

copyright © 2021 | Photo by: Range四方

# 宁波两次下击暴流多普勒雷达 演变特征对比和数值模拟研究

∞

顾小丽 宁波市气象台

宁夏·银川

2023年8月

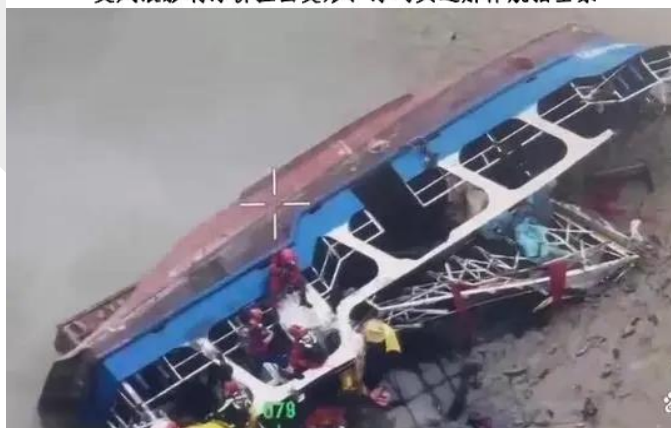
2021.7.14 20:13

经典型超级单体雷暴-The Classic Supercell Thunderstorm  
内蒙古包头市达茂旗-Damao Banner of Inner Mongolia in China

# 两次下击暴流灾害影响



受风浪影响浮桥扭曲变形、浮码头遭解体航拍全景



- ◆ 2022年7月12日下午，宁波出现下击暴流，鄞州国家站出现13级极端强风，导致地铁3号线出入口顶棚覆盖层被掀翻（称“7·12”过程）。
- ◆ 2022年7月17日宁波象山港翡翠湾一带受到下击暴流袭击，发生11~12级大风，一艘停靠在码头的休闲渔船被吹翻、引桥被吹断，造成严重人员伤亡（“7·17”过程）。
- ◆ 雷暴大风预报预警时效短，防御难度大，潜势预报难度更大。



# 汇报内容

CONTENTS

一

过程概况和环流背景分析

二

下击暴流的地面气象要素特征

三

多普勒雷达演变特征对比

四

“7·17”下击暴流数值模拟分析

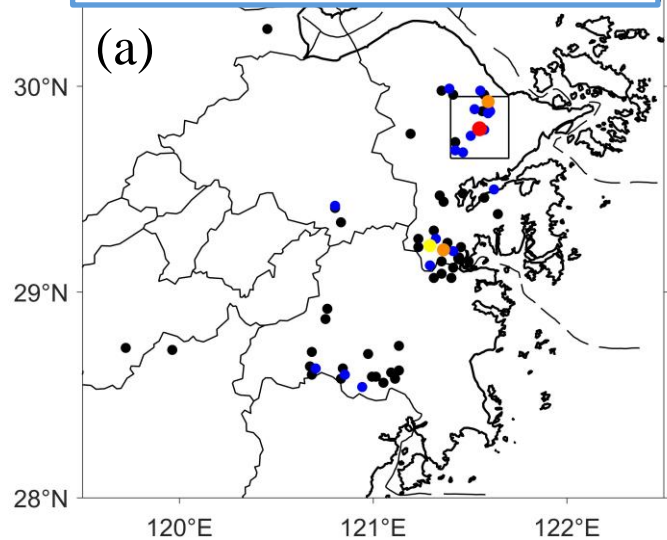
五

总结和思考

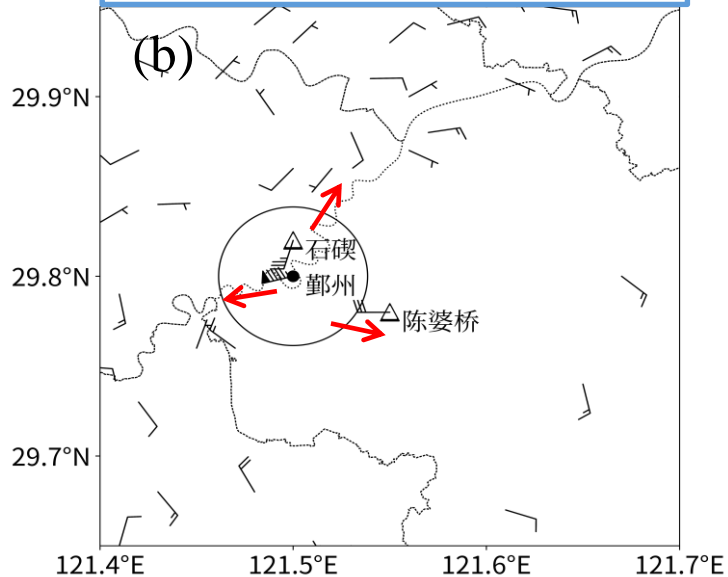


# 一、过程概况和环流背景分析

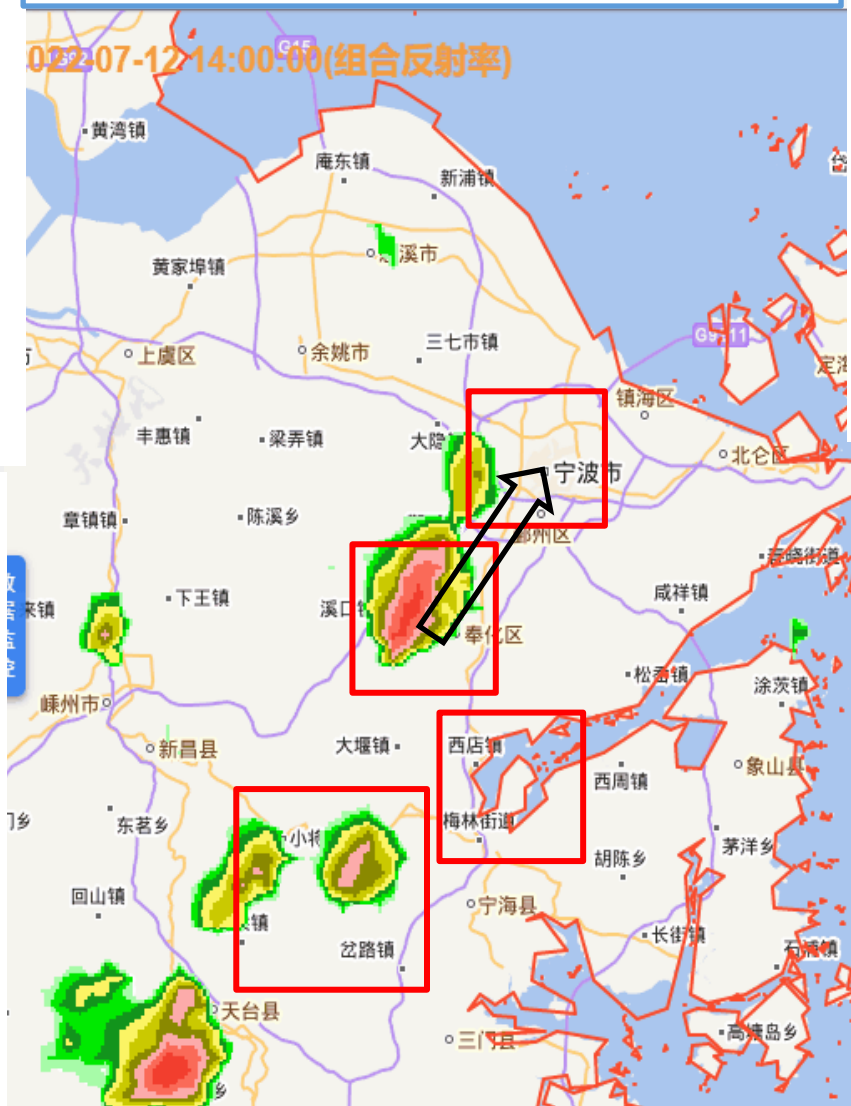
## 7月12日8级以上极大风分布



## 7月12日14:51大风分布



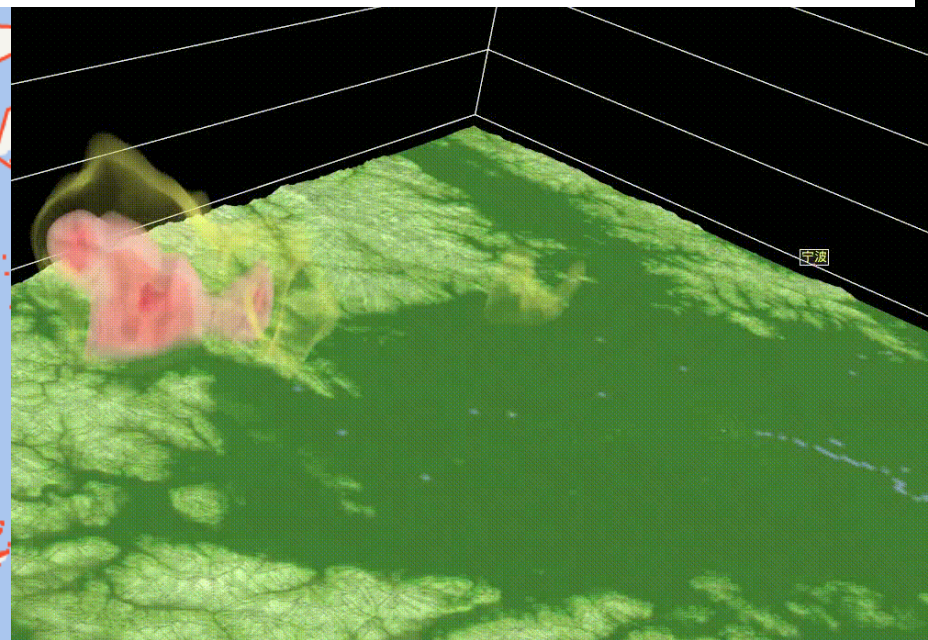
## 组合反射率演变



## 1 过程概况—“7·12”过程

- 12日14-18时，浙江东部出现分散性强对流，以雷暴大风、短时强降水为主，局地10 mm左右的冰雹。
- 有4站风力10级及以上，发生在宁波，鄞州站测得13级大风。

## 雷达反射率因子三维演变

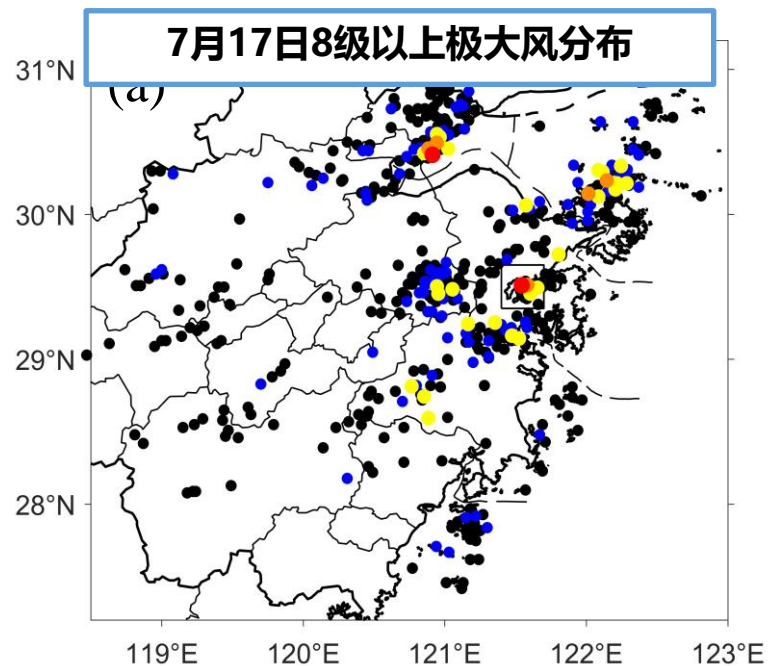




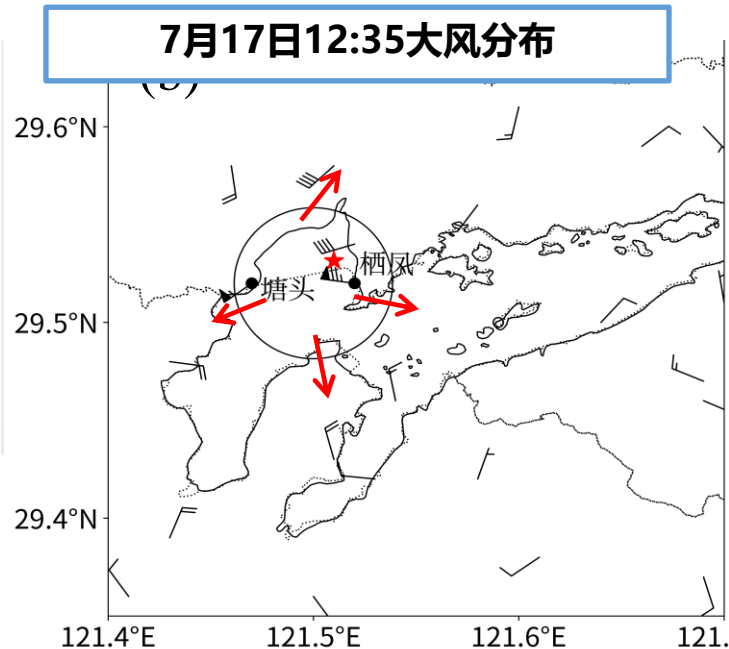
# 1 过程概况——“7·17”过程

- 7月17日午后，江苏中南部、安徽南部和浙江出现大范围雷雨大风和短时强降水等强对流天气，浙江413个测站8级以上雷暴大风，33站10级以上的雷暴大风。
- 影响宁波的强对流分为两个阶段：（1）12—14时本地生成，8~12级雷暴大风和短时强降水。象山港翡翠湾附近11~12级大风。（2）浙江西北部生成的对流单体东移，17:00移至浙江东部并发展成线状对流，影响宁波到温州北部一带，浙江大部分地区出现8~10级雷雨大风。

