

# 强单体雹暴的研究

王昂生 徐乃璋

(中国科学院大气物理研究所)

## 提 要

若干强单体雹暴只在地面降下小而弱的雹块,这一事实已在中国发现。作者核对了发生于中国、美国、加拿大和英国等地的23个强单体雹暴,其中也有类似事实。虽然这些雹暴具有典型的强单体风暴结构,即前悬回波、弱回波区和回波墙,但它们却没有造成严重的灾害。最后,我们给出了三类强单体雹暴,并讨论了这一新现象的成因。

## 一、引 言

强单体(国外亦称超级单体)雹暴是冰雹风暴中的一种类型,它是很重要的。它的特征是它有一支强烈的上升气流,只有一个大的单体,并常降下成灾冰雹等。强单体雹暴具有一个典型的前悬回波、弱回波区和回波墙。由于强单体雹暴常造成地面严重的农业灾害,也由于人工防止这类冰雹十分困难<sup>[1,2]</sup>,所以近20年来,很多科学家注意了强单体雹暴的研究。K. A. Browning 和 G. B. Ludlam (1962)<sup>[3]</sup>研究了英国的 Wokingham 雹暴; C. M. Newton (1967)<sup>[4]</sup>, K. A. Browning (1964, 1965)<sup>[5,6]</sup>, J. D. Marwitz (1972a)<sup>[7]</sup>, K. A. Browning 和 G. B. Foote (1975)<sup>[8]</sup>等人研究了若干美国的强单体雹暴; Г. К. Сулаквелидзе (1967)<sup>[9]</sup>给出了苏联某些雹暴的研究结果; A. J. Chishalm (1968)<sup>[10]</sup>, J. D. Marwitz (1972a)<sup>[7]</sup>提供了不少加拿大强单体雹暴资料;王昂生和洪延超等(1978)<sup>[10]</sup>,黄美元和王昂生(1980)<sup>[11]</sup>,以及杨颂喜等人(1980)<sup>[12]</sup>研究了若干中国的强单体雹暴,等等。虽然我们已知世界上已经公布的强单体雹暴资料有30多个,但它们多数都只作为个例研究,所以这方面尚有许多问题需要深入研究。

近十年来,许多人都相信强单体雹暴将强烈降雹于地面并造成严重雹灾。某些防雹理论(如过量撒播原理)也是依据强单体雹暴模式提出的<sup>[8,12]</sup>。识别冰雹云与雷雨云也应用了上述论点<sup>[2,12]</sup>。遗憾的是,上面用的结论“一个具有前悬回波、弱回波区和回波墙的风暴毫无疑问是强单体雹暴并会造成严重雹灾”并没有得以证实,故是一个大问题。

有趣的是我们给出了一个典型的强单体雹暴(即1980年6月20日北京雹暴),它却仅降了小而弱的雹块<sup>[13,14]</sup>。在这一研究之后,我们又发现了几个类似北京雹暴的雹暴。现在我们核对了世界上大约30个强单体雹暴,不过其中只有23个有我们所需的资料。以

下我们将研究它们。

## 二、雹云的分类和它们的降雹

首先,我们把雹云分类研究的结果给出来<sup>[10,15]</sup>。根据我们的研究,冰雹云分成五类,即强单体(亦称超级单体)雹云、弱单体雹云、传播雹云、点源雹云和多单体雹云<sup>[15,16]</sup>,我们的结果是依据自 1975 到 1977 年在山西昔阳获得的 42 个雹云<sup>[10]</sup>及 1977、1979、1980 和 1982 年在新疆获得的 57 个雹云<sup>[17]</sup>做出的。在表 1 中,我们给出了各类雹暴的统计结果。

表 1 山西昔阳和新疆雹云分类统计结果

| 雹暴<br>例子<br>地点和时间       | 强(超级)<br>单体 | 弱单体  | 传 播 | 点 源 | 多单体  | 总 计   |
|-------------------------|-------------|------|-----|-----|------|-------|
| 昔阳(1975—1977)           | 5           | 14   | 3   | 1   | 19   | 42    |
| 新疆(1977,1979,1980,1982) | 4           | 21   | 6   | 4   | 22   | 57    |
| 总 数                     | 9           | 35   | 9   | 5   | 41   | 99    |
| 出现百分比(%)                | 9.1         | 35.4 | 9.1 | 5.0 | 41.4 | 100.0 |

