

用二维冰雹云模式预报 桂西北地区降雹

邹光源

(广西壮族自治区人工降雨办公室, 南宁 530022)

提 要

建立了二维准弹性对流云模式, 利用其对百色、河池两地区 1971~1998 年期间的冰雹天气进行事后模拟, 结果表明该模式对桂西北地区冰雹天气具有一定的预报能力。

关键词: 冰雹 预报 模式

引 言

春夏之交雹暴是桂西北地区农业的重大气象灾害之一, 由于受地形和暖湿气流的共同影响, 冰雹天气几乎年年发生, 给该地区的春玉米、水稻、芒果、油菜、桐油林等粮食、经济作物造成极大的危害, 甚至造成有些地方农作物失收, 给本来就较为贫穷的该地区人民的生活带来了极大困难。因此, 从 70 年代就开始了人工增雨防雹作业, 为减轻本地区的灾情作出了贡献。为了更好地指挥防雹作业, 提高作业的科学性, 我们对现有的二维冰雹云模式进行改进, 建立二维准弹性冰雹云模式, 利用其及历史气象资料, 对出现冰雹天

气过程进行事后模拟, 并对模式进行修改完善, 提高模式预报准确率, 为今后能及时进行防雹作业提供科学依据。

1 模式方程组

1.1 动力过程

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -u \frac{\partial u}{\partial x} - w \frac{\partial u}{\partial z} - c_p \theta_{v0} \frac{\partial \pi}{\partial x} + D_u$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -u \frac{\partial w}{\partial x} - w \frac{\partial w}{\partial z} - c_p \theta_{v0} \frac{\partial \pi'}{\partial z} +$$

$$g \left[\frac{\theta'}{\theta_{v0}} + 0.608(q_v - q_{v0}) - q_c - q_r - q_i - q_g - q_h \right] + D_w$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -u \frac{\partial \theta}{\partial x} - w \frac{\partial \theta}{\partial z} + \frac{\theta_0}{c_p T_0} (L_v S_v + L_s S_s + L_f S_f) + D_\theta$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial t} = -\frac{\beta^2 c_0^2}{c_p \rho_0 \theta_{v0}^2} \left[\frac{\partial(\rho_0 \theta_{v0} u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_0 \theta_{v0} w)}{\partial z} \right] + f_\pi$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} = -u \frac{\partial A}{\partial x} - w \frac{\partial A}{\partial z} + S_A + F_A + D_A$$

$$f_\pi = -u \frac{\partial \pi'}{\partial x} - w \frac{\partial \pi'}{\partial z} - \frac{R_d \pi'}{c_v} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{c_0^2}{c_p \theta_{v0}^2} \frac{d\theta_v}{dt} + D_\pi$$

模式中采用了胡志晋和邹光源(1991)^[1]提出的准弹性近似,即在可压连续性方程中引入准弹性系数 β 压缩声波,当 $\beta = 1$ 时,模式为完全弹性模式, $\beta = 0$ 时,模式为滞弹性模式。本文中 $\beta = 1/4$,与完全弹性模式相比重力波频率相对误差为1%。忽略科氏力的作用。

式中 $A = A_0 + A'$, A_0 为背景场, A' 为模式尺度量,共有14个预报量,它们是水平和垂直速度 U, W ,位温 θ ,无量纲气压 π ,比湿 Q_v ,云、雨、冰晶、霰、雹的比质量 Q_c, Q_r, Q_i, Q_g, Q_h ,以及后四者的比浓度 N_r, N_i, N_g, N_h 。 U, θ ,密度 ρ, π, Q_v 的背景场量 $U_0, \theta_0, \rho_0, \pi_0, Q_{v0}$ 只随高度变化,其它量的背景场值均为零。

S_A 为 A 的源汇项:

$$S_u = -c_p \theta_{v0} \frac{\partial \pi}{\partial x}$$

$$S_w = -c_p \theta_{v0} \frac{\partial \pi'}{\partial z} + g \left[\frac{\theta'}{\theta_0} + 0.608(q_v - q_{v0}) - q_c - q_r - q_i - q_g - q_h \right]$$

$$S_\theta = \frac{\theta_0}{c_p T_0} (L_v S_v + L_s S_s + L_f S_f)$$

其中 S_v, S_s, S_f 分别为凝结、凝华和冻结速率。

1.2 微物理过程

①云微物理源汇项方程

根据对流云中水的相态、形状、比重等将水分成6种,即水汽 Q_v 、云水 Q_c 、雨水 Q_r 、冰晶 Q_i 、霰 Q_g 和雹 Q_h ,雨滴、冰晶、霰、雹的比浓度为: N_r, N_i, N_g, N_h 。

