

# 毛乌素沙漠东部边缘中 $\beta$ 尺度暴雨和冰雹综合分析<sup>\*</sup>

井 喜<sup>1</sup>, 屠妮妮<sup>2</sup>, 井宇<sup>3</sup>, 万红卫<sup>1</sup>, 康 磊<sup>1</sup>

(1. 陕西榆林市气象局, 陕西 榆林 719000; 2. 中国气象局成都高原气象研究所, 四川 成都 610071;  
3. 兰州大学 大气科学学院, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要:** 利用多普勒雷达资料、Micaps 系统提供的常规观测资料和物理量场, 对2006年9月20日发生在毛乌素沙漠东部边缘的一次强对流天气过程进行了分析。结果表明: 冰雹和暴雨是由两块呈块状的中 $\beta$ 尺度强对流单体造成的; 地面能量比中 $\alpha$ 尺度“ $\Omega$ ”系统的生成, 为能量的积聚和集中释放提供了有利条件; 地面能量比中 $\beta$ 尺度能量比低值舌的生成, 为强对流天气的发生提供了抬升触发机制; 冰雹和暴雨发生前, 涡度场和散度场的耦合、影响雹暴区次级环流的形成, 为雹暴的发生维持提供了动力机制; 850 hPa 等压面上湿正压场和湿斜压场的配合、以及湿位涡的三维空间结构, 对雹暴的发生及落区有指示意义; 在多普勒雷达径向速度场上, 雹暴运动的前方对流层低层有中气旋生成, 雹暴运动的后方对流层低层有中反气旋生成, 而对流层中高层有辐散生成, 且超级单体特征明显。

**关键词:** 毛乌素沙漠; 湿位涡; 中 $\beta$ 尺度暴雨; 冰雹

**中图分类号:** P426.62; P426.64 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-811X(2010)01-0073-05

## 0 引言

有关青藏高原东侧的强对流天气, 我国气象工作者做了大量研究工作<sup>[1-5]</sup>。但专门针对毛乌素沙漠东部边缘的强对流天气进行的研究很少。但毛乌素沙漠东部边缘(榆林市西北部长城沿线)是雹灾和局地洪涝灾害多发地带。随着国民经济的发展, 由雹灾和局地洪涝灾害造成的损失越来越大。由此可见, 开展毛乌素沙漠东部边缘局地暴雨和冰雹的研究, 对防灾减灾具有十分重要的意义。

位涡是综合热力、动力的物理量, 有湿位涡和干位涡, 等压面和等熵位涡等多种形式, 被广泛用于暴雨和其它天气系统的诊断<sup>[6-7]</sup>。地面能量比是反映夏季地面弱冷空气活动有用的物理量<sup>[4]</sup>。本文把湿位涡和地面能量比也应用于毛乌素沙漠东部边缘强对流天气的分析, 以便对今后毛乌素沙漠东部边缘强对流天气的预报服务提供一些新的和有益的依据。

## 1 冰雹和暴雨概况及研究资料、方法

2006年9月20日夜, 榆林市横山县(位于毛乌素沙漠东部边缘地带)境内遭受特大暴雨和冰雹(以下简称雹暴)的袭击, 大部分地区就地起洪, 境内房屋、道路、桥涵、库坝等基础设施损毁严重, 特别是韩岔乡、殿市镇、横山镇等部分乡镇在降暴雨的同时, 遭受特大雹灾袭击, 冰雹所过之处, 农作物损失殆尽, 至21日凌晨, 韩岔等乡镇境内部分地方存积冰雹厚度仍有0.5 m厚。韩岔、石湾等乡镇降雨量高达73 mm, 境内最大冰雹直径达10~15 mm。据民政部门统计, 受灾人口达15万人, 直接经济损失大于1.5亿元。

本文利用多普勒雷达资料、Micaps 提供的常规探测资料和物理量场, 对上述强对流天气采用湿位涡、地面能量比等物理量和天气学方法进行了分析。在计算湿位涡时, 采用了文献[5]给出的湿位涡表达式。

在绝热无摩擦的饱和大气中湿位涡守恒, 在 $p$ 坐标下忽略 $\omega$ 的水平变化, 等压面湿位涡的表达式为:

