

张一平,牛淑贞,席世平,等.东北低涡槽后型河南强对流过程的天气学特征分析[J].暴雨灾害,2011,30(3):193-201

东北低涡槽后型河南强对流过程的天气学特征分析

张一平^{1,2},牛淑贞^{1,2},席世平¹,梁俊平¹,宋培玲³,周红俊⁴

(1.河南省气象台,郑州 450003;2.河南省农业气象保障与应用技术重点实验室,郑州 450003;
3.河南省新乡市气象局,新乡 453003;4.河南省大气探测保障中心,郑州 450003)

摘要:利用常规高空、地面观测资料和14时订正后的探空资料,分析2008—2010年6月河南处于东北低涡槽后形势下其强对流天气的相关物理量特征和阈值,通过对其中3次致灾强风暴过程的天气学特征进行综合分析,归纳出其三维天气系统要素配置和预报着眼点。结果表明:1) SI 、 LI 均为负值, K 指数 ≥ 20 °C, $\Delta\theta_{850-500} \geq 5$ °C, $CAPE \geq 1500$ J·kg⁻¹, $Sweat$ 指数 ≥ 180 , 0—6 km水平风垂直切变 ≥ 15 m·s⁻¹,大气可降水量 ≥ 2 cm,可作为发生灾害性强对流天气的参考指标; SI 为正值, $LI \geq -1.5$ °C, K 指数 ≤ 24 °C, $\Delta\theta_{850-500} \leq -4.3$ °C, $CAPE \leq 150$ J·kg⁻¹且远小于 CIN ,14时探空订正后 $CAPE$ 也在500 J·kg⁻¹以下,0—6 km垂直风切变 ≤ 12 m·s⁻¹,可降水量 ≤ 1.5 cm,可作为无对流天气出现的参考指标;除此之外,可出现一般雷暴天气。2) 东北低涡槽后型背景下,河南出现强对流天气的热力不稳定条件是,中上层干冷,有24 h显著降温区或冷槽、冷平流;低层暖,850 hPa温度达到20 °C,或有低空急流或显著流线通过暖脊。3) 其抬升触发条件是,中层有横槽、切变线、干线,地面有辐合线、干线等有触发和抬升作用的系统。4) 其水汽条件是,850 hPa比湿 ≥ 7 g·kg⁻¹,地面露点温度达16 °C以上。5) 垂直风切变条件是,存在高空西北风急流,低层偏南风,地面偏东风。

关键词:强对流;东北低涡;冷空气;预报着眼点

中图分类号:P445 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-9045(2011)03-0193-09

Analysis on Characteristic of Severe Convective Weather in Henan in the Situation of Northeast Vortex and the Back of Trough

ZHANG Yiping^{1,2}, NIU Shuzhen^{1,2}, XI Shiping¹, LIANG Junping¹, SONG Peiling³, ZHOU Hongjun⁴

(1.Henan Meteorological Observatory, Zhengzhou 450003; 2.Henan Key Laboratory of Agrometeorological Ensuring and Applied Technique, Zhengzhou 450003; 3.Xinxiang Meteorological office of Henan province, Xinxiang 453003;
4.Henan Provincial Atmospheric Probing Technical Support Center, Zhengzhou 450003)

Abstract: The routine upper-air and surface observations and the revised sounding data at 14:00 were used to analyze physical quantity features and thresholds of the severe convective weather from 2008 to June 2010 when Henan was in the situation of Northeast vortex and the northwest airflow at the back of vortex trough, also analyze the synoptic features of the three strong storm events which resulted in hazard, and induce the element configuration of three dimensional weather system and forecast starting points for the three strong storm events. The results show that the fact with the following elements such as SI and LI are both negative values, $K \geq 20$ °C, $\Delta\theta_{850-500} \geq 5$ °C, $CAPE \geq 1500$ J·kg⁻¹, $Sweat$ index ≥ 180 , vertical wind shear from 0 to 6 km ≥ 15 m·s⁻¹ and $PW \geq 2$ cm can be taken for reference index for disastrous severe convective weather. And the fact with the following elements such as SI is positive value, $LI \geq -1.5$ °C, $K \leq 24$ °C, $\Delta\theta_{850-500} \leq -4.3$ °C, $CAPE \leq 150$ J·kg⁻¹ and is far less than CIN (revised $CAPE$ at 14:00 is less than 500 J·kg⁻¹), vertical wind shear from 0 to 6 km ≤ 12 m·s⁻¹ and $PW \leq 1.5$ cm can be regarded as reference index for non-convective weather. Except the facts described above, general thunderstorm weathers could be happened. In the situation of Northeast vortex and the back of trough, the thermal instability conditions causing severe convective weather in Henan are the dry and cold air in the mid-and-upper level, a significant cooling zone in 24 hours (or cold trough, or cold advection), warm air in the low level, 20 °C in temperature at 850 hPa (or a low-level jet or a significant streamline passing through the warm ridge). The triggering conditions of air uplifting are zonal trough, shear and dry line in the middle level, convergence line and dry line etc. in ground layer. The water vapor conditions causing severe convective weather in Henan are that

收稿日期:2011-04-21;定稿日期:2011-08-02

资助项目:河南省科技厅项目“河南省地强天气短时临近预报预警技术研究”(112102310033),中国气象局预报员专项(CMATG2010Y12)

第一作者:张一平,女,1964年生,高级工程师,主要从事短时天气预报和强对流天气研究。E-mail: zhangyiping618@yahoo.com.cn

specific humidity $\geq 7 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ at 850 hPa and dew point temperature is above $16 \text{ }^\circ\text{C}$ in the ground layer. The conditions on vertical wind shear are northwesterly upper-level jet, southerly wind in the lower-level and easterly wind in ground layer.