在这里的 99 个冰雹云中,只有 9 个强单体雹云,即占 9.1%。在五类雹云中,多单体雹云出现最频繁,占 41.4%。其后次序是弱单体。传播雹云或强单体雹云,最后为点源雹云,如表 1 所示,分别占 35.4%,9.1%,9.1% 及 5.0%。当我们给出它们的灾情时,这就更有意思了。在表 2 里,我们列出各类雹暴的出现百分比  $M$  和它们的灾情百分比  $D$  (即各类雹暴的灾害与总受灾值之比)。最后还给出  $P = D/M$ , 它表示对各类雹云平等来看,任何一类雹云出现总雹云次数的 1% 时,其灾害占总灾害值的百分值。由  $P$  值可看到,强单体雹云危害最大,  $P = 7.14\%$ , 即平均而言,当有占总雹云次数 1% 的强单体雹云出现时,它产生的灾害为总灾害的 7.14%, 即远大于平均值 (1%)。其后依次为点源 (2.0%)、

表 2 各类雹暴的灾害情况

| 雹暴<br>结果<br>灾 情 | 强(超级)<br>单体 | 弱单体  | 传 播  | 点 源 | 多单体  | 合 计   |
|-----------------|-------------|------|------|-----|------|-------|
| 灾情序号            | 1           | 5    | 3    | 2   | 4    |       |
| 雹暴出现百分比 $M(\%)$ | 9.1         | 35.4 | 9.1  | 5.0 | 41.4 | 100.0 |
| 灾害的百分比 $D(\%)$  | 65          | 5    | 12   | 10  | 8    | 100   |
| 灾害权重值 $P = D/M$ | 7.14        | 0.14 | 1.32 | 2.0 | 0.19 |       |

传播 (1.32%)、多单体 (0.19%) 和弱单体 (0.14%) 雹暴。平均而言,强单体雹暴的危害比弱单体雹暴大 50 倍以上。所以,很多科学家关注并研究它是必然的。

### 三、强单体雹暴的特征和模式

强单体雹暴的特征和模式已有好些人提出,如 K. A. Browning (1964)<sup>[12]</sup>, Г. К. Сулаквелидзе (1967)<sup>[13]</sup>, J. D. Marwitz (1972a)<sup>[17]</sup>,王昂生和黄美元(1978)<sup>[18]</sup>,等等。为了便于下边的研究,我们有必要把以上各种模式的共同之处归集在一起,并绘在图 1 上。

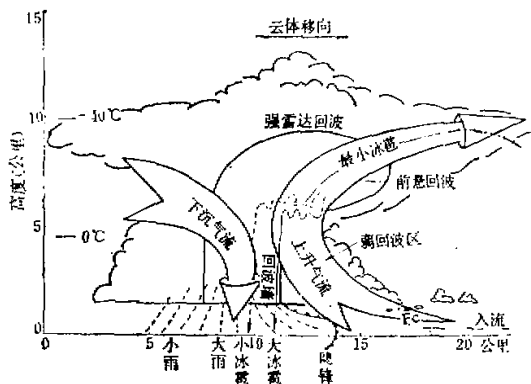


图 1 强(超级)单体模式

强单体雹暴仅由一个很大的单体构成。它不同于其它由二个及更多单体构成的传播、点源及多单体雹云。弱单体雹云虽然也是由一个单体组成,但其尺度小而强度弱,结构也不相同<sup>[19]</sup>,如图 1 所示,强单体雹暴有一对强烈而有组织的上升气流和下沉气流环持续并存。由于这一气流结构的支托,风暴稳定而持续,象 Fleming 雹暴竟持续了 9 小时之久<sup>[21]</sup>,弱单体雹暴只有直立对称的柱状结构,与之差别明显。

强单体雹暴具有某些典型的雷达回波特征。如图 1 所示,它具有突出的前悬回波、弱回波区和回波墙;有时在低层区会出现钩状或指状之类的特殊形态回波。它运动时,常移向风向的右侧,移速较快。此外,如上节所述,它出现较少,但灾害严重。

### 四、一次强单体雹暴只降下小而弱的冰雹

1980 年 6 月 20 日,我们在北京用 5 公分雷达(713 型)详细地探测了一个典型的强单体雹云<sup>[23,24]</sup>。它的典型 RHI 多层显示图片给在图 2 上,这里我们可以看到一个突出的穹窿在图中央,它具有前悬回波、弱回波区和回波墙。这说明在穹窿区有一股有组织的上升气流,它们支撑着冰雹增长。云体是自右向左移动的。