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2009-07-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(40675058)资助

作者简介: 井喜(1957-), 男, 陕西米脂人, 高级工程师, 主要从事短期天气预报工作. E-mail: jingxiailihua@126.com

$$MPV = -g(\xi p + f) \frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} + g \left( \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y} \right) = const. \quad (1)$$

将其写成分量形式, 有:

$$MPV_1 = -g(\xi p + f) \frac{\partial \theta_{se}}{\partial p}, \quad (2)$$

$$MPV_2 = g \left( \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y} \right), \quad (3)$$

式中:  $MPV_1$  为湿正压项;  $MPV_2$  为湿斜压项。

在计算地面能量比时, 采用了文献[8]给出的地面能量比表达式:

$$K_{EG} = T_{\sigma G} / (P_0 - 950), \quad (4)$$

式中:  $T_{\sigma G}$  为地面相对总温度;  $P_0$  为海平面气压。

## 2 环流背景及中尺度影响系统

2006 年 7 月 2 日 08:00 (北京时, 下同) 在 500 hPa 等压面上, 亚洲 40°N 以北地区为两槽一脊型: 黑龙江东部至日本海为大槽区, 乌拉尔山东部为大槽区 (以下简称乌山大槽), 贝加尔湖为高脊区; 亚洲 20°~40°N, 青藏高压脊和蒙古西部高脊形成同位相迭加, 阴山山脉北部存在一中尺度低涡, 从阴山山脉东部、山西东部、河南中部至湖南中部为一阶梯槽区 (图略)。2006 年 7 月 2 日 08:00 在 850 hPa 和 700 hPa 等压面上, 40°N 以南我国大陆东部为东高西低形势, 从临河、银川至兰州生成一切变线; 700 hPa 从平凉至延安生成  $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  西南气流, 850 hPa 从延安至东胜生成一支  $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  南风气流 (图略)。7 月 2 日 20:00, 伴随乌山大槽的东移、蒙古西部高脊的东移发展, 500 hPa 阴山山脉北部中尺度低涡中心向南移入河套北部雹暴区 (图略), 700 hPa、850 hPa 位于临河、银川至兰州的切变线向东移入雹暴区, 700 hPa 在延安生成  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  西南气流 (图略); 850 hPa 等压面上, 河套有东北西南向倒槽发展, 延安生成  $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  南风气流, 太原生成  $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  东南低空急流; 和太原东南低空急流配合, 同时生成一西北东南向的冷舌入侵河套北部 (图略)。中低空环流形势的配合, 在黄土高原 (陕西北部) 形成有利于雹暴发生发展的环流背景。

## 3 水汽条件分析

2006 年 9 月 20 日 20:00, 850 hPa 等压面上, 雹暴区东南部及东部形成大于  $8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

水汽通量中心 (图略), 雹暴区形成小于  $-20 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  水汽通量强辐合中心 (图略); 700 hPa 等压面上, 在延安西南气流的前方 (雹暴区) 也形成大于  $6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  水汽通量中心和小于  $-10 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  水汽通量辐合中心 (图略), 对流层低层水汽通量和水汽通量辐合中心的形成, 满足了雹暴发生发展所需的水汽条件。

## 4 湿位涡诊断分析

### 4.1 湿位涡的三维空间结构

9 月 20 日 20:00, 700 hPa 等压面上, 在延安西南风带来的暖湿气流和阴山山脉低涡西部偏北风带来的干冷气流相互作用下, 在雹暴区北侧生成  $MPV$  等值线密集区, 有利于强对流天气的发生发展<sup>[5]</sup>; 500 hPa 等压面上, 河套北部低涡西部生成高值湿位涡平流 (图略), 也有利于毛乌素沙漠风暴的发生发展<sup>[5]</sup>。同时从过风暴区湿位涡的空间剖面图上看到, 从 08:00~20:00, 对流层高层  $MPV > 0$  的高值湿位涡区呈“漏斗”状向对流层低层发展的同时, 和雹暴区边界层  $MPV \leq -2$  的中心形成垂直配置。根据文献[5], 上述湿位涡的垂直配置形式有利于雹暴区强对流不稳定的形成和不定能量的集中猛烈释放。

