

文章编号:1004-9045(2008)02-0186-05

边界层和陆面过程对中国暴雨影响研究的进展

赵 鸣

(中尺度灾害天气教育部重点实验室/南京大学大气科学系, 南京 210093)

摘 要:总结了近年来我国学者关于边界层和陆面过程对中国暴雨影响的研究成果。此类研究主要应用中尺度数值模式,有的对边界层过程和陆面过程做敏感性试验,有的则对模式中边界层和陆面过程参数化作改进。结果表明:边界层和陆面过程对我国暴雨有明显影响。主要表现在影响暴雨的强度以及使暴雨中心位置有一定的变动,但决定暴雨发生发展的主要因子是大中尺度动力过程。对边界层和陆面过程的改进能有效改善数值模式对暴雨的模拟。

关键词:暴雨;边界层;陆面过程

中图分类号: P458.1*21.1; P435 **文献标识码:** D

1 引言

暴雨是影响我国的重要灾害性天气,多年来对其发生发展的天气动力学过程及分析预报进行了大量研究^[1-4]。而用数值模式研究暴雨更是近年来研究的主要方法,其优点是可以连续分析暴雨过程中各种物理量的逐时变化情况,为暴雨的数值预报奠定基础。暴雨是中尺度过程,因此用来研究的模式是中尺度模式,如 MM4、MM5 系列^[5], RAMS^[6], 坐标模式(AREM)^[7]等等,而以 MM4、MM5 系列更常用。用数值模式研究暴雨除了可以从天气形势演变上分析暴雨的发展外,因模式包含众多的动力和物理过程,可以仔细分析不同动力和物理过程对暴雨的影响。从物理过程而言,云过程、边界层、陆面过程、辐射等均可对暴雨产生影响,随着模式的逐步发展,这些物理过程也越来越详尽。对边界层和陆面过程而言,它们影响了地气间热量、水汽、动量的输送,从而影响暴雨发生发展的热力、动力和水汽条件,进而影响暴雨过程。本文试图总结我国学者关于边界层和陆面过程对暴雨影响的研究成果。

2 边界层总体对暴雨的影响

边界层是地面和大气间的过渡带,地面来的水汽是大气水分的重要来源,而地面来的感热、潜热及辐射热通量是大气的重要热源,边界层还起到摩擦作用。早期研究主要是研究地面感、潜热通量对暴雨的影响,如翟国庆等^[7]用 MM5 的前身 MM2 研究 1991 年

7 月一次江淮暴雨个例,发现从边界层进入大气的水汽(或潜热通量)通过上空西南低空急流向长江下游输送,改变了下游大气的温、湿结构,通过积云对流和层状云的潜热释放促进过程后期气旋系统的发展,造成江淮暴雨,说明了地面水汽通量的重要作用。董佩明等^[8]用 MM4 对 1992 年 7 月 23 日京津冀暴雨进行研究,由考虑与不考虑地气之间热、水交换来评价地面和边界层对暴雨的影响,当不计此交换时,降水量减少 40%,而当去掉辐射,但考虑热、水交换时,降水仅减少一成,可见地面通过边界层进入大气的水汽源是降水重要的水汽源,而感、潜热通量则是位势不稳定源,可见下垫面热、水强迫的重要作用。董佩明等^[8]用模式通过考虑与不考虑边界层作用研究 1998 年 7 月江淮暴雨,并分析了垂直速度场、水汽散度场等,结论是大范围暴雨落区是由大尺度流场决定,边界层则影响低层水汽及稳定性、地表通量与低层流场的相互配置,在长江南侧,是地面通量的大区,是水汽及不稳定能量的源区,对暴雨影响大。程麟生等^[9]用 MM4 也证明了地面热通量及其垂直输送有利于暴雨和低涡的发展,增加降雨量。无地面通量则中尺度系统发展弱,降水少。马淑芬等^[11]用 MM4 也有类似的结果,即地面通量影响降水强度,计入地面热、水通量能使模拟区域降水量增加,但暴雨落区主要由大尺度流场决定。高坤等^[12]用 MM4 得到地面通量能加深气旋,增加降水。陈炯^[13]用 WRF 模式做试验,有边界层过程比无边界的更好,不考虑边界层,则对流降水少,加入边界层后,则低层辐合、垂直运动增加、层结不稳定

