4) 积云性质通用性:同时适合于深厚积云、浅积云和中等强度积云。

这种“通用性”的提法和研究尝试,有助于将人们从为数值模式配备合适物理过程而频繁更换参数化方案和对众多方案敏感性的低效研究中解脱出来,加快模式开发进程,改善模拟效果。这在数值天气预报和气候数值模拟及预测方面都将具有广阔的应用前景和重要的应用价值,但目前而言,这种通用性的实现难度很大,尚需大量的研究工作。

参 考 文 献:

- [1] ANTHES R A. A cumulus parameterization scheme utilizing a one-dimensional cloud model[J]. Mon Wea Rev, 1977, 105(3): 270-286.
- [2] KUO Y J, ANTHES R A. Semi-prognostic tests of Kuo type parameterization schemes in an extratropical convective system[J]. Mon Wea Rev, 1984, 112(8): 1 498-1 509.
- [3] BETTS A K. A new convective adjustment scheme. Part I: Observational and theoretical basis[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1986, 112(473): 677-691.
- [4] BETTS A K, MILLER M J. The Betts-Miller scheme-the Representation of Cumulus Convection in Numerical Models[J]. Amer Meteor Soc, 1993, 24(46):107-122.
- [5] DONNER L J. A cumulus parameterization including mass fluxes, vertical momentum dynamics, and mesoscale effects[J]. J Atmos Sci, 1993, 50(6): 889-906.
- [6] RANDALL D A, PAN D M. Implementation of the Arakawa-Schubert cumulus parameterization with a prognostic closure[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1993, 24(46): 137-144.
- [7] RANDALL D A, PAN D M, DING P, et al. Quasi-equilibrium. The Physics and Parameterization of Moist Atmospheric Convection[M]. SMITH R K. Dordrecht: Kluwer Academic, 1997: 359-386.
- [8] PAN D M, RANDALL D A. A cumulus parameterization with a prognostic closure[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1998, 124(547): 949-981.
- [9] EMANUEL K A. The problem of convective moistening[M]//The Physics and Parameterization of Moist Atmospheric Convection. SMITH R K, Ed, SERIES N A. Dordrecht: Kluwer Academic, 1997: 447-462.
- [10] DING P, RANDALL D A. A cumulus parameterization with multiple cloud bases[J]. J Geophys Res, 1998,103(D10): 11 341-11 352.
- [11] EMANUEL K A, ZIVKOVIC-ROTHMAN M. Development and evaluation of a convection scheme for use in climate models[J]. J Atmos Sci, 1999, 56(11): 1 766-1 782.
- [12] LIN J W, NEELIN J D. Considerations for stochastic convective parameterization[J]. J Atmos Sci, 2002, 59(5): 959-975.
- [13] GRELL A G, KUO Y H, PASCH R J. Semiprognostic tests of three cumulus parameterization schemes in middle latitudes[J]. Mon Wea Rev, 1991(1), 119: 5-31.
- [14] FRANK W M, COHEN C. Simulation of tropical convective systems Part I: A cumulus parameterization[J]. J Atmos Sci, 1987, 44(24): 3 787-3 799.
- [15] FRANK W M. A hybrid parameterization with multiple closures: The Representation of Cumulus Convection in Numerical Models[J]. Amer Meteor Soc, 1993, 24(46): 151-154.
- [16] GREGORY D, ROWNTREE P R. A mass flux convection scheme with representation of cloud ensemble characteristics and stability dependent closure[J]. Mon Wea Rev, 1990, 118(7): 1 483-1 506.
- [17] PING Fan, GAO Shouting, WANG Huijun. A Comparative Study of the Numerical Simulation of the 1998 Summer Flood in China by Two Kinds of Cumulus Convective Parameterized Methods[J]. Adv Atmos Sci, 2003, 20(1): 149-157.
- [18] 平凡, 高守亭. 短期气候模式中积云参数化方案的选取及其效能检验[J]. 中国科学院研究生院学报, 2004, 21(4): 366-373.
- [19] EMANUEL K A. Large-scale and mesoscale circulations in convectively adjusted atmospheres[R]. Reading: Workshop on Diabatic Forcing, ECMWF, 1987: 323-348.
- [20] GRAY W M. Cumulus convection and larger scale circulations I: Broadscale and mesoscale considerations[J]. Mon Wea Rev, 1973, 101(12): 839-855.
- [21] EMANUEL K A, NEELIN J D, BRETHERTON C S. On large-scale circulations in convecting atmosphere[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1994, 120(519): 1 111-1 143.
- [22] ARAKAWA A. The Cumulus Parameterization Problem: Past, Present, and Future[J]. J Climate, 2004, 17(13): 2 493-2 525.