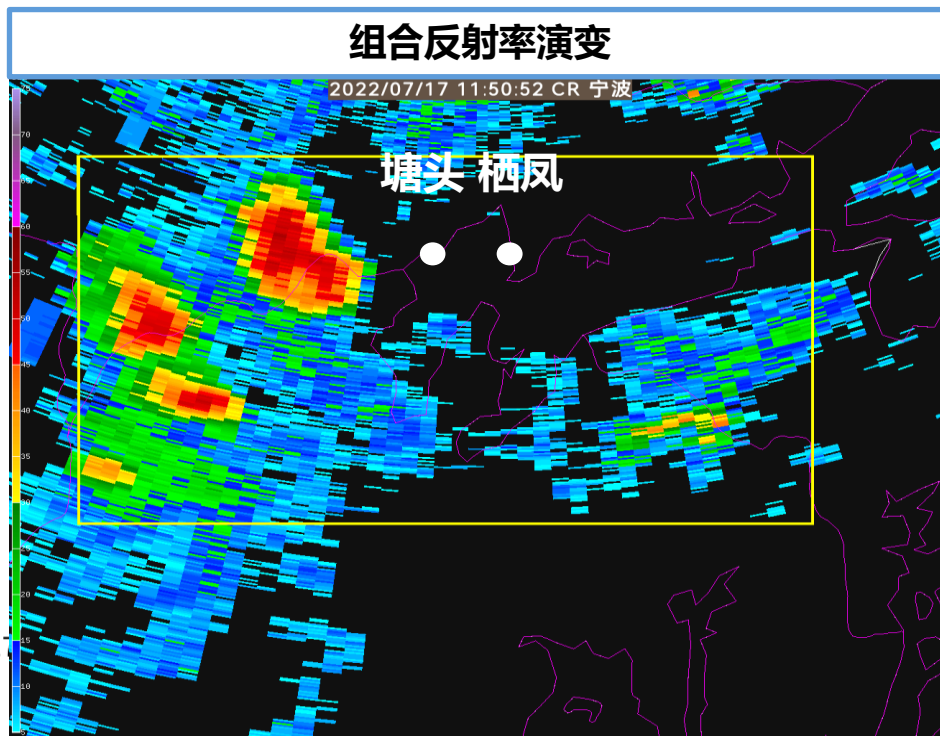
7月17日8级以上极大风分布



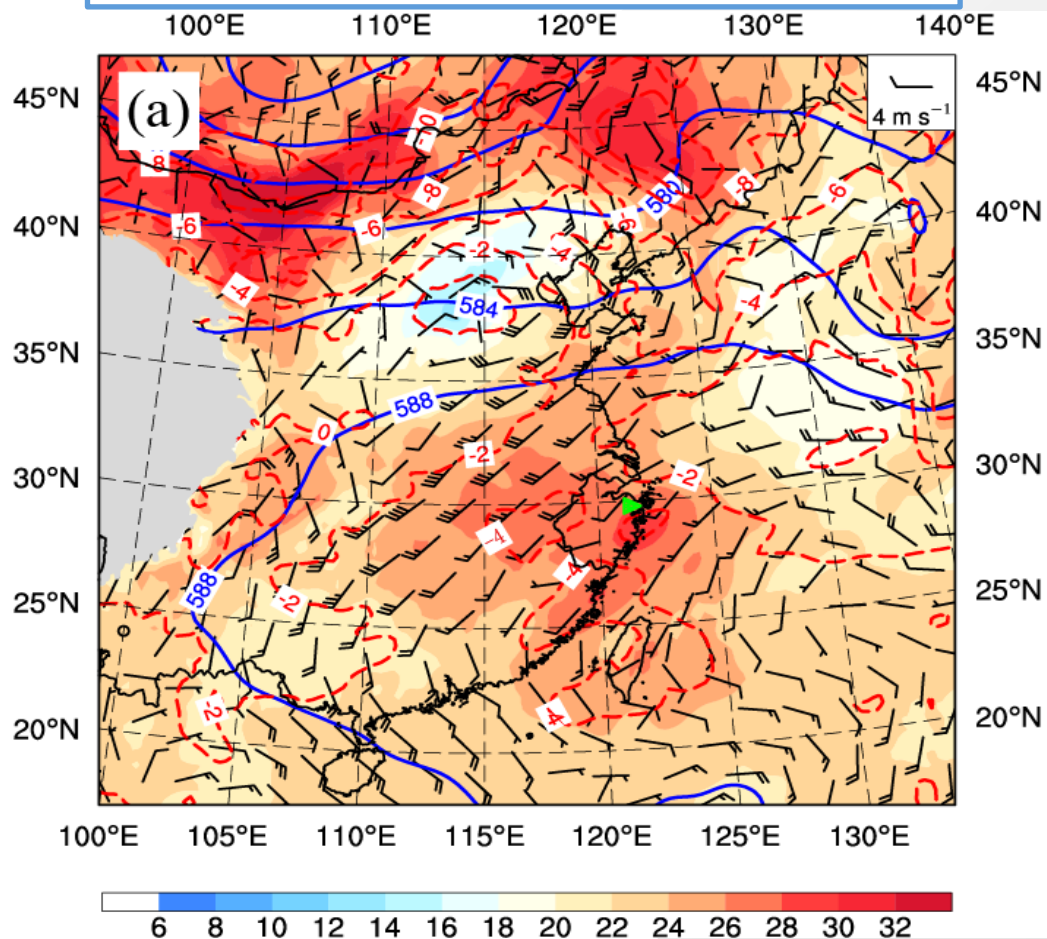
7月17日12:35大风分布



组合反射率演变



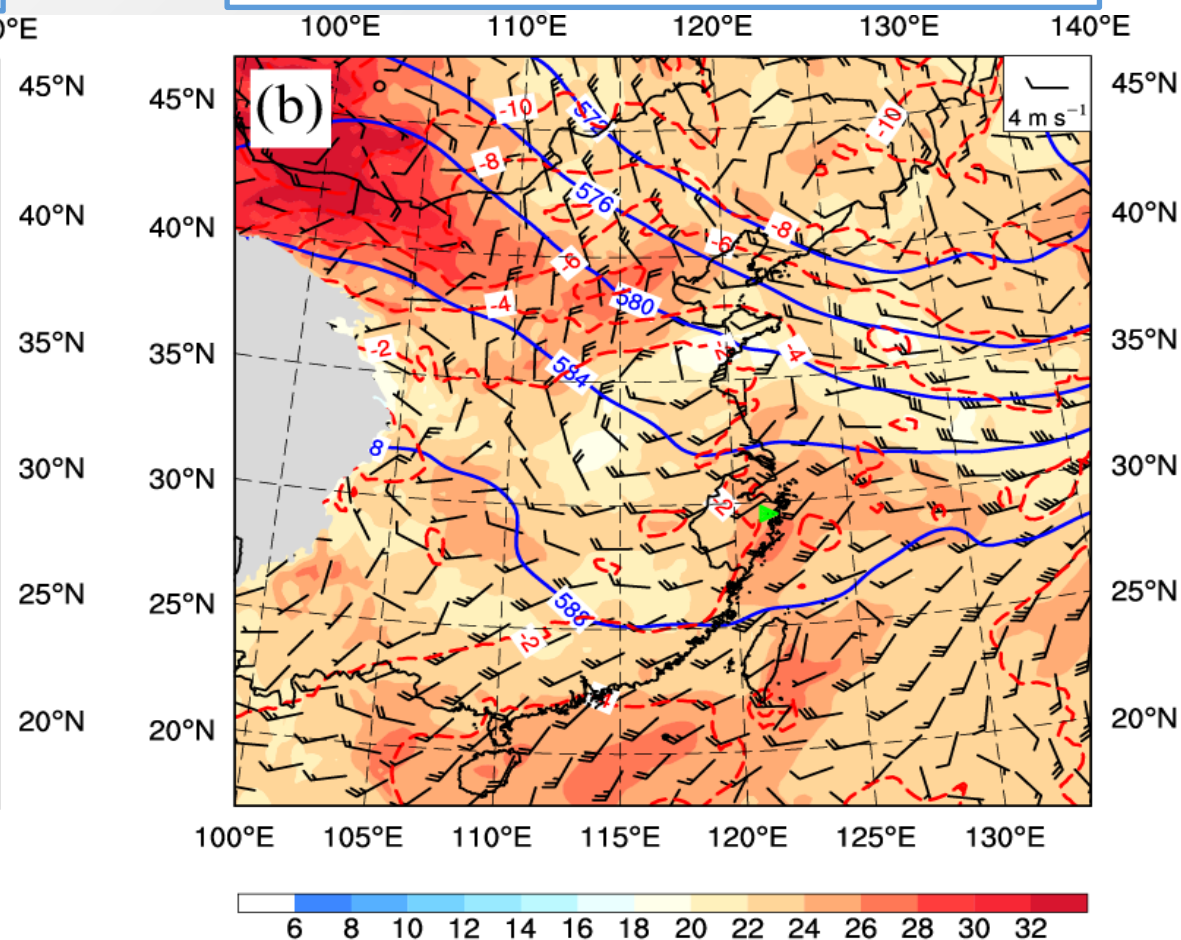
7月12日8时ERA5客观分析



## “7·12” 过程

- 副热带高压控制
- 弱强迫
- 弱的垂直风切变
- 有利的热力抬升
- 中层弱冷空气渗透
- 潜势预报难度大

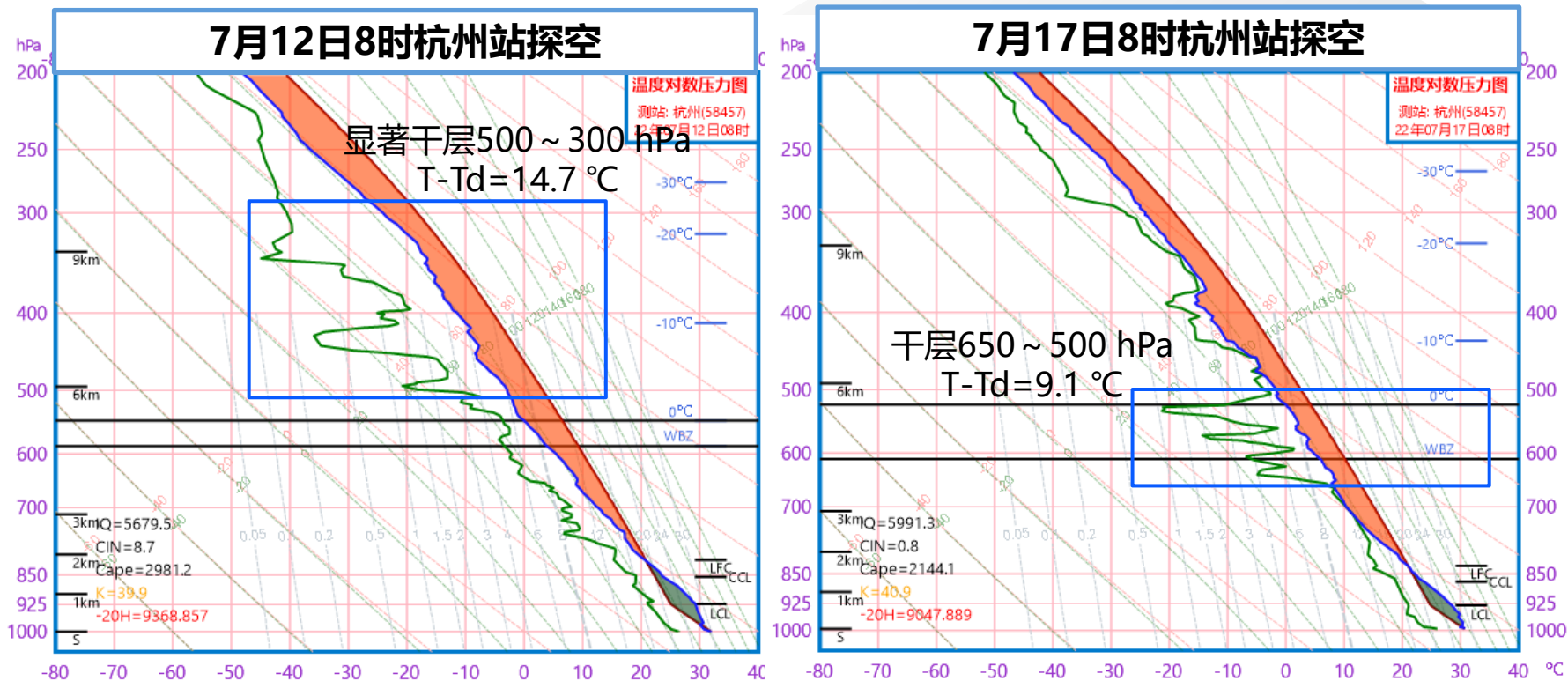
7月17日8时ERA5客观分析



## “7·17” 过程

- 高空槽影响
- 动力强迫抬升作用强
- 中等强度的垂直风切变
- 上干冷下暖湿的垂直结构
- 可预报性更强



◆ **共同点:**

- 强热力不稳定
- 双CAPE高值
- 较低的抬升凝结高度
- 明显的中层干层
- 较高的0~3 km的 $\gamma$
- 有利的低层水汽条件

◆ **差异性:**

- “7·12” 过程上干下湿形态，干层更高、更厚、更强，符合脉冲风暴发展有利条件，实况出现更强风力的主要原因。
- “7·17” 过程干层在650~500 hPa的中层，低层水汽充沛。

日期	CAPE/ ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	LI/ ( $^{\circ}\text{C}$ )	K/ ( $^{\circ}\text{C}$ )	0~3km垂直风切变/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	0~6km垂直风切变/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	0~3km垂直温度递减率/ ( $^{\circ}\text{C}/\text{km}$ )	$T_{850-500}$ / ( $^{\circ}\text{C}$ )
