

下击暴流的数值模拟研究*

许焕斌

魏绍远

(北京应用气象研究所,北京,100081) (空军气象学院,南京,211101)

摘 要

下击暴流是危害飞行安全的一种重要天气现象,特别是尺度为 1—4km 的微下击暴流。为了了解下击暴流的发展过程,以及大气环境条件和云-降水微物理结构对下击暴流发生演变的影响,利用我们设计发展的非静力全弹性中尺度- γ 模式,以一次发生了下击暴流的大气的温、湿、风实测资料为算例进行了数值模拟研究。计算结果给出了下击暴流发生发展的过程,以及在发展过程中各种物理量的变化,得出一些大气环境条件及水凝物粒子微结构对下击暴流发展的影响机理,有助于台站预报员掌握这种天气现象的出现和演变。

关键词: 下击暴流,数值模拟,云-降水微物理结构。

1 前言

下击暴流是云下急速发展起来的强下沉气流,严重威胁飞行安全,在飞行降落和起飞中遇到这种天气现象^[1]常会导致坠机事件。因而近 10 年来对下击暴流的研究十分重视,其中包括使用数值模式这一手段。美国人曾用 TASS 模式系统模拟了造成严重空难的下击暴流的发展^[2]。中国孔繁铀也模拟了静风环境中产生的下击暴流。为了较为全面地了解温、湿、风场,以及与下击暴流发展相伴的云-降水过程中水凝物粒子微结构对下击暴流发生发展的影响,我们设计了一个模拟试验方案,力图得到一些更多的相关知识。

2 模式简介

鉴于本研究要作批量算例,因而使用了我们设计发展的一个非静力全弹性云尺度动力模式^[3,4]的二维版本。并加上只含云水、雨水和霰的三相态单参谱演变的云-降水微物理模式,该模式包括有水汽凝结、云-雨转化、雨冻结、雨并云水、霰融化转雨、霰并云水剥离成雨、云水蒸发、雨水蒸发、因融化而带有水膜的霰蒸发等 10 个过程,有关这些过程的方程推导类似于文献^[5]。

模式计算的初始环境条件,由图 1 所示的发生了下击暴流的实例给出^[6]。模式的计算范围,水平方向为 20km,格距 $\Delta X = 200\text{m}$,格点数为 100,垂直方向为 3km,格距 $\Delta Z = 100\text{m}$,格点数为 30。鉴于下击暴流主要是在云下发展的,模式顶放在云底。在云底(模式顶)给定云水(WR),雨(R)和霰(G)的比含量以后,它们将以自己的质量加权平均末速下

* 1993 年 5 月 13 日收到原稿,1993 年 7 月 19 日收到修改稿。本文得到国家自然科学基金资助。

落,激发下击暴流及相应云物理过程的发展。本例中给出的 WR、R 和 G 值在水平上是均匀的,且不随时间变化。计算的大时间步长 $\Delta T = 5.0s$, 小时间步长 $\Delta t = 0.5s$ 。模拟时间为 30—60min。

3 模拟试验方案

模拟试验方案见表 1, 其中编号 5 为基本算例, 其他 12 个为对比算例。

编号 5 为基本算例; 编号 4 为对比谱分布截距的影响; 编号 6 为对比环境切变风的影响; 编号 7 为对比雨霰比含量的影响; 编号 8 为对比蒸发降温的影响; 编号 9 为对比融化降温的影响; 编号 10 为对比环境湿度的影响; 编号 11 为对比降水范围的影响; 编号 12 为对比环境湿度对蒸发作用的影响; 编号 13 为对比环境温度、湿度对蒸发作用的影响; 编