收稿日期:2008-03-05;定稿日期:2008-04-05

基金项目:国家自然科学基金(40333031)资助

作者简介:赵鸣,男,1939年生,教授,主要从事边界层和陆面过程模式的研究。Email: mzhao@nju.edu.cn

增加,使对流的激发作用增强,即考虑边界层后,不稳定层结的范围扩大,但边界层对大尺度的降水影响较小,它主要通过和积云对流的耦合来增大对流降水。

如果仔细分析模式中边界层的作用,则边界层作用有二个,一是将地面的热、水通量输入大气,并通过地气间动量通量对大气动能起消耗作用,二是边界层内部的湍流交换,即地气间的通量通过湍流向上层大气进行热、水、动量的交换,这两种作用究竟何者更重要,其影响是否一致?赵鸣等^[14]用 MM5 对 1998 年 7 月 23 日和 1991 年 6 月 12 日的二次江淮暴雨过程做试验,先不计二者的影响,再只不计地表通量来区分这两部分作用的大小,结果表明二者影响是一致的,地气间的通量是影响的主要部分,并分析了二种情况下影响暴雨的湿位涡、水汽通量散度、涡度、低空急流等,当不计地面通量则低空急流、水汽辐合均减弱,降水区的湿位涡中心数值下降,涡度也减少;二种作用均不计则结果更甚,显然降水也更少些,这说明边界层湍流扩散和地气通量对降水总影响方向一致,且边界层通过影响上述各动力学因子来影响暴雨强度。

由于边界层参数化方案的不同,运转模式时有多种选择,各方案比较如何?蔡芎宁等^[15]在 MM5 中用 6 种边界层参数化方案分析了 2003 年 7 月 4-5 日的南方暴雨,不同方案结果表明对天气形势预报影响不明显,但在雨量中心、强度及雨区分布上有差异,各方案在垂直速度、水汽通量散度、涡、散度、假相当位温方面均有差异,这些是造成暴雨强度分布差异的原因,即边界层影响了一些低层大气的动、热力结构,边界层可使低层大气层结更不稳定,水汽的垂直输送、涡、散度均可增加,形成深厚云层和积雨云的物理条件,可以说边界层是对流形成的原动机,不同参数化造成上述量的差异从而产生降雨的差异,试验中以 Blackadar 的高分辨方案为最佳。

总之,边界层过程主要对暴雨强度有影响,对落区也有部分影响,物理机制是地气间的各种交换改变了低层大气的水、热条件,而边界层摩擦也增加了穿越等压线的辐合,增加了水汽辐合等,而影响大范围的落区仍主要受大尺度环流场决定,从这点说,边界层的影响不是最根本的。

3 边界层参数化方案的改进

在中尺度模式中边界层参数化方案根据原理的不同有多种方案,如常用的 MM5 模式其边界层方案有七、八种之多,各有优点。我国学者根据新的湍流交换的理论对 MM4、MM5 模式系列做了改进,引进了新的边界层参数化方案,例如许丽人等^[16]将 E-、E- -I