12日	2981	-6	40	5	3	6.5	26.4
17日	2144	-4	41	8	10	6.8	23.8

下沉对流有效位能:  $DCAPE = \int_{p_1}^{p_n} R_d(T_s - T_p) d \ln p$

大风指数:  $WINDEX = 5[H_M R_Q(\Gamma^2 - 30 + Q_L - 2Q_M)]^{0.5}$

混合微下击暴流指数:  $HMI = \Gamma + (T - T_d)_{850} - (T - T_d)_{670}$

微下击暴流日潜势指数:  $MDPI = \frac{Max\theta_{se}(sfc-850) - Min\theta_{se}(670-500)}{Cons}$

日期	DCAPE/ (J·kg <sup>-1</sup> )	WINDEX/ (m·s <sup>-1</sup> )	HMI	MDPI	SWEAT
12日	1436	28.5 (10级)	4.3	1.1	275
17日	1057	22.4 (9级)	8.1	1.2	314
本地阈值	1000	17.2	<8 不可能 [8 24]有可能 >24 高风险	1	275

HMI风险等级 (Pryor, 2006)

### ◆ 雷暴大风和下击暴流指数

■ **DCAPE** > 1000 J/kg, 下沉运动动能大

■ **WINDEX**分别达10级和9级, 潜势预报参考

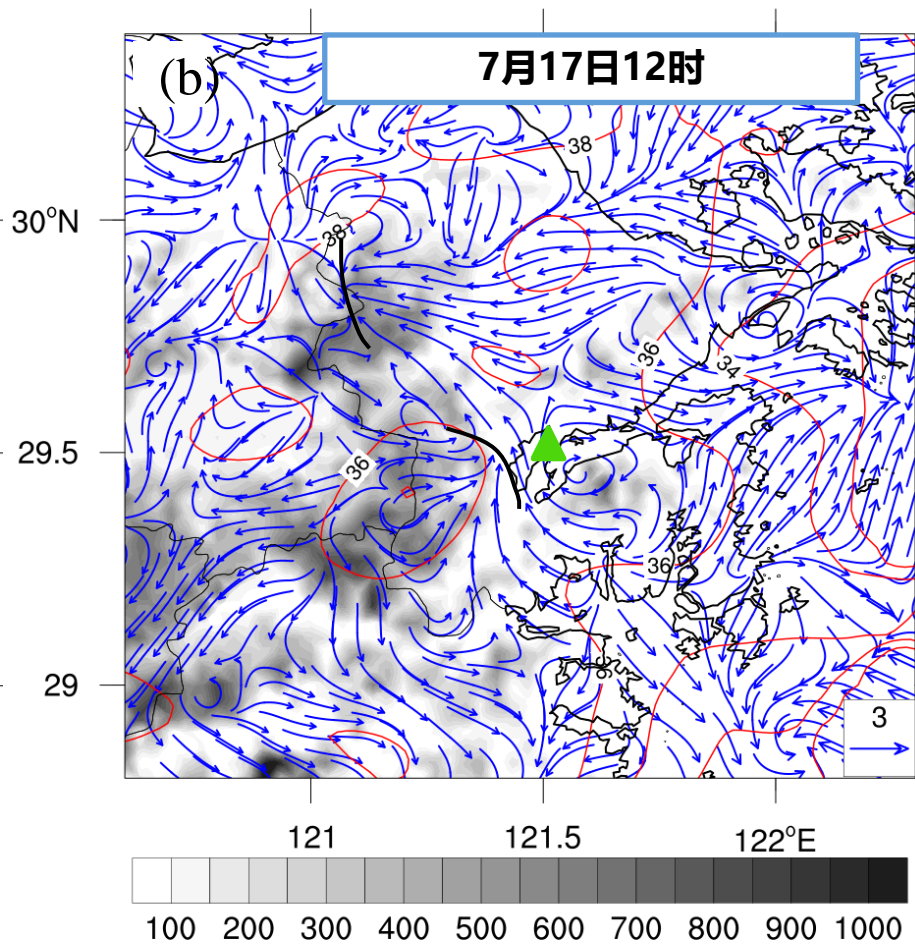
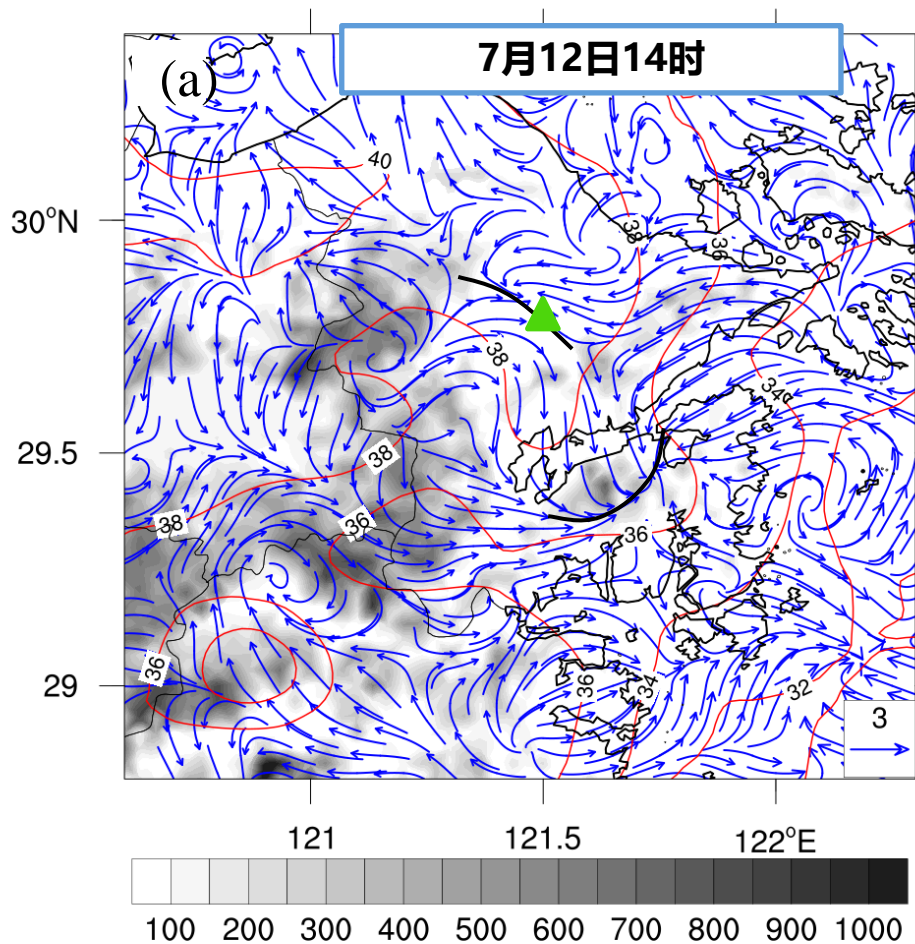
■ **HMI**分别为4.3和8.1, “7·17”过程有指示意义

■ **MDPI**为1.1和1.2, 预示发生微下击暴流的可能, 值越大, 上下两层的假相当位温差越大, 相对干冷的环境空气对发展中下击暴流的影响就越大

■ **SWEAT**达到或超过浙江省雷暴大风发生的临界值 (275)

表征雷暴大风和下击暴流的参数在两次过程中都表现出较大可能性。





流场 (蓝色箭头)  
温度场 (红色实线)  
地形场 (灰色填图)