作为对比,我们在图 3 中给出两个雹暴,即上边的中国北京雹暴(1980 年 6 月 20 日, 16 时正)及下边的美国 Fleming 雹暴(1972 年 6 月 21 日 16 时 30 分)。它们的水平和垂直尺度是 1:1 的。由图可见,两个雹暴都是强单体雹暴,十分相似,尺度也差不多。但是,美国的 Fleming 雹暴的生命史达 9 小时,移程 450 多公里,雹迹长达 250 多公里,并在地面



图2 1980年6月20日北京雹暴的典型 RH1 回波图片  
水平距标: 20 公里垂直距标: 5 公里方位角:  $324^{\circ}$

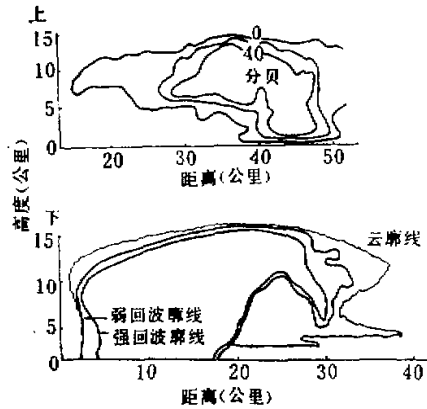


图3 两个强烈强单体雹暴的比较  
a. 中国的北京雹暴(1980年6月20日16时00分) b. 美国的 Fleming 雹暴(1972年6月21日16时30分)。

造成严重灾害, 最大冰雹直径有 7—8 厘米<sup>[29]</sup>。但当北京雹暴具有典型的强单体结构的一个多小时里, 只降下小而弱的冰雹, 危害很小<sup>[10]</sup>。

我们对这一现象十分感兴趣, 因为它与以前的个例不同, 表明可能某些强单体雹暴也会降小而弱的冰雹, 说明这类雹云情况也很复杂。当然, 要说明这一问题还应找到更多的例子并核实已有的资料。

## 五、各国强单体雹暴的统计结果

现在我们收集了 23 个强单体雹暴, 它们基本具有本研究所需的详细资料。其中 10 个取自英国、美国和加拿大, 另外 13 个取自中国。西方国家的强(超级)单体雹暴包括 Fleming 雹暴(1972 年 6 月 21 日)<sup>[10]</sup>; Oklahoma 雹暴(1963 年 5 月 26 日)<sup>[61]</sup>; Geary 雹暴(1961 年 5 月 4 日)<sup>[49]</sup>; Wokingham 雹暴(1959 年 7 月 9 日)<sup>[51]</sup>; Centennial 雹暴(1967 年 6 月 29 日)<sup>[120]</sup>; Graver 雹暴(1970 年 6 月 18 日)<sup>[71]</sup>; Morgen 雹暴(1970 年 6 月 15 日)<sup>[21]</sup>; Alberta 雹暴(1968 年 7 月 28 日)<sup>[20]</sup>; Canada 雹暴(1968 年 7 月 25 日)<sup>[20]</sup>以及 Kast 雹暴(1974 年 7 月 28 日)<sup>[19]</sup>等。

中国的强单体包括 1973 年 8 月 8 日, 1976 年 7 月 9 日, 1976 年 7 月 12 日和 1977 年 7 月 1 日等四个昔阳雹暴<sup>[2, 10, 12]</sup>; 也包括 1973 年 9 月 20 日, 1974 年 6 月 12 日, 1974 年 6 月 29 日及 1980 年 6 月 20 日等四个北京雹暴<sup>[22, 13]</sup>; 1973 年 9 月 4 日的永登雹暴<sup>[22]</sup>; 1975 年 6 月 6 日<sup>[23]</sup>及 1976 年 6 月 4 日<sup>[11]</sup>的平凉雹暴; 以及 1977 年 8 月 6 日和 1979 年 9 月 12 日等新疆雹暴<sup>[24]</sup>等。

应当说明, 我们虽然还找到了一些强单体雹暴, 但因为缺少我们所需的某些详细资料而没有采用。当然, 世界各地还有一些强单体雹暴, 但我们没有掌握它们的资料, 所以没

