

# 银川多条阵风锋共同触发 次生强雷暴预报线索分析

成都信息工程大学

胡文东

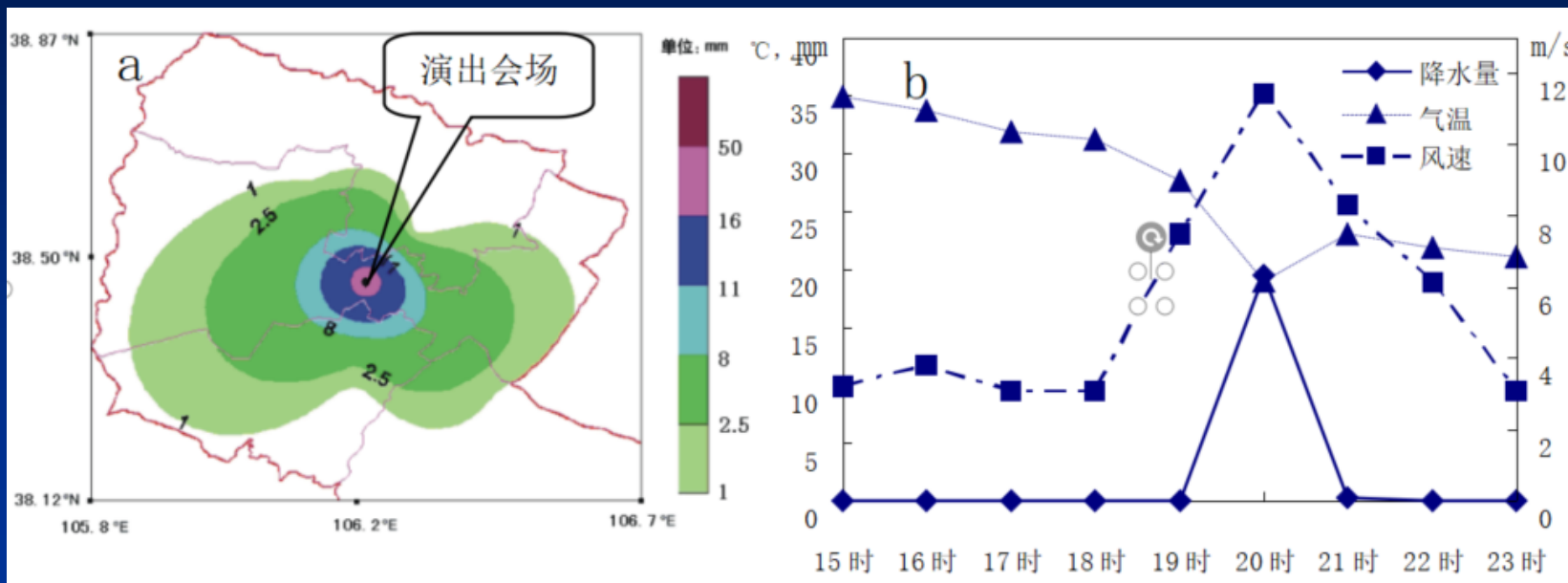
2023/8/21



# 值班面临的问题

- 1今天有灾害性天气吗
- 2什么类别
- 3哪些天气
- 4在哪里
- 5在何时
- 6强度怎样
- 7持续多久
- 8线索呢

# 天气状况，怎么了



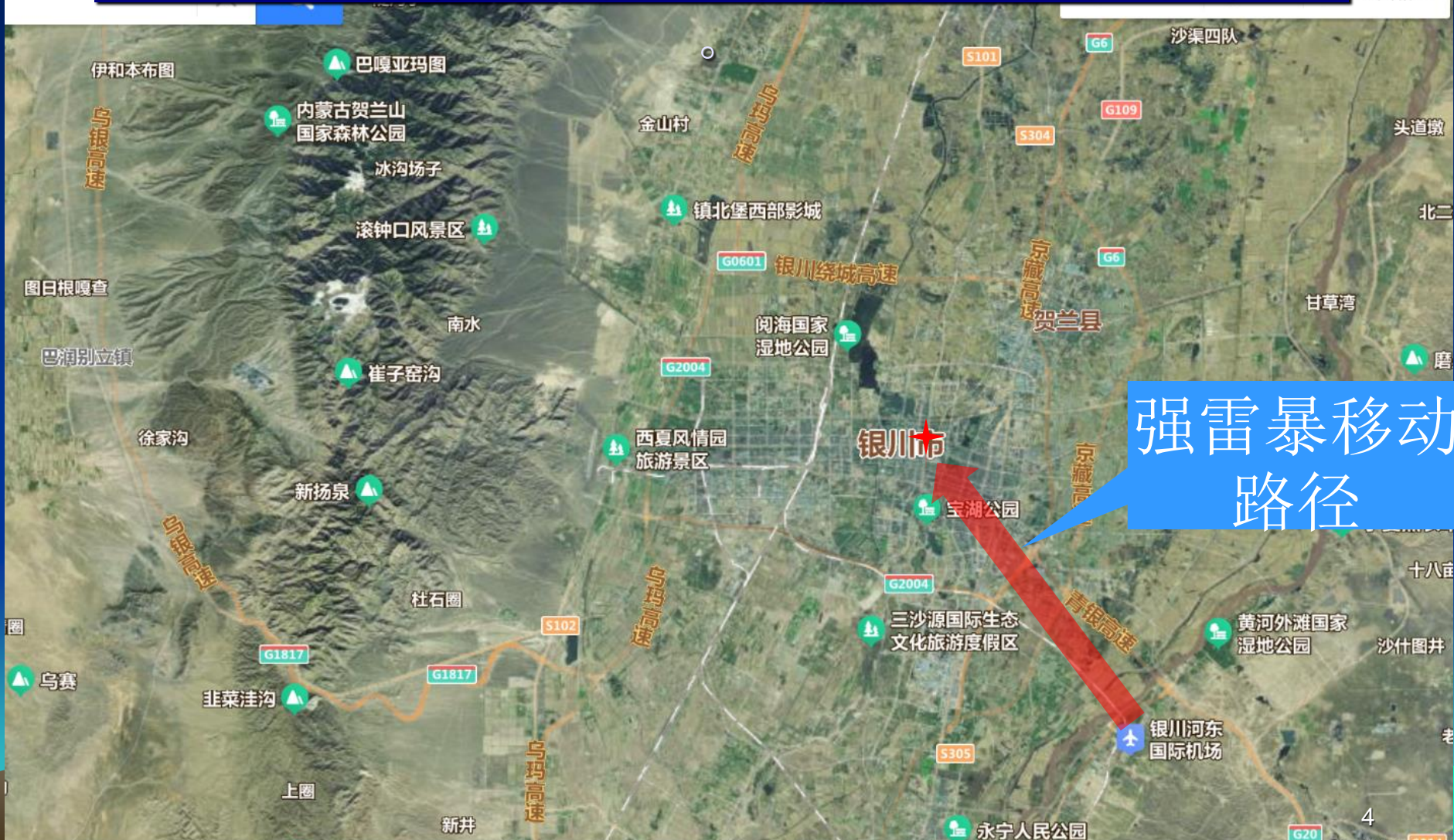
2010年7月18日天气实况，降水量：mm 风速：m/s 气温：°C  
(a)19:00—20:00降水量，(b)自动站逐时气象要素变化