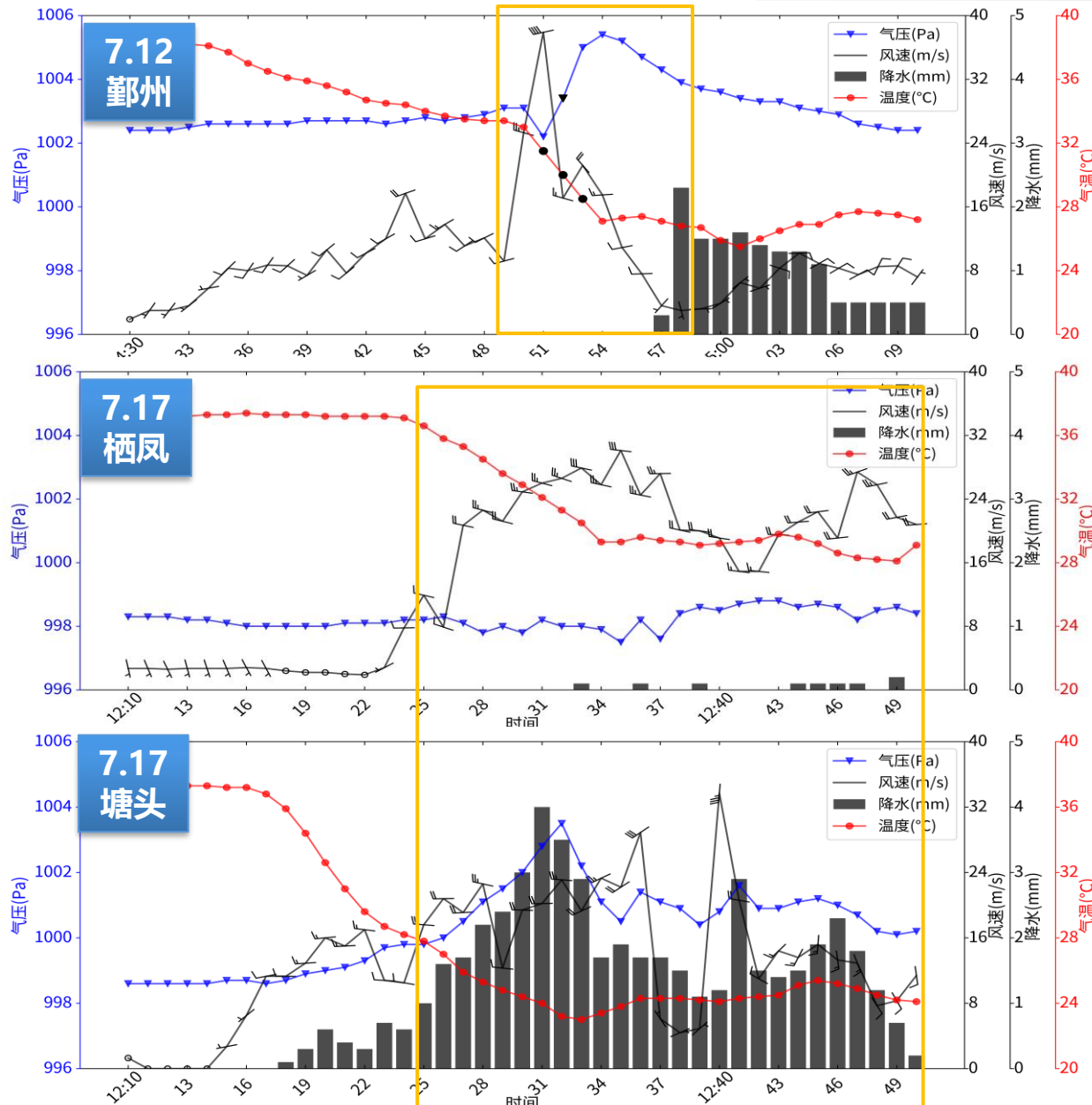
### ◆ “7·12” 过程

- 海陆风辐合：海上东到东南风和西部地区西北风
- 热力抬升：午后气温升至38~40°C，海陆风辐合线附近有西北向东南方向伸展的暖舌

### ◆ “7·17” 过程

- 地面辐合线：事发地上游由来自西部山区的西风、来自三门湾的南风以及象山港的东南风形成。
- 热力抬升：中午最高气温升至38°C以上。
- 天气尺度系统抬升：高空槽前动力降压。

## 二、下击暴流的地面气象要素特征



### ◆ 气象要素演变

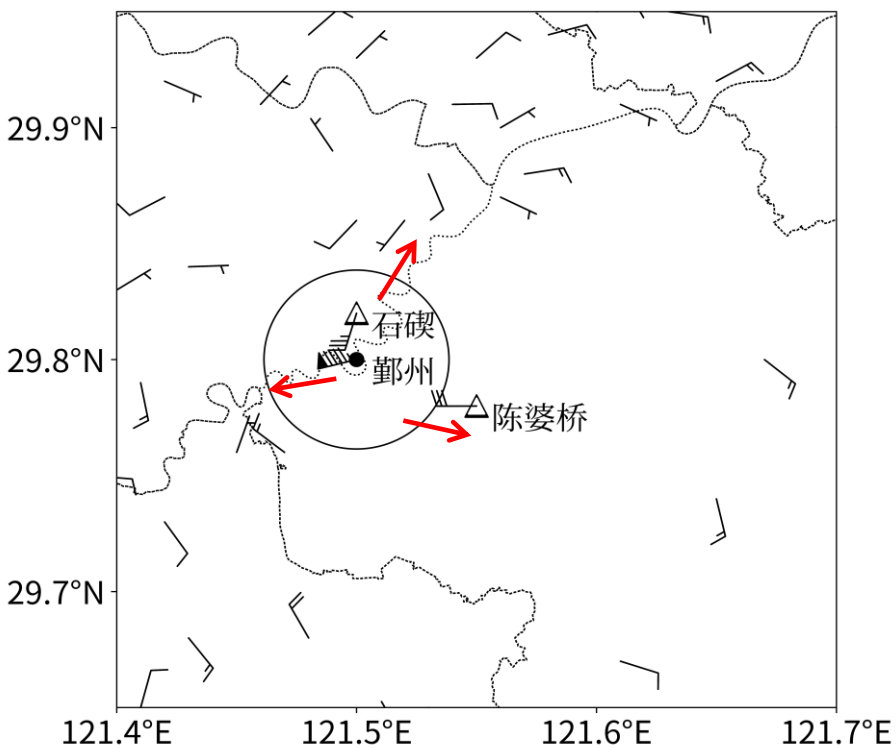
- “7·12” 过程影响时间短，但风速更强、突变更大；
- “7·17” 过程变压更显著；1 h变温都超过13°C，冷池强。
- “7·17” 过程塘头站气象要素变化比栖凤站剧烈，栖凤站出现10级及以上大风的时间更长。

特征	12日 鄞州	17日 栖凤	17日 塘头
影响时间	5 min	35 min	35 min
风速突增	4—13级 (2min)	4—11级 (15)	3—11—3—12级 (15min)
风向突变	75° 西南转西北风	90° 偏南转偏西风	360° 顺时针
气压涌升	3.2 hPa (3 min)	/	4.5 hPa (12 min)
气温骤降	13.5°C (1h变温)	8.8°C (1h变温)	13.1°C (1h变温)

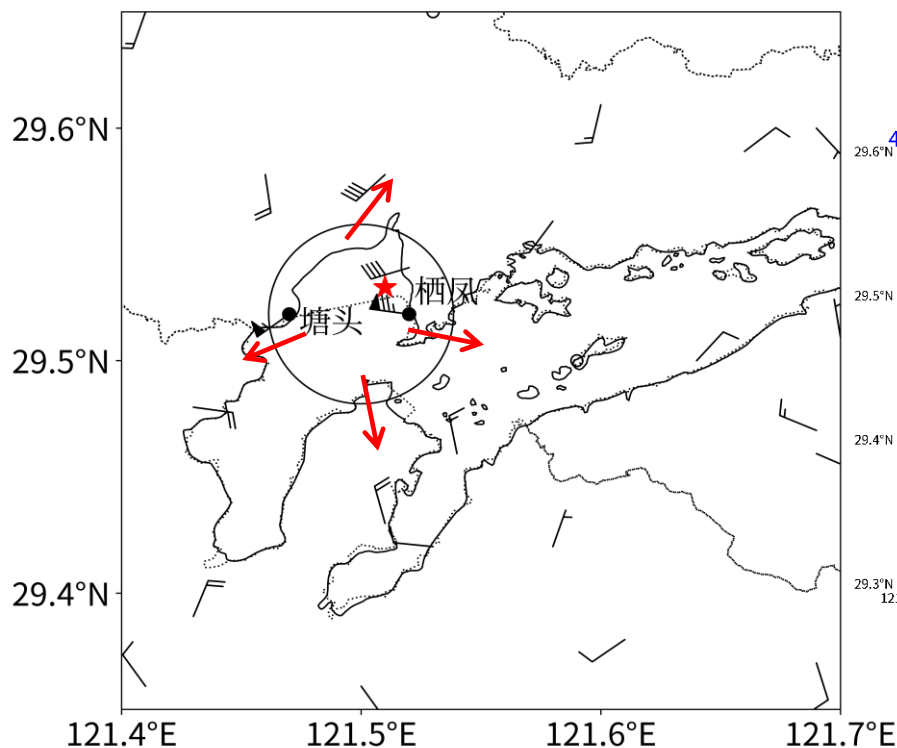


## 二、下击暴流的地面气象要素特征

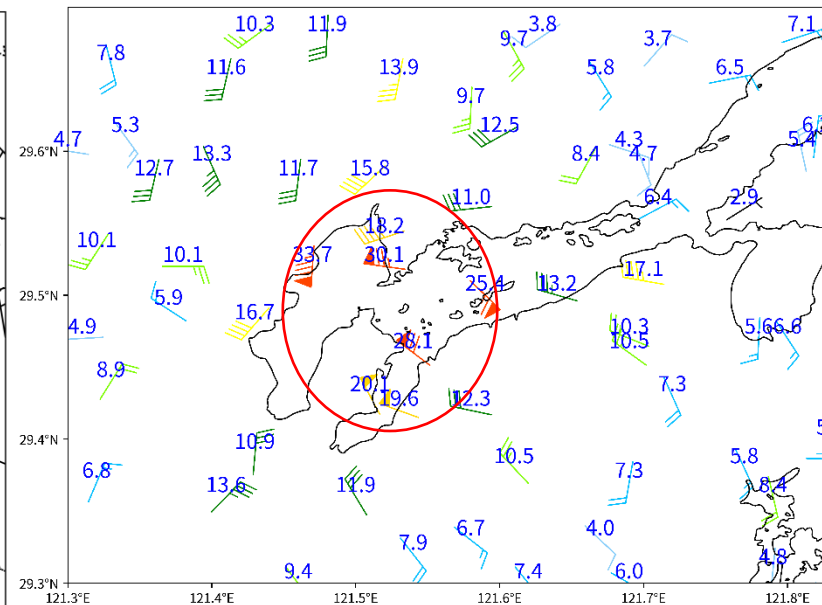
2022-07-12\_14:51:00



2022-07-17\_12:35:00



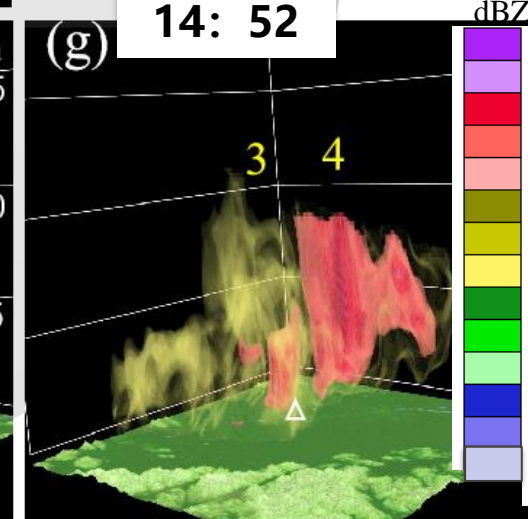
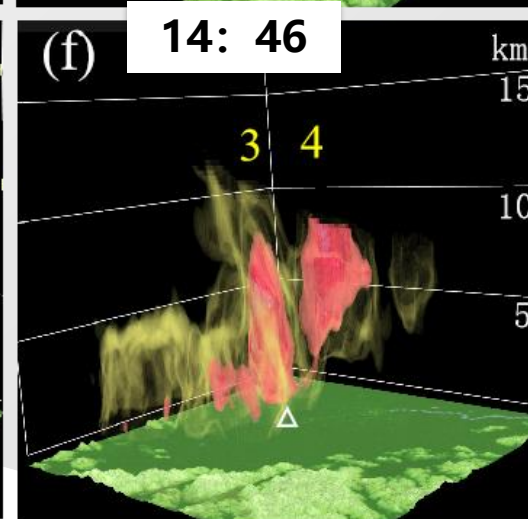
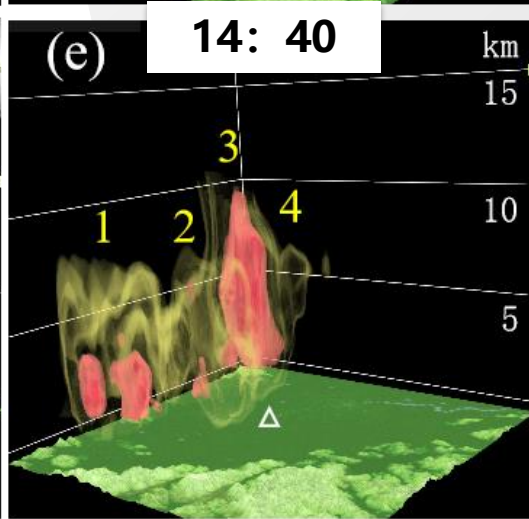
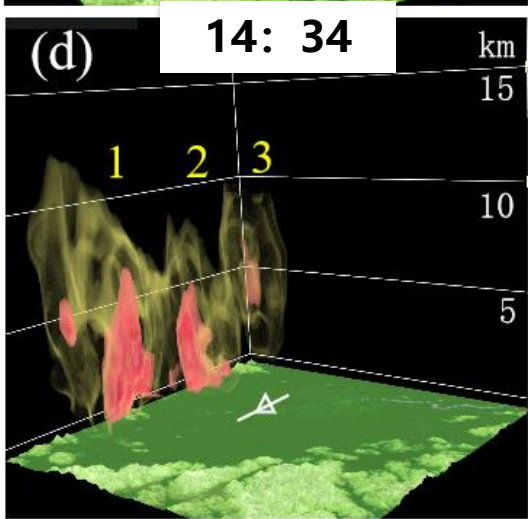
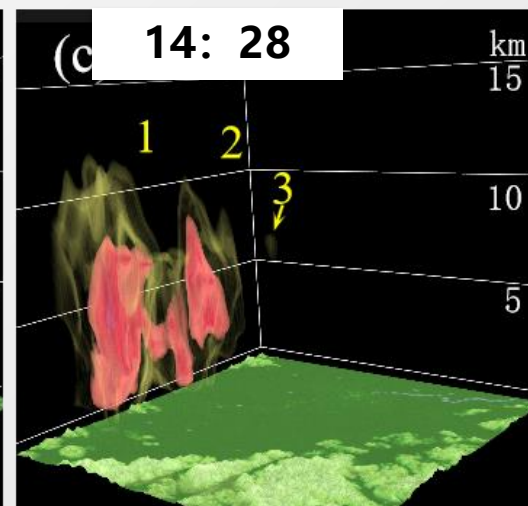
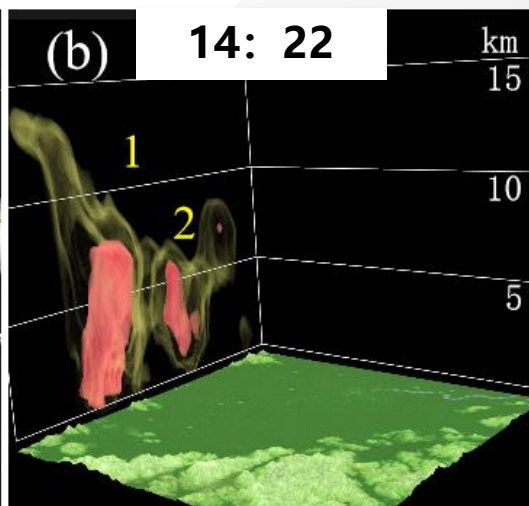
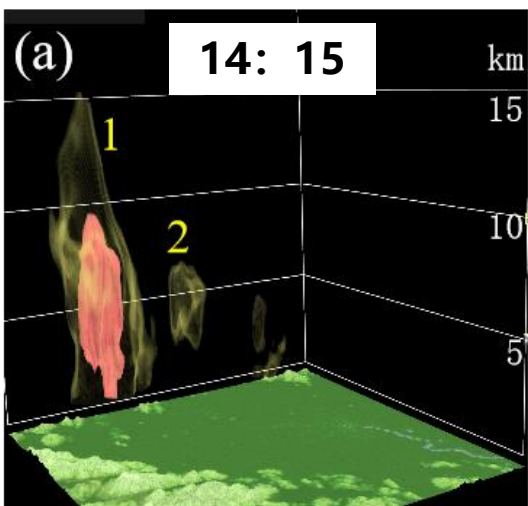
2022\_07\_17:12:00-2022\_07\_17:13:00 级大