云微物理考虑了26种主要微物理过程,即云、雨、冰、霰的凝结(华)和蒸发($S_w, S_{wr}, S_{vi}, S_{vg}$);冰、霰、雹、雨对云滴的碰并($C_{ci}, C_{cg}, C_{ch}, C_{cr}$);雨滴和冰晶的碰并(C_{ri}, C_{ir});霰、雹碰并雨滴(C_{rg}, C_{rh});霰、雹碰并冰晶(C_{ig}, C_{ih});冰晶的核化、繁生(P_{vi}, P_{ci});云雨转化(A_{cr});冰霰转化(A_{ig});霰雹转化(A_{gh});雨冻结成霰(M_{rg});霰、雹、冰融化成雨(M_{gr}, M_{hr}, M_{ir});冰晶相并(C_{ii});雨滴相并(C_{rr});雹的湿增长极限(C_{wh});加 N 表示过程中的比浓度变化率; $T > T_0$ 时,冰晶被碰并融化在雨滴中, $T < T_0$ 时,冰晶碰并雨滴后雨滴冻结成霰。

$$\frac{\delta Q_v}{\delta t} = -S_w - S_{wr} - S_{vi} - S_{vg} - S_{vh} - NP_{vi} Q_{v0}$$

$$\frac{\delta Q_c}{\delta t} = S_w - C_{cr} - C_{ci} - C_{cg} - C_{ch} - A_{cr} - NP_{ci} Q_{c0}$$

$$\frac{\delta Q_r}{\delta t} = S_{wr} + C_{cr} + A_{cr} - C_{ri} - C_{rg} - C_{rs} + M_{gr} + M_{sr} - F_{rg}$$

$$T \geq 273K: +C_{ch} + C_{ir}$$

$$T < 273K, kk = 0: -C_{rh} - C_{rg} - C_{ri}$$

$$T < 273K, kk = 1: -C_{wh} + C_{ch} - C_{rg} - C_{ri}$$

$$\frac{\delta Q_i}{\delta t} = S_{vi} + C_{ci} - C_{ii} - C_{is} - A_{ig} - A_{is} + P_{vi} + P_{ci} - C_{ir} - C_{ig} - M_{ic} + F_{ci}$$

$$\frac{\delta Q_g}{\delta t} = S_{vg} + C_{cg} + C_{ig} - C_{gh} + A_{ig} - A_{gh} + M_{rg} - M_{gr}$$

$$T < 273K: +C_{rg} + C_{ir} + C_{ri}$$

$$\frac{\delta Q_h}{\delta t} = S_{vh} + C_{ih} + C_{gh} - M_{hr} + A_{gh}$$

$$T < 273\text{K}, kk = 0: + C_{ch} + C_{rh}$$

$$T < 273\text{K}, kk = 1: + C_{sh}$$

$$\frac{\delta N_i}{\delta t} = NS_{iv} + NA_{iv} + NC_{iv} - NC_{ri} - NC_{rk} - NC_{rs} + NM_{gr} + NM_{sr} - NF_{rg}$$

$$\frac{\delta N_i}{\delta t} = NS_{ii} - NC_{ir} - NM_{ir} - NC_{ik} - NC_{ih} - NA_{ik} + NP_{iv} + NP_{ci} + NC_{ii}$$

$$\frac{\delta N_h}{\delta t} = NA_{gh} - NM_{hr}$$

$$\frac{\delta N_k}{\delta t} = NS_{vk} + NA_{ik} - NA_{gh} + NM_{ri} - NM_{kr} - NC_{jk}$$

$$T < 273\text{K}: + NC_{ir}$$

各微物理过程的参数化方程取自胡志晋、何观芳(1986)的结果。

②降水粒子的下落项 F_A

$$F_A = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial(\rho_0 \bar{V} A)}{\partial z}$$

③次尺度混合项 D_A 见文献[2]。

1.3 边界条件

由于模式计算是在有限的区域内进行的,所以存在着边界问题,选取边界条件的困难在很大程度上取决于是否能让波动通过边界传播,大多数模式工作者选取边界条件时,都尽量让模拟区内的波动通过边界传播出去,减少反射。

1.3.1 侧边界

对侧边界条件,人们已作过不少的研究, Tripoli and Cotton(1982)分析了几种侧边界对模式结果的影响。Klemp(1978)分析了辐射边界的作用。总的来说,为了保证计算稳定,侧边界必须尽量让模拟域内的波动外传,使边界对波动的反射减到最小。因而对垂直于侧边界的法向速度,我们采用辐射边界:

$$\frac{\partial u_{nb}}{\partial t} = -c_b \frac{\partial u_{nb}}{\partial x_{nb}}$$

u_{nb} 为法向速度, x_{nb} 为法向坐标,这里 $u_{nb} = u$, $x_{nb} = x_0$

c_b 为重力波的水平相速,求法如 Orland-

ki(1976)那样,用边界内部相邻一层前一刻的相速 c_{b-1} 来代替:

$$c_{b-1} = - \frac{u_{nb-1}^t - u_{nb-1}^{t-\Delta t}}{\Delta t} \left/ \left(\frac{u_{nb-1}^{t-\Delta t} - u_{nb-2}^t}{\Delta x_{nb}} \right) \right.$$

