

下曳气流在积云对流中的作用

薛建军 谈哲敏

闫之辉

(南京大学大气科学系, 南京 210093)

(国家气象中心, 北京 100081)

提 要

利用国家气象中心高分辨率有限区域业务预报模式(HLAFS), 对有无下曳气流的积云参数化方案进行了对比试验, 通过对积云内各物理量及大尺度物理量场的诊断分析研究下曳气流对积云对流发生发展的作用以及对大尺度热力、动力场的影响。结果表明: (1) 下曳气流具有湿冷的特征, 主要出现在强对流时段对流层中下层; (2) 下曳气流的引入, 促进了模式中强积云对流的发生发展, 并在更高更多的空间层次上更强地加热及干化环境大气, 进而改变了积云对流对大尺度热力场、动力场的作用状况。

关键词: 下曳气流 积云对流 诊断分析

引 言

积云是由一个或多个对流单体组成的, 不管是单体积云, 还是多单体、超级单体积云, 都包含上升气流和下曳气流。关于下曳气流在积云对流中所起的作用, 国内外已有不少研究。

Ming-Dean Cheng^[1](1989) 用一个包含动力模拟积云尺度上升、下沉运动的积云总体诊断模式, 诊断 GATE 资料以判断积云尺度下沉运动对大尺度热、湿收支情况的影响。研究表明: 在对流层低层下沉运动对视热源和视水汽汇的作用程度与上升运动相当。上升运动使环境变暖变干, 而下沉运动则使低云层变得湿冷。明显的下沉运动常出现在组织性对流中。

冯业荣^[2](1997) 等用 TAMEX 中尺度试验加密观测资料, 研究影响台湾地区的一次梅雨锋前暖区强对流过程, 用的是改进的 Yanai 积云总体诊断模式。结果指出暖湿上升气流和冷湿下曳气流是台湾锋前对流云团的基本温湿结构, 有利于对流系统的维持和

发展。

国家气象中心在“八五”期间建立了有限区域同化预报系统(HLAFS), 在次网格尺度积云对流参数化方案中使用的质量通量方案中仅考虑了由向上的质量通量对环境大气所产生的影响。薛建军等^[3](1999) 对 HLAFS 中原有的参数化方案作了进一步的改进, 在参数化方案中同时考虑积云对流上升和下沉运动, 并进行了个例对比试验。结果表明, 下曳气流的引入, 进一步提高了 HLAFS 对积云降水特别是暴雨的预报能力。为了给模式的进一步改进提供有力的理论依据, 本文将进一步诊断分析积云对流的微物理图象及其对大尺度场的影响, 研究下曳气流在积云对流过程中所起的作用。

1 个例选取

9711 号台风于 1997 年 8 月 10 日上午在西北太平洋上生成, 于 18 日晚 9 时 30 分(北京时, 下同) 在浙江温岭石塘镇登陆^[4]。受其影响, 18~23 日, 浙江大部、安徽东部、江苏大部、上海、山东中部和半岛地区、辽宁大

部、吉林中部和西部、黑龙江南部和东部过程降水量有 50~200mm。

2 诊断分析

为了更好地研究下曳气流对积云对流发生发展的作用及对大尺度热力、动力场的影响,以 1997 年 8 月 18 日 00 时为初始场,我们分别计算了两种方案中强降水中心单点 24 小时内每小时一次的积云内及大尺度场热力学、动力学物理量和积分 12 小时后中心点周围一定区域内 13 层标准等压面上的大尺度场温度、湿度、涡度、散度和垂直速度等物理量。

2.1 云内量诊断

下曳气流的引入,将改变积云对流自身的物理图象。一方面下曳气流自身具有向下的质量通量并通过卷入卷出与环境空气发生

能量和物质交换,另一方面下曳气流的作用必然会影响到上升气流的发生发展。这样包含上升、下曳气流的模式所描述的积云对流的特征与只含上升气流的模式将有较大的差别。

图 1 给出了每小时一次的积云内下曳气流的质量通量(ZMD,单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)。可以看出:下曳气流基本存在于积云中下层,主要是 500 hPa 气压层(10~11 层)以下。且在出现强对流时段,下曳气流质量通量值大小达到 0.1 以上,而在其它时刻却很弱,基本上在 0.05 以下。ZMD 大值出现在 13 时左右 5~10 层,与强对流降水的出现时间基本上一致。卷入、卷出率(ZED、ZDD)量值分布特点与 ZMD 基本类似(图略)。