Key words: severe convective weather; northeast vortex; cold air; forecast starting point

0 引言

强对流天气一般指 $\geq 17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的雷雨大风,冰雹、短时强降水($\geq 20 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$),因其尺度小、持续时间短、局地性强、灾害严重等特点,很多气象工作者已做了大量研究工作。曲晓波^[1]对 2009 年 6 月东北低涡形势下,我国淮河中下游地区连续出现的 3 次飊线天气过程的生成环境和形成机制进行了天气学分析和诊断分析,认为 3 次飊线具有类似的 500 hPa 环流形势、较强的不稳定能量积累、低层适当的水汽条件、相似的不稳定层结,在低层辐合抬升、高层干冷空气侵入和较强风垂直切变产生次级环流动力作用下,不稳定能量释放,发展成有组织的飊线系统。易笑园^[2]利用云图和 NCEP $1^\circ\times 1^\circ$ 再分析资料,对生命史长达 9 天的冷涡系统的云图形态、移动轨迹、强度变化及其长久维持的原因进行了分析;并对比分析该冷涡影响下的持续对流性天气与冷涡分裂的冷空气、湿度层结及水汽条件的关系,探讨了对流性天气的预报着眼点和不稳定参数阈值。张霞^[3]从冰雹形成所需具备的三个条件入手,对 500 hPa 上存在东北冷涡并南压形势下出现在河南的一次强冰雹灾害天气进行详细分析,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;适宜的 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 层和 $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ 层高度及大的环境风垂直切变有利于雹粒增长;低空水平螺旋度和差动位温平流与强雹落区有较好的对应关系。国内对强对流天气特征的分析和研究还有很多^[4-13],但用中尺度方法分析的很少。

当 6 月份我国东北地区有深厚低涡维持时,河南处于东北低涡后部、河套高压脊前西北气流里,受东北低涡后部南下冷空气和近地面强烈辐射增温影响,强对流天气出现相对较多。如 2008 年 6 月 3 日,受东北低涡后部快速南下冷空气影响,当日 14—18 时,焦作、新乡、洛阳、郑州、开封、商丘、周口、许昌、漯河、驻马店、平顶山等地遭受大风、冰雹袭击,全省 38 站出现 8~11 级瞬间大风(鄯陵极大风速达 $31.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,突破历史极值),4 站出现直径 3~20 mm 的冰雹;全省受灾人口 94.46 万人,因灾死亡 20 人。2009 年 6 月 3 日,受东北低涡后部横槽携带冷空气南下和地面中尺度辐合线影响,当日 16—24 时,河南安阳、鹤壁、濮阳、新乡、焦作、济源、郑州、开封、商丘等地先后出现短时大风、局地强降水等强对流天气,19 个县(市)出现 $17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上雷雨大风,开封、商丘等地出现

强飊线天气,商丘的宁陵、睢县、柘城、永城等地阵风达 8~10 级或 11 级。此次强飊线过程因雷击和大风造成树倒、房塌,致 22 人死亡。2009 年 6 月 14 日下午到夜里,河南再次发生大范围雷雨大风、冰雹等强对流天气,24 个县(市)出现冰雹,其最大直径 30 mm,21 个县(市)出现 $17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上雷雨大风;因灾死亡 1 人。然而,在冷涡系统稳定持续下,河南并非必然有强天气发生,即使出现强对流天气,其强度和落区准确预报和预警难度很大。

长期以来,东北低涡槽后形势下的河南省强对流天气一直是短临预报预警业务的难点。普查 2008—2010 年 6 月份天气形势发现,在东北低涡存在的 15 次个例中,均预报有强对流天气,空报 40%;当大范围强对流天气真正出现时,对其强度往往估计不足、落区把握不准、致灾程度难以预料。因此,本文选取 2008—2010 年 6 月份在东北地区存在低涡时河南所发生的 3 次强对流天气过程,分析其天气形势、物理量场等,试图寻找河南发生对流天气的物理量指标和阈值;在详细分析这 3 次严重致灾强对流过程的影响系统、强风暴形成环境条件的基础上,归纳出东北低涡槽后型河南出现致灾强风暴的三维天气系统和要素结构配置,以便为河南省强对流天气分析预报提供有益参考和技术支持。

1 研究对象与资料选取

1.1 研究对象的确定

将 2008—2010 年 6 月份 500 hPa 高空图上东北地区($115^\circ\text{—}145^\circ\text{E}$, $40^\circ\text{—}55^\circ\text{N}$)有闭合低涡且河南上空受偏北或西北气流控制的日期作为研究对象(以下简称东北低涡槽后型天气),2008—2010 年符合该条件的样本共 15 个,2008 年 6 月 1—4 日、2009 年 6 月 1—6 日、2009 年 6 月 11—15 日,其中 2008 年 6 月 3 日,2009 年 6 月 3 日、6 月 14 日为 3 次影响较大的致灾强风暴过程(以下简称东北低涡槽后型致灾强风暴,类);2008 年 6 月 2 日,2009 年 6 月 4、5、6、12、13 日 6 次过程河南仅出现一般雷暴,局部伴有短时大风或小冰雹,无灾害报告(以下简称东北低涡槽后型一般对流天气,类);2008 年 6 月 1、4 日以及 2009 年 1、2、11、15 日 6 次过程,河南实况天气晴好,无对流天气出现(以下简称东北低涡槽后型非对流天气,类)。表 1 给出上述 15 个个例日期和相应低涡中心位势高度。

表 1 2008—2010 年 6 月 15 个样本低涡中心位势高度(单位:dagpm)及其对应河南对流天气类型

低涡	2008 年 6 月				2009 年 6 月										
	1 日	2 日	3 日	4 日	1 日	2 日	3 日	4 日	5 日	6 日	11 日	12 日	13 日	14 日	15 日
中心值	554	558	561	563	545	545	544	548	551	555	541	545	556	554	559
对应实况															

分析上述 15 次东北低涡维持期间, 位于其西南部、南部的华北和江淮地区天气实况表明, 基本都有雷电、大风、冰雹等强对流天气发生, 只是其并非均出现在河南。如 2009 年 6 月 5 日, 苏皖等地出现大范围灾害强对流天气, 而河南未出现。从低涡位置和河南强对流天气实况对应关系看(图 1), 东北低涡位置与对流天气强度无明显相关性。可见, 东北低涡只是河南强对流天气发生的背景条件, 低涡形势下河南是否出现强对流天气, 取决于能否满足水汽、不稳定层结和抬升等强对流天气基本条件和垂直风切变等增强条件。



图 1 2008—2010 年 15 次个例东北低涡(D)位置分布图

D 为红色、绿色、黑色分别表示河南出现灾害性对流天气、局地(或一般)对流天气和未出现强对流天气; D 右下第一个数字 8、9 分别表示 2008 年和 2009 年, 余下依次表示月、日, 如 9.6.3 为 2009 年 6 月 3 日