湍流参数化方案引入到 MM4 中并用不同层结下近地层的通量-廓线关系计算地面通量以取代原模式中的拖曳系数法,其中并引入了标量粗糙度。对 1991 年、1998 年夏季江淮暴雨做模拟,与各方案比较,得到 E- -I 方案及上述求地面通量的方法在降水强度上模拟结果最好,而相应的垂直速度、低空急流、假相当位温等影响降水的因子也最合理,从而使模拟结果更好。江勇等^[17]则将上述方案引入到 MM5 中并与原有的总体边界层方案、MRF、BT、M- Y 等方案作了比较,也以上述暴雨两个例为例,结果发现含湍能的方案都不错,而 E- -I 方案在降水模拟上更好一些,但也发现并非任一方案在所有个例上均最好,因为影响暴雨的因子有很多,各种因子在一起并不能使某一边界层方案最优越,但显然新的 E- -I 方案要优越一些。程锐等^[9]在区域 η 模式中引入上述用多种层结的通量-廓线关系计算地面通量的方案,在模式中还有陆面过程,研究 2002 年 8 月 20 日我国东部暴雨,并将其与原模式中总体交换系数方案、不考虑地面过程的结果比较,结果新方案在降水形态、中心分布上与实况最接近,低空急流也最符合实况,而涡、散度与低空急流等与降水带配合也很好,正是通过上述因子改进了降水模拟。

徐大海等^[18]将 Stull 的穿越湍流闭合参数化方案引入到 MM5 中,模拟了 1998 年 7 月 21-22 日长江流域暴雨,表明它比原高分辨边界层参数化方案要好,在中心点位置及降水量级上均好于原方案。

徐大海等^[18]、朱蓉等^[19]在多尺度湍流理论基础上将湍流谱与平均量梯度相联系,在 MM5 原 MRF 方案基础上建立了边界层多尺度湍流参数化模式,引入 MM5 后对 1998 年夏季武汉和华南前汛期暴雨进行模拟,其降水量比 MRF、高分辨边界层方案更符合实况。

徐大海等^[18]还在 Mellor-Yamada 第 4 级湍流闭合方案基础上建立了二阶矩闭合方案,引入了 MM5,应用于 1998 年 6 月 8-9 日的华南暴雨,结果在二个降水中心位置、强度及其他地区的降水分布上比原模式中的 Eta 方案更接近实况,在低空流场等方面的模拟上也更合理。

总之,对中尺度模式中新边界层参数化方案的引入改善了边界层中的湍流交换的模拟,进一步改善了暴雨的模拟。

4 陆面特征对暴雨的影响

边界层是下垫面与大气间的交换渠道,而下垫面的性质直接影响了地气间的通量,在旧的中尺度模式中只有不同下垫面性质所对应的如反照率、土壤潮湿程度等的不同,而没有陆面过程,新的模式则引进了

包括植被、土壤等陆面过程,这样下垫面的温、湿度、各种通量都是预报量,因而使地气间的交换的计算更精确。一些新的中尺度模式如 MM5 新版本中耦合有陆面过程,一些区域气候模式如 RIEMS 更是在 MM5 的基础上耦合好的陆面过程和辐射方案而得。一些大、中尺度气候模式中陆面过程甚至连碳循环也包括在内,但这往往用于更长期的气候预报。

陆面过程对大气的影晌应该是长期的甚至是远距的,即对气候有较大影响,如柏晶瑜等^[20]将青藏高原地温异常引入 CCM3 气候模式,长期积分后发现能影响次年长江中下游夏季降水,资料分析也表明欧亚和青藏高原冬春季积雪与我国夏季降水有关^[21],这些都表明陆面过程对气候有长期的、大范围的影响。

范广洲等^[22]用 RegCM2 模式在夏季积分二个多月,将华北西北部用沙漠代替草原后,则华北北部降水增加,草原沙漠代替落叶林则华北夏季降水有减少,用农田代替落叶林,则夏季降水略增,这仍是对气候的影响。由于下垫面反照率、粗糙度、热性质等的改变,使地气间能量交换发生改变,地面加热场的改变导致局地环流改变,虽然由于时间长,过程很复杂,但说明陆面的不同性质对降水有很大影响。用含陆面过程的气候模式研究陆面对降水气候的影响有很多工作,如汤剑平等^[23]用引入陆面过程 BATS 的 MM5 模式对 6 年夏季平均降水的模拟都较成功。