- 国际艺术节开幕式前，突遭由东向西移动的强对流袭击，降水19.5 mm/h，超本地短时暴雨红色预警标准(16mm/h)，为有记录以来的次大值。伴有冰雹、闪电、大风11.4m/s和16.1°C/h急剧降温，严重混乱。

# 强对流，为什么

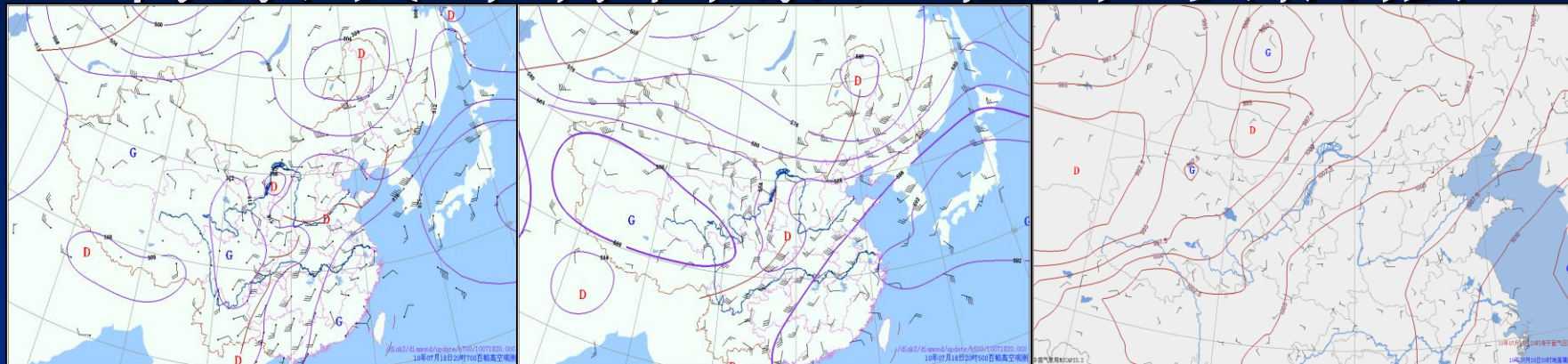
当日下午分散弱对流，无降水、大风及雷电

工具箱

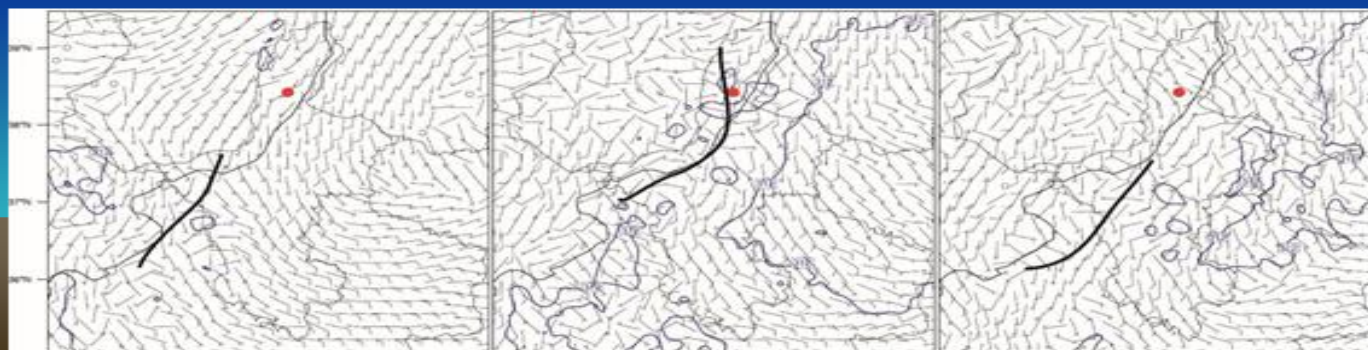
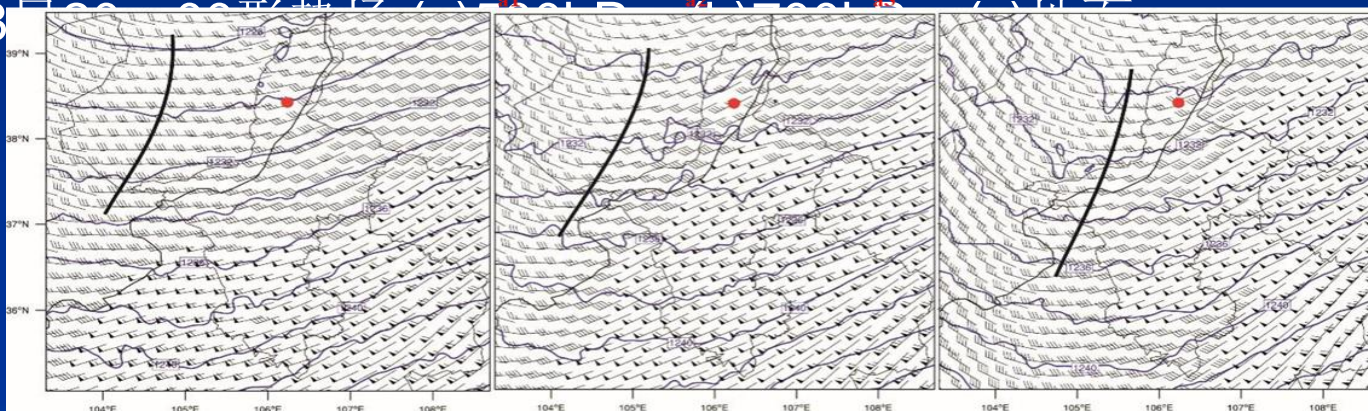