- [23] RENNOÓ N O, INGERSOLL A P. Natural convection as a heat engine: A theory for CAPE[J]. *J Atmos Sci*, 1996, 53(4): 572-585.
- [24] EMANUEL K A, BISTER M. Moist convective velocity and buoyancy scales[J]. *J Atmos Sci*, 1996, 53(22): 3 276-3 285.
- [25] YANO Jun-Ichi. Scale-separation and quasi-equilibrium principles in Arakawa and Schubert's cumulus parameterization[J]. *J Atmos Sci*, 1999, 56(21): 3 821-3 823.
- [26] YANO J I, GUICHARD F, LAFORE J P, et al. Estimations of Mass Fluxes for Cumulus Parameterizations from High-Resolution Spatial Data[J]. *J Atmos Sci*, 2004, 61(7): 829-842.
- [27] SIEBESMA A P, CUIJPERS J W M. Evaluation of parametric assumptions for shallow cumulus convection[J]. *J Atmos Sci*, 1995, 52(6): 650-666.
- [28] GRABOWSKI W W, SMOLARKIEWICZ P K. CRCP: A cloud resolving convective parameterization for modeling the tropical convective atmosphere[J]. *Physica D*, 1999, 26(133): 171-178.
- [29] GRABOWSKI W W. Coupling cloud processes with the large-scale dynamics using the cloud-resolving convective parameterization (CRCP)[J]. *J Atmos Sci*, 2001, 58(9): 978-997.
- [30] 许习华. 积云对流参数化方案研究的进展[J]. *高原气象*, 1991, 10(1): 105-110.
- [31] 陈伯民, 钱正安. 关于积云参数化问题[J]. *高原气象*, 1992, 11(2): 213-222.
- [32] 刘一鸣. 中国关于积云参数化方案的应用[J]. *气象学报*, 1998, 56(2): 247-255.
- [33] 林文实, 黄美元. 积云参数化方案研究的现状[J]. *热带气象学报*, 1998, 14(4): 374-379.
- [34] 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[J]. *中国科学(B 辑)*, 1990, 20(9): 998-1008.
- [35] 刘金良. 改进的 Kuo-Type 积云对流参数化方案[J]. *热带气象学报*, 1994, 10(2): 185-192.
- [36] 赵思雄, 张宝严. 根据时空加密观测资料对 Kuo 型方案的改进试验[C]//台风暴雨数值预报新技术的研究. 北京: 气象出版社, 1996: 1-9
- [37] 邓崧, 琚建华, 吕俊梅. 低纬高原上中尺度模式的积云参数化方案研究[J]. *高原气象*, 2002, 21(4): 80-86.
- [38] 陈德辉. 积云对流参数化技术[J]. *应用气象学报*, 1997, 8(增刊): 69-77.
- [39] 薛建军, 闫之辉. 一种改进的质量通量积云参数化方案及预报试验[J]. *气象*, 1999, 25(5): 8-12.
- [40] 薛建军, 谈哲敏, 闫之辉. 下曳气流在积云对流中的作用[J]. *气象*, 1999, 25(11): 9-14.
- [41] GUANG J Z, GUO M M. Preliminary evaluation of a revised Zhang-McFarlane convection scheme using the NCAR CCM3 GCM[J]. *Adv Atmos Sci*, 2001, 18(5): 710-717.
- [42] 王鹏云, 阮征, 康红文. 华南暴雨中云物理过程的数值研究[J]. *应用气象学报*, 2002, 13(1): 78-87.
- [43] WANG Pengyun, YANG Jing. Physical processes associated with torrential rain of the Meiyu Front[J]. *Adv Atmos Sci*, 2003, 20(1): 77-96.
- [44] 辜旭赞. 引入考虑凝结作用的连续性方程与积云对流参数化方案修正[J]. *气象科技*, 2004, 32(1): 19-33.
- [45] 余斌, 黄荣辉. 热带对流活动与低频波流相互作用[J]. *热带气象学报*, 1995, 11(4): 297-305.
- [46] 李兴良, 陈德辉, 沈学顺. 不同垂直坐标系对垂直速度计算的影响[J]. *热带气象学报*, 2005, 21(3): 265-276.
- [47] 王鹏飞, 阮征. 对华南对流云中过冷云水-飞机积冰的直接气象因子的中尺度数值预报试验[J]. *热带气象学报*, 2002, 18(4): 399-406.
- [48] 陈安宁, 陈文, 黄荣辉. 积云对流参数化方案对气候数值模拟的影响[J]. *大气科学*, 1998, 22(6): 814-824.
- [49] HUANG Ronghui, WU Bingyi, OH Jai-Ho, et al. Sensitivity of Numerical Simulations of the East Asian Summer Monsoon Rainfall and Circulation to Different Cumulus Parameterization Schemes[J]. *Adv Atmos Sci*, 2001, 18(1): 23-41.
- [50] 彭新东, 吴晓明, 坪木和久. 积云对流参数化对一次梅雨锋暴雨过程影响的模拟检验[J]. *高原气象*, 1999, 18(3): 451-461.
- [51] 刘一鸣, 丁一汇. 修正的质量通量积云对流方案及其模拟试验研究 I: 方案介绍及对 1991 年洪涝过程的模拟[J]. *气象学报*, 2001, 59(1): 10-22.
- [52] 刘一鸣, 丁一汇. 修正的质量通量积云对流方案及其模拟试验研究 II: 三种积云方案的积云对流活动及 MFS 方案相关参数的敏感性试验[J]. *气象学报*, 2001, 59(2): 129-142.

DISCUSSIONS OF THE PROBLEMS EXISTING IN CURRENT CONVECTION PARAMETERIZATION

ZUO Rui-ting^{1,2}, WANG Li-qiong¹, QIAN Zhen-cheng¹, HOU Zhi-ming¹

(1. Meteorology College of Science and Engineering University, PLA, Nanjing 211101, China;

2. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China)

Abstract: Based on the development of convection parameterization, some problems existing in current parameterized schemes are discussed. The defects of two types of classic schemes, the large scale moisture converging scheme and mass flux scheme, are emphasized and the current study proceeding for East Asia monsoon region and China is analyzed simultaneously. Furthermore, new designing ideas and the rules of a common convection parameterization are provided, which may be of great importance for future studies in this field.

Key words: convection parameterization; numerical model; physical processes