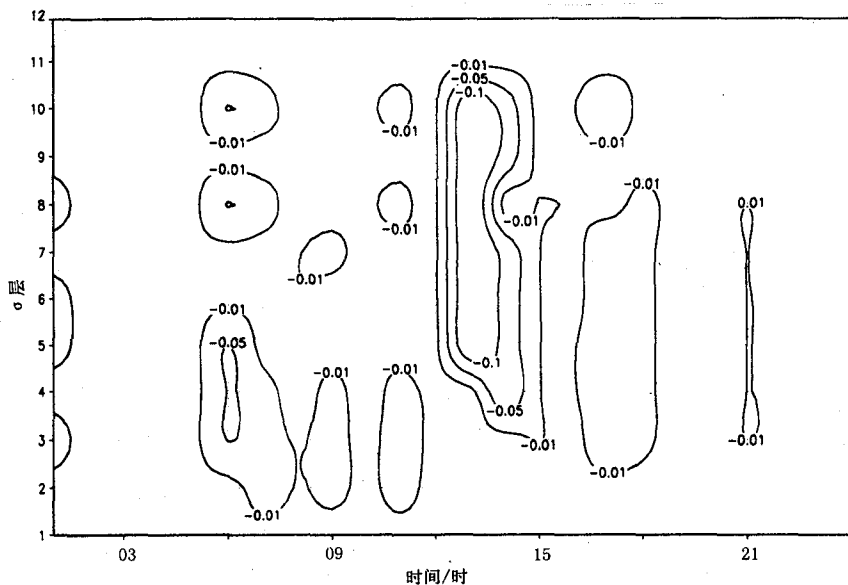


图 1 积云内下曳气流质量通量

下曳气流的温度(ZTD)、湿度值(ZQD)与环境空气有明显差异(图略),在强对流时刻,在下曳气流中及云底以下各层,ZQD 均大于环境空气的比湿值;在 5 层以下 ZTD 均小于环境空气温度值。说明下曳气流中由于存在液态水的蒸发作用,本身温度偏低、湿

度偏大。

就上升气流而言,包含有下曳气流的积云参数化方案中所描述的上升气流与原方案中单独的上升气流之间出现了明显的差别。也就是说,下曳气流的引入,影响到了对上升气流的模拟。从有无下曳气流两种方案中上

升气流的质量通量(ZMC,单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) 时间-空间剖面图(图2)中可见,原方案中,上升气流亦即积云对流主要发生在6~12层,且强上升气流出现时间早,在04时、05时出现大值,而此时段改进方案中的上升气流却弱得多。相反,在12时以后改进方案模

拟出伸至16层的强上升气流,质量通量也较原方案中相应时刻及04时、05时所模拟的上升气流强得多。对比可见,原方案中模拟出伸展高度较低、强度较弱的对流,而改进方案则能模拟出强的积云对流。