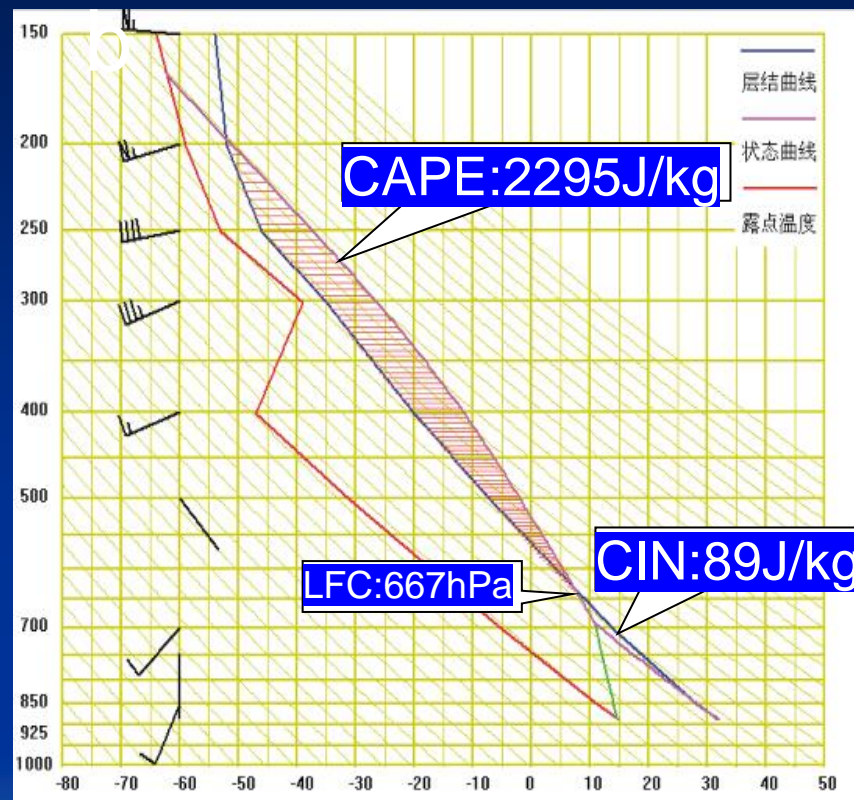
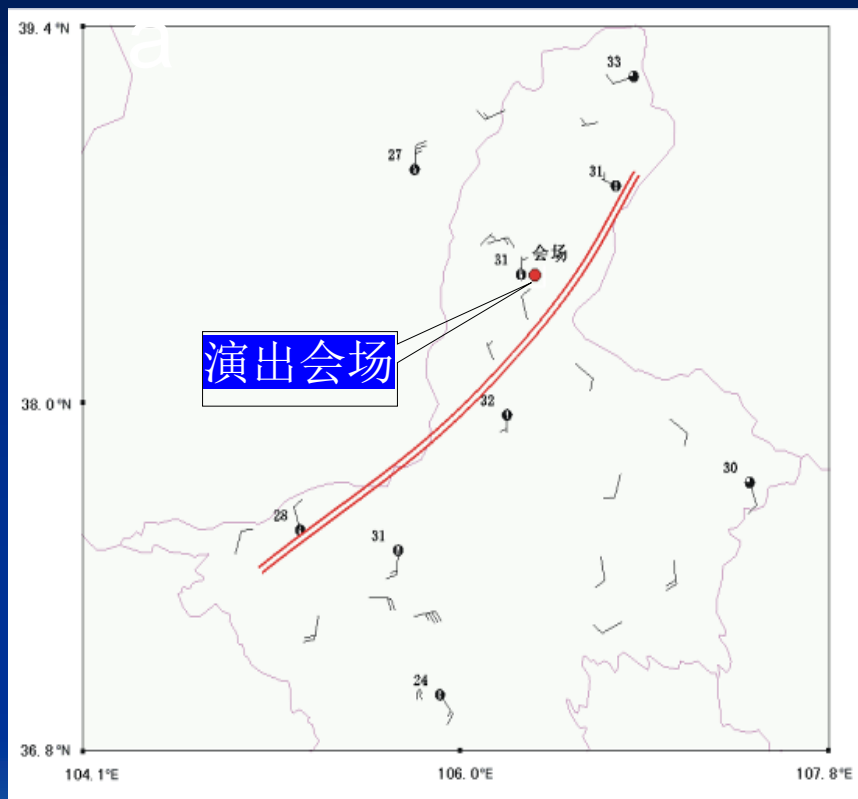


# 背景或许有雷暴，但不该很强



7月18日00时00分形势场 (1) (2) (3) (4) (5)