1.2 资料的选取

统计结果表明, 东北低涡形势下河南强对流天气的特点是, 其出现时间一般在午后至傍晚或傍晚至夜间, 多生成于河北或山西南部, 在西北气流引导下东南移动和传播, 主要影响河南北部、东部、中部地区, 当南下冷空气势力较强时影响豫东南、豫南。基于以上特点, 选取距河南主要强天气落区较近的郑州、南阳、邢台、徐州、阜阳 5 个探空站, 用 08 时探空资料和 14 时地面温度、露点订正的探空资料计算的各类物理量, 以及用常规高空、地面天气图和重要天气报告等资料, 对上述三次致灾强风暴(类)进行中尺度天气综合分析。

2 东北低涡槽后型天气的物理量特征和阈值

普查 15 例东北低涡槽后型天气过程 08 时 5 个

探空站稳定度、热力、动力、热力动力综合类等 30 多个物理量, 从中挑选对河南强对流天气有较好指示意义的物理量和有关常用参数 11 个。即, 层结稳定度类 6 个: 沙氏指数(SI), 抬升指数(LI), K 指数(K), 修正 K 指数(mK), 850 hPa 与 500 hPa θ_{se} 之差($\Delta\theta_{se850-500}$), 850 hPa 与 500 hPa 温度差 ($\Delta T_{850-500}$); 热力能量类 2 个: 对流有效位能(CAPE)、对流抑制能量(CIN); 动力类 1 个: 0—6 km 垂直风切变 (指 6 km 和地面风矢量差, 下同); 热力动力综合类 1 个: Sweat 指数; 水汽类 1 个: 大气可降水量(P_w)。

2.1 东北低涡槽后型各类天气的物理量特征

除用 08 时探空计算的物理量外, 考虑低涡类强对流天气主要发生在午后到傍晚或傍晚到夜里, 因此用各探空站 14 时地面温度和露点作为起始气块的温度和露点, 高空温湿廓线仍采用 08 时探空资料, 用 14 时订正后的探空资料重新计算上述物理量, 其热力稳定度指数变化可更确切地表现对流天气的热力状况(其中 0—6 km 垂直风切变和 $\Delta T_{850-500}$ 无变化)。

2.1.1 东北低涡槽后型非对流天气(类)

2008 年 6 月 1、4 日, 2009 年 1、2、11、15 日当东北低涡维持时, 河南实况天气晴好, 无对流天气, 此型共 6 例。表 2、3 为使用郑州、南阳、邢台、徐州、阜阳 5 个探空站 08 时探空资料计算的物理量平均值和使用 14 时温度、露点订正的探空资料计算的主要物理量平均值(下同)。

从表 2、3 中可见, 第 类东北低涡槽后型天气根据 08 时探空计算的 SI 均为正值($>0.9 \text{ }^\circ\text{C}$); $LI > -1.5 \text{ }^\circ\text{C}$; K 指数 $< 24 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Delta\theta_{se850-500}$ 基本为负值($< -4.3 \text{ }^\circ\text{C}$); CAPE 基本小于 $150 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 且远小于 CIN 值(14 时订正后探空 CAPE 也在 $500 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以下); 0—6 km 垂直风切变较弱($< 15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), 平均小于 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 可降水量基本在 1.5 cm 以下。由此可将 $SI > 4 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $LI > -1.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 、K 指数 $< 16 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $\Delta\theta_{se850-500} < -4.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 、CAPE $< 150 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 且远小于 CIN 作为东北低涡形势下河南无强对流天气发生的参考指标。

用上述指标对 15 个例进行回代检验表明, 一次空报(2009 年 6 月 15 日), 一次漏报(2008 年 6 月 2 日), 5 次正确, 准确率达 71%。分析空报原因, 2009 年 6 月 15 日 500 hPa 东北低涡明显东移, 20 时 850、925 hPa 河南

表 2 东北低涡槽后型非对流天气类(类)当天 08 时探空资料计算的物理量

日期/ (年.月.日)	SI/°C	LI/°C	K/°C	mK/°C	$\Delta T/°C$	$\Delta\theta_{se}/°C$	CAPE/ (J·kg ⁻¹)	CIN/ (J·kg ⁻¹)	I	0-6 km 切变/ (m·s ⁻¹)	P _w / cm
2008.6.1	5.7	3.7	5.8	14.1	31.2	-4.3	0.0	0.0	59.1	13.4	1.45
2008.6.4	5.0	4.1	16.0	24.2	24.0	-4.6	5.4	0.0	132.1	15.7	2.13
2009.6.1	8.9	2.5	-19.4	2.4	31.6	-9.2	0.0	0.0	41.4	7.6	0.85
2009.6.2	4.4	-1.5	-7.4	9.1	33	-5.8	142.2	471.6	51.5	8.7	1.41
2009.6.11	11.6	4.6	-0.6	26.1	27.6	-10.8	49.9	129.7	38.8	9.8	1.26
2009.6.15	0.9	-1.3	24	32.6	29.4	4.82	259.4	417.1	131.1	13.8	2.96
平均	6.1	2.0	3.1	18.1	29.5	-5.0	76.1	169.7	75.7	11.5	1.74

注: ΔT 、 $\Delta\theta_{se}$ 分别为 850 hPa 与 500 hPa 的温度、 θ_{se} 差值, I 表示 Sweat 指数,下同。

表 3 东北低涡槽后型非对流天气类(类)当天 14 时
订正探空资料计算的主要物理量

日期/ (年.月.日)	SI/°C	LI/°C	K/°C	$\Delta T/°C$	CAPE/ (J·kg ⁻¹)	I	P _w / cm
2008.6.1	5.9	-3.9	3.0	-1.0	102.2	78.0	1.49
2008.6.4	4.2	0.4	17.2	-0.4	332.8	134.4	2.12
2009.6.1	17.0	-0.9	-5.7	-7.3	145.6	42.4	1.03
2009.6.2	10.3	-3.7	-7.4	-2.6	402.2	52.8	1.48
2009.6.11	15.1	-0.6	-0.6	-8.7	58.6	39.6	1.37
2009.6.15	1.0	-5.3	24.0	11.0	1679.0	156.4	2.99
平均	8.9	-2.3	5.1	-1.5	453.4	83.9	1.75

上空为一致偏南风,地面为一致东南到偏东风,该过程水汽和不稳定条件虽好,但动力条件差,低层无干

线、辐合线等对流天气触发机制。分析漏报原因,2008 年 6 月 2 日各项指数虽差,但 2 日 20 时到 3 日 08 时河南自西向东出现小阵雨、雷阵雨,无强对流天气产生,这是因河南受西路冷空气影响,可能整层空气被抬升,由稳定层结变为弱对流性不稳定所致。