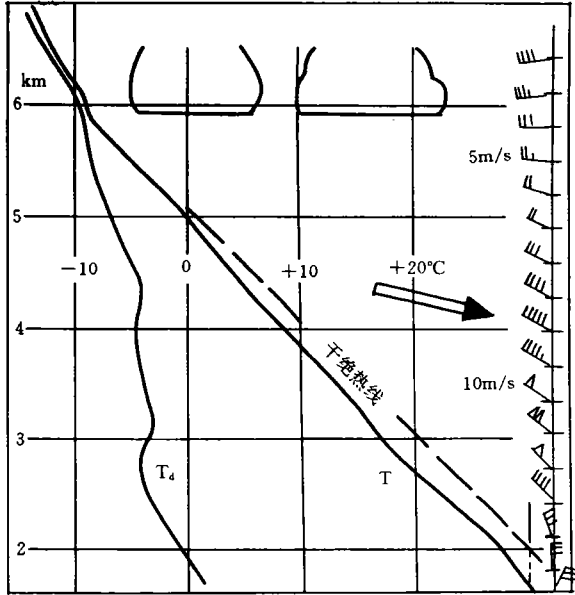


图 1 1982 年 7 月 14 日美国山区夏令时 17:00 丹佛的温度、露点、风的垂直分布 (T: 温度垂直分布曲线; Td: 露点温度垂直分布曲线; - - -: 干绝热温度分布曲线; \Rightarrow : 下击暴流的移动方向)

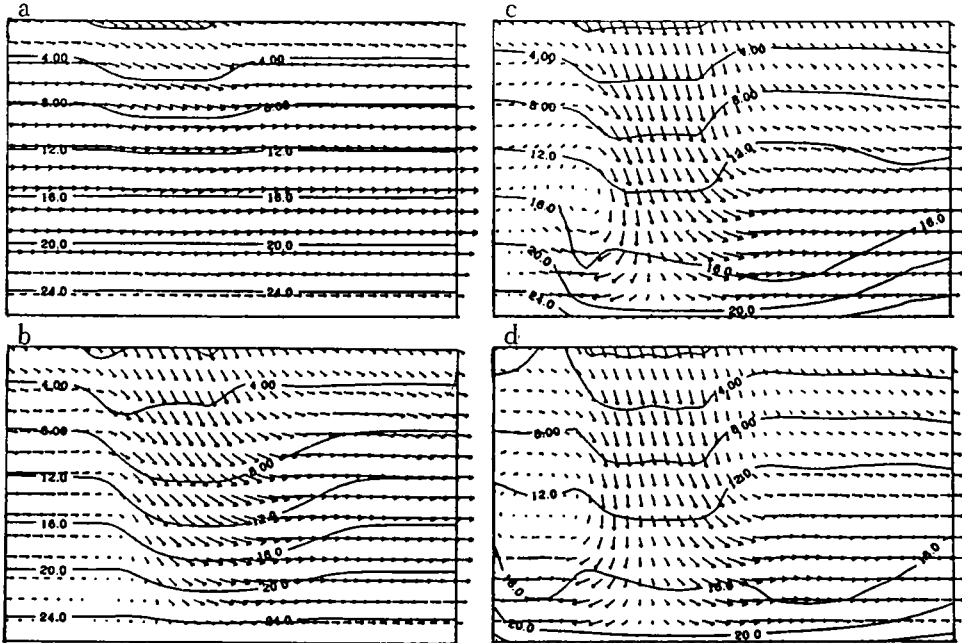


图 2 算例 5 的气流矢量和温度分布随时间的演变

(a, b, c, d 分别为发展时间 5.2min, 11.2min, 21.2min, 31.2min 时的状况。纵坐标是高度, 顶高 3km, 横坐标是水平距离, 满度是 20km)

号 14 为对比环境平均温度、湿度的影响; 编号 15 为对比单有降雨时的影响; 编号 17 为对

比有云水向下输送并蒸发的影响。

表 1 各算例中有关参数的选取情况

编号	RR	NO	RM	IM	CM	AML	AEV	GPT	AQ	VE
5	R1	0.8	0.003	0.003	0.0	1.0	1.0	GA	Q1	VK
4	R1	0.08	0.003	0.003	0.0	1.0	1.0	GA	Q1	VK
6	R1	0.8	0.003	0.003	0.0	1.0	1.0	GA	Q1	0.0
7	R1	0.8	0.001	0.001	0.0	1.0	1.0	GA	Q1	VK
8	R1	0.8	0.003	0.003	0.0	1.0	0.0	GA	Q1	VK
9	R1	0.8	0.003	0.003	0.0	0.0	1.0	GA	Q1	VK
10	R1	0.8	0.003	0.003	0.0	1.0	1.0	GA	Q2	VK
11	R2	0.8	0.003	0.003	0.0	1.0	1.0	GA	Q1	VK
12	R1	0.8	0.003	0.003	0.0	0.0	1.0	GA	Q2	VK
13	R1	0.8	0.003	0.003	0.0	0.0	1.0	GB	Q3	VK
14	R1	0.8	0.003	0.003	0.0	1.0	1.0	GB	Q3	VK
15	R1	0.8	0.003	0.0	0.0	1.0	1.0	GA	Q1	VK
17	R1	0.8	0.003	0.0	0.001	1.0	1.0	GA	Q1	VK