陆面过程对暴雨的模拟预报有没有影响呢?陈万隆等^[24]用 6 层 $p-\sigma$ 模式加上 Deardorff 的植被参数化对 1981 年和 1982 年 7 月青藏高原下游暴雨进行了模拟,发现加与不加植被对大尺度环流动力过程影响不明显,但对降水强度和落区有改善作用,因植被增加了水份蒸发,增加了水汽输送。王鹏云等^[25]用卫星遥感的地表植被研究华南暴雨,将我国地表植被及 NCAR 资料分别放到非静力 MM5 中,对 1998 年 5 月华南暴雨二个例模拟,当网格 45 km 时,二者差别不大,但网格尺度达 5~15 km 时,前者预报降水的最大值增加了 12%~14%,更接近观测值。在差值大的地区,我国实际植被为农田和亚热带常绿灌木,而 NCAR 为针叶林,使前者土壤湿度较大,前者锋生带上锋生函数要大出百分之几十,且地面粗糙度不均,使水平风速切变增加,辐合增加,于是前者降水更大更好,这说明了蒸发和下垫面引起的动力作用起了作用。李英等^[26]用 MM5V3 研究台风 Nina,发现湿地边界层通量对登陆台风的强度、结构和降水有影响,其感、潜热通量有利于台风的维持和增强,特别潜热作用大,有利于雨带螺旋结构的维持,影响了降水分布。而动量通量则削弱台风,但对台风降水有增幅作用。张福青等^[27]用热

带地区 6 层 σ 模式研究台风暴雨,发现地面潜热通量和边界层动量通量,使得低层辐合增加,高层流出增加,即边界层在台风的发展和维持中起重要作用,若不计这种下垫面作用则最大降水量及范围均会减少很多。以上研究表明陆面过程对短期暴雨也会起到重要作用。

5 改进的陆面模式对暴雨的影响

上面总结了用已有的陆面模式研究对暴雨的影响,我国学者还对陆面模式的发展作了不少研究,如孙菽芬等^[28-29],但这些模式发展多用于研究气候变化,用于暴雨研究的还不多。赵鸣等^[30]对原 RIEMS 模式进行了改进,RIEMS 模式是在 MM5 基础上加上 BATS 及辐射过程形成的区域中尺度气候模式^[31]。上述改进是将 RIEMS 模式中的边界层参数化引入 MYE、MRF、E- -I 等方案,对 1998 年 5 月 10~11 日和 1998 年 7 月 17~18 日江淮暴雨二个例进行模拟,发现新 RIEMS 模式对降水模拟比 MM5 更好,即陆面模式对短期暴雨也有影响。除降水外对 850 hPa 上的流线、海平面气压、低空急流、涡、散度等的模拟均比 MM5 更好,因而降水模拟也更好,各边界层方案中 E- -I 是比较优秀的,在月尺度降水上,同样新 RIEMS 比 MM5 好^[32]。陈潜等^[33]又对气候模式 RIEMS 中的地气通量计算做了改进,原来 RIEMS 中陆面模式 BATS 耦合到大气时地面通量计算用了简单的拖曳系数法,而文献^[33]用在文献^[17]中提到的在几种层结下的通量-廓线法计算通量的方案引入到 RIEMS 中,这样又改进了陆面与大气间通量的计算,并引入了标量粗糙度。用 1991 年 6 月、1998 年 7 月二个江淮暴雨二个例进行模拟,发现在月尺度降水上新结果更好,改变了原模拟降水偏多的结果,更符合实况。850 hPa 上气流,海平面气压等也更好。对个别日暴雨如 1991 年 7 月 17 日、1998 年 5 月 10 日进行了一天积分,使用了 MRF 和 E- -I 方案,则改进后降水模拟场和实况场的相关系数均好于以前,说明地气通量计算的改进对有陆面过程的气候模式也很重要,它具体体现了边界层和陆面二个过程的影响。