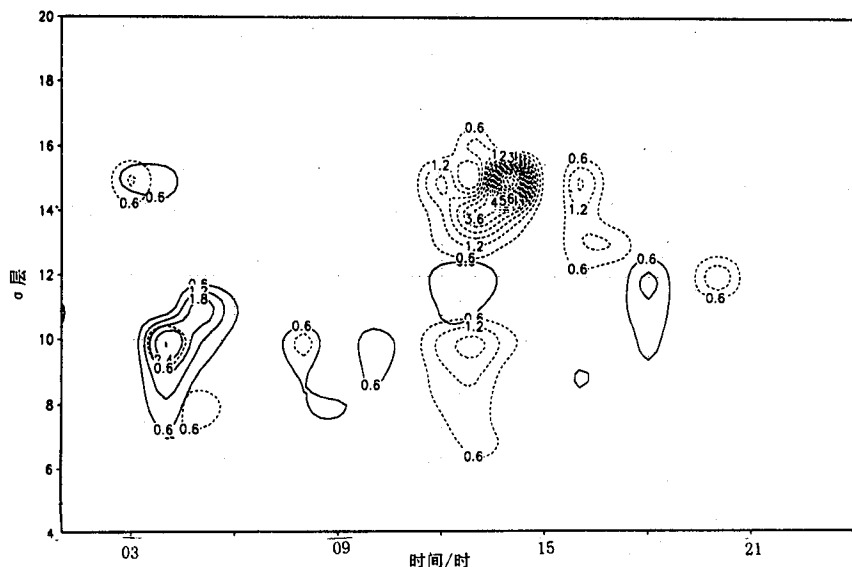


图2 上升气流的质量通量时-空剖面图

实线为原方案的值,断线为改进方案的值

上升气流中的卷入率、卷出率时间-空间分布对比情况与质量通量也相似,改进方案中积云对流通过卷入、卷出与环境空气发生物质、能量交换的时间宽度、空间层次、作用强度基本上均有明显提高。说明下曳气流的引入对积云对流自身的发生发展也起到了很大的作用。不同方案所描述的上升气流的热力学特征也存在着差异。上升气流质量通量时间、空间、强度分布的不同必然导致其温、湿度出现不同。在强对流时刻两方案上升气流温度(ZTC,单位为 $^{\circ}\text{C}$)、比湿(ZQC,单位为 $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)的对比情况见图3,12~15层改进方案中的上升气流温、湿度均较原方案中的偏高。而在8~11层,温、湿度则为改进方案中的偏低。说明在改进方案中更强的上升气流向更高空输送水汽使湿度偏大,并由于凝结

潜热的释放而使温度更高。在稍低层量值偏小可能是由于云顶高度较低的积云对流改进方案中模拟得更弱导致。

不论含否下曳气流,作为一个整体,我们来对比分析两个方案中积云对流对环境空气的作用,主要考虑对温度场和湿度场的作用情况。用DTFC、DQFC分别表示积云对流引起的格点场空气温度、湿度变化趋势,单位分别为 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $\text{g} \cdot (\text{gs})^{-1}$ 。两个方案中DTFC基本上以正值为主即通过对流潜热释放加热环境大气。而改进方案强度要强得多。说明改进方案中所模拟的强对流在更高更多层次上更强地加热环境大气。图4a和4b分别给出了两个方案中DQFC的分布情况。可见,两方案积云对流对环境大气湿度场的影响均主要以消耗环境水分即形成水汽汇为主

但差异明显,原方案中在 04 时在 7~10 层有 1×10^{-7} 至 6×10^{-7} 的干化作用,而 11 层则有较强的湿化作用,这与原方案在 04 时模拟出的云顶在 11 层附近的积云对流相对应。在 13 时,原方案所模拟对流很弱,其对环境大气的干化作用也很弱,仅在 10~12 层出现 1×10^{-7} 大小的量值;而在改进方案中,强作用

主要出现在 12 时以后,在从 5 层开始直到 15 层除 11 层为湿化作用外均有明显的负值即产生干化作用,即 DQFC 出现空间上、下双峰特征,11 层的湿化作用表明对流系统中层存在某种蒸发机制,可能是浅薄积云云顶云滴的卷出使然^[2]。