### 4.2 对流层低层湿正压场和湿斜压场特征

从 9 月 20 日 20:00 强对流发生前 850 hPa 湿正压场上看到 (图 1a), 强对流发生区邻近上游生成  $MPV_1 \leq -4.0$  PVU 中  $\beta$  尺度强对流不稳定中心。从 9 月 20 日 20:00 强对流发生前 850 hPa 湿斜压场上看到 (图 1b), 伴随河套倒槽的发展 (延安生成  $V = 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  南风, 银川生成  $V = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  东北风)、延安西南风带来的暖湿平流和河套西北部东北风带来的冷平流的相互作用, 使延安至平凉之间生成  $MPV_2 \leq -0.8$  PVU 湿斜压中心, 银川及其南部生成正的湿斜压扰动, 正的湿斜压扰动和负的湿斜压中心之间在雹暴区上游生成  $MPV_2$  等值线密集区 (也是能量锋生区)。湿正压场和湿斜压场的配合, 在雹暴区上游生成  $MPV_2$  等值线密集区和  $MPV_1 \leq -4.0$  PVU 中  $\beta$  尺度强对流不稳定中心的耦合区, 有利于中  $\beta$  尺度强对流天气的生成和发展<sup>[5]</sup>。

## 5 地面能量比诊断分析

从图 2a 可见, 9 月 20 日 20:00, 地图上已形成中  $\alpha$  尺度能量比高值区, 雹暴区东北方同时

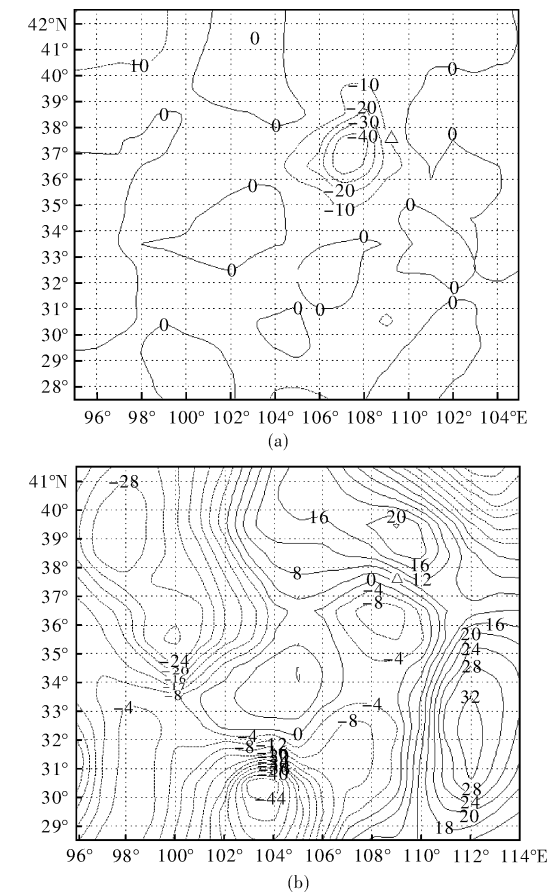


图1 2006年9月20日20:00 850 hPa  $MPV_1$  (a)和  $MPV_2$  (b) (单位:  $10^{-1}$  PVU)