表 3 强单体雹云的三种类型

| 类 别   |    | 1                                             |    |                    |                  | 2                                      |                    |                  | 3                       |                    |                  |
|-------|----|-----------------------------------------------|----|--------------------|------------------|----------------------------------------|--------------------|------------------|-------------------------|--------------------|------------------|
| 冰雹和灾情 |    | 灾害很严重,雹灾面积在万亩以上;或有龙卷出现;或 $D_{max} \geq 3cm$ . |    |                    |                  | 有灾,但雹灾面积在万亩以下,或 $D_{max} \sim 1-3cm$ . |                    |                  | 轻灾或 $D_{max} < 1-2cm$ . |                    |                  |
| 特 征   |    | 大的有界弱回波区<br>(大的 BWER)                         |    |                    |                  | 小的有界弱回波区<br>(小的 BWER)                  |                    |                  | 无界弱回波区<br>(UWER)        |                    |                  |
| 国家    | 项目 | 总次数                                           | 次数 | $\bar{V}_{(km^3)}$ | $\bar{H}_{(km)}$ | 次数                                     | $\bar{V}_{(km^3)}$ | $\bar{H}_{(km)}$ | 次数                      | $\bar{V}_{(km^3)}$ | $\bar{H}_{(km)}$ |
| 西方各国  |    | 10                                            | 5  | 158.5              | 9.0              | 3                                      | 31.7               | 7.3              | 2                       | 0                  | —                |
| 中 国   |    | 13                                            | 3  | 41.5               | 4.7              | 6                                      | 4.1                | 4.4              | 4                       | 0                  | —                |
| 平 均   |    | 23                                            | 8  | 108.5              | 7.4              | 9                                      | 9.4                | 5.4              | 6                       | 0                  | —                |

说明:  $\bar{V}$  为雹体的平均体积;  $\bar{H}$  为雹体的平均顶高。

有列入。从统计情况(见表 3),可以看到中国资料与西方间有一定差异,这可能是自然差异;但也可能是西方选出的多半是有名的、典型的和强烈的,而中国的则较为普通;故选择的代表性有差别而致。然而,现在我们还不能按照同一标准去挑选它们,这不能不说是一个不足之处。

根据我们的上述资料,研究了强单体雹暴及其降雹(雹灾)。可以发现,虽然所有的强单体雹暴都拥有前悬回波、弱回波区和回波墙,但它们的降雹危害却是有所不同的。有的强单体雹暴造成了非常严重的灾害,但也有的灾害轻微,而不都是非常严重。如果依据雹灾情况去区分冰雹云的话,强单体雹云也可分成三类。

表 3 里给出了强单体雹暴的三种类型。第一种强单体雹云造成严重灾害(即受灾万亩以上),或降下最大尺度在 3 厘米以上的冰雹,或者有龙卷发生。第二类强单体雹云造成万亩以下灾害,或降有最大尺度在 1—3 厘米的冰雹。第三类则造成轻灾,冰雹尺度在 1—2 厘米以下。对所用的 23 次强单体雹云统计(见表 3),表明虽然严重成灾及成灾的为多(各占 8 次及 9 次),但也有 6 次为轻灾。就中国与两方几国资料来看,大体趋势是一致的,说明强单体雹暴情况也仍较复杂。

上述统计结果告诉人们,虽然依据统计资料(参见表 2)说明强单体雹云是造成灾害最严重的一类雹云,但也并非每一块云体均如此,也有部分只造成较轻灾害,就象 1980 年 6 月 20 日北京雹暴一样<sup>[24]</sup>。表 3 这一统计结果支持了我们这一新观点,即具有前悬回波、弱回波区和回波墙的强单体雹云也有一些只降下小而弱的冰雹,这是与十多年来流行观点所不同的<sup>[7]</sup>。当然,我们仍然认为,在各类冰雹云中,强单体雹云是造成雹灾的主要类别(见表 2)。

现在我们所关心的是为什么强单体雹云三个类别有所不同?

