

# 一次强冰雹过程的物理机制分析

张霞<sup>1,2</sup> 周建群<sup>2</sup> 申永辰<sup>2</sup> 李荣<sup>2</sup> 白宇<sup>2</sup> 王君<sup>2</sup>

(1. 南京气象学院大气科学系, 210044; 2. 河南省郑州市气象局)

## 提 要

从冰雹形成所需具备的三个条件入手,详细分析了2002年7月19日出现在郑州地区的强冰雹过程。结果表明:水汽条件、不稳定层结、外部抬升力等条件同时满足,易导致强对流性天气的产生;适宜的0℃层和-20℃层高度及大的环境风垂直切变有利于雹粒的增长;低空水平螺旋度和差动位温平流与此次强雹落区有较好的对应关系。

**关键词:** 强冰雹 差动位温平流 0℃层 低空水平螺旋度

## 引 言

冰雹是由生命期较长的强风暴系统产生的强对流天气现象<sup>[1]</sup>。此类天气具有影响范围小、发展速度快、持续时间短等特点,虽是一种局部的灾害性天气,但同时也是最严重的自然灾害之一,其危害主要来自雹块,通常对建筑、车船、农作物及人畜带来毁灭性的打击,所造成的经济损失和对人民的生命威胁都十分巨大。

2002年7月19日18~21时(北京时,下同),郑州大部地区遭受了一次强对流天气过程袭击,分别出现了暴雨、大风和强降雹等灾害性天气。其间郑州市最大风力达8级,新密市1小时降雨53mm,大部分乡镇均降了冰雹,冰雹最大直径达8cm,持续时间在10~20分钟之间。这样的强降雹天气是郑州地区自建站以来从未出现过的,这次强降雹给当地造成了数千万元的经济损失。

由于冰雹天气的影响系统为小尺度天气系统,在常规的天气图上难有明显反映,本文根据冰雹产生所需的特殊条件,深入分析了本次过程的热力学和动力学特征及成雹的微物理特征,较深刻地揭示了本次强降雹的物理机制。

## 1 大尺度环流背景分析

### 1.1 前期气候特点

本次过程前期,7月6~17日期间,受持续增强的大陆暖高压控制,郑州地区连续10日最高温度均达30℃以上。其中,7月15日,郑州站日最高气温达41.5℃,创1967年以来7月中旬日最高气温极值。据统计,当日全区日最高气温平均为40.4℃,平均地面最高温度升至63.7℃;郑州本站气温维持在38℃以上的时间长达6小时,气温维持在40℃以上的时间达3小时,这在历史上是罕见的。连日的高温天气,使得郑州地区上空空气中水汽含量相当小。但是自16日后,由于西南暖湿气流的活跃,低层的水汽增大明显,造成低层空气暖湿,地面水汽压增大,该区上空大气中有大量不稳定能量积蓄。

### 1.2 高空主要影响系统

500hPa上东北冷涡的存在和南压是本次强降雹的主要影响系统。分析图1可知,自17日20时开始,位于东北地区的冷涡开始向南压,之后逐渐有冷空气自东北地区经华北向河套地区扩散,18日20时,冷涡中心已南压至辽宁与河北省的交界处,至19日08时,冷空气前锋已影响到河南省北部地

区,之后继续南压,影响郑州地区。东北冷涡是一深厚的辐合系统,它的影响造成了郑州地区上空有强的辐合上升运动,低层暖湿空气被抬升,使得该地区产生剧烈对流天气。

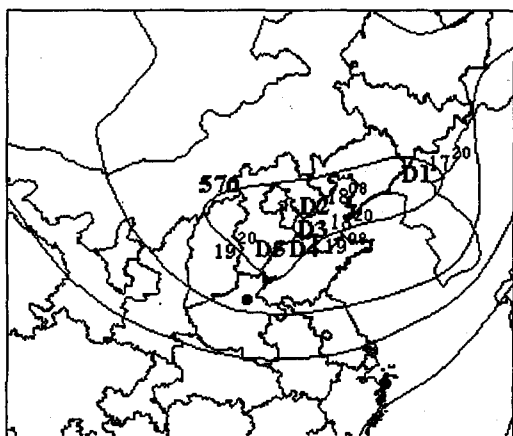


图1 2002年7月17日20时~19日20时  
500hPa冷涡中心移动路径  
(图中实线为19日20时500hPa高度,●处为郑州本站)