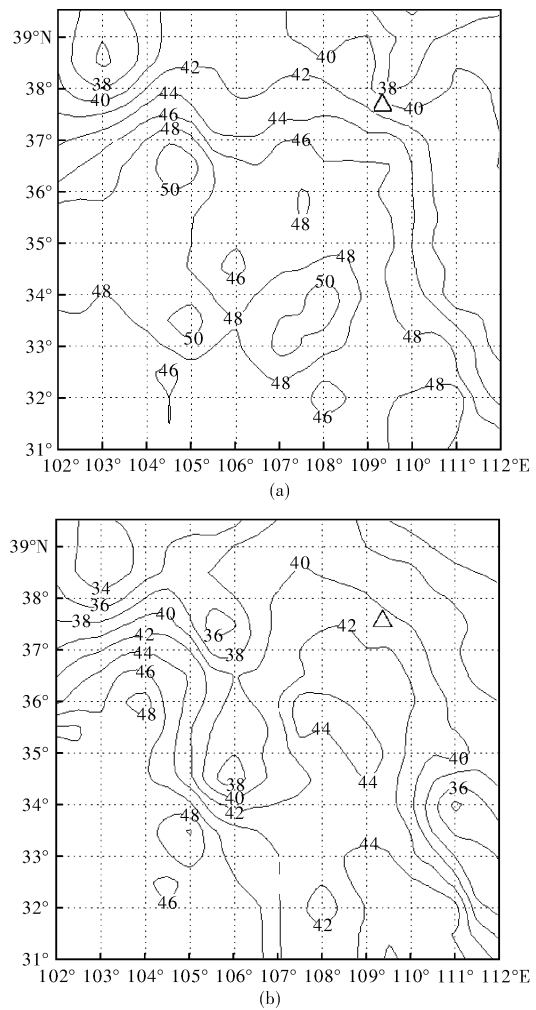


图2 2006年9月20日20:00 (a)和21日02:00(b) 地面能量比 (单位:  $^{\circ}\text{C}/\text{hPa}$ )

生成中 $\beta$ 尺度能量比低值舌,正是中 $\beta$ 尺度能量比低值舌触发了强对流天气的生成和发展。从图2b可见,由于雹暴区上下游弱冷空气的活动,使地面图上形成能量比“ $\Omega$ ”系统。能量比“ $\Omega$ ”系统的形成,使能量在雹暴区形成积聚,为能量在中 $\beta$ 度尺度小范围内形成集中猛烈释放创造了有利条件。

## 6 动力条件分析

从图3a可见,2006年9月20日20:00,雹暴区( $38^{\circ}\text{N}$ )已形成深厚的正涡度柱,雹暴区北方( $48^{\circ}\text{N}$ )已形成深厚的负涡度柱;雹暴区对流层低层形成强辐合,对流层中高层形成强辐散,而雹暴区北方( $45^{\circ}\text{N}$ )对流层中高层形成强辐合,对流层低层形成强辐散(图3b);涡度柱和散度柱的耦合,使雹暴区( $32\sim40^{\circ}\text{N}$ )形成很强的上升运动柱和 $\omega = -3.2 \times 10^{-2} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 上升运动中心,使雹暴区北方( $45^{\circ}\text{N}$ )形成很强的下沉运动柱和 $\omega = 2.8 \times 10^{-2} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 下沉运动中心(图3c)。影响雹暴区次级环流的形成,成为雹暴发生发展和维持的动力机制。

## 7 多普勒天气雷达回波特征

以榆林多普勒雷达获得的资料,对此次强对流天气做进一步分析。

19:06,在雷达的西部看到一条强对流云带,在强对流云带的西南端生成一强度 $>50 \text{ dBZ}$ 、中 $\beta$ 尺度强对流单体b(图4a);在对应的 $1.5^{\circ}$ 仰角经向速度场看到,在强对流云带上生成3个中 $\gamma$ 尺度的逆风区,和强对流单体b对应的逆风区右侧同时生成 $V \geq 16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 西南急流中心,即西南急流中心左侧生成第一个中气旋(图5a)。20:00,强对流云带在向东南移动的过程中又生成强对流单体a(图4b),正是强对流单体a和强对流单体b在东移的过程中造成了横山部分乡镇的强冰雹和暴雨天气;在对应的 $1.5^{\circ}$ 仰角的经向速度图上,和强对流单体a、强对流单体b对应,分别出现中 $\gamma$ 尺度逆风区,而在两个中 $\gamma$ 尺度逆风区左侧对应出现两个西南急流核,在两个中 $\gamma$ 尺度逆风区右侧也