2.1.2 东北低涡槽后型致灾强风暴天气(类)

2008 年 6 月 3 日,2009 年 6 月 3 日、14 日强风暴为近 3 年东北低涡维持时河南出现的 3 次影响较大的强对流天气,特别是前两次强风暴和飏线天气,给人民生命财产造成重大损失。表 4、5 给出 08 时探空资料计算的物理量平均值和使用 14 时温度、露点订正的探空资料计算的主要物理量平均值。

表 4 东北低涡槽后型致灾强风暴天气类(类)当天 08 时探空资料计算的物理量

日期/ (年.月.日)	SI/°C	LI/°C	K/°C	mK/°C	$\Delta T/°C$	$\Delta\theta_{se}/°C$	CAPE/ (J·kg ⁻¹)	CIN/ (J·kg ⁻¹)	I	0-6 km 切变/ (m·s ⁻¹)	P _w / cm
2008.6.3	0.3	-0.1	28.4	37.1	28.4	8.2	71.9	344.8	292.9	23.1	2.77
2009.6.3	-1.2	-1.2	13.2	21.7	33.0	4.9	180.7	470.0	110.8	7.8	2.04
2009.6.14	-0.6	-4.5	23.8	34.4	31.8	7.1	1257.4	90.5	189.3	15.3	2.79
平均	-0.5	-1.9	21.8	31.1	31.1	6.7	503.3	301.8	197.7	15.4	2.53

表 5 东北低涡槽后型致灾强风暴天气类(类)当天 14 时
订正探空资料计算的主要物理量

日期/ (年.月.日)	SI/°C	LI/°C	K/°C	$\Delta T/°C$	CAPE/ (J·kg ⁻¹)	I	P _w / cm
2008.6.3	0.3	-5.4	26.6	6.1	1475.1	288.1	2.80
2009.6.3	-0.3	-5.7	13.2	8.9	1572.4	111.6	2.06
2009.6.14	-0.7	-21.1	24.1	11.6	1511.2	166.4	2.80
平均	-0.2	-10.7	21.3	8.9	1519.6	188.7	2.55

表 4、5 中,第 类东北低涡槽后型天气物理量统计结果表明,3 次过程 SI、LI 平均为负值,K 指数较大(两次大于 20 °C), $\Delta\theta_{se850-500}>5$ °C,14 时 CAPE 基本在 1500 J·kg⁻¹ 以上,Sweat 指数>100,0—6 km 风矢量差基本达到中等强度垂直风切变(>15 m·s⁻¹),P_w>2 cm。以上物理量值

显示,强不稳定层结、强对流有效位能和较好水汽条件可作为东北低涡形势下河南出现强风暴的参考指标。

2008 年 6 月 2 日与 2009 年 6 月 4、5、6、12、13 日,当东北低涡维持时,河南出现一般雷暴,局部伴有短时大风或小冰雹,无灾害报告。表 6、7 给出 08 时探空资料计算的物理量平均值和使用 14 时温度、露点订正的探空资料计算的主要物理量平均值,除第 2.1.1、2.1.2 节中物理量阈值外,其它情况均可作为出现第 类东北低涡槽后型天气的参考。

由表 6、7 可知, 类东北低涡槽后型天气的 SI、LI 并非都为负值,K 指数平均小于 类强对流天气的,14 时 CAPE 平均在 900 J·kg⁻¹ 左右,0—6 km 风矢量差值表明垂直风切变较弱。需要指出的是,2009 年 6 月

表 6 东北低涡槽后型一般对流天气类(类)当天 08 时探空资料计算的物理量

日期/ (年.月.日)	$SI/^\circ\text{C}$	$LI/^\circ\text{C}$	$K/^\circ\text{C}$	$mK/^\circ\text{C}$	$\Delta T/^\circ\text{C}$	$\Delta\theta_{se}/^\circ\text{C}$	$CAPE/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1})$	$CIN/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1})$	I	0-6 km 切变/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	P_w/cm
2008.6.2	7.6	4.2	6.8	13.2	27	-6.9	1.7	0.0	57.1	6.7	1.25
2009.6.4	0.3	-0.9	19.6	27.0	31.8	0.8	317.9	318.0	124.2	11.7	2.14
2009.6.5	2.7	-4.4	16.6	31.6	34.6	0.2	1069.1	242.8	88.6	15.5	1.96
2009.6.6	-0.8	-0.8	27.6	36.6	30.8	0.7	537.7	95.8	124.3	13.5	3.38
2009.6.12	6.5	0.3	11.2	20.3	30.4	-9.4	171.5	147.2	52.3	9.2	1.89
2009.6.13	-1.5	-2.4	26.6	34.7	31.8	4.6	275.1	44.1	164.2	11.6	2.54
平均	2.5	-0.7	18.1	27.2	31.1	-1.7	395.5	141.3	101.8	11.4	2.2

表 7 东北低涡槽后型一般对流天气类(类)当天 14 时
订正探空资料计算的主要物理量

日期/ (年.月.日)	$SI/^\circ\text{C}$	$LI/^\circ\text{C}$	$K/^\circ\text{C}$	$\Delta T/^\circ\text{C}$	$CAPE/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1})$	I	P_w/cm
2008.6.2	7.3	0.7	10.4	-5.2	117.8	58.8	1.20
2009.6.4	0	-5.2	12.5	6.2	1280.4	134.2	2.18
2009.6.5	0.6	-6.8	20.7	7.2	2036.0	121.3	2.01
2009.6.6	2.9	-3.3	24.4	5.3	956.2	276.6	3.40
2009.6.12	7.0	-2.3	8.3	-6.1	527.0	55.2	1.97
2009.6.13	-0.9	-4.2	27.0	9.4	780.3	166.4	2.56
平均	2.8	-3.5	17.2	2.8	949.6	135.4	2.22

表 8 东北低涡槽后型致灾强风暴天气类(类)、一般对流天气类(类)、非对流天气类(类)物理量平均值

类型	$SI/^\circ\text{C}$	$LI/^\circ\text{C}$	$K/^\circ\text{C}$	$mK/^\circ\text{C}$	$\Delta T/^\circ\text{C}$	$\Delta\theta_{se}/^\circ\text{C}$	$CAPE/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1})$	$CIN/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1})$	I	0-6 km 切变/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	P_w/cm
	-0.2	-10.7	21.3	31.1	31.1	8.9	1519.6	301.8	188.7	15.4	2.55
	2.8	-3.5	17.2	27.2	31.1	2.8	949.6	141.3	135.4	11.4	2.22
	8.9	-2.3	5.1	18.1	29.5	-1.0	453.4	169.7	83.9	11.5	1.75