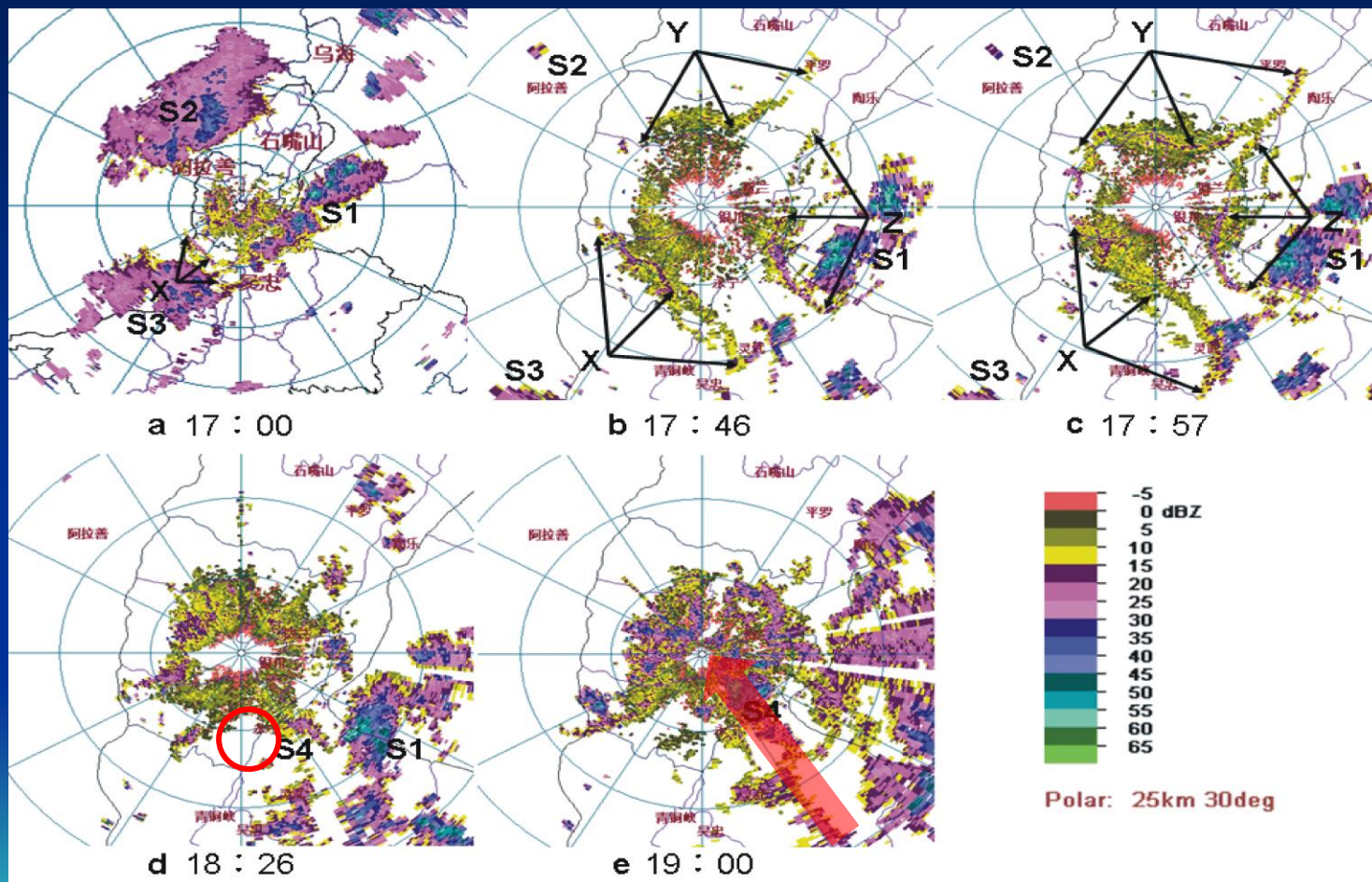




7月18日17:00大气状况 (a)地面实况场, (b)银川层结



# 事发前弱雷暴，然后...



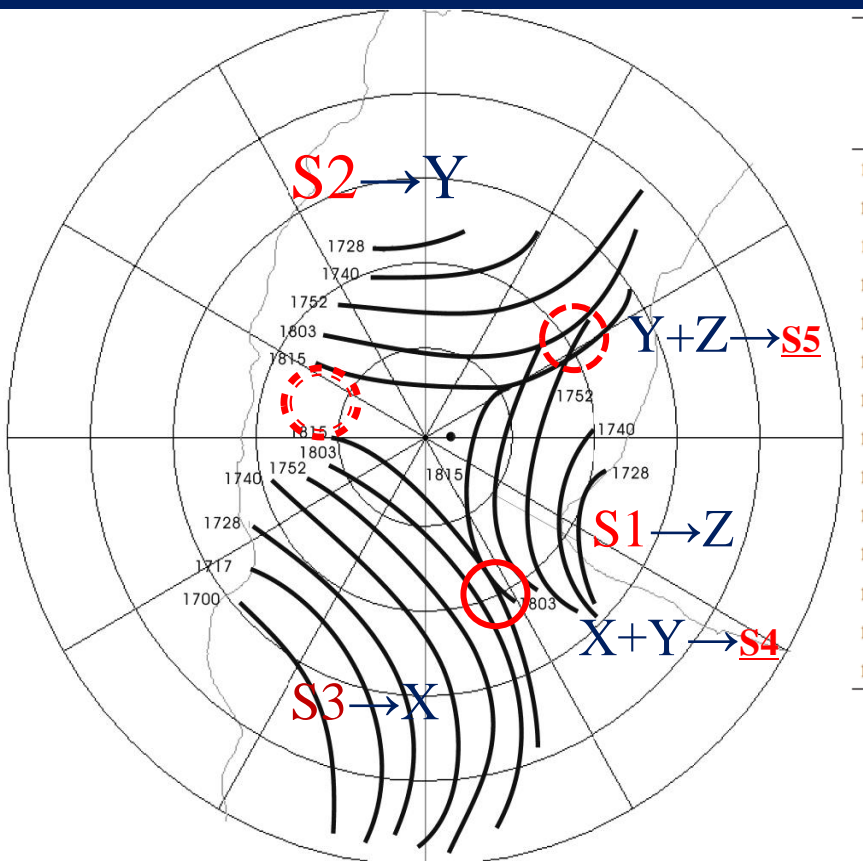
7月18日雷达仰角 $0.5^\circ$ 基本反射率，单位：dBz  
(a)17:00,(b)17:46,(c)17:57,(d)18:26,(e)19:00

# 事主：次生强对流

- 灾害性天气类别：雷暴
  - 强雷暴还是弱雷暴
- 哪些灾害性天气
  - 强降水？大风？闪电？冰雹？龙卷？
- 在哪里
- 在何时
- 强度怎样
- 持续多久
- 线索呢

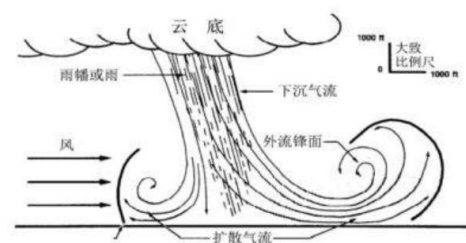


# 次生强对流从何而来？ 鸡生蛋，蛋生鸡



北京时	阵风锋 X			阵风锋 Y			阵风锋 Z					
	回波强度/dBz	长×宽×高/km <sup>3</sup>	速度/(km·h <sup>-1</sup> )	汇合用时/min	回波强度/dBz	长×宽×高/km <sup>3</sup>	速度/(km·h <sup>-1</sup> )	汇合用时/min	回波强度/dBz	长×宽×高/km <sup>3</sup>	速度/(km·h <sup>-1</sup> )	汇合用时/min
17:00:11	30	32.1×3.7×2.5	8.1	103								
17:05:56	25	39.6×3.7×2.5	8.1	97								
17:11:42	25	41.2×3.7×2.5	8.1	91								
17:17:27	25	43.8×3.7×2.5	8.1	85								
17:23:12	25	45.3×3.7×2.5	8.1	79								
17:28:58	25	47.1×4.2×2.5	9.3	63	15	9.7×1.6×2.0	11.0	57	25	15.7×2.1×2.0	5.2	82
17:34:43	25	51.2×5.1×2.5	11.0	49	15	16.9×2.8×2.0	10.4	56	25	16.9×2.2×2.0	6.4	67
17:40:29	20	65.3×6.5×2.5	9.8	47	15	28.6×3.4×2.0	9.3	55	25	24.4×2.6×2.0	7.9	49
17:46:15	20	65.7×6.5×2.5	9.9	41	15	45.9×4.6×2.0	9.8	46	25	52.7×2.6×2.0	7.3	44
17:52:01	20	68.4×6.5×2.5	10.1	35	20	59.8×4.8×2.0	10.4	37	35	55.3×2.8×2.0	6.4	43
17:57:47	20	64.5×6.8×2.5	10.1	22	20	64.3×6.6×2.0	10.4	31	35	58.6×2.8×1.5	7.8	31
18:03:31	20	62.9×6.8×2.5	9.0	16	20	64.1×6.6×2.0	10.4	23	35	55.2×3.2×1.5	9.3	21
18:09:17	15	62.9×6.8×2.5	6.4	15	20	57.3×6.6×2.0	8.7	16	35	55.2×3.2×1.5	7.3	17
18:15:02					20	57.3×6.6×2.5	8.7	14	35	55.2×3.2×1.5	7.3	13

0.5° 观测基本反射率回波演变情况。每圈15km



# • 问题 核心：蛋生鸡

- 与前几天一样的弱形势为何会有强对流
- 为何其强度超常？
- 原生弱对流中的阵风锋
- 为什么阵风锋要会合？
- 3条阵风锋均向心推进存在几个会合点
- 触发几个次生对流；