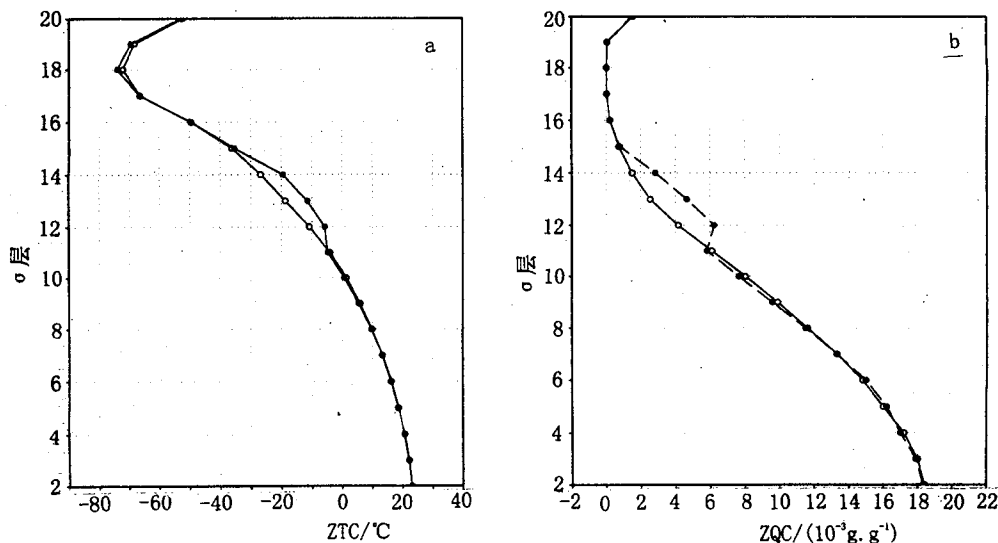


图3 在强对流时刻两方案上升气流温度、比湿的对比情况
空心圆为原方案的值,实心圆为改进方案的值

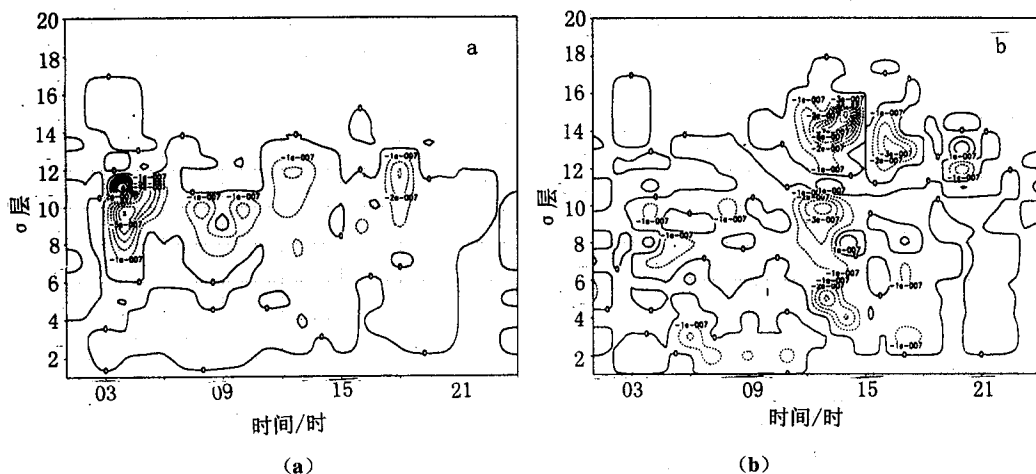


图4 两个方案中 DQFC 时间—空间分布情况。(a)原方案,(b)改进方案

2.2 强降水中心点及周围区域大尺度场物理量诊断分析

2.2.1 强降水中心单点大尺度场物理量诊断分析

针对有无下曳气流,我们分别计算了强降水中心点(30.5°N, 122.0°E)每小时一次的大尺度场物理量温度 T 、比湿 q 、云水含量 q_c 、雨水含量 q_r 及 P 坐标垂直速度 ω (图略)。垂直坐标为20层 σ 面。

对比分析可见,除最上边4层外,强降水中心大尺度场温度,在出现明显降水后,改进方案的值均明显高于原方案的值,尤以10层以上更为明显。表明引入下曳气流后,积云对流本身发展得更为强盛,对环境大气的加热作用较原方案更强。

水分含量对比情况为:在强降水时段12~18时,各层比湿值基本上都是改进方案中的偏大一些,特别是10层以上更为明显。云水、雨水含量情况为:在04时以前,两方案结果相差不大,其后随着积云对流作用的加强,因积云对流方案中含下曳气流否,两方案环境场云水、雨水含量出现很大不同。改进方案中强对流时段云水、雨水含量基本上较原方案中的量值大,尤以在中高层更为明显,而在其它时刻相对较弱。说明考虑下曳气流能更好地模拟出强对流的发生发展。改进方案中云水在强对流时段出现了上、下两个大值中心,说明此时同时具有较明显的弱对流和强对流。

由强降水中心点环境大气 ω 值时空分布情况可见,改进方案中大尺度垂直运动明显强于原方案,特别是在12~18时间,上升运动强度和所达高度都明显强于原方案。说明引入下曳气流后模拟出强对流的发展,进而影响到大尺度场大气的垂直运动。

可以看出,由于引入下曳气流,积云对流本身发生了很大变化,变化了的上升气流及下曳气流使强降水中心大气所受影响明显不同于原方案。

2.2.2 强降水中心周围区域大尺度场物理量诊断分析

分别采用两种方案,计算输出了积分12

小时后某些等压面的一定水平区域范围(24.5~34.5°N, 114.5~124.5°E)及经过强降水中心的纬度-高度剖面物理量场(图略)。

改进方案中850 hPa等压面上温、湿度场上浙江沿海地区暖舌湿区明显强于原方案。改进方案中对流区域低层空气更暖更湿。

涡度场特点为两方案均报出大范围的正涡度区,且均偏南。850 hPa上,原方案中心偏在海上,而改进方案中 $1.1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 的闭合圈已包括近海陆地。剖面图中,强对流区域低层改进方案涡旋性更强而高层则为改进方案稍弱于原方案。