在北京雹云个例中,我们曾讨论了上升气流、水汽凝成物场、云与环境温度的配置和环境风切变等四个因子,由于只是个例难以得出结论<sup>[25]</sup>。现在,我们采用上述 23 个雹云再次讨论这一问题。我们的研究指出:有组织的强烈上升气流在各要素中最为重要,它的表征就是图 1—3 中显示出的穹窿区域。对应于强单体雹暴的三个类型,我们已经发现

在雷达回波特征中对应地有三种弱回波区(WER),即大的有界弱回波区(BWER),小的有界弱回波区(bWER),和无界弱回波区(UWER)(见表3)。我们测量了雹暴穹窿的长度、宽度和高度,近似地把它视为半椭球体去计算穹窿体积。十分显然,无界弱回波区雹云没有穹窿悬空,所以  $V = 0$ 。统计表明 8 个大的有界弱回波区的平均体积为  $108.5\text{km}^3$ ,它们远大于小的有界弱回波区的平均体积( $9.4\text{km}^3$ )。可见三类 WER 差别明显。对应的平均穹窿顶高差别也是清楚的。再对比一下中国与西方的测量值,它们的趋势是一致的,但就对应各项来说,西方的测值均大于中国的,这可能与选取雹暴来源有关,当然也可能西方强单体雹暴的上升气流的确强于我国。

一般来说,有组织的上升气流造成弱回波区<sup>[7,21]</sup>;当它相当强时,就造成穹窿,出现有界弱回波区;它愈强时,BWER 区愈大。表 3 资料表明  $\bar{V}_1 > \bar{V}_2 > \bar{V}_3$  (下标为雹云类型),它说明大的有界弱回波区(第一类)内的有组织上升气流强于第二类(小的 BWER),它们又强于第三类(UWER)的。众所周知,当上升气流愈强时,雹云中形成的冰雹也愈大,所以一般雹灾也愈严重。这正好解释了表 3 中三类强单体雹云的统计结果(穹窿平均体积与平均穹窿顶高)与灾情的一致性。第一类强单体雹云(大的有界弱回波区雹云)的  $\bar{V}$  最大( $108.5\text{km}^3$ ),对应  $\bar{H}$  最高( $7.4\text{km}$ );这说明它们具有最强的上升气流活动,因而最有利于大冰雹形成。实际的雹灾也是最为严重(万亩以上受灾),且降下的雹块也是各类中最大的( $D_{\max} > 3$  厘米)。与此相反,第三类强单体雹云(无界弱回波区雹云)则相对最弱。

## 六、结 论

根据我们的研究,可以得到以下结论:

1. 强单体雹暴仅由一个大的单体组成。它有一对互为依托的有组织的上升气流和下沉气流为其气流骨架。前悬回波、弱回波区和回波墙是强单体雹暴具有的典型雷达回波特征。
2. 我们的统计资料指出,强单体雹暴出现较少(在 99 次雹暴中,仅出现了 9 次),但是它们造成的雹灾却是严重的(在五类雹云总灾害中占 65%)。

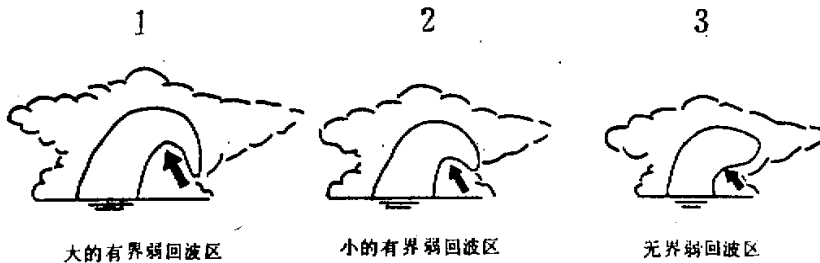


图 4 三类强单体雹暴的模式

3. 虽然许多强单体雹暴造成了相当严重的雹灾,但仍有一些强单体雹暴只造成了较轻的灾害。本文给出三类强单体雹暴,即大的有界弱回波区雹暴、小的有界弱回波区雹暴

以及无界弱回波区雹暴。研究表明由有组织的上升气流所确定的弱回波区特征与雹灾密切相关。

4. 图 4 给出了三类强单体雹暴的模式(自左至右分别为 1, 2 和 3 类)。三类强单体雹暴的主要差别在于如表 3 及图 4 所示的弱回波区的不同, 即大(1 类)或小(2 类)的有界弱回波区, 以及无界弱回波区; 这些特征决定了它们造成雹灾的差别(见表 3)。