### ◆ 地面风场辐散特征

- “7·12” 影响半径4 km左右，影响时间10 min以内，属于**微下击暴流**。
- “7·17” 影响半径6~8 km，持续时间35 min左右，属于**宏下击暴流**。

### 三、多普勒雷达演变特征对比——7.12风暴三维演变



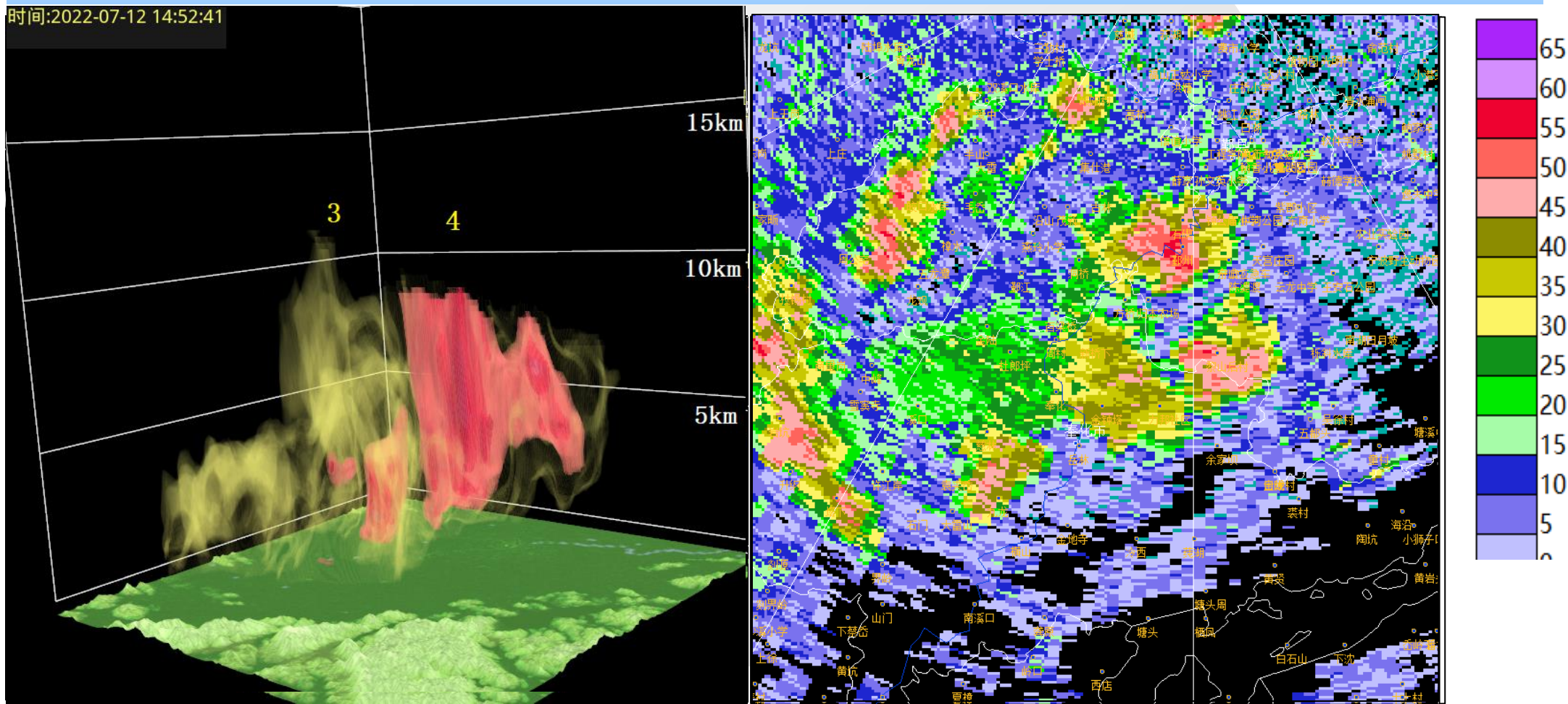
#### ◆ 7.12过程脉冲风暴的三维演变

- 13:30 1号单体, 8~9级风
- 14:15 2号单体脉冲风暴, 9级风
- 14:28 阵风锋上触发3号脉冲风暴, 9~13级风
- 14:40 阵风锋上生成4号脉冲风暴, 8~9级风



### 三、多普勒雷达演变特征对比——7.12风暴三维演变

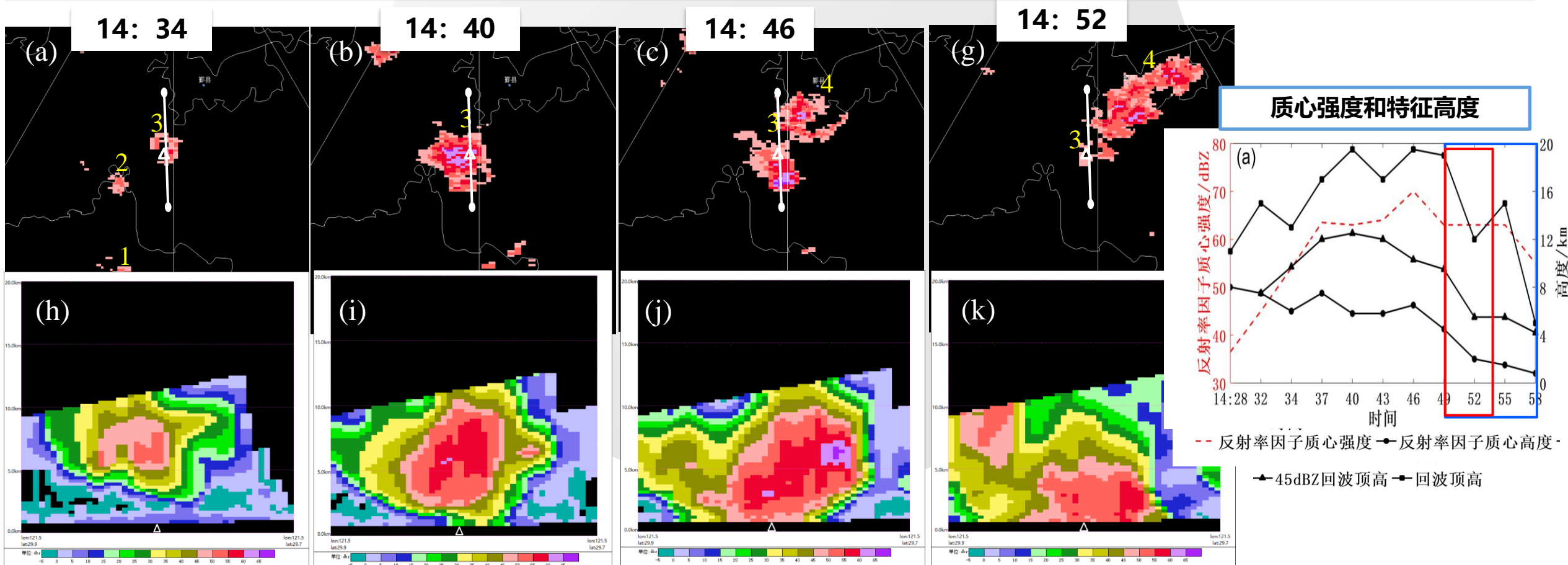
- 脉冲风暴呈现原地生消、移动性差、传播性强特征；
- 阵风锋的形成和向东推进，是新单体不断触发并迅速发展的重要因素。