其它标量的侧边界条件是:法向速度为出流时,法向平流项用迎风格式计算;入流时,法向导数取为零。

1.3.2 顶底边界

底边界条件取 $W|_{z=0} = 0$, 其他量的法向平流为出流时,用迎风格式计算,入流时,法向导数为零。

对顶边界, Klemp and Durran(1983)提出了一个能辐射上传重力波的辐射顶边界,并与设有海绵层的顶边界作了比较,发现这种辐射边界与海绵层一样具有减小重力波反射的作用。但设有海绵层时,增加了计算域范围,而这种辐射顶边界在计算时需进行富里叶变换,使得计算效率有所降低。为了减小计算量,我们采用与侧边界形式相同的辐射顶边界:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -c_T \frac{\partial w_T}{\partial z}$$

C_T 的计算与 C_b 相同。

在边界上,不考虑次网格湍流交换的作用。顶底边界上, $q_c = 0$ 。

1.3.3 计算方法

本文模拟区域 $39.6\text{km} \times 16.8\text{km}$, 空间水平步长 $\Delta x = 1200\text{m}$, 垂直步长 $\Delta z = 700\text{m}$ 。采用交错网格,时间差分采用时间步长分离法,对含有声波的项采用小时间步长,欧拉前差格式;其它量采用大时间步长,蛙跃格式。空间用中央差。

2 冰雹天气的预报

利用上述模式及 1971~1998 年百色、河池地区各县出现冰雹天气的探空资料进行事后模拟,以是否出现冰雹天气为预报对象,由探空值计算出模式的背景场值 U_0 、 θ_0 、 ρ_0 、 π_0 、 Q_{c0} , 其中 U_0 为西风分量。由于模拟区域有限,水平风速过大时,热泡会很快移出模拟域,因此,我们将每一层的水平风速值减去

某一值,再取其值的60%作为背景风速值。这样模拟的对流泡移动会相对减慢,维持在模拟域的时间较长。

为了节省计算时间,更快地启动对流发展,初始时刻给出了温度和湿度扰动,扰动的水平半径 $x_r = 3.6\text{km}$,垂直半径 $z_r = 1.4\text{km}$ 。扰动中心在距地面2.1km处,在水平的中心位置。最大扰动值在扰动中心,最大温度扰动是1.5℃,最大湿度扰动是95%。

1971~1998年28年来百色地区各县气象站共观测到出现冰雹天气168次(整个地区一天内有两个以上的县出现冰雹的算一次,下同),河池地区各县气象站共观测到冰雹天气105次。我们利用上述冰雹天气时08时或20时的探空(温、压、湿、风)作为初始背景场,预报冰雹天气,预报准确率百色地区达88.69%,河池地区达84.76%;漏报率百色为11.31%,河池为15.24%。

3 预报结果与初始扰动的关系

为了检验冰雹云模式的预报能力,我们利用它在不同的初始扰动下预报百色、河池两地区的冰雹天气,结果与初始扰动有关(见表1~2),当最大扰动温度取1.5℃,湿度扰动取95%时,预报准确率最大。当扰动温度取1.0℃,相对湿度取85%时,预报准确率最小,百色是36.3%,河池是26.7%。如果取温度扰动不变,预报准确率则随着湿度扰动的增加而升高;同样,如果假定湿度扰动不

变,则预报准确率随着温度扰动的增加而升高。

表1 不同初始扰动的预报结果(百色)

温度扰动/℃	湿度扰动/%	预报准确率/%
1.0	85	36.3
1.0	90	67.9
1.0	95	84.5
1.5	85	64.9
1.5	90	83.9
1.5	95	88.7

表2 不同初始扰动的预报结果(河池)

温度扰动/℃	湿度扰动/%	预报准确率/%
1.0	85	26.7
1.0	90	51.4
1.0	95	76.2
1.5	85	58.1
1.5	90	75.2
1.5	95	84.8

4 结 语

从上面的结果可知,上述模式对夏初桂西北地区的冰雹天气具有一定的预报能力,用历史资料定性预报是否降雹准确率达84.8%以上;模式预报准确率随着初始扰动的加大而升高。

参考文献

- 1 胡志晋,邹光源.大气非静力平衡模式和弹性适应.中国科学,1991,(5).
- 2 毛玉华,胡志晋.强对流云人工增雨和防雹原理的二维数值研究.气象学报,1993,51(2):184~194.

Forecast of the Hailstorms in the Northwest Guangxi with 2-D Convective Cloud Model

Zou Guangyuan

(Guangxi Office of Weather Modification, Nanning 530022)

Abstract

A 2-D convective cloud model is used to forecast the hailstorms in the northwest Guangxi. The results show that the model may forecast the hailstorms in the region accurately.

Key Words: hailstone forecast model