### 1.3 地面冷锋分析

分析图2可知,7月19日08时,冷锋位于沈阳、北京到银川一线,锋后有冷空气扩散南下。19日14时冷锋移到成山头、齐河、安阳到长安一线,锋后有明显的冷空气南下,锋

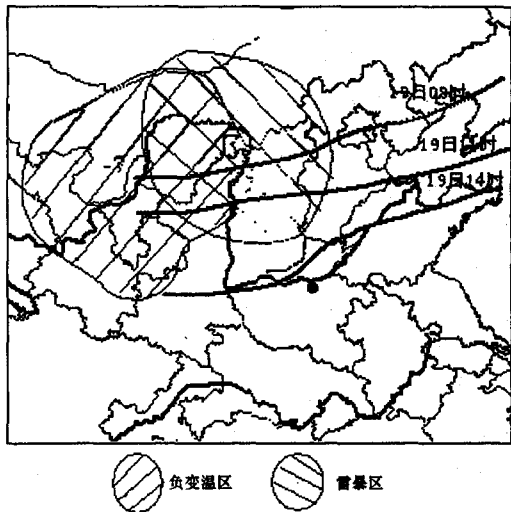


图2 2002年7月19日08时~14时  
地面冷锋移动路径  
(图中●处为郑州本站)

后测站伴有偏北大风、雷暴、阵雨等不稳定天气,冷锋的影响为冲破不稳定层结提供了外部抬升力。

## 2 冰雹成因分析

### 2.1 成雹的动力学及热力学条件分析

为揭示本次冰雹过程的动力学和热力学特征,以郑州本站为中心,对21.5~46.5°N、100.5~127.5°E范围内1000~100hPa的标准大气层进行了诊断,计算的物理量场网格距为1°×1°,以MICAPS第4类数据格式存放,借助MICAPS平台进行物理量场的图形显示。

#### 2.1.1 水平螺旋度分析

螺旋度从物理本质上反映了流体涡管扭结的程度,定义为风矢量与涡度点积的体积分<sup>[2]</sup>。近年来,螺旋度的计算被广泛应用于短时暴雨、沙尘暴等的分析预报中<sup>[3,4]</sup>。其数学表达式为:

$$H = \iiint_V (\mathbf{V} \cdot \nabla \times \mathbf{V}) d\tau = H_h + H_v \quad (1)$$

式(1)中 $d\tau$ 为三维空间的体积元。螺旋度通常分解为水平( $H_h$ )和垂直( $H_v$ )两个分量来讨论。在 $P$ 坐标上的三维涡度相应也有水平( $\zeta_h$ )和垂直( $\zeta_v$ )两个涡度分量,表达式如下:

$$(\nabla \times \mathbf{V}) = \zeta_h + \zeta_v \quad (2)$$

式(2)中水平涡度: $\zeta_h = \left(\frac{\partial \omega}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial p}\right) \mathbf{i} + \left(\frac{\partial u}{\partial p} - \frac{\partial \omega}{\partial x}\right) \mathbf{j} \approx -\frac{\partial v}{\partial p} \mathbf{i} + \frac{\partial u}{\partial p} \mathbf{j}$ 为了简化,式中略去了垂直速度 $\omega$ 在等压面上的变化。

Robert Davies-Jones<sup>[5]</sup>等人定义水平螺旋度计算公式为:

$$H_h = \int_p^{p_0} (\mathbf{V}_h - \mathbf{C}) \cdot \zeta_h dp \quad (3)$$

$H_h$ 的单位是 $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 。式(3)中 $\mathbf{V}_h$ 为水平风矢量, $\mathbf{C} = C_x \mathbf{i} + C_y \mathbf{j}$ 表示风暴速度矢量。 $\mathbf{C}$ 以850~400hPa气层中的平均风为

依据,取该风速的75%为风暴风速,该风向向右偏转40°为风暴来向。鉴于大多数风暴系统形成于3000m以下的低层环境风场中,因此计算 $H_h$ 时,选取 $p_0 = 1000\text{hPa}$ , $p = 700\text{hPa}$ 。 $H_h$ 值越大,沿气流方向的低空水平涡度大小和人流强度对风暴旋转的贡献也越大,大气层结的不稳定倾向就越大。从7月19日08时的低空水平螺旋度场(图3a)可以看出,郑州地区处在水平螺旋度大值轴附近,表明郑州地区上空为极不稳定大气层。