# 三、多普勒雷达演变特征对比——7.12回波演变特征

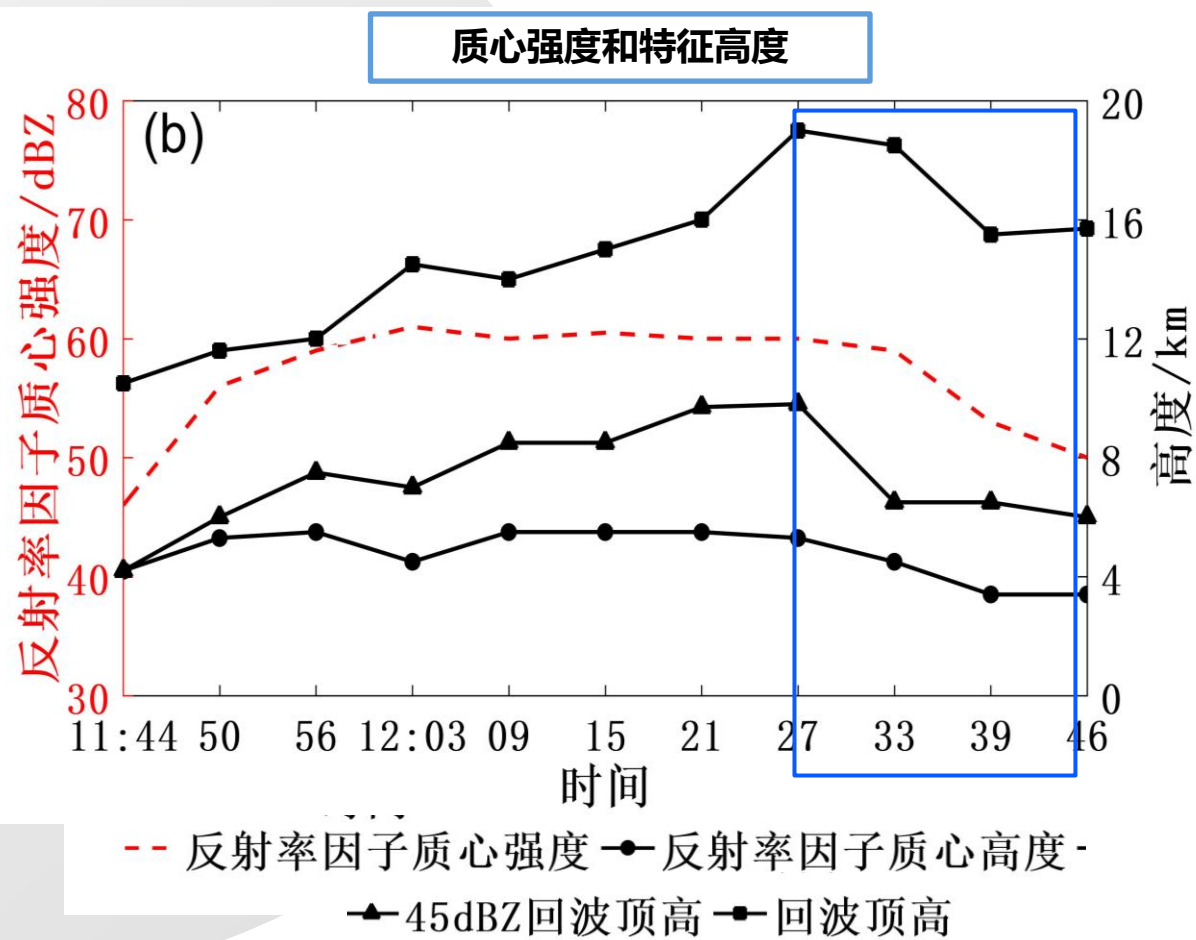
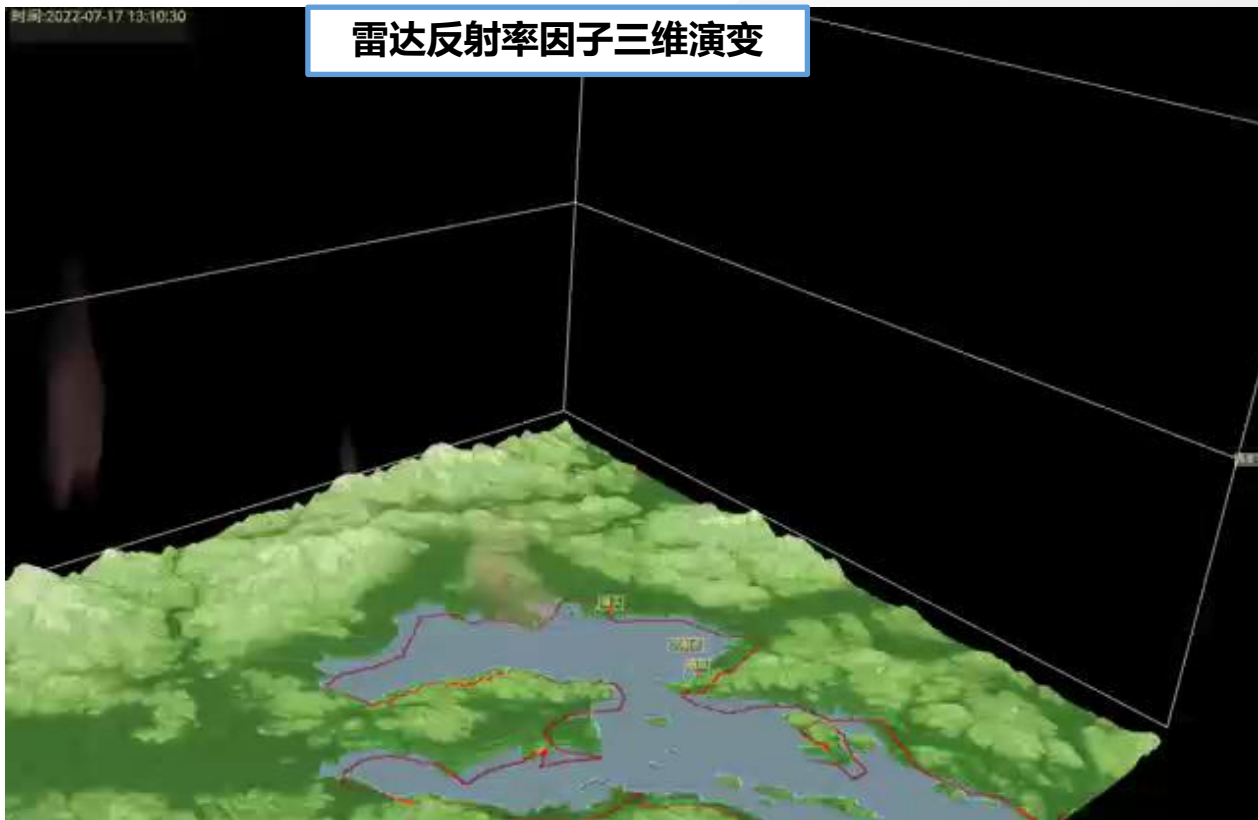
## ◆ 7.12过程3号脉冲风暴的演变

- **14:46之前发展阶段**: 质心强度增强到70 dBZ, 质心高度由8 km下降至6 km, 45 dBZ顶高伸展到10~12.5 km之间; 14:46最强盛, 前倾结构, 低层弱回波区和高层强回波悬垂, 60 dBZ以上强回波伸展高度1.2~6.5 km。
- **14:46之后减弱到消亡阶段**: 质心强度减弱, 强回波范围减小, 质心高度下降和回波顶坍塌。14:49—14:52下击暴流最强, 质心高度和45 dBZ顶高下降速度分别达 $13.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $22.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 地面风力由5级突增至13级。

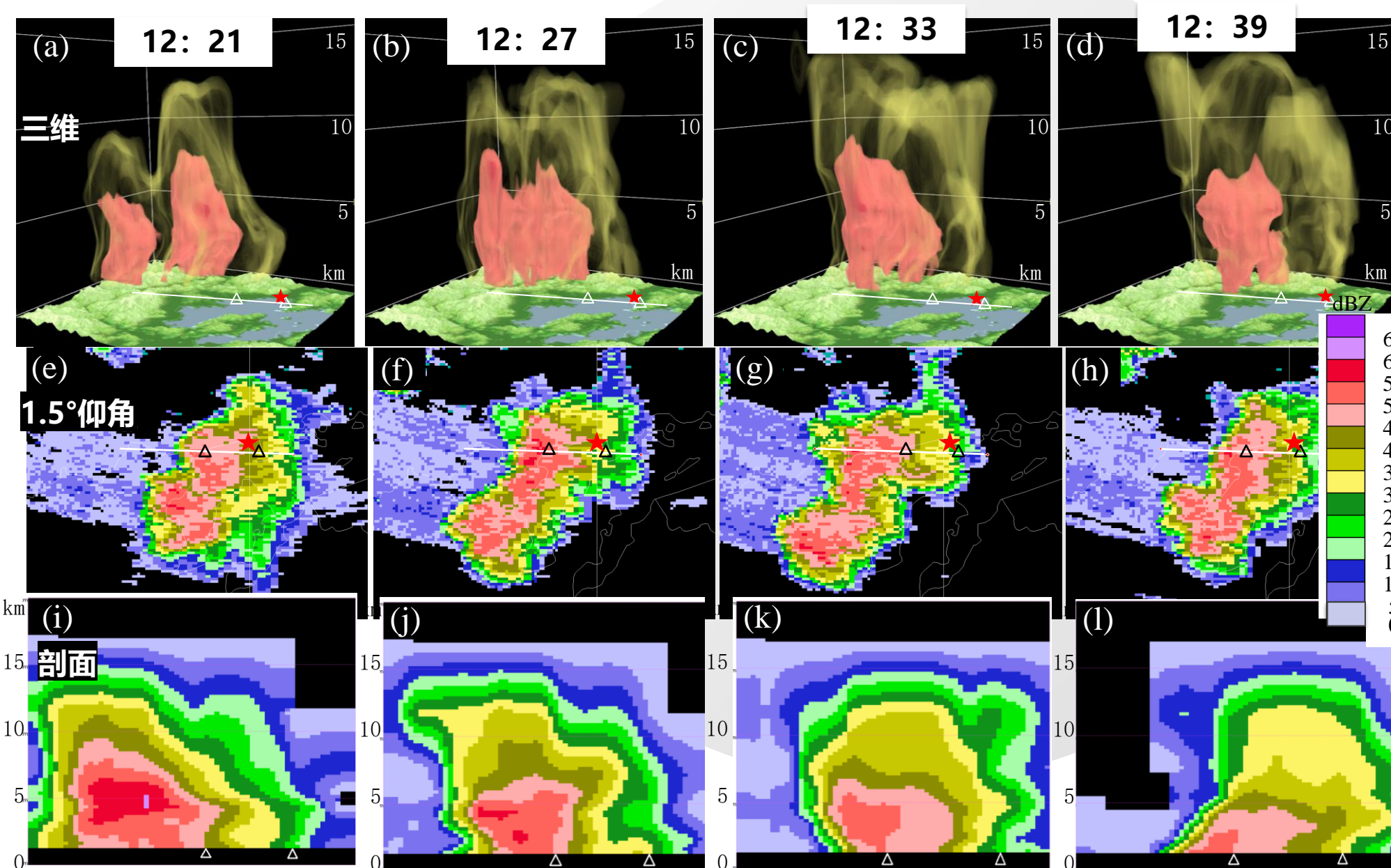




### 三、多普勒雷达演变特征对比——7.17风暴三维演变



### 三、多普勒雷达演变特征对比——7.17回波演变特征



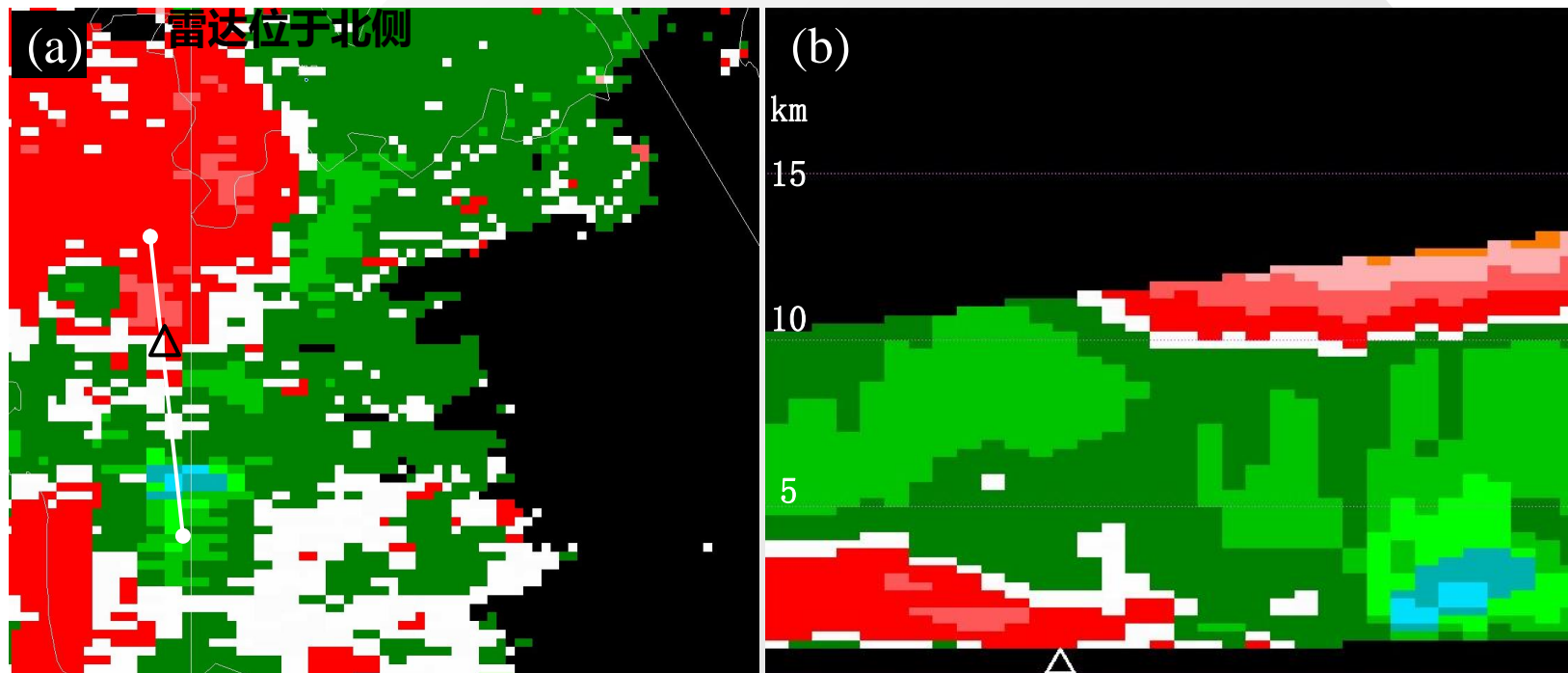
#### ◆ 下击暴流风暴演变

■ 12:21最强盛阶段, 质心强度60 dBZ, 高度5.5 km。  
 ■ 12:27强质心范围缩小、高度降低, 下击暴流开始影响翡翠湾水域, 12:25地面西风风力增大到8~10级。  
 ■ 12:27—12:46雷暴单体的质心高度由5.3 km降至3.4 km, 45 dBZ顶高则从9.8 km下降到6 km, 风暴质心高度和45 dBZ顶高最大下降速度达 $3.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $9.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 地面测得11-12级的偏西大风。