(RR:降水水平范围,R1表示 $I=40-60$;R2表示 $I=48-52$;I为水平方向的格点序号;NO:雨和霰的分布谱的截距,由于雨和霰粒子的尺度范围相当,因此可以取同一分布截距(cm^{-4}),其典型值为0.08,为了增加融化蒸发率,多数例子取值0.8;RM:计算上边界处,雨水比含量(g/g);IM:计算上边界处,霰比含量;CM:计算上边界处,云水比含量;AML:融化变温系数。AML=1.0表示考虑融化过程对温度的影响;AML=0.0表示考虑融化过程,但对温度不产生影响;AEV:蒸发变温系数。AEV=1.0表示考虑蒸发过程对温度的影响;AEV=0.0表示考虑蒸发过程,但对温度不产生影响;GPT:给出温压环境,GA表示给出图1所示的环境,即:地面气压 $P(1)=900.0\text{hPa}$,地面温度 $TE(1)=300\text{K}$,递减率 $\gamma=0.9\text{K}/100\text{m}$;GB表示 $P(1)=900.0\text{hPa}$, $TE(1)=294.0\text{K}$, $\gamma=0.7\text{K}/100\text{m}$;AQ:给出露点,Q1表示 $TD(K)=TE(K)-28.0+0.7\times(K-1)$,K为垂直方向上的格点序号;Q2表示 $TD(K)=TE(K)-2.0$;Q3表示 $TD(K)=TE(K)-22.0+0.55(K-1)$;VE:给出垂直风分布,VE=VK,表示图1中的风在下击暴流方向上的投影值;VE=0.0表示环境为静风)

4 模拟试验结果

模拟试验结果以两种方式给出。图2-6是图形结果,表2则给出了各对比算例与基本算例的主要特征性差别。

基本算例5的主要结果给出在图2中。图2是风矢量场和温度场随时间的演变,可以看到下击暴流自上而下发展的过程,与下击暴流相伴,其温度值在下沉区内是下降的,说明了由于蒸发和融化降温的负浮力是主要驱动力,当然承载力也是使下沉气流发展的。至于扰动气压梯度力的作用,由于最大扰动气压值位于下沉区中轴的底部,其作用是反向的。

图3给出了算例5的雨和霰向下降落伸展的动态图象,可以看出它们在下落中被消耗,转变成的水汽加湿了周围的环境。要维持一个降温的下沉气流,必须有冷源,这个冷源便是水的蒸发和冰的融化,这又要有冰水源,所以下击暴流的发展与雨霰的降落伸展是相伴的。