### 2.1.2 300~850hPa 差动位温平流分析

位温平流表达式为:

$$A = -V_h \cdot \nabla_h \theta \quad (4)$$

A 的单位是 $10^{-5}\text{°C} \cdot \text{s}^{-1}$ 。式(4)中下标 $h$ 代表某具体的等压面。300~850hPa 差动位温平流指的是用上层300hPa的位温平流减去下层850hPa的位温平流而得。由图3b

可以看出,19日08时,郑州处于 $-30 \times 10^{-5}\text{°C} \cdot \text{s}^{-1}$ 的负值中心区,表明当日300hPa高层冷平流与850hPa低层暖平流差值较大。分析同一时次的300hPa和850hPa的位温平流场,郑州站值分别为: $-20 \times 10^{-5}$ 和 $10 \times 10^{-5}(\text{°C} \cdot \text{s}^{-1})$ ,表明冷暖空气势力均较强。这样上层大气为冷平流、低层大气为暖平流的温度场配置,一方面有利于不稳定度倾向加大,同时高空强的冷空气下传使得过冷水滴在碰撞增长的过程中,在较短时间内冷冻为冰雹颗粒。到19日20时,郑州地区上空300~850hPa的差动位温平流值变为 $10 \times 10^{-5}\text{°C} \cdot \text{s}^{-1}$ ,说明08~20时这短短的12小时中,高空的冷空气迅速下传,致使低层空气迅速变冷。随着不稳定能量的释放,大气层结转化为稳定层结,强对流天气也宣告结束。

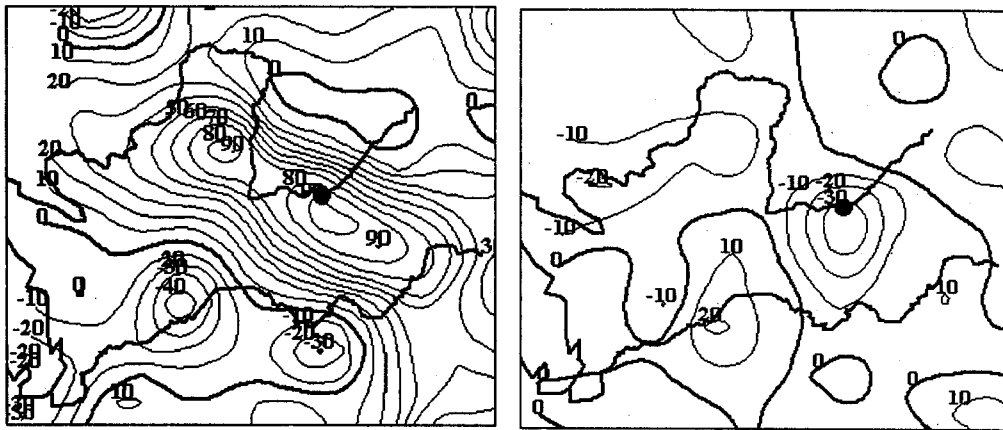


图3 2002年7月19日08时水平螺旋度(a)和300~850hPa差动位温平流(b)

(图中实线表示物理量等值线,底图为MICAPS系统下的河流,●处为郑州本站)

## 2.2 成雹的物理因子分析

### 2.2.1 0℃层高度和-20℃层高度分析

为分析本次强冰雹天气的物理成因,利用本站的高空探测资料,分析了降雹当日08时和20时的对流层顶高度、0℃层高度和-20℃层高度,结果如表1。一般来说,0℃等温线至-20℃等温线之间的区域主要由过冷水滴、雪花及冰晶组成,这个区域是冰雹生

成的“雹源区”<sup>[1]</sup>。从表1可以看出,19日08时郑州站探测的对流层顶高度为9km左右,20时,对流层顶高约12.6km,下午发展的对流云高为15km(据雷达回波数据),高于对流层顶,这对对流云继续发展极为有利,对流云发展越高大,降雹的概率和强度就越大。且据雷达探测,影响郑州地区的对流云顶高度长时间维持在对流层顶之上,使得强降雹