从表 8 中可见,以上各参数值变化特征较好地对应了对流天气从无到强的变化。

1) LI 、 $\Delta\theta_{se850-500}$ 、 $CAPE$ 、 CIN 、0—6 km 垂直风切变、 P_w 等对各类东北低涡槽后型天气具有很好的指示意义。第 类东北低涡槽后型天气出现时, LI 达 -10.7°C , $\Delta\theta_{se850-500}$ 达 8.9°C , LI 负值、 $\Delta\theta_{se850-500}$ 正值越大,表明大气层结越不稳定,出现的对流天气越强; $CAPE$ 和 CIN 分别为 1519.6 、 $301.8\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$, 表明有较大不稳定能量且有一定对流抑制, CIN 越大,越能抑制对流发生,其越小,不稳定能量越不易在低层聚积,对流越易发生,大的 $CAPE$ 和合适的 CIN 是强对流天气发生较理想的状况;垂直风切变达到 $15.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 属中等强度,其大小和形成风暴的强弱密切相关,切变环境能使上升气流倾斜,增强中层干冷空气吸入,0—6 km 垂直风切变达 $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 及以上时,有利对流发展、维持和超级单体生成; P_w 达 2.55 cm ,表明大气中含大量水分,其水分随上升气流从低层向上输送,风暴发展

4、5 日计算和订正后的部分物理量,如 $CAPE$ 平均值达 $1000\sim 2000\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上,而河南局部只出现一般雷暴天气,实况是 4 日山西、河北南部等出现大范围大风、局地冰雹等强对流天气,5 日安徽等地出现大范围大风、冰雹等强对流天气。究其原因,有利于强天气发生的触发抬升等条件更有利河南省外产生强对流。

2.2 三类东北低涡槽后型天气的物理量对比

表 8 给出上述东北低涡槽后型三类天气物理量平均值 (mK 、 CIN 、0—6 km 垂直风切变为 08 时平均,其余为 14 时平均)。

要求低层有充足水汽供应,对流天气产生的关键是边界层水汽条件充沛, P_w 值越大,强对流越易出现。

2) SI 、 K 指数、 mK 、 I 在第 类东北低涡槽后型天气中量值不理想。这与中上层较干冷、整层水汽条件差有直接关系,如西北气流下 700 hPa 空气干冷,该层温度露点差较大,对 K 指数影响很大;美国发生龙卷时, I 临界值为 400,发生强雷暴时 I 临界值为 300,从表 8 中看,东北低涡型背景下,发生强雷暴时 I 临界值应为 180,发生一般对流天气时 I 为 130, I 小于 80 时对应无对流天气。上述四参数虽达不到河南出现致灾强风暴所要求的量值,但从其量值差别上仍能区分上述三类东北低涡槽后型天气。

3) $\Delta T_{850-500}$ 在 28°C 以上,是低涡槽后型对流天气有别于其它对流天气(如槽前对流天气等)的重要特征之一。表 8 中三类东北低涡槽后型天气的 $\Delta T_{850-500}$ 均超过 29°C ,说明低涡槽后形势下河南上干冷、下辐射增温明显,无论是否发生对流天气,大的垂直温度递

减率层始终存在。

3 东北低涡槽后型致灾强风暴天气学特征及初步概念模型

2009 年国家气象中心在强对流天气预报业务中试行中尺度天气综合分析方法,并建立一套中尺度天气综合分析规范^[14-15]。本文参照其规范并结合河南省强对流天气特点,以 2008 年 6 月 3 日,2009 年 6 月 3

日、14 日河南 3 次东北低涡槽后型致灾强风暴天气过程为例,详细分析其基本条件和物理要素,揭示低涡槽后型强对流天气的一般特征。

3.1 致灾强风暴过程天气学特征分析

图 2a₁ 给出 2008 年 6 月 3 日 08 时高空综合分析图。从中可见,200 hPa 急流(风速≥40 m·s⁻¹)在长江一带,河南处于高空急流北侧,相应物理量场上(图略),河南位于正涡度区中,但有负涡度平流,预示未