图4给出了环境风为零时的对比算例,左边是下击暴流和温度场的演变;右边是雨-

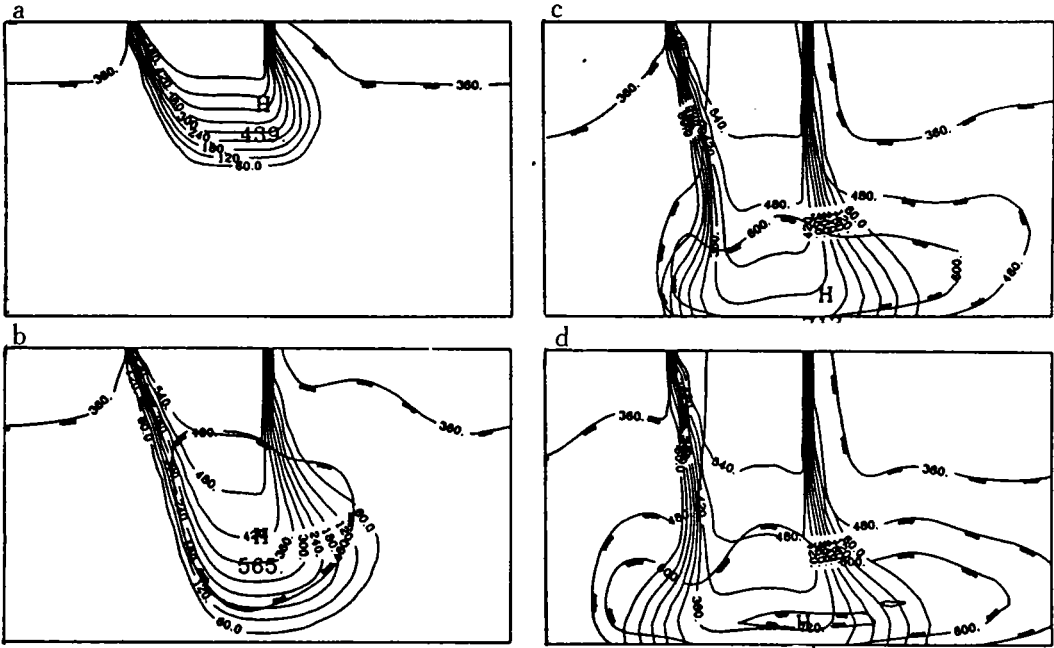


图 3 算例 5 的水凝物含量分布(线间间距 60.0)和比湿分布(实线带旁缀, 线间间距 120.0)随时间的演变
(a,b,c,d,说明同图 2,H 给出了加湿后的最大比湿值中心)

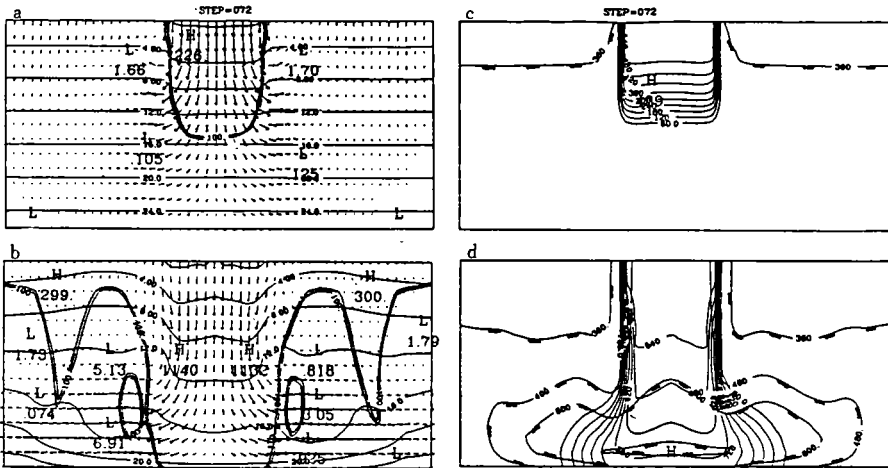


图 4 算例 6 的气流矢量和温度场(a,b)及水凝物和比湿(带旁缀的实线)的分布(c,d)随时间变化
(左图中双线为垂直速度绝对值等于 1.0ms^{-1} 的线;右图中 H 给出了加湿后的比湿最大值所在位置)

霰下落伸展和湿度场的演变。在左边图中还用双线来给出垂直速度绝对值等于 1.0ms^{-1} 的廓线,以便更清晰地看到下击暴流自上而下发展的图象。与基本算例比较,可见环境切

变风的作用改变了下击暴流的直立性和对称性,最大下沉气流比基本算例稍大,说明切变风场对下击暴流的强度有阻尼作用。

表 2 各对比算例与基本算例的主要特征性差别

编号	主要特征性差别及注解
4	最大下击暴流速度 W_m 减少,地面最大降水量 Rain 增大
6	W_m 增大,下击暴流呈直立对称型,不倾斜
7	W_m 减小,下击暴流发展缓慢,Rain 明显减少
8	W_m 达到最小,下击暴流发展缓慢
9	W_m 稍低,下击暴流发展速度缓慢
10	W_m 稍低,下击暴流发展缓慢
11	W_m 明显减小 Rain 明显减少
12	W_m 有增,显示出不计融化降温作用的反映。即因融化作用的降温,对蒸发作用有所抑制。
13	W_m 明显减小,显示气层的平均温度降低不利于下击暴流发展
14	W_m 明显减少,但比算例 13 稍增,显然在气层温度降低后,融化降温作用又稍明显一些
15	下击暴流的发展速度变缓,但对 W_m 值则稍有增加,Rain 明显减少。这又一次表现出算例 12 所显示的:融化作用的降温,可否理解为等效于空气的非蒸发性降温,降低了饱和比湿的值,反而对蒸发作用有抑制。该例负载减少一半,但 W_m 并未减少,这也说明负载的作用与其他因子比起来是次要的。
17	W_m 明显增大,达到了 19.0ms^{-1} ,下击暴流发展速度快,Rain 明显减少