持续时间较长。表1中还可看到,19日08时和20时,郑州本测站0℃层高度维持在4000m左右,这样的高度使得对流云可向更高处发展,使低层的水汽通过强烈的上升运动能够达到该高度,为冰雹生成提供了丰富的水汽条件,且当雹粒增长到足够大而下落时,不至于因暖层过厚而被融化。当日-20℃层高度在8000m左右,与0℃层间厚度适宜,因高空冷空气进入中层,加剧了层结的对流不稳定性,同时,使得雹胚在过冷水含量丰富的环境中,相互碰撞的机会较多,雹粒增长快,有利于生成大雹。

表1 2002年7月19日08、20时郑州站参数

单位:m			
时间	对流层顶高度	0℃层高度	-20℃层高度
08时	9128	4430	7500(400hPa)
20时	12580	4188	8000(360hPa)

2.2.2 稳定度指标及环境风场分析

为了分析本次强冰雹天气的水汽条件和稳定度情况,利用郑州站的探空资料和公式(5)~(7),制作了19日08时郑州站的三θ曲线图<sup>[6]</sup>(如图4),即:位温曲线(θ)、假相当位温曲线(θ<sub>se</sub>)、饱和状态下的假相当位温曲线(θ<sub>se</sub><sup>\*</sup>)。

$$\theta = T(1000/p)^{R/c_p} \quad (5)$$

$$\theta_{se} = \theta \cdot e^{L \cdot q / c_p T_c} \quad (6)$$

$$\theta_{se}^* = \theta \cdot e^{L \cdot q_s / c_p T_c} \quad (7)$$

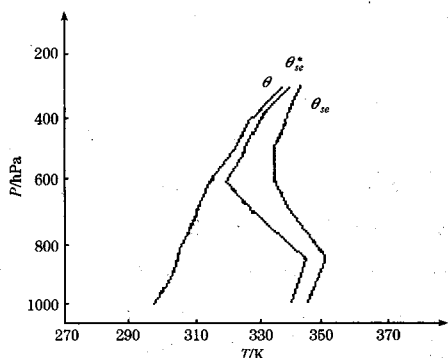


图4 2002年7月19日08时郑州站的三曲线图  
式(5)~(7)中, T<sub>c</sub>为抬升凝结高度温

度,其它为气象常用符号。

由图4可看出,三θ线在1000~850hPa之间的低层上,表现为明显的对流稳定性层结,有利于水汽的积累,为本次强降雹提供了充足的水汽;同时低层稳定层结的存在也非常有利于不稳定能量的积蓄,一旦遇到强的外部抬升力冲破不稳定层结,可导致强对流天气的发生。而在850~600hPa之间的中层上,则为明显的对流性不稳定层结(∂θ<sub>se</sub>/∂z < 0)。在1000~850hPa上,θ<sub>se</sub>和θ<sub>se</sub><sup>\*</sup>较为接近,在850~500hPa间,两曲线相差较大,这一特征反映出本站上空低层水汽饱和程度高,而中层水汽饱和度较低,这种低层潮湿,中空干燥的特点,正是符合冰雹生成发展的层结。

由测风资料分析可知,19日08时,郑州本站地面及低空为偏东风,高层则吹较强的偏西风,850~500hPa风速差值为9m·s<sup>-1</sup>,存在明显的高空风向、风速垂直切变,400hPa风速达到23m·s<sup>-1</sup>,这样的风场有利于增加低空的水汽,同时也有利于启动抬升机制,促使强对流爆发。

在作强对流天气预报时,常采用各种预报指数<sup>[1,6,7]</sup>。表2是利用郑州单站探空资料计算的强天气威胁指数(SWEAT)、K指数及Δθ<sub>se850-500</sub>。SWEAT指数主要用于监测强烈的对流性天气,它反映了不稳定能量与风速垂直切变及风向垂直切变对风暴强度的综合作用,是一个无量纲值。其公式为:

$$SWEAT = [12T_{D850} + 20(T - 49) + 2F_{850} + F_{850} + 125WS] \quad (8)$$

式(8)中 T = T<sub>850</sub> + T<sub>D850</sub> - 2T<sub>500</sub>; WS = sin(D<sub>500</sub> - D<sub>850</sub>) + 0.2, 其中 D<sub>500</sub>、D<sub>850</sub>、F<sub>500</sub>、F<sub>850</sub> 分别是500hPa和850hPa的风向、风速。SWEAT的值愈高,发生龙卷和强雷暴的可能性愈大。据统计,当SWEAT ≥ 300时可有强雷暴发生,当SWEAT ≥ 400时可有