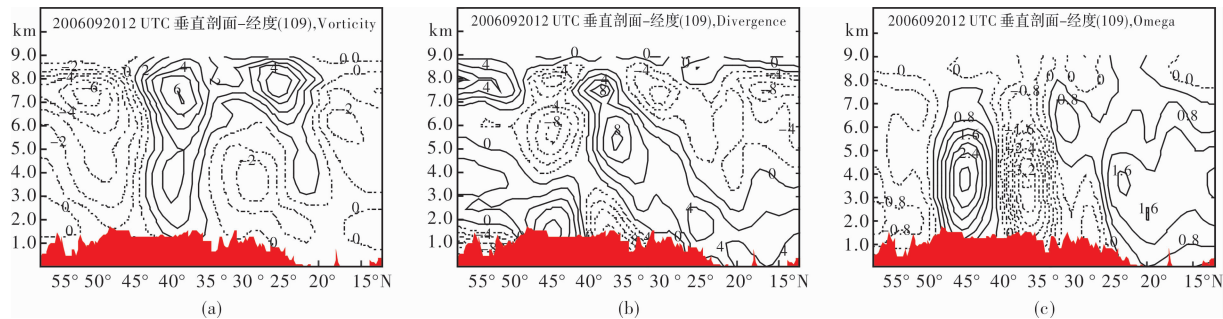


图3 2006年9月20日20:00沿109°E 涡度(a)、散度(b)和 $\omega$ (c)剖面图(涡度和散度单位:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ;  $\omega$ 单位:  $10^{-2} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ )

分别出现对应的两个急流核,即在强对流单体 a、强对流单体 b 后部分别生成中  $\beta$  尺度反气旋,而在强对流单体 a、强对流单体 b 前部分别生成中  $\gamma$  尺度气旋(图 5b)。21:00,强对流单体 a 和强对流单体 b 在东移过程中减弱,而在强对流单体 b 的西南部(靖边县)又生成新的强对流单体 c(图 4c);在对应的 1.5°仰角的经向速度图上看到,和新生的强对流单体 c 对应,又生成一新的中气旋(图 5c)。21 日 02:00,强对流云带的带状特征消失,

单体 c 减弱(图略),影响毛乌素沙漠东部边缘地带的短时暴雨和强冰雹天气结束。同时从 2.4°仰角的径向速度图上看到,强对流发生期间对流层高层有辐散发展。

做单体 a 和单体 b 反射率因子剖面图(图略),在陕北来说强中心不算太强,但云体有界弱回波区明显, >55 dBZ 的强回波达到 -21℃ 所在的高度(大约 8 km), 0℃ 所在的高度在 3 km 左右,也显示出强冰雹的特征。

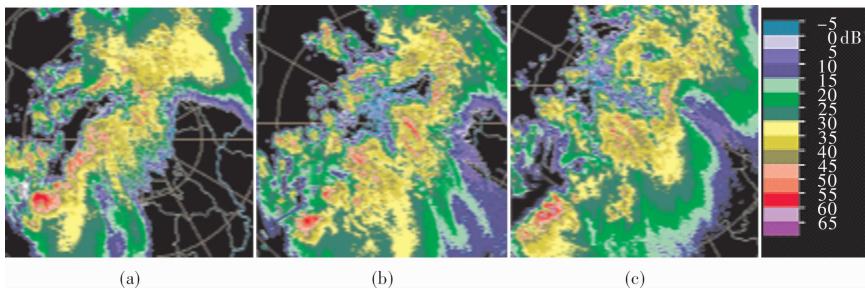


图4 2.4°仰角多普勒雷反射率因子

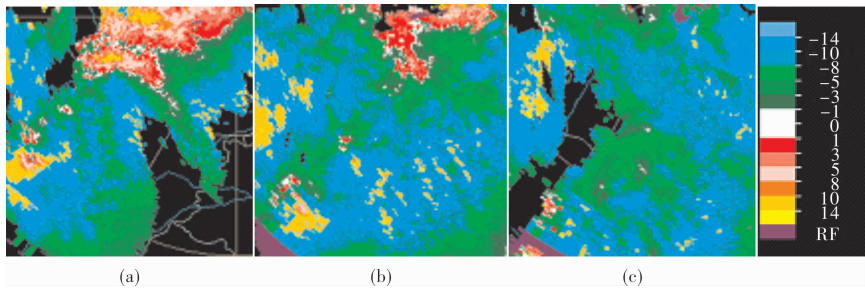


图5 1.5°仰角多普勒雷达径向速度图

8 结论

通过上述分析,可得出以下几点结论:

(1) 地面能量比中  $\alpha$  尺度“ $\Omega$ ”系统的生成、中  $\beta$  尺度能量比低值舌的生成,为雹暴的发生发展提供了能量积聚、集中释放条件和抬升触发机制。

(2) 冰雹和暴雨发生前,850 hPa 等压面上湿正压场和湿斜压场的配合、以及湿位涡三维空间

结构,对冰雹和暴雨的发生及落区有指示意义;动力场涡度柱和散度柱的耦合,影响雹暴区次级环流的形成,成为雹暴发生发展和维持的动力机制。

(3) 多普勒雷达反射率因子分析表明,冰雹和暴雨是由带状云系尾部生成两块中  $\beta$  尺度强对流单体造成的;在反射率因子剖面图上,强对流单体有界弱回波区明显, >55 dBZ 高度达到 -21℃ 所在高度,强冰雹特征明显。在径向速度图上,强

对流单体运动的前方对流层低层有中气旋生成, 强对流单体运动的后方对流层低层有中反气旋生成, 而对流层中高层有辐散生成, 且超级单体特征明显。

参考文献:

[1] 苑海燕, 侯建忠, 杜继稳, 等. 黄土高原突发性局地暴雨的特征分析[J]. 灾害学, 2007, 22(2): 101 – 104.

[2] 胡淑兰, 李社宏, 杜继稳. 渭河上游一次致洪暴雨过程诊断分析[J]. 灾害学, 2008, 23(1): 51 – 54.

[3] 王建鹏, 薛春芳, 薛荣, 等. 西安城市内涝灾害气象预警系统研究[J]. 灾害学, 2008, 23(S0): 45 – 49.

[4] 马鹤年. 次天气尺度  $\Omega$  系统和暴雨落区[C]//暴雨文集. 吉林: 吉林人民出版社, 1978: 171 – 176.

[5] 井喜, 胡春娟. 位涡诊断在黄土高原强对流风雹暴雨预报中的应用[J]. 气象科技, 2007, 35(1): 20 – 25.

[6] 吴国雄, 蔡雅萍, 唐晓菁. 湿位涡和倾斜涡度发展[J]. 气象学报, 1995, 53(4): 387 – 404.

[7] 陆尔, 丁一汇, 李月洪. 1991 年江淮特大暴雨的位涡分析与冷空气活动[J]. 应用气象学报, 1994, 6(3): 266 – 274.

[8] 杜继稳, 李明娟, 张弘, 等. 青藏高原东北侧突发性暴雨地面能量场特征分析[J]. 高原气象, 2004, 23(4): 453 – 457.

Comprehensive Analysis on Mes- $\beta$ - Scale Rainstorm and Hails on the Eastern Border of Maowusu Desert

Jing Xi<sup>1</sup>, Tu Nini<sup>2</sup>, Jing Yu<sup>3</sup>, Wan Hongwei<sup>1</sup> and Kang Lei<sup>1</sup>

(1. Yulin Meteorological Bureau of Shaanxi Province, Yulin 719000, China;

2. Chengdu Institute of Plateau Meteorology, Chengdu 610071, China;

3. College of Atmosphere Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The process of a strong convective weather occurred on September 20, 2006 on the eastern border of Maowusu desert is analyzed by use of observation data and Doppler Radar data. The results show that the hail and rainstorm are cause by two blocks of mes- $\beta$ - scale strong convective cells. The formation of mes- $\beta$ - scale “ $\Omega$ ” system provides a favorable condition for concentrating and releasing energy. The formation of low-value tongue in ground energy creates a trigger mechanism for strengthening convective weather. Before the hail and rainstorm, the coupling of strong vorticity and divergence generates the secondary circulation system and provides the dynamical mechanism for the generation and development of the hail storm. The combination of both wet barotropy field and wet baroclinity field on the equal pressure surface of 850 hPa and three-dimensional structure of MPV are the meaningful indicator of occurring of hail and rainstorm. At the field of Doppler Radar speed, a meso-cyclone originates before the strong hail storm in lower troposphere and a meso-aticyclone forms behind the strong hail storm in lower troposphere. The divergence occurs in higher troposphere and the characteristics of the super cell are evident.

**Key words:** Maowusu desert; MPV; mes- $\beta$ - scale rainstorm; hail