### 三、多普勒雷达演变特征对比——7.12径向速度

12日14: 52 2.4°仰角的径向速度

垂直剖面



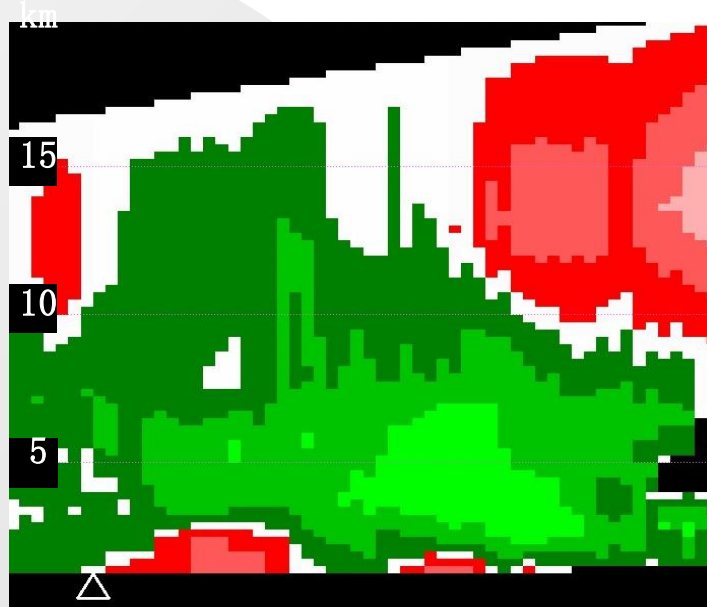
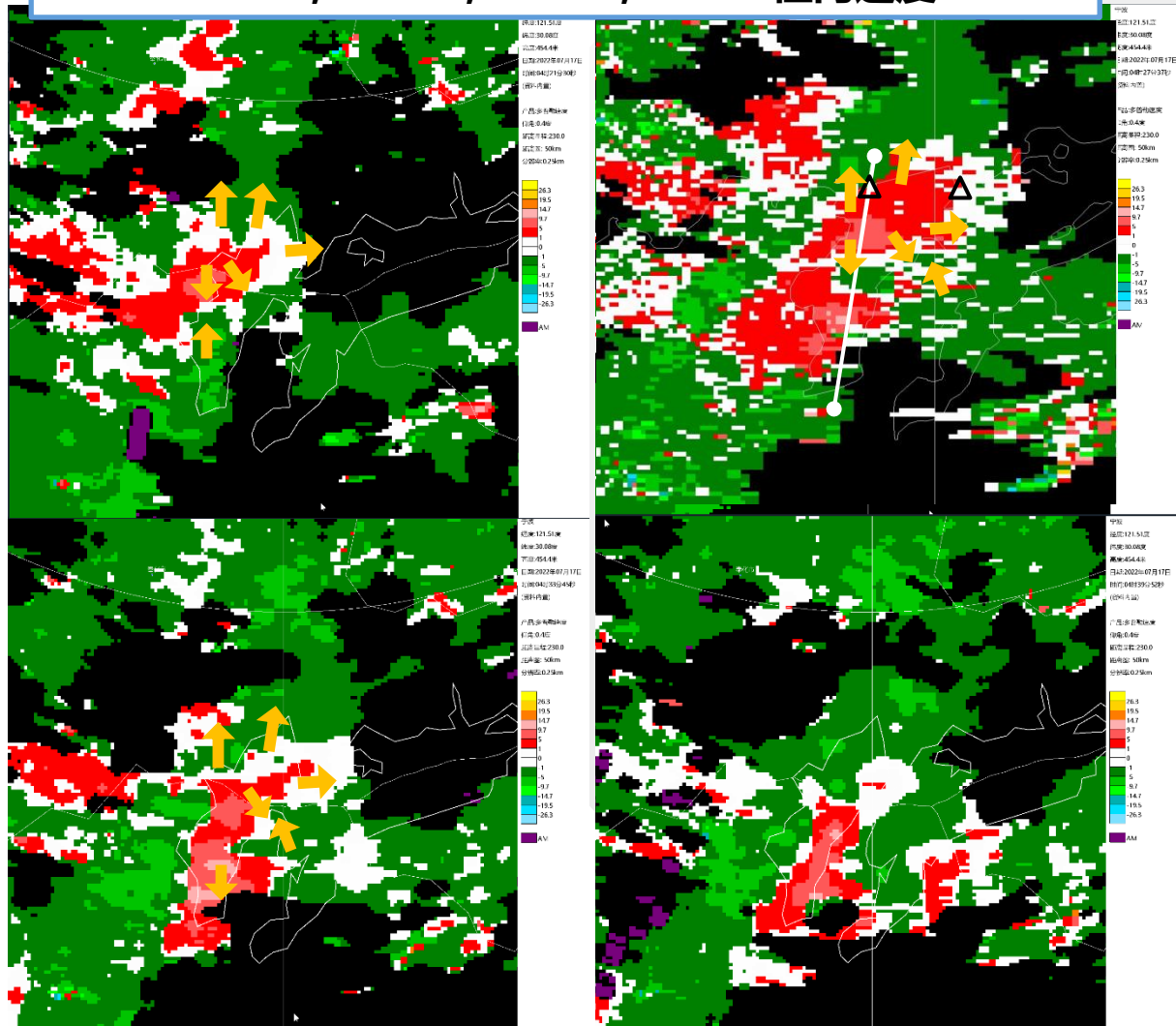
#### ◆ 7.12径向速度场特征

- 风暴发展阶段：**低层弱辐合、高层明显辐散**特征，表明风暴中上升气流主导；
- 风暴最强盛到减弱阶段：1.5~5 km的**中层径向辐合**，其正负速度中心分别为 $7.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $-25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，表征强烈的下沉气流。中层径向辐合出现时间（14: 46）比地面8级大风出现时间（14: 50）提早4 min；45 dBZ顶高下降、风暴质心强度和高度下降的开始时间（分别为14: 43、14: 49）提前于地面8级风1~7 min。



### 三、多普勒雷达演变特征对比——7.17径向速度

12:21, 12:27, 12:33, 12:39径向速度



#### ◆ 7.17径向速度场特征

- 低仰角辐散：0.5°仰角于12:21—12:46在一片负速度中出现南北两个正速度区，正速度区被零速度带包围，发生下击暴流时，在翡翠湾北岸沿线产生风场辐散，南侧为辐散出流与环境风场辐合；
- 垂直剖面图上无明显的中层径向辐合特征。

### 三、多普勒雷达演变特征对比

#### 特征对比

过程	实况风力 /m·s <sup>-1</sup>	影响时间 /min	尺度/km	质心强度 /dBZ	质心高度 /km	质心高度 下降速度 /m·s <sup>-1</sup>	45dBz顶 高下降速 度/m·s <sup>-1</sup>	径向速度 特征	特征提前 量/min
7.12	37.9	10min	4km	70	8	13.8	22.2	中层径向 辐合和风 暴顶辐散	1~7
7.17	33.7	35min	6-8km	60	5.5	3.0	9.1	低层辐散	滞后2~ 8

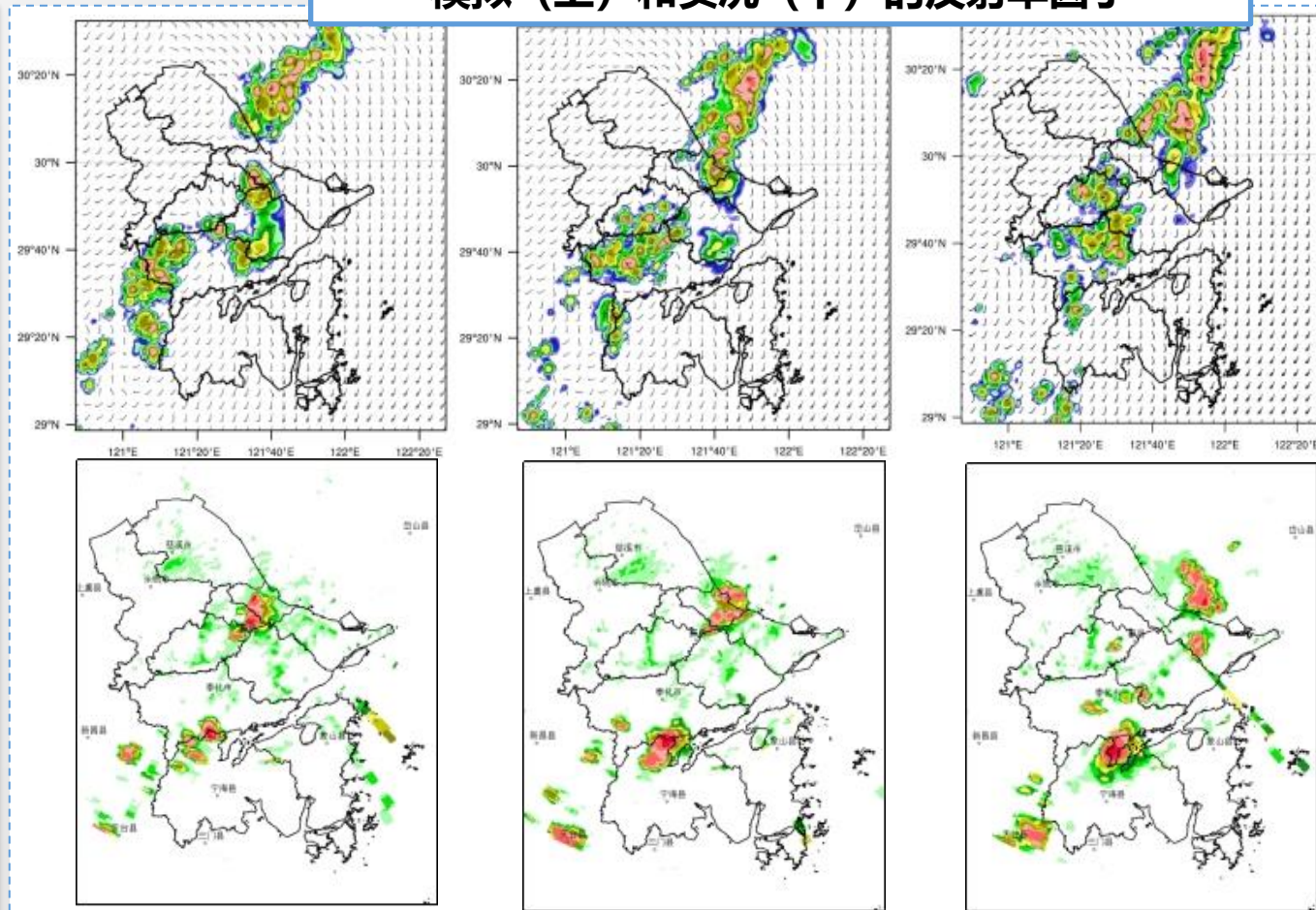
- “7·12”过程的脉冲风暴尺度小、生命史短，但初始高度更高、质心强度更强、回波伸展高度较高，还具有原地生消、移动性差、传播性强的特征；“7·17”对流单体具有移动性、合并加强的特征。
- 两次过程均出现质心强度和高度、45 dBZ顶高下降的特征，“7·12”过程质心高度和45 dBZ顶高的下降速度比“7·17”过程更快，相应的地面自动站测得的极大风更强。