# 问题

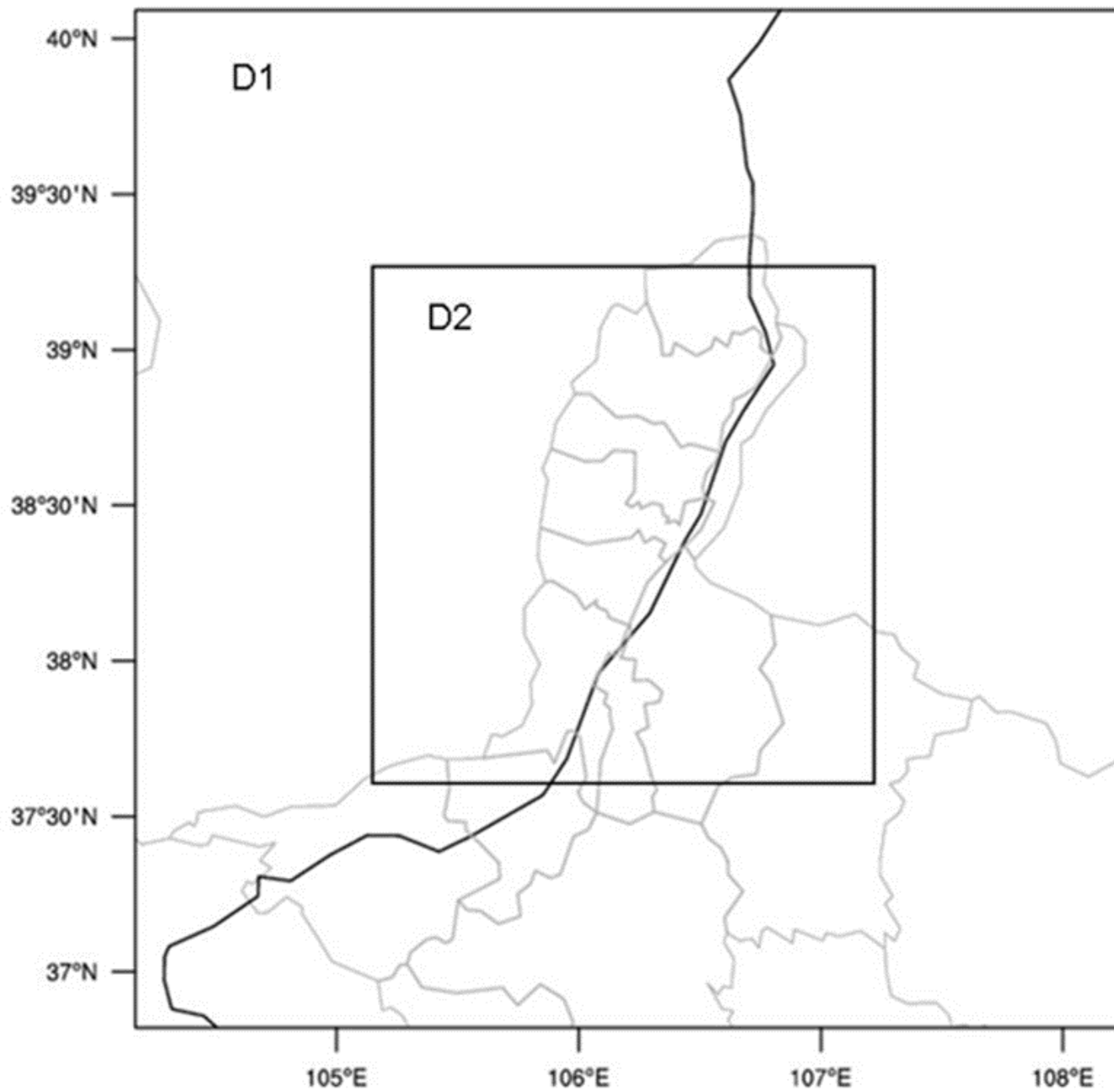
- 次生对流各自如何运动？
- 次生对流的强度差异的线索？
- 次生对流的逆向传播？
- 次生对流异常强度的关键机制？
- 强迫抬升共几类，各有多大贡献？



# 雷达虽好，但能力不足

- 阵风锋高度有限。阵风锋作为雷暴系统的一部分，其几何尺度和强度远低于雷暴自身。
- 如果雷达天线稍高，即使在最低探测仰角下，丘陵、山区也很难发现。平原雷达天线相对较低时，往往受地面高大物体的遮挡。
- 即便在最为理想的探测条件下，最低的 $0.5^\circ$  仰角，也难以获得较远距离的阵风锋回波，特别是在强度不高时。
- 如何解决？
- 数值模式

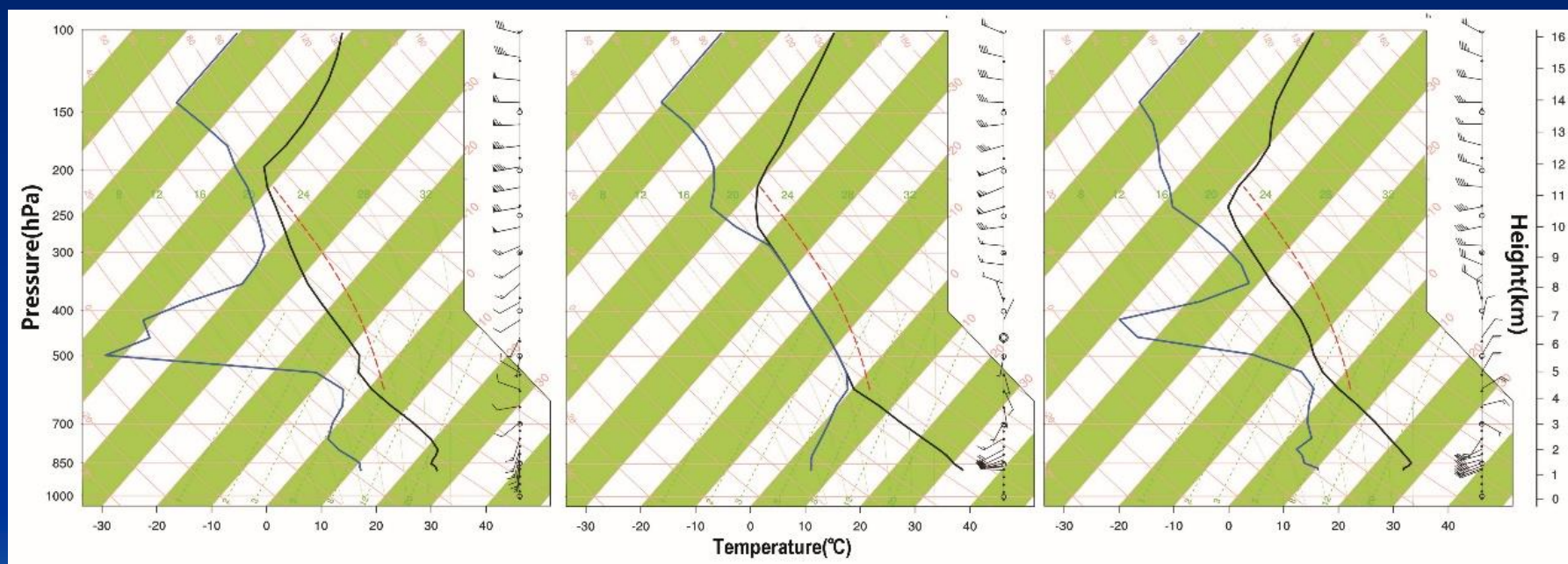
以景双水水垂  
7月  
微物  
数体  
中，  
别述  
面发  
YS