### 参 考 文 献

- [1] Browning, K. A., and G. B. Foote, Airflow and hail growth in supercell storms and some implication for hail suppression. NIRE Tech. Report No. 75/1. 75, 1975.
- [2] 黄美元、王昂生, 人工防雹导论, 科学出版社, 北京, 204 页, 1980.
- [3] Browning, K. A. and F. H. Ludlam, Airflow in convective storms. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 88, 117—135, 1962.
- [4] Newton, C. M., Severe convective storms. *Advance in Geophysics*, 12, 257—308, 1967.
- [5] Browning, K. A., Airflow and precipitation trajectories within severe local storms which travel to the right of the winds. *J. Atmos. Sci.*, 21, 634—639, 1964.
- [6] ———, Some inferences about the updraft within a severe local storm. *J. Atmos. Sci.*, 22, 669—677, 1965.
- [7] Marwitz, J. D., The structure and motion of severe hailstorms. Part 1: Supercell storms. *J. Appl. Meteor.*, 11, 166—179, 1972a.
- [8] Сулаквелидзе, Г. К., Ливневые осадки и Град. Гидрометеониздат. Л. 412, 1967.
- [9] Chisholm, A. J., Observation by 10cm radar of an Alberta hailstorm in sheared environment. 13th Conf. on Radar, Meteorology. AMS, 1968.
- [10] 王昂生、洪延超等, 1978: 昔阳冰雹云物理研究, 全国人工影响天气科学技术会议, 南宁, 本文载于大气物理研究所集刊, 第十二期, 冰雹和人工防雹研究. 科学出版社, 66—76 页, 1983.
- [11] Yang Song-Xi *et al.*, (杨颂禧等), 1980: Analysis of the echoes and the hailstone microstructure of a supercell hailstorm. 8th International Conf. on Cloud Physics, Clermont-Ferrand, France. July 15—19, 1980. 303—306.
- [12] 大气所雷达组, 雷达探测冰雹云. 科学出版社, 北京, 220 页, 1981.
- [13] Wang Angsheng (王昂生) and Xu Naizhang (徐乃璋), Beijing hailstorm probing by using 5cm radar. 21st Conf. on Radar Meteorology. Edmonton, Alta, Canada, 1983a.
- [14] 王昂生、徐乃璋, 强烈雹暴结构和降雹. 大气科学, 7, 95—101, 1983b.
- [15] Wang Ang-Sheng (王昂生), Radar application on research work of Cloud Physics. 21st Conf. on Radar Meteorology. AMS. Edmonton, Alta, Canada, 1983.
- [16] Wang Angsheng (王昂生), Xu Naizhang (徐乃璋) and Huang Meiyuan (黄美元), On the characteristics of the physical processes of hailcloud. 8th International Conf. on Cloud Physics. Clermont-Ferrand, France July 15—19, 1980. 519—522, 1980.
- [17] 施文全、王昂生, 新疆冰雹云的结构和分类. 中国气象学会强对流天气会议, 合肥, 1981.
- [18] 王昂生、黄美元, 冰雹和防雹研究述评. 大气科学, 2, 76—84, 1978.
- [19] Foote, G. B., C. G. Wade and K. A. Browning, Air motion and hail growth in supercell storms. 9th Conf. on severe local storms. AMS. 444—451, 1975.
- [20] Chisholm, A. J., Alberta hailstorms. Part 1: Radar case studies and airflow models. *Meteor Monograph.*, 14(36), 1—36. 1973.
- [21] Marwitz, J. D., The structure and motion of severe hailstorms. Part 3: Severely sheared storms. *J. Appl. Meteor.*, 11, 189—201, 1972b.
- [22] 甘肃省气象研究所, 冰雹云结构探讨. 全国人工影响天气科学技术会议. 南宁, 1978.
- [23] 兰州高原大气所雷达组, 一次雹暴特征随时间演变分析. 大气科学, 1976, No. 2. 62—69, 1976.
- [24] 施文全、杨炳华、张清、王昂生, 雹云低层入流区的测定和雷达判别. 高原气象, 2, 58—63, 1983.

## THE STUDIES OF STRONGCELL HAILSTORMS

Wang Angsheng Xu Naizhang

*(Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica)*

### Abstract

Some strongcell (supercell) hailclouds from which only small hailstones fall on the ground have been found in China. Authors have checked 23 strongcell hailstorms which happened in the countries of China, America, Canada and England etc., and pointed out that some strongcell hailclouds only caused light damage on the ground. Although those storms had typical echo structures of strongcell hailstorms, i.e. an overhang echo, weak echo region and echo wall, they did not cause heavy damage. Finally, three kinds of strongcell hailclouds are given, and the causes of the new phenomenon are discussed.