## 四、“7·17”下击暴流数值模拟分析

### ◆ WRF模式

- 水平分辨率： $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$
- 模式初始场：NECP/NCAR GFS 分析场同化多普勒雷达观测资料、常规地面和探空观测资料等
- 3层嵌套分辨率分别为8.1 km、2.7 km和0.9 km
- 水平网格点数： $301 \times 301$
- 垂直方向：57层
- 网格中心： $29.5^{\circ}\text{N}$ ， $120.5^{\circ}\text{E}$ ，
- 积分步长：30 s
- 微物理方案：Thompson方案
- 长短波辐射方案：分别RRTM和Dudhia方案
- 积云方案：无
- 模拟初始时刻：2022年7月17日08时（北京时）
- 积分时长：9 h
- 输出间隔：1 min

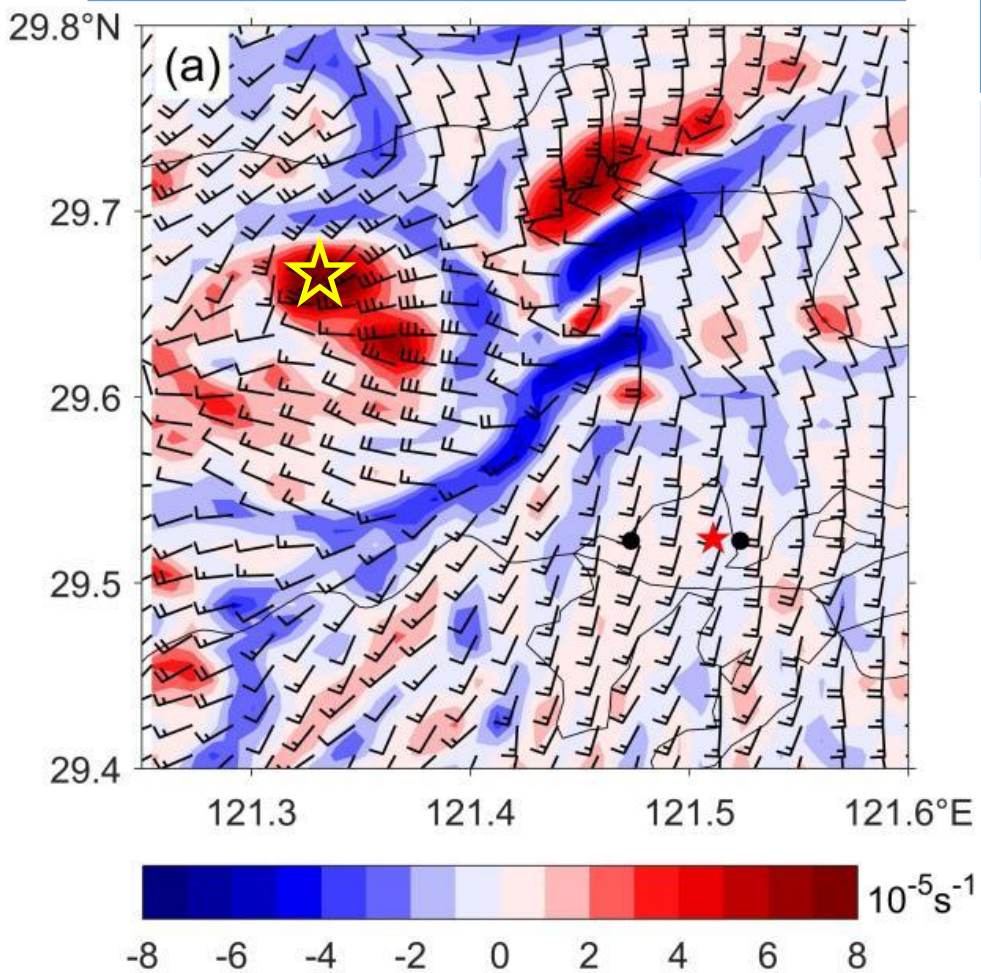
模拟（上）和实况（下）的反射率因子





## 四、“7·17”下击暴流数值模拟分析

模拟的12: 35 925 hPa风场和散度场

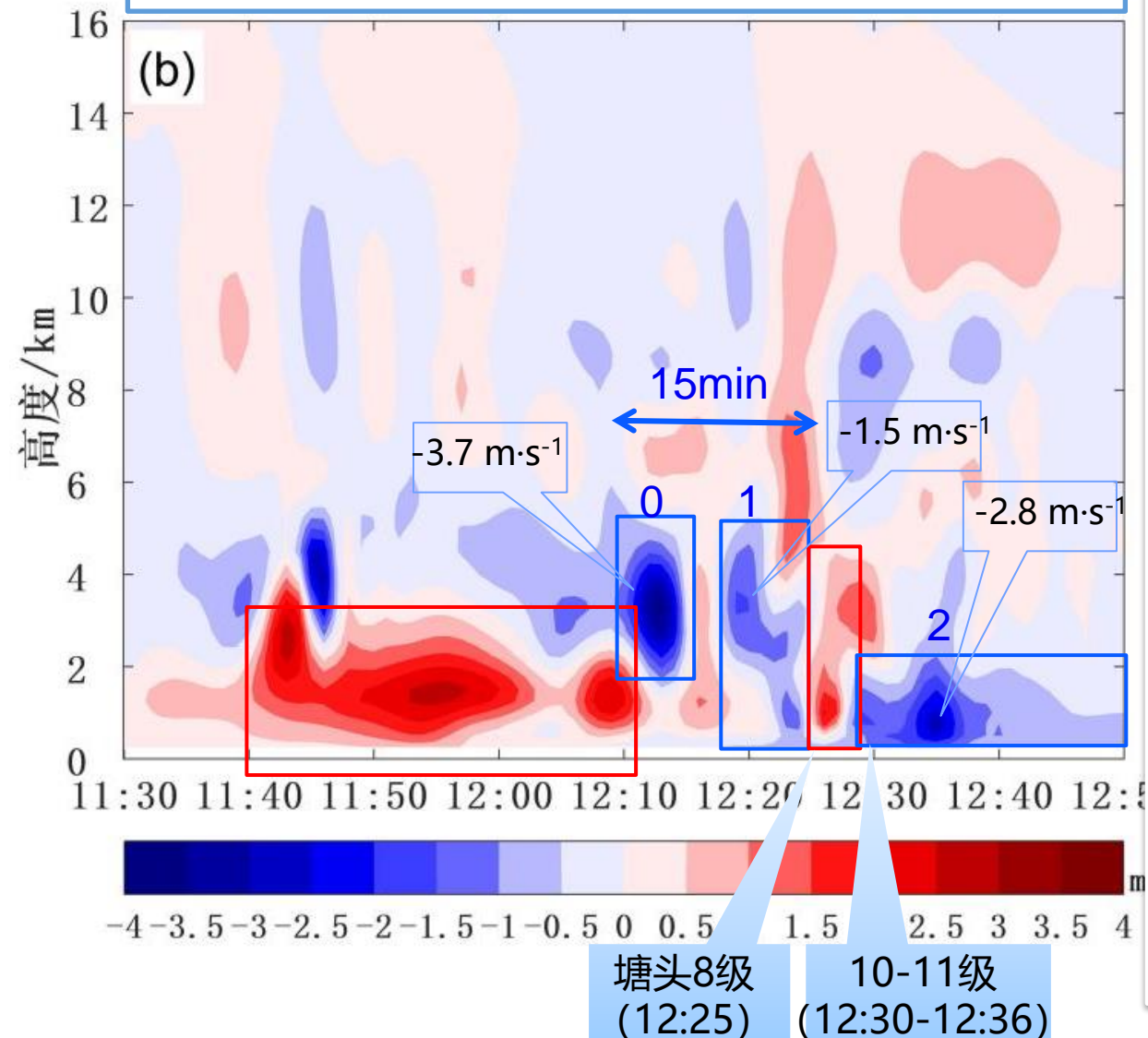


参数	最大反射率因子/dBZ	最大反射率因子高度/km	最大地面风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	13时最大小时雨强/mm	地面最大变温/ $^{\circ}\text{C}$	地面最高气压/hPa
实况	61.5	6.2	23.3	51.8	-13.5	998.7
模拟	66	7	22.2	27	-12.7	998.8

- 实况观测典型要素和数值模拟结果对比，模拟结果除最大小时雨强偏弱外，雷达回波强度、风速、气压和变温等参数与实况基本相符，模拟结果较为理想
- 在事故地西北方向约20 km处出现明显的风场辐散中心，辐散中心强度达 $10.3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$
- 该辐散中心相应的地面1 min最大模拟风速为 $22.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，该值与事故发生地附近实况观测的地面2 min最大风速 $23.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 相近

## 四、“7·17”下击暴流数值模拟分析

模拟下击暴流中心点 (121.33°E, 29.65°N) 垂直速度  
(单位 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 的时间--高度剖面



- 12: 10—12: 15在2~5 km出现下沉速度, 未及地面
- 12: 18开始, 2~5 km再次出现下沉气流, 中心强度 $-1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 12: 23以第一次到达地面, 持续2 min。
- 12: 28起下沉运动第二次到达地面, 中心于12: 35达到最大 $-2.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 高度1 km左右, 地面最大速度为 $-1.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 12: 29—12: 37地面附近的垂直速度维持在 $-1 \sim -1.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间, 表征持续下击暴流的影响。
- 下沉运动第一次到达地面时间 (12: 23) 与地面出现8级时间 (12: 25) 接近。
- 下沉运动第二次到达地面的时段 (12: 29—12: 37) 与地面出现10~11级强风的时段 (12: 30—12: 36) 较为吻合, 模拟得到地面1min最大风速为 $22.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 与实况观测的地面2 min最大风速 ( $23.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 接近, 推断下击暴流的实际下沉气流强度在 $-2.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 或以上。

## 五、总结和思考

- 环境背景差异：“7·12”过程发生在副高控制下的弱天气尺度系统强迫和弱垂直风切变背景中；“7.17”过程发生在前倾槽背景下的“上干冷、下暖湿”不稳定层结中。两次过程都存在中层干冷空气侵入，其中“7·12”过程干层更高（500~300 hPa之间）、更厚且更强，这也是12日出现更强风力的主要原因。多个表征雷暴大风、下击暴流和强天气威胁的指数（如：DCAPE、WINDEX、MDPI和SWEAT）对这两次过程均有较好的指示意义，在潜势预报阶段可为预报员提供有价值参考。
- 下击暴流为中 $\gamma$ 尺度单体引发，影响范围较小、局地性强。“7·12”是由孤立脉冲风暴产生的微下击暴流；“7·17”为宏下击暴流，其对流单体在移动过程中发生合并加强。地面风场辐散，气象要素出现风速突增、风向突变、气压涌升和气温骤降。
- 雷达回波都出现质心强度和高度下降、45 dBZ回波顶坍塌现象，径向速度场“7·12”过程为中层径向辐合和风暴顶辐散，“7·17”过程表现出低层辐散。“7·12”过程雷达特征出现时间早于地面8级风1~7min，而“7·17”过程雷达特征滞后于地面8级风2~8min，若据此开展临近预警，存在预警时效性不足、防御时间窗太短等问题，因此潜势阶段雷暴大风预报仍是致灾性下击暴流预警的重要支撑依据。
- “7·17”下击暴流的数值模拟的下沉运动第一次到达地面的时间（12:23）与地面实况风力增大到8级的时间（12:25）接近。下沉运动第二次到达地面并维持 $-1\sim-1.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的时段（12:29—12:37）与地面10~11级实况风力出现时间（12:30—12:36）基本吻合，期间下沉运动中心高度1 km、强度 $-2.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，推断实际下沉气流强度达 $-2.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上。



## 五、总结和思考

- 从业务角度来看，两次下击暴流在极端大风的预报和预警发布时效方面都存在较大难度。潜势预报中，准正压特别是副热带高压控制的背景环境下，强对流天气容易漏报，极端强对流天气的可预报性更低，部分雷暴大风和下击暴流参数在大风极端性方面给预报员提供了有价值的参考，值得深入挖掘，提炼本地化预警阈值。
- 下击暴流雷达特征的预警时效不足，极端大风的预警准确率极低，预警难度极大。下击暴流发生时高空主要为下沉气流、近地面为辐散大风，多普勒雷达难以捕捉到有效的垂直方向和近地面风场信息，无法为预警提供有价值参考。因此，我们还需要更合适的监测分析手段加强垂直方向的速度监测，以提高此类中小尺度天气系统的监测时效。
- “7·12”过程出现多个脉冲风暴，且风暴具有明显传播性，其传播机制本文并未涉及，还需要进一步深入研究。



谢谢！  
敬请批评指正