从表 2 看到,算例 17 由于加入了云水的下传蒸发作用,使下击暴流的强度和发展速度都达到最大,尽管这时没有降雪,云水比含量也只有 0.001。这说明了由于云水是小水滴,同一比含量有着最大的蒸发表面,蒸发能力最强,因而降温能力也最大,反映了水凝物粒子结构和性质的影响。

从表 2 还可以看出,把雨、霰比含量由 0.003 减到 0.001 时, W_m 减小,下击暴流发展缓慢,说明供水、供冰量的大小影响是显著的,供水供冰量不足,下击暴流就弱。这一结果在图 5 中各算例流线型对比中更清晰。

图 5 给出的是时间为 21.5min 时的算例 5,6,7,17 的流线图。从算例 5 与算例 6 的对比看出,在环境静风条件下,下击暴流流场是对称的,下沉气流轴线两边的流场是波动的;而在环境为切变风的情况下,流场是不对称的,自上而下顺风倾斜,在逆风侧形成深厚的涡,穿越这种流场需经历风向切变和风速切变。再把算例 7 与算例 17 对比,可见逆向涡旋的强度是与下击暴流的强度呈正相关。算例 7 下击暴流弱,逆风向涡旋尺度小位置低;而算例 17 下击暴流强度大,其逆风涡旋强度大,位置高。

算例 5 给出的下击暴流的流场特征,与 Fujita^[6]由观测分析给出的剖面图是十分相似的(参见文献[6]中 99 页的图 6.34,看此图时请注意剖面的走向和风场的关系),这说明模拟结果是合理的。

为了进一步考查蒸发降温 and 融化降温作用何者为重,看一下表 2 中的算例 8 和算例 9 的对比。在不考虑蒸发降温时的算例 8 中下击暴流中的下沉气流最大值 W_m 达到最小;而在不考虑融化降温时,算例 9 的结果,其 W_m 值只比基本算例稍低。可见蒸发降温作用

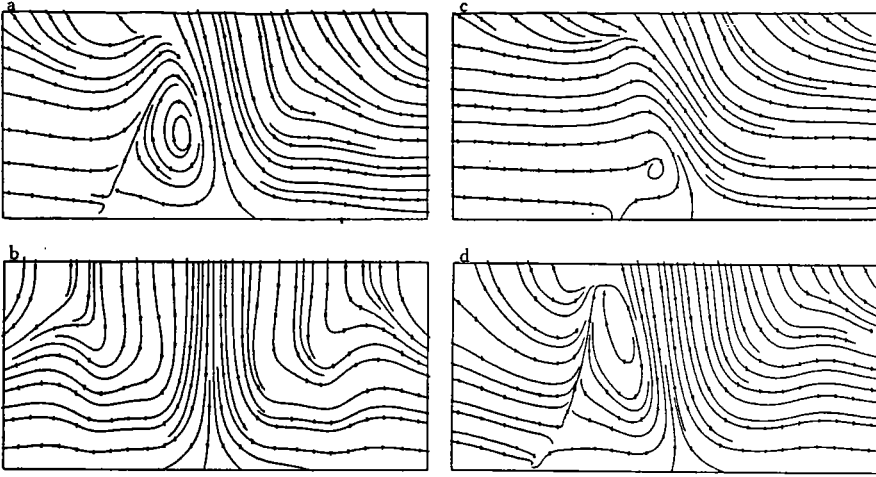


图5 21.2分时,算例5(a),6(b),7(c),12(d)的流线图

明显多于融化作用。

既然蒸发降温作用大,那么影响蒸发的欠饱和度,即环境比湿的大小,以及影响水凝物粒子蒸发能力的粒子类型和分步谱形的变化,对蒸发降温的作用就值得作进一步探讨。

粒子类型的区别,对蒸发降温的影响,已在上面对算例17的剖析中谈到了,至於同类粒子因谱形变化的影响,可看算例4与算例5的对比,当雨(霰)谱分布截距减少一个量级时,最大下沉气流速度减小,地面最大降水量则明显增加。这是由于蒸发率与截距值NO成正比,而质量加权平均落速则与NO呈反相关之故,导致蒸发率减少而降水强度加大。