散度场两方案差别明显,在700 hPa,原方案中对流中心区已出现较强辐散,浙东海区辐合弱;改进方案中浙东海区有一明显的辐合区,对流中心区辐散很弱。剖面图上,原方案中低层辐合区仅伸至850 hPa,而中层有较强辐散,高层为弱辐合、辐散交替出现;改进方案中低层辐合区明显抬高,强度也较强,中层为弱辐合、辐散区,高层则有较强辐散,此种配置更利于对流发展。

P 坐标垂直速度 ω 场更能说明对流发展的情况,在500 hPa,原方案在沿海地区报出一上升区,中心离强对流降水区远,仅有一 $-2.5 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$,而改进方案中则在对流区报出大片强上升区,中心闭合圈值达 $-5.0 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。同样,在剖面图上,改进方案报出对流区伸展高度高、中心强度强的强上升区,而原方案所报出的强上升区伸展高度低,强度也弱得多。

从以上大尺度物理量场对比分析可以看出:引入下曳气流后,经过一段时间积分后,对流发生区模式空气变暖变湿,涡旋性加强,低层辐合、高层辐散及大尺度上升运动均明显加强。即说明下曳气流的引入促进模式中强积云对流的发展进而更强地影响了大尺度物理量场。

3 结论与讨论

针对有无下曳气流两种积云对流参数化方案,利用 HLAFS 模式,对一次强降水过程进行了对比试验,诊断分析了下曳气流的引入对大尺度动力、热力场的影响及对积云对流本身的作用,得出以下主要结论:

(1)下曳气流基本上存在于积云中下层,主要在 500 hPa 气压层以下,且主要出现在强对流时段,其它时刻很弱。下曳气流中由于存在液态水的蒸发作用,本身温度偏低、湿度偏大;

(2)下曳气流的引入,对积云对流自身的发生发展起到了很大的作用。能模拟出伸展高度更高、质量通量值更大的强上升气流,向更高层输送水汽、能量,改变了积云对流对环境大气的作用状况。所模拟的强对流在更高更多的空间层次上更强地加热及干化环境大气。在 500 hPa 等压面附近出现对环境大气的湿化作用,表明对流系统中层存在某种蒸发机制;

(3)下曳气流的引入,促进了模式中强积云对流的发展进而改变了积云对流对大尺度热力场、动力场的作用状况,使模式格点大气

更暖更湿,涡旋性加强,低层辐合、高层辐散及大尺度上升运动均明显加强;

以上结论是通过个例数值预报试验结果对比分析得到的,它有助于我们更好地理解 and 认识下曳气流在积云对流发展中所起的作用,也为改进 HLAFS 模式降水预报提供了一些有意义的线索。然而,这些结论是否具有普遍性,还需得到更多的理论研究和个例试验,模式方案本身也有待于在今后的工作中进一步加以改进完善。

参考文献

- 1 Ming-Dean Cheng. Effects of downdrafts and mesoscale convective organization on the heat and moisture budgets of tropical cloud clusters. Part II: Effects of convective scale downdrafts. J. A. S. 1989,46:1540~1564.
- 2 冯业荣,罗会邦. 台湾锋前暖区一次积云对流过程. 气象学报, 1997,55(2):249~256.
- 3 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. 气象,1999,25(5):8~12.
- 4 孙军. 北方局地继续高温少雨,登陆台风多 9711 号影响大. 气象,1997,23(11):58~61.

The Role of Downdrafts in Cumulus Convection

Xue Jianjun Tan Zhemin

(Department of Atmospheric Science, Nanjing University, Nanjing 210093)

Yan Zhihui

(National Meteorological Center, Beijing 100081)

Abstract

By using a high resolution limited area operational forecasting model, the comparative forecasting experiments were performed to study the role of downdrafts in cumulus convection. The main conclusions are as follows: (1) Being relatively cool and moist, downdraft occurs mainly in middle and lower troposphere below 500 hPa during the period of deep convection development. (2) The downdrafts introduced have promoted the formation and development of deep cumulus clouds, which tend to warm and dry the cumulus environment more strongly at higher and more spatial levels. Consequently, the contributions of cumulus clouds to the large-scale environment thermodynamic and dynamic fields are modified.

Key Words: downdraft cumulus convection diagnostic analysis