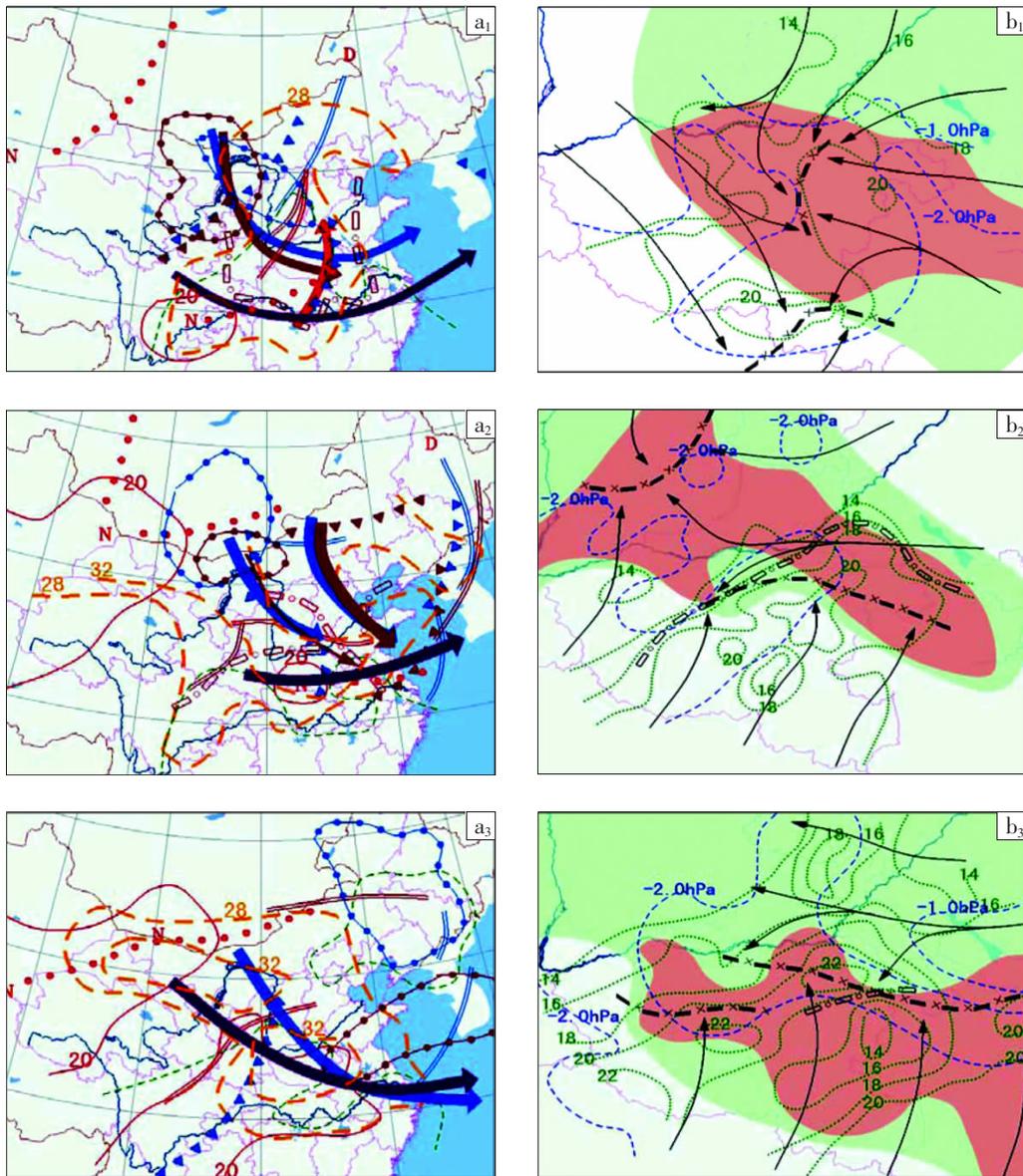


图 2 2008 年 6 月 3 日 08 时(a₁)、2009 年 6 月 3 日 08 时(a₂)、2009 年 6 月 14 日 08 时(a₃)高空综合图,以及 2008 年 6 月 3 日 14 时(b₁)、2009 年 6 月 3 日 14 时(b₂)、2009 年 6 月 14 日 14 时(b₃)地面综合图

- 200 hPa 急流; → 500 hPa 急流; → 700 hPa 急流; → 850 hPa 急流; → 500 hPa 切变线;
- 700 hPa 切变线; → 850 hPa 切变线; - - - 地面辐合线; - - - 700 hPa 干线;
- - - 850 hPa 干线; - - - 地面干线; ···· 500 hPa 温度槽; ···· 700 hPa 温度槽;
- 500 hPa 24 h 显著降温区; ···· 700 hPa 24 h 显著降温区; ···· 850 hPa 温度脊;
- - - 850/500 hPa 温差等值线; - - - 850 hPa 等温线; - - - 850 hPa 7 g·kg⁻¹ 比湿等值线;
- 地面显著流线; → 地面露点温度等值线; → 地面 3 h 显著降压等值线;
- 实况雷暴区; ■ 重要天气区(≥17 m·s⁻¹ 大风、冰雹等)

来高层可能转为辐散流场;500 hPa 低涡在内蒙东部,低槽自低涡中心伸向山西,温度槽落后于高度槽,温度槽和 24 h 显著降温区($\Delta T_{24} \leq -2.0$ °C)位于内蒙到河套地区,风速 ≥ 16 m·s⁻¹的强西北气流携带冷空气穿过河南,这一方面说明垂直风切变较大,另一方面说明河南上空将变得更加干冷;700 hPa 中低空显著降温区、温度槽、切变线分析结果与 500 hPa 相似,河南北部有一干线;850 hPa 四川盆地有一 20 °C 的暖中心,暖脊自四川伸向豫南,风速 ≥ 12 m·s⁻¹的南风急流穿过温度脊伸向河南,加之辐射增温,未来低层温度将进一步升高,河南位于 ≥ 7 g·kg⁻¹的高比湿区内,说明河南低层存在有利的水汽条件,但比暴雨发生时的比湿(河南出现区域暴雨时^[4],850 hPa 比湿一般 ≥ 12 g·kg⁻¹)小得多;850 hPa 和 500 hPa 温差大于 28 °C,较大垂直温度梯度说明河南上空大气层结不稳定。

2008 年 6 月 3 日 14 时地面图上(图略),新疆到河套大陆暖低压向东发展,河南西南部有一 1005 hPa 暖低压闭合中心,河南处于该低压向东北伸展的暖倒槽中,图 2b₁ 给出同一时次地面综合分析图。从中可见,河南中东部有明显辐合线,其东部盛行偏东风,露点温度 ≥ 18 °C,说明低层绝对水汽条件较好;地面辐合线西侧为偏北风和西北风,该辐合线为强对流天气产生提供了低层触发条件,3 h 显著降压区(≤ -1.0 、 -2.0 hPa)位于豫南以南地区。天气实况是,3 日午后到夜里,河南北中部、东部均出现雷暴(浅绿色区域),重要强天气区主要位于地面辐合线及其两侧附近。

图 2a₂ 给出 2009 年 6 月 3 日 08 时高空综合分析图。从中可见,200 hPa 急流位于河南南部到东海,相应物理量场上(图略),河南位于正涡度区中,但有负涡度平流;500 hPa 低涡位于黑龙江,高度槽和温度槽自东北伸向朝鲜半岛,河南位于低涡后部西北气流中,内蒙中部有一横槽,未来南压转竖影响河南;700 hPa 四川东部经陕西到河南中部有一干线,干线经常和雷暴活动相联系,有时导致强烈的对流风暴^[16],是强对流天气触发机制之一。河套北部有 24 h 显著降温区,在西北气流引导下,河南北中部、东部将有较强冷平流;850 hPa 上,20 °C 的暖中心在河南南部,温度脊自河南经安徽伸向江苏,切变线位于陕西北部经山西、豫北伸向山东,豫东地区比湿 ≥ 7 g·kg⁻¹, $\Delta T_{850-500}$ 达 32 °C。

2009 年 6 月 3 日 14 时地面图上(图略),新疆到河套为大陆暖低压控制,河套南部低压向东伸展,河南处于向东伸展的暖槽中,图 2b₂ 给出同一时次地面综合分析图。从中可见,受东伸暖槽影响,山西南部、河南中部分别有一辐合线,自河南开封到南阳有一明显