可以想象,环境湿度的大小,决定着欠饱和度,因而会对蒸发率,或者对下击暴流的强度有直接影响,可是对比算例10与算例5的结果表明,在温度露点差已减少到 2°C 的高湿情况下,其 W_m 值只有稍许降低,下击暴流的发展速度虽慢了一些,但如果算下去,可达到的峰值还可以再上升一些,这显示出环境湿度的影响是不明显的。

为了进一步了解环境湿度的影响,又运行了算例12,使 $AML=0$,只考察环境湿度对蒸发的影响。把算例12的结果与算例5及算例10对比, W_m 值反而有增,说明环境湿度的增加并未减少蒸发降温的作用,而且还显示出不计融化降温的作用,即因融化造成的降温,对蒸发作用有所抑制的现象。

为什么会出现在这种情况,可由图6给出的结果看出端倪。这是由于下击暴流的发展,下沉气流把上空低比湿的空气下传,造成低层变干,增干区正与水凝物下落伸展区相容,从而造成一个局部的干环境,使大的湿环境不能起作用。这种湿环境因下击暴流发展而变干,和干环境因伴随下击暴流发展带来的水凝物蒸发的加湿,都是合理的。这种动态的结果,使得环境湿度对下击暴流的发展作用不明显。Fujita给出的是干环境下的下击暴流,而Protor^[2]给出下击暴流的环境是相当湿的,温度露点差也就是 $2-3^{\circ}\text{C}$,因此实例也说明了在干、湿环境下皆可出现下击暴流现象。

下击暴流的发展与层结及气层平均温度的关系如何,可由算例13和14的结果得到

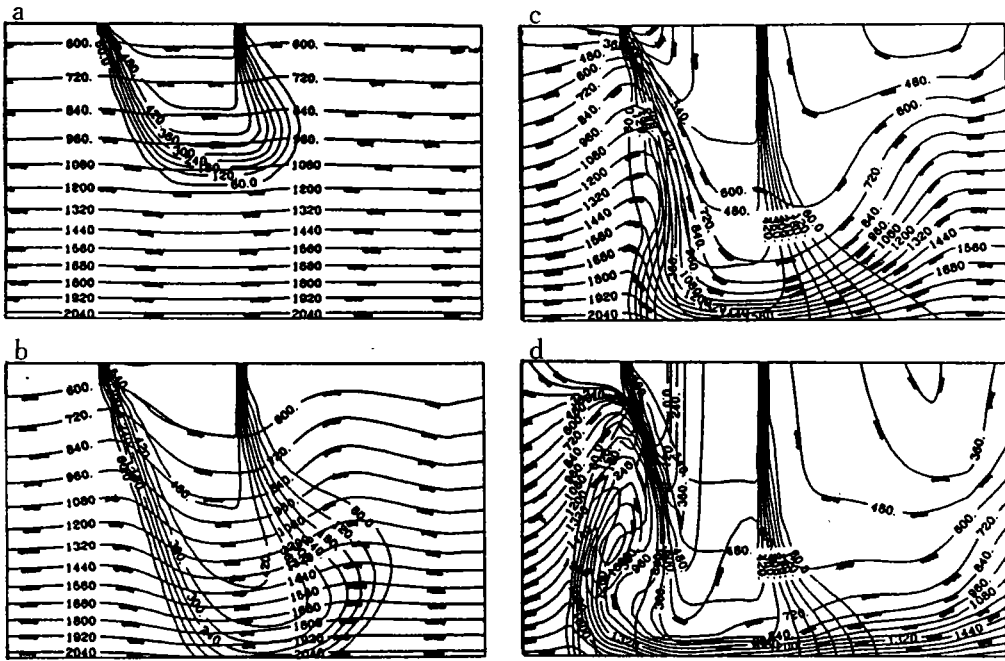


图6 算例12的水凝物和比湿分布随时间的演变

(a, b, c, d 说明同图2, 线间间距为60的是水凝物等值线, 间距为120的带旁缀的实线是等比湿线)

一些信息, 层结的变稳($\gamma=0.7$)和气层平均温度的降低, 使 W_m 明显减小。算例14的结果也是如此, 但与算例13相比, W_m 则稍有回升, 这又一次显示出融化的降温对蒸发作用有所抑制。