背  
三  
参  
案  
分  
地  
采  
用

# 模拟行吗

14: 00—20: 00大气层结状况(T-lnP)， 600到200hPa为深厚的不稳定层结， CAPE 1188—1611J·kg<sup>-1</sup>， K指数35°C



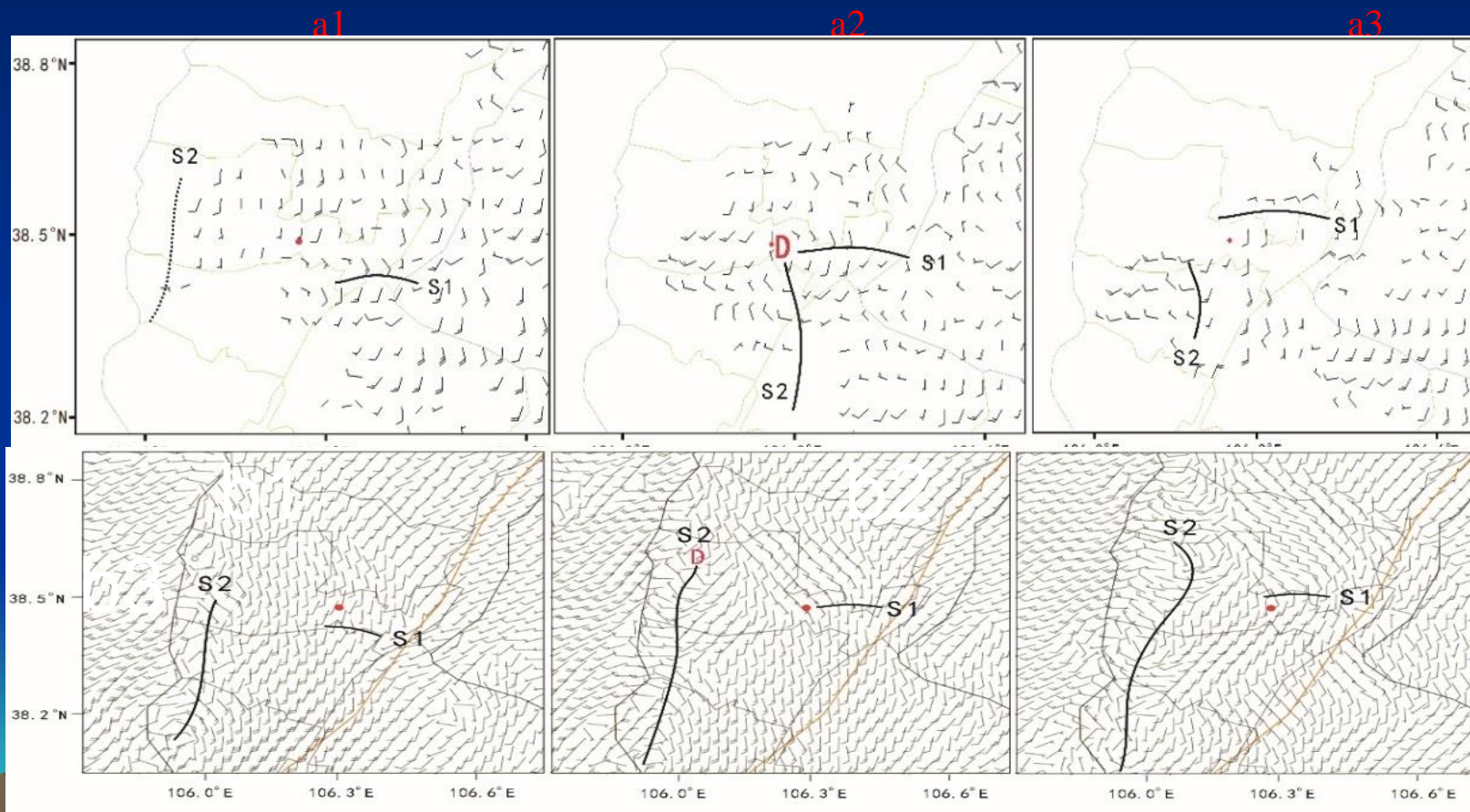
7月18日银川大气层结状况 (a)14:00, (b)17:00,(c)20:00