龙卷风发生。由表2看到,自17日始,K指数和 $\Delta\theta_{e850-500}$ 表现出不稳定层结特征,18日08时和19日08时,郑州单站的SWEAT指数均达到300以上,表明该区已具备产生强雷暴天气的可能性条件(冰雹是雷暴云的产物)。18日,由于抬升作用弱,仅产生了局地性的对流天气,19日,高空冷空气很强,在地面冷锋的强抬升力作用下,郑州地区出现了大范围的强对流天气,并伴有大面积强降雪现象。

表2 2002年7月17~20日郑州单站  
稳定度指数

稳定度参数	17日		18日		19日	
	08时	20时	08时	20时	08时	20时
SWEAT指数	172.1	198.0	382.9	246.6	308.0	216.2
K指数/℃	29.9	31.1	39.9	33.9	32.0	40.3
$\Delta\theta_{e850-500}/\text{℃}$	10.1	7.1	12.7	14.9	14.7	4.6

### 3 结 语

(1) 上中层干冷、下层暖湿的温、湿场配置,为强对流发生区提供大量不稳定能量。高、低空强的风速垂直切变,有利于不稳定度倾向加大。地面冷锋的影响,为不稳定能量的爆发提供了很强的外部抬升力。

(2) 高空有强的冷平流,低层为强的暖平流,在东北冷涡的强辐合作用下,低层的暖湿空气被抬升到高空,遇到强的冷空气冷凝成冰晶,为冰雹的生成和增长提供了雹胚和生长环境。

(3) 水汽条件、不稳定层结、外部抬升力等条件同时满足,导致郑州地区出现强对流天气,而单站探空0℃层和-20℃层高度较为适宜,环境风垂直切变较大,有利于强风暴云发展,为雹粒的形成、增长和降落提供了有利条件,强风暴云持续维持,有利于降雪持续较长时间。

(4) 低空水平螺旋度高值轴附近及差动位温平流中心附近有利于强对流天气(特别是冰雹)的形成。

致谢:河南省气象局赵国强正研高工对本文提出了宝贵意见,谨此致谢!

### 参考文献

- 1 陆忠汉,陆长荣,王婉馨.实用气象手册.上海:上海辞书出版社,1984:320~327.
- 2 寿绍文,励申申,姚秀萍.中尺度气象学.北京:气象出版社,2003:285~291.
- 3 刘惠敏,郑兰芝.螺旋度诊断分析与短时强降水雨量预报.气象,2002,28(10):37~40.
- 4 申红喜,李秀莲,石步鸿.北京地区两次沙尘(暴)天气过程对比分析.气象,2004,30(2):15~16.
- 5 Robert Davies-Jones, Burgess D W. Test of helicity as a tornado forecast parameter. Preprints, 16th of Conf. On Severe Local Storm, Am Meteor Soc, 588—592.
- 6 中国气象局科教司.省地气象台短期预报岗位培训教材.北京:气象出版社,1998:225~228,240~243.
- 7 朱乾根,林锦瑞,寿绍文等.天气学原理和方法.北京:气象出版社,2000:436~460.

## Physical Mechanism Analysis of a Heavy Hail Event

Zhang Xia<sup>1,2</sup> Zhou Jianqun<sup>2</sup> Shen Yongchen<sup>2</sup> Li Rong<sup>2</sup> Bai Yu<sup>2</sup> Wang Jun<sup>2</sup>

(1. Department of Atmospheric Science, Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044;

2. Zhengzhou Meteorological Bureau)

### Abstract

Based on the three conditions of formed-hail, a heavy hail event in Zhengzhou area on 19 July 2002 is analysed. The results show that the severe convection weather occurs easily when the water vapor and instability and the outer rising force are all suitable. The severe vertical wind shear and an appropriate height about 0℃ layer and -20℃ layer will be advantageous to the hail augmentation, and the low-level horizontal helicity and potential temperature difference are correlation with the hail area.

**Key Words:** heavy hail 0℃ layer potential temperature difference low-level horizontal helicity