干线(露点锋),其东南侧露点温度 ≥ 18 °C,为豫东商丘强对流天气提供了较好的水汽条件,辐合线和干线对强对流产生具有强触发作用。

图 2a₃ 给出 2009 年 6 月 14 日 08 时高空综合分析图上。从中可见,200 hPa 急流自内蒙西部经河南伸向长江下游,与前两次过程类似,河南上空仍为正涡度区和负涡度平流;500 hPa 低涡在我国东北地区东部,急流自河套经河南伸向东海,河套东部有一明显的温度槽;850 hPa 河北、山西到陕西南部有一 NE—SW 向辐合线,河南大部位于 20 °C 高温区、比湿 ≥ 7 g·kg⁻¹ 高湿区和 $\Delta T_{850-500} \geq 32$ °C 高值区。

图 2b₃ 给出 2009 年 6 月 14 日 14 时地面综合图。从中可见,其地面形势与当年 6 月 3 日的相似,河南中部有东西向辐合线,其北侧为偏东风,南侧为偏南风,自南阳经许昌到开封一线有一高露点大值带(湿轴),露点温度 ≥ 20 °C,周口北部有一干线。天气实况是,强对流天气出现区域露点温度基本 ≥ 18 °C,说明在其他条件满足时,强对流天气大都发生在低层有一定水汽条件的区域内。

3.2 东北低涡槽后型致灾强风暴天气系统及要素的三维结构

根据上节分析结果,表 9 列出上述 3 次东北低涡槽后型河南强对流天气的高空、地面综合分析内容,从中可明显看出 3 次过程的不稳定层结、水汽、抬升力和垂直风切变条件及相关物理要素场特征。

在表 9 中初步归纳出河南东北低涡槽后型强对流天气的一般概念模型,其特点包括:从强天气触发抬升条件看,中层有横槽、切变线、干线,地面有辐合线、干线等触发(或起抬升作用的)系统。从不稳定层结建立看,对流层中上层干冷,上层有 24 h 显著降温区或冷槽、冷平流;低层暖,热力条件容易满足,850 hPa 温度达到 20 °C 说明此季节低层温度已相当高,若其低于 20 °C 但有低空急流或显著流通过暖脊也可达到同样效果。以上条件均满足时,若水汽条件不满足,也不易发生大范围强对流,所以强对流天气产生的关键是 850 hPa 以下水汽条件。根据以上个例分析,当 850 hPa 比湿达到 7 g·kg⁻¹、地面露点温度在 16 °C 以上时,可认为低层水汽条件较好,易发生大范围强对流天气。另外,从垂直风切变条件看,500 hPa 有急流(一般风速 ≥ 15 m·s⁻¹)经过是大范围强对流天气产生的一个增强条件,因地面风速较小,说明有较强垂直风切变,有利动力不稳定加强,垂直风切变增强将使风暴进一步发展加强。根据以上分析结果,可初步建立东北低涡槽后形势下河南省强风暴天气学模型(图 3)。

表 9 三次东北低涡槽后型河南强对流过程天气系统和物理要素场特征比较

层次	强天气 分析内容	过程 1	过程 2	过程 3	备注
200 hPa	高空急流	急流北侧	急流北侧	急流北侧	上层辐散条件
500 hPa	主导气流与 影响系统	西北气流、 下滑槽	西北气流、横槽	西北气流	上层干冷条件
	冷空气	冷温槽、 ΔT_{24} 显 著降温区	弱冷温槽、 ΔT_{24} 显 著降温区	冷温槽	
700 hPa	中空急流	急流经过	上游有急流	急流经过	垂直风切变和动 力不稳定条件
	影响系统	下滑槽	干线	西北气流	
850 hPa	冷空气	冷温槽、 ΔT_{24} 显 著降温区	ΔT_{24} 显著降温区		上层干冷条件
	影响系统	偏南风急流、 切变线	切变线、干线	切变线	
地面	暖空气	温度脊、暖平流	20 °C 暖中心	温度 ≥ 20 °C	低层辐合抬升 条件
	比湿	$\geq 7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$	一般 $\geq 7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\geq 7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$	
	$\Delta T_{850-500}$	≥ 28 °C	≥ 32 °C	≥ 32 °C	
地面	影响系统	暖倒槽	东伸暖槽	东伸暖槽	低层暖湿条件
	触发系统	辐合线	辐合线、干线	辐合线、干线	
	3 h 显著 降压	$\leq -1.0 \text{ hPa}$	$\leq -1.0 \text{ hPa}$	$\leq -1.0 \text{ hPa}$	
地面	露点温度	一般 ≥ 16 °C	灾害强对流区 ≥ 16 °C	≥ 18 °C	地面暖湿条件

注: 过程 1、2、3 分别指 2008 年 6 月 3 日、2009 年 6 月 3 日、6 月 14 日的河南强对流天气

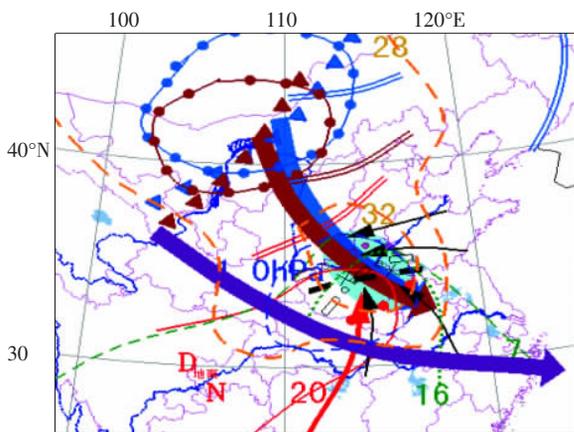


图 3 东北低涡槽后型河南强对流天气学模型图

- 200 hPa 急流; — 500 hPa 急流; — 700 hPa 急流;
- 850 hPa 显著流线; — 500 hPa 切变线; — 700 hPa 切变线;
- 850 hPa 切变线; — 地面辐合线; — 700 hPa 干线;
- 850 hPa 干线; — 地面干线; — 500 hPa 温度槽;
- 700 hPa 温度槽; — 500 hPa 24 h 显著降温区;
- 700 hPa 24 h 显著降温区; — 850 hPa 温度脊;
- 850、500 hPa 温度差等值线; — 850 hPa 等温线;
- 850 hPa 比湿等于 $7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 等值线; — 地面显著流线;
- 地面露点温度等值线; — 地面 3 h 显著降压等值线;
- 重要天气区域($\geq 17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 大风、冰雹等)