一定的对流抑制CIN，自由对流高度667hPa和抬升凝结高度784hPa相对不高，在适当扰动即可启动对流

地面到200hPa为干-湿-干-湿的结构，500hPa附近有干冷空气侵入，易于触发初生对流未破坏深厚不稳定层结，为阵风锋触发次生对流提供了不稳定基础

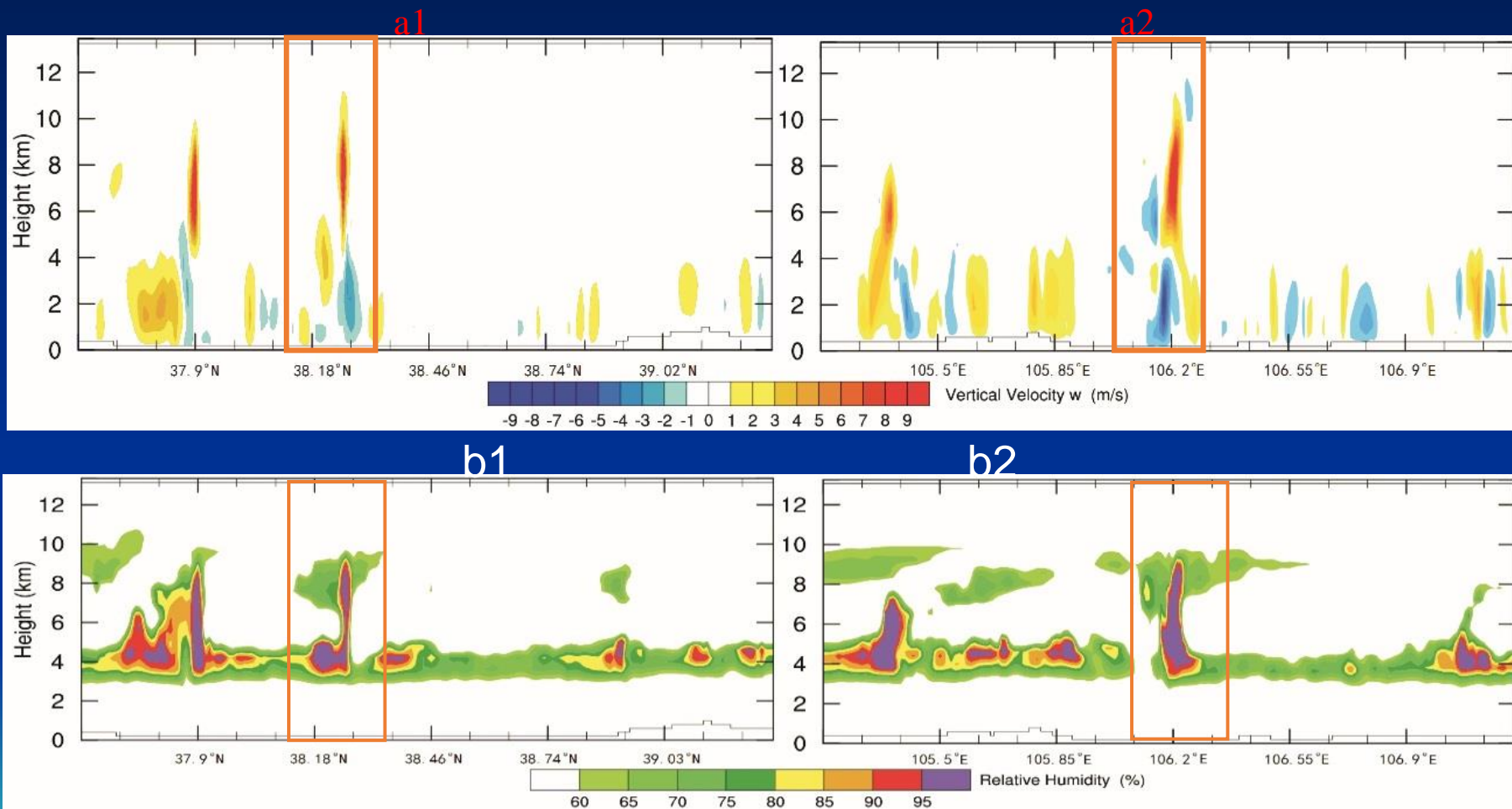


- 对比同时刻模拟700hPa风场雷达反演风场，十分相近。

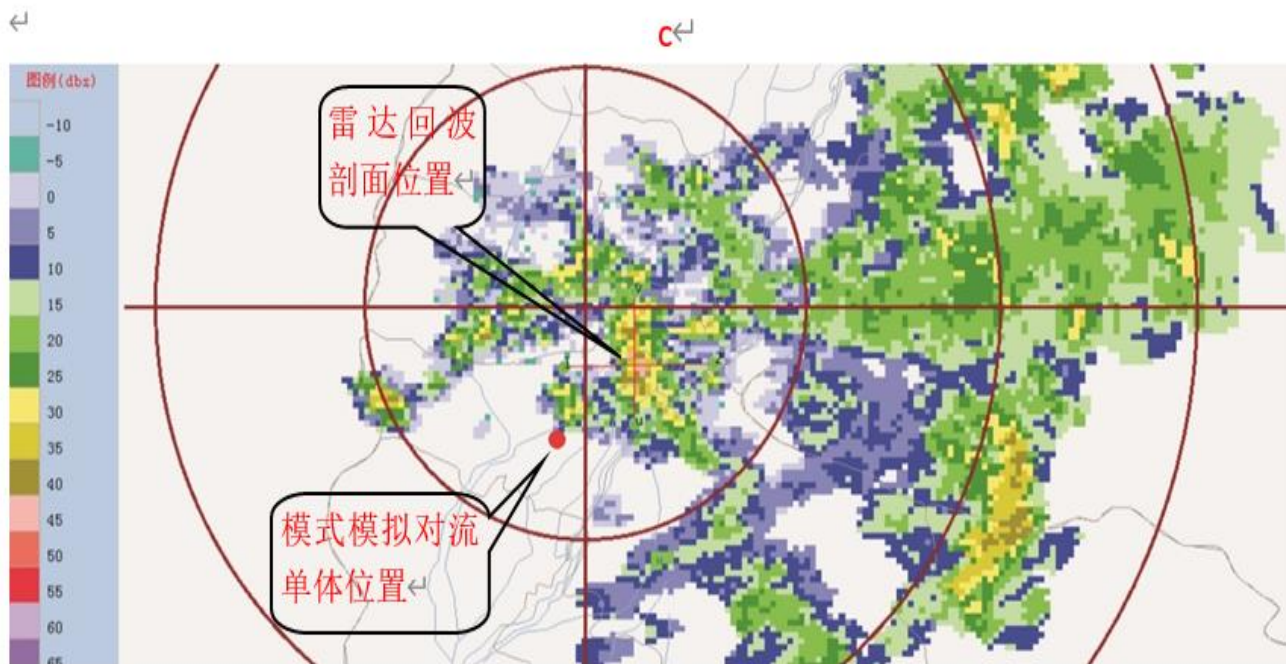
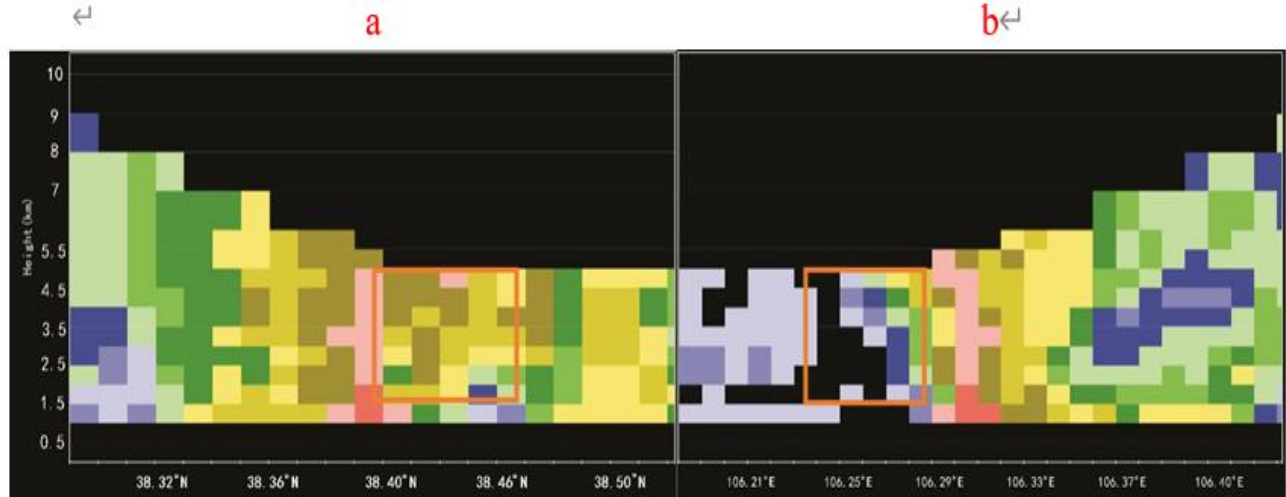


7月18日COTREC与模式700hPa风场(a. COTREC, b. WRF, 1.19:00 2.19:30 3.20:00)