算例15是只有降雨的情况, 由于只有降雨而没有降雪, 负载量减了一半。计算结果表明, 除下击暴流发展稍有变缓之外, W_m 值比基本算例5还稍有增加, 地面最大降水则明显减少。这再一次表现出算例12已显示了融化降温是非蒸发降温, 它等效于空气的气层降温带来的饱和比湿比值的减小, 使欠饱和度降低, 从而对蒸发作用有抑制趋向。该例也说明负载减少了一半, W_m 值并未因此有明显减少, 反映负载作用是不明显的; 也反映出只有雨供水而无冰供水时, 下击暴流仍然能够发展。

最后讨论一下降水区大小的影响, 算例11是把降水区由 $I=40-60(4\text{km})$ 缩小到 $I=48-52(1\text{km})$, 从表2中看出, W_m 值明显减小, 下击暴流的尺度与降水范围相当, 地面最大降水量锐减。表明强的下击暴流需要有一个适当大小的水平尺度。

5 结论

综上所述, 可以得出以下几点结论, 可供机场预报员参考:

(1) 下击暴流是水凝物在云下蒸发、融化降温形成的负浮力、负载拖曳力和扰动气压梯度力的驱动下, 自上而下发展的。其中蒸发降温作用最大, 依次是融化降温、负载拖曳。扰动气压梯度力总的作用是阻尼。

(2) 环境切变使下击暴流顺风倾斜, 并在逆风向形成深厚的涡旋, 使云下流场切变强

度加大。

(3)环境的空气湿度,在不饱和前提下,由低湿变到高湿,对下击暴流的发展影响不敏感,这是由于下沉气流的发展,导致高湿环境变干的反映。

(4)导致下击暴流发展的降水范围大小及降水强度,对下击暴流的发展强度和速度是灵敏的。

(5)水凝结物粒子的微结构,影响着它们的蒸发和融化率大小,因而影响着下击暴流的发展,云滴是蒸发率最强的,它们随气流向下输送会使下击暴流明显增强。

最后应当说明,云是一个整体,云下过程和云中过程是相互依存的,虽然一些结果显示出下击暴流的主要现象在云下,受计算量的限制我们可以用一个云下模式来研究,但这仍是一个缺陷。例如云下垂直气流不一定为零,如果上升气流相当强,雨、雪等粒子就不能落到云下起蒸发融化作用,这时可能落下来的是具有大落速的雹,雹的先导冲击作用就很重要。这些都是在进一步工作中应当予以注意的。

参考文献

- [1] 李泓家. 风云与飞行. 北京:气象出版社, 1988. 34—36.
- [2] Proctor F H. Proceedings of 15th Conference on Severe Local Storms. 1988. AMS. 99—103.
- [3] 许焕斌, 王思徽. 三维可压缩大气中的云尺度模式. 气象学报, 1990, 48 (1): 80—90.
- [4] 许焕斌. 中- β 模式研究:地形云的数值模拟. 计算物理, 1992, 9 (4): 731—734.
- [5] 许焕斌, 王思徽. 一维时变冰雹云模式研究(二). 反映融化对雹谱双参数演变的影响. 气象学报, 1985, 43 (2): 162—171.
- [6] Fujita T T. The downburst. the Press of University of Chicago. 1985. 93—99.

THE MODELING STUDY OF DOWNBURST

Xu Huanbin

(Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing, 100081)

Wei Shaoyuan

(Air Force Institute of Meteorology, Nanjing, 211101)

Abstract

Downburst is a very dangerous weather phenomenon for aeroplane flying in or flying off the airport. In order to understand the initial formation and evolution of downburst and to study the effects of atmospheric environment condition and the microstructure of cloud-precipitation particles on the downburst development processes, we have designed and carried out a modeling scheme by use of our own unhydrostatic compressible mesoscale- γ model including necessary cloud-precipitation processes. The initial condition of temperature, humidity and wind is from a observation case on which the downburst occurred. The results of computations demonstrated the evolution of downburst and showed the variation of various environmental and microphysical parameters. Some of the mechanism about the downburst occurrence have been obtained. All the statements may be help the forecastor working in airport to manage the occurrence of downburst better.

Key words: Downburst, Numerical modeling, Microstructure of cloud-precipitation.



为了保证学术会议交流材料的印刷质量,提高学术交流的效果,并使之与《气象学报》的出版接轨。我编辑部自即日起开展对外文稿录排服务。使用北大方正排版系统,按《气象学报》发表文章的编排格式,进行科技论文的录入。并按委托要求提供软盘、胶片和激光样。有意者,可直接与《气象学报》编辑部联系。

《气象学报》编辑部

1995年5月20日