赵鸣^[34]进一步改善了 RIEMS 中陆面过程,将 RIEMS 中 BATS 的二层土壤以 10 层土壤模式代替,用较复杂的土壤热、水过程取代简单的二层模式。对夏季一个月的模拟,即 1991 年 6 月和 1998 年 7 月,原模式降水场在江淮、华中华南均偏大,而改进后更接近观测场,同时海平面气压、850 hPa 流场均较原模式为优,这也是降水更好的原因。虽然未对个别暴雨日进行模拟,但 6、7 月正是江淮暴雨多发季节,其结果也反映

了对暴雨模拟的改进。

陆面模式中网格内部下垫面视为均匀的,但实际并非如此,网格内非均匀的考虑是近年来陆面模式中的热点问题,合理考虑非均匀显然能改进模式模拟的效果。曾新民等^[35-39]考虑了下垫面某些参数非均匀的影响,如对粗糙度设计了各种非均匀分布,用 RegCM2 区域气候模式得到其对降水的影响,研究了 1991 年梅雨季节三个暴雨个例,对 24 h 降水而言,显然选择合理的粗糙度非均匀分布比均匀分布得到更合理的结果,而影响暴雨的低空急流、低空温、湿度均更符合实况,说明了陆面粗糙度的非均匀分布对降水会有影响。进一步,曾新民等^[37-39]对 RegCM2 中的陆面模式 BATS 中的温、湿分布做了非均匀性的试验,设下垫面温、湿分布服从一定的分布规律,用 1991 年夏季 6 月及 6-8 三个月降水实况资料做试验,得出了下垫面温、湿的非均匀对地表通量、降水都敏感。适当选取湿温非均匀的参数可以改进暴雨预报。

曾新民等^[40]进一步在上述系列研究基础上在 BATS 中计入降水和土壤渗透的非均匀,对 1991 年梅雨期的模拟得出能改善水文状况的预报如径流降水比得到更实际的结果,显然考虑合适的降水和土壤渗透的非均匀对暴雨预报也是有益的。

赵得明等^[41]从卫星遥感资料反演土壤的水分指数,得到接近实况的土壤湿度,解决了大范围土壤湿度资料难以获得的困难,用此土壤湿度代替 NCEP 资料用 MM5V3 模拟 1998 年 6 月 13-14 日、6 月 18-23 日、7 月 21-26 日的长江流域暴雨过程,前二个例子模拟的位置和强度好于 NCEP 的,接近观测,后一个例子也改进了结果,模拟出的更强降水是由于降水带反演出的土壤湿度比 NCEP 大,并使降水的日温度降低。NCEP 模拟的降水比观测少很多,卫星资料模拟得到的大为改进,这进一步说明了土壤湿度的重要作用。

6 结论和展望

边界层和陆面过程影响了地气间交换,当然会影响到大气中各种动力和物理过程,更好地表现边界层和陆面的作用会改善暴雨预报。本文总结了我国学者这方面的研究,指出好的边界层和陆面参数化的重要性,但也指出它们主要通过改善低层大气水热输送及稳定度来改善热、动力过程的模拟,进而影响降水,决定性因素仍是大中尺度环流形势。边界层和陆面过程不能根本改变降水预报,但能起到改善作用,未来可以在改进模式上进一步加强,综合考虑各种陆面非均匀的影响,并深入探讨影响大气过程的机理。上述这些研究主要是中尺度的边界层过程,从更小的尺度上研

究边界层和陆面过程对暴雨中对流触发过程的动、热力影响,并将地形与陆面和边界层相互作用考虑进来,可能会有新的发现和进展,应大力开展研究,进一步提高暴雨数值预报的准确率。

参考文献:

- [1] 陶诗言,张小玲,张顺利.长江流域梅雨锋暴雨灾害研究[M].北京:气象出版社,2004.
- [2] 宇如聪,薛纪善,徐幼平. AREMS 中尺度暴雨数值预报模式系统[M].北京:气象出版社,2004.
- [3] 赵思雄,陶祖钰,孙建华,等. 长江流域梅雨锋暴雨机理的分析研究[M].北京:气象出版社,2004.
- [4] 85-906-08 课题组.暴雨科学业务试验和天气动力学理论研究[M].北京:气象出版社,1996.
- [5] 陈蓉,杜华武. 陆面过程对初夏华南冷锋过程影响的数值研究[J].热带气象学报,1996,12(2):188-192.
- [6] 程锐,宇如聪,徐幼平,等. AREM 地表通量参数化的一种改进方法及其预报试验[G]//武汉区域气象中心编.暴雨·灾害,北京:气象出版社,2004:12-20.
- [7] 翟国庆,高坤.江南地面热通量对江淮气旋暴雨形成的模拟研究[J].气象学报,1997,55(1):55-65.
- [8] 董佩明,张维桓. 下垫面强迫对京津冀大暴雨作用的数值研究[J].应用气象学报,1999,10(4):436-444.
- [9] 董佩明,赵思雄. 边界层过程对 98 年 7 月长江流域暴雨预报影响的数值试验研究[J].气候与环境研究,2003,8(2):230-240.
- [10] 程麟生,彭新东.行星边界层物理过程对暴雨及其中尺度系统演变的影响[G]//85-906-08 课题组.暴雨科学业务试验和天气动力学理论研究.北京:气象出版社,1996:279-285.
- [11] 马淑芬,丁-汇,郭立新,等.暴雨系统与地面通量的数值试验[G]//85-906-08 课题组.暴雨科学业务试验和天气动力学理论研究.北京:气象出版社,1996:286-291.
- [12] 高坤,翟国庆.地面热流量对江淮气旋暴雨影响地数值模拟试验[G]//85-906-08 课题组.暴雨科学业务试验和天气动力学理论研究.北京:气象出版社,1996:292-302.
- [13] 陈炯.边界层参数化方案对降水预报的影响[J].应用气象学报,2006,17(增刊):11-17.
- [14] 赵鸣,陈潜.边界层过程对暴雨影响的敏感性试验[J].气象科学,2007,27(1):1-10.
- [15] 蔡蓁宁,寿绍文,钟青.边界层参数化方案对暴雨数值模拟的影响[J].南京气象学院学报,2006,29(3):364-367.
- [16] XU Liren, ZHAO Ming. The influence of boundary layer parameterization schemes on mesoscale heavy rain system [J]. Adv Atm Sci,2000,17(3):458-472.
- [17] 江勇,赵鸣,汤剑平等. MM5 中新边界方案的引入和对比试验[J].气象科学,2002,22(3):253-261.
- [18] 徐大海,周秀骥,孙健,等. 大气边界层参数化模式[G]//陈德辉,胡志晋,徐大海,等.CAMS 大气数值预报模式系统研究.北京:气象出版社,2004:107-161.
- [19] 朱蓉,徐大海.中尺度数值模式中的边界层多尺度参数化方案[J].应用气象学报,2004,15(5):543-555.
- [20] 柏晶瑜,徐祥德.青藏高原春季地温异常对长江中下游夏季影响的研究[J].应用气象学报,1999,10(4):478-485.