从图 3 中可见,河南位于 200 hPa 急流轴北侧西北气流中;500 hPa 东北低涡槽位于东北地区,其后部

至河套地区为西北气流区;500、700 hPa 大风速轴自河套北部携带冷空气影响河南北中部、东部,这一方面使河南高空更加干冷,加剧层结不稳定,另一方面大风速带说明有强垂直风切变,有利动力不稳定加强。850、500 hPa 温度差大值中心说明有强垂直温度梯度,此处大气层结为强不稳定区,有出现强对流天气的潜势。850 hPa 上 20 °C 温度线和温度脊说明低层热力条件好,在显著西南风的作用下,河南北部、中东部低层热力条件将加强。850 hPa 比湿和地面露点线说明低层湿舌向东北伸展,强天气区有相对较好的水汽条件。低层切变线、辐合线和地面辐合线、干线以及 3 h 显著降温区,将有利于动力辐合抬升和触发强对流天气。

4 结论

本文以 2008—2010 年 6 月份河南东北低涡槽后型强对流天气为研究对象,寻找河南发生对流天气的物理量指标和阈值,详细分析了 3 次严重致灾强对流过程的影响系统、强风暴环境条件,归纳出河南东北低涡槽后型致灾强风暴的三维天气系统要素结构配置和强天气分析预报着眼点。结论如下:

(1) 东北低涡槽后形势下,河南午后升温幅度大,不稳定能量建立快,用 14 时温度、露点订正的探空

比08时探空物理量对河南强对流天气有更好的指示意义。

(2) SI 、 LI 均为负值, K 指数 ≥ 20 °C, $\Delta\theta_{850-500} \geq 5$ °C, $CAPE \geq 1500$ J·kg⁻¹并有一定 CIN , $Sweat$ 指数 ≥ 180 , 0—6 km风切变 ≥ 15 m·s⁻¹, 大气可降水量 ≥ 2 cm, 可作为河南发生东北低涡槽后型灾害性强对流天气的参考指标; SI 为正值, $LI \geq -1.5$ °C, K 指数 ≤ 24 °C, $\Delta\theta_{850-500} \leq -4.3$ °C, $CAPE \leq 150$ J·kg⁻¹且远小于 CIN , 14时探空订正后 $CAPE$ 也在500 J·kg⁻¹以下, 0—6 km垂直风切变 ≤ 12 m·s⁻¹, 可降水量 ≤ 1.5 cm, 可作为无对流天气出现的参考指标;除此之外, 可出现一般雷暴天气。

(3) 抬升指数 LI 、 $\Delta\theta_{850-500}$ 、对流有效位能 $CAPE$ 和对流抑制 CIN 、0—6 km垂直风切变、大气可降水量 P_w 等, 在灾害性强风暴、一般雷暴、无对流天气出现三类天气中均有很好的表现, 对河南东北低涡型强对流天气有很好的指示意义; SI 、 K 指数、 mK 、 $Sweat$ 指数值能区分三类(类、类、类)不同天气;东北低涡槽后形势下, 无论是否出现对流天气, $\Delta T_{850-500}$ 值一般都很大。

(4) 河南出现东北低涡槽后型强对流天气的热力不稳定条件是, 中上层干冷, 低层暖, 即上层有24 h显著降温区或冷槽、冷平流;850 hPa温度达到20 °C, 或有低空急流或显著流线通过暖脊。抬升条件是, 中层存在横槽、切变线、干线, 地面存在辐合线、干线等有触发和抬升作用的系统。水汽条件是, 850 hPa比湿 ≥ 7 g·kg⁻¹, 地面露点温度达到16 °C以上时, 易发生大范围强对流天气。垂直风切变条件是, 高空有西北风急流, 低层偏南风, 地面偏东风, 此三维流场有利

于动力不稳定建立和对流风暴进一步发展加强。

参考文献:

- [1] 曲晓波, 王建捷, 杨晓霞, 等. 2009年6月淮河中下游三次爬线过程的对比分析[J]. 气象, 2010, 36(7): 151-159.
- [2] 易笑园, 李泽椿, 李云, 等. 长生命史冷涡影响下持续对流性天气的环境条件[J]. 气象, 2010, 36(1): 17-25.
- [3] 张霞, 周建群, 申永辰, 等. 一次强冰雹过程的物理机制分析[J]. 气象, 2005, 31(4): 13-17.
- [4] 牛淑贞, 张素芬, 席世平. 河南省强对流天气的特征与预报[J]. 河南气象, 1998, 25(9): 36-40.
- [5] 赵培娟, 吴葵. 河南省区域性冰雹天气特征及预报[J]. 河南气象, 2001, (2): 2-4.
- [6] 杨晓霞, 张爱华, 贺业坤. 连续冰雹天气的物理量场特征分析[J]. 气象, 2000, 26(4): 50-54.
- [7] 龙利民, 陈亮, 江航东, 等. 副热带高压外围西北侧一次强对流天气的雷达回波特征[J]. 暴雨灾害, 2007, 26(1): 68-72.
- [8] 王华, 孙继松, 李津. 2005年北京城区两次强冰雹天气的对比分析[J]. 气象, 2007, 33(2): 49-55.
- [9] 赵培娟, 吴葵, 郑世林, 等. 河南省强对流天气诊断分析预报系统[J]. 气象, 2010, 36(2): 33-38.
- [10] 许爱华, 詹丰兴, 刘晓晖, 等. 强垂直温度梯度条件下强对流天气分析与潜势预报[J]. 气象科技, 2006, 34(4): 376-380.
- [11] 张素芬, 鲍向东, 牛淑贞. 河南省人工消雹作业判据研究[J]. 气象, 1999, 26(4): 50-54.
- [12] 陈晓燕, 罗松, 杨玲. 黔西南州冰雹时空分布及春夏冰雹环境条件分析[J]. 暴雨灾害, 2010, 29(1): 49-53.
- [13] 黄艳芳. 2004年初春武汉机场临近的两次强雷暴天气过程分析[J]. 暴雨灾害, 2007, 26(1): 73-77.
- [14] 郑永光, 张小玲, 周庆亮, 等. 强对流天气短时临近预报业务技术进展与挑战[J]. 气象, 2010, 36(7): 33-42.
- [15] 张小玲, 张涛, 刘鑫华, 等. 中尺度天气的高空地面综合图分析[J]. 气象, 2010, 36(7): 143-150.
- [16] 陆汉城, 杨国祥. 中尺度天气原理和预报[M]. 气象出版社, 2004: 170-172.