- [21] 陈兴芳, 宋文玲. 欧亚和青藏高原冬春季积雪与我国夏季降水关系的分析和预测[J]. 高原气象, 2000, 19(2): 214-223.
- [22] 范广洲, 吕世华. 陆面植被类型对华北地区夏季降水的数值研究[J]. 高原气象, 1999, 18(4): 649-658.
- [23] 汤剑平, 赵鸣, 苏炳凯, 等. MM5 BATS对东亚夏季气候及其变化的模式试验[J]. 高原气象, 2005, 24(1): 28-37.
- [24] 陈万隆, 王革丽, 周锁铨. 植被分布对青藏高原东侧暴雨过程影响的数值模拟[J]. 高原气象, 1997, 16(2): 165-173.
- [25] 王鹏云, 肖乾广, 林永辉. 卫星遥感地表植被及其在华南暴雨中尺度数值模拟中的应用试验[J]. 应用气象学报, 2001, 12(3): 287-296.
- [26] 李英, 陈联寿. 湿地边界层通量影响热带气旋登陆维持和降水的数值试验[J]. 气象学报, 2005, 63(5): 683-692.
- [27] 张福青, 杜华武, 蒋全荣. 成熟台风边界层作用的数值研究[J]. 热带气象学报, 1994, 10(2): 107-114.
- [28] 孙菽芬, 李敬阳. 用于气候研究的雪盖模型参数化方案敏感性研究[J]. 大气科学, 2002, 26(4): 558-575.
- [29] 陈海山, 孙照渤. 陆面模式 CLSM 设计及性能检验, I 模式设计[J]. 大气科学, 2004, 28(6): 801-819.
- [30] 赵鸣, 江勇, 汤剑平, 等. 用新 RIEMS 模式研究陆面过程对暴雨的影响[J]. 南京大学学报, 2003, 39(3): 370-381.
- [31] 熊喆. 用区域气候模式模拟和分析东亚年气候变化[D]. 北京: 大气科学研究所, 2001.
- [32] ZHAO Ming, JIANG Yong, SU Bingkai. The effects of land surface process on regional precipitation simulation on monthly time scale [C]. WMO Proc int. symposium on climate change. Beijing, 2003: 275-279.
- [33] 陈潜, 赵鸣, 汤剑平, 等. 陆面过程模式 BATS 中地气通量计算方案的一个改进试验[J]. 南京大学学报, 2004, 40(3): 330-340.
- [34] 赵鸣. 对 RIEMS 模式中陆面过程的一个改进[J]. 气象科学, 2006, 26(2): 119-126.
- [35] ZENG Xinmin, ZHAO Ming, SU Bingkai. A numerical study on effects of land surface heterogeneity from combined approach on atmospheric process, part I, principle and method [J]. Adv Atm Sci, 2000, 17(1): 103-120.
- [36] ZENG Xinmin, ZHAO Ming, SU Bingkai. A numerical study on effects of land surface heterogeneity from combined approach on atmospheric process part II, coupling model simulations [J]. Adv Atm Sci, 2000, 17(2): 241-254.
- [37] 曾新民, 赵鸣, 苏炳凯. 结合法表示的下垫面温湿非均匀对夏季季风气候影响的数值试验[J]. 大气科学, 2002, 26(1): 41-56.
- [38] ZENG Xinmin, ZHAO Ming, SU Bingkai, et al. The effects of land surface heterogeneities on regional climate, a sensitivity study [J]. Met and Atm Phys, 2002, 81(1-2): 67-83.
- [39] ZENG Xinmin, ZHAO Ming, SU Bingkai, et al. Effects of land surface heterogeneities in temperature and moisture from combined approach on regional climate, a sensitivity study [J]. Global and Planetary Change, 2003, 37: 247-263.
- [40] ZENG Xinmin, ZHAO Ming, SU Bingkai, et al. Effects of subgrid heterogeneities in soil infiltration capacity and precipitation on regional climate sensitivity study [J]. Theor App Climatology, 2002, 73(3-4): 207-221.
- [41] ZHAO Deming, SU Bingkai, ZHAO Ming, et al. Soil moisture retrieval from satellite images and its application to heavy rain simulation in Eastern China [J]. Adv Atm Sci, 2006, 23(2): 299-316.

A Review of the Research on the Effects of Boundary Layer and Land Surface Process on Heavy Rain in China

ZHAO Ming

(Key lab of Meso- Scale Severe Weather of the Department of Education/
Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract: This paper summarized the research of the effects of PBL and land surface process on the heavy rain in China by Chinese meteorologists. This kind of research applied meso-scale numerical model to do sensitivity experiment for the PBL and land surface process, or improve their parameterizations. The results showed that there were obvious effects of PBL and land surface process mainly on the strength of the heavy rain and the location of the center of heavy rain system. But the main factor controlling the occurrence and developments of heavy rain is the dynamical process of macro- and meso- scales. The improvement on the PBL and land surface process models can improve the simulation of the heavy rain.

Key words: Heavy rain; Boundary layer; Surface process