WRF模拟出对流，模式产品具有较好的预报指示意义。次生强对流触发位置垂直速度和相对湿度剖面



2010年7月18日19时垂直速度与相对湿度沿  $38.26^{\circ}$  N,  $106.21^{\circ}$  E的剖面(a. 垂直速度, b.相对湿度. 1. 纬向, 2. 经向)



2010年7月18日19时5km高度基本反射率因子及沿 $38.3^{\circ}$  N,  $106.3^{\circ}$  E剖面 (a.纬向, b.经向, c.5km高度)

7月18日19:00雷达基本反射率因子, 新触发的对流5km高度回波中心位置, 进行东西和南北剖面的主要回波特征(强对流距离雷达较近且发展高度超出雷达最大探测仰角, 无法探测到5km以上的回波特征)

中心强度50dBz, 接地产生降水。

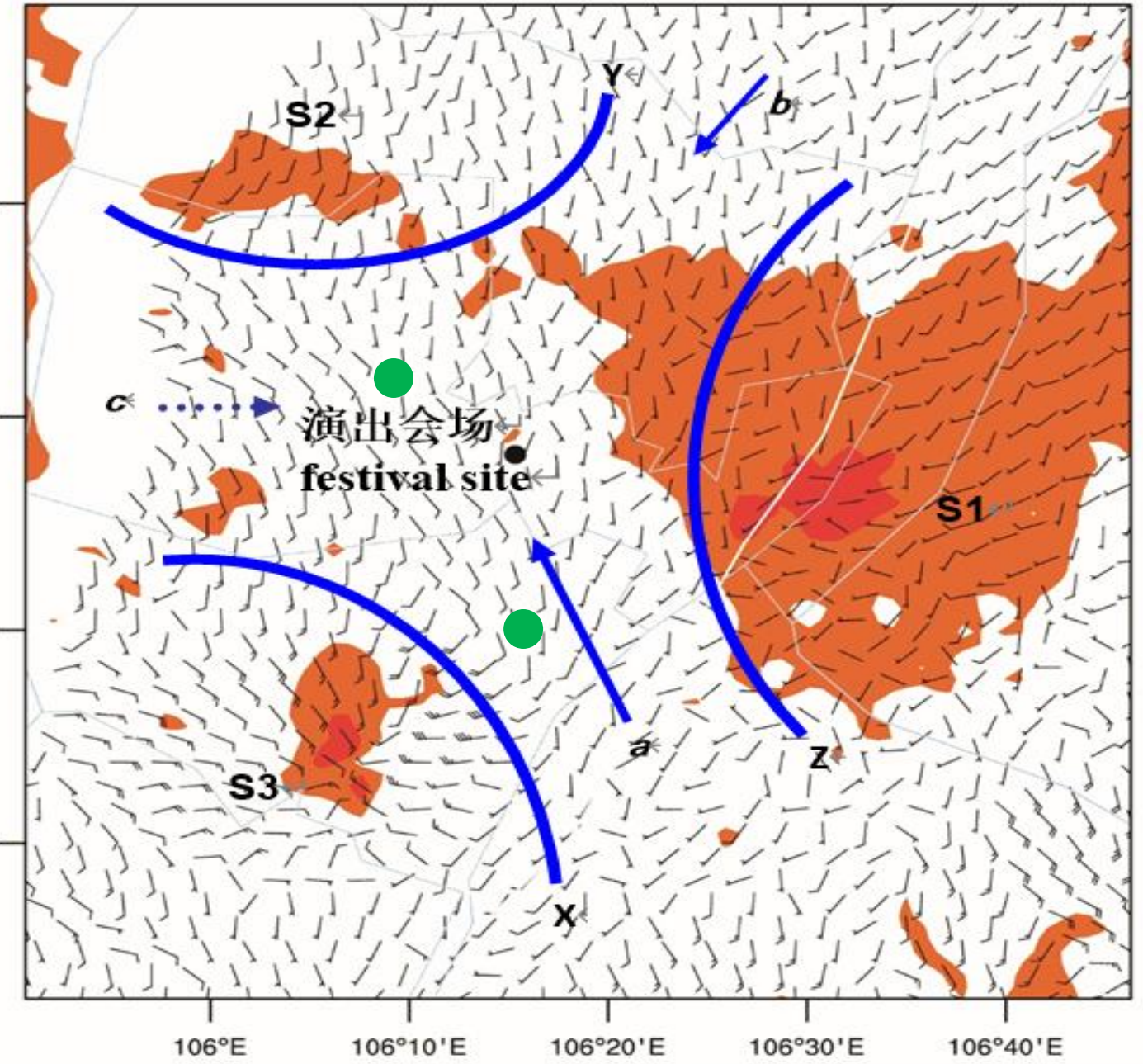
弱回波区(方框所示, 宽度4km, 高度3km)和近地层倾斜结构(从地面向上, 由东南向西北倾斜)

实况比模拟位置偏北约4km, 偏东约6km

模拟总体效果较好  
但...



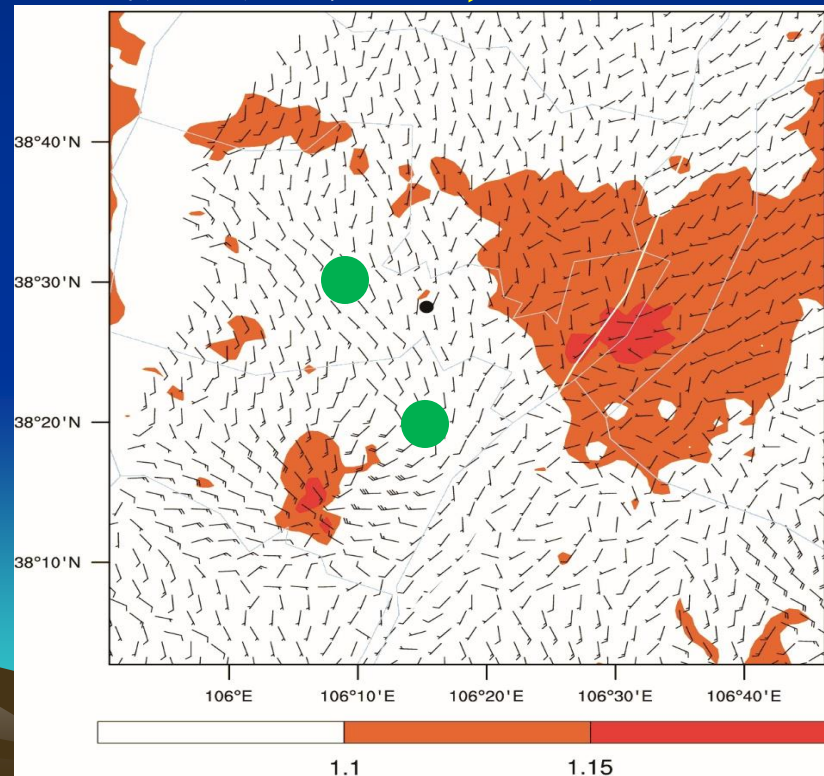
- 直接模拟能力仍有限，**关键系统特征及其出现的时间、地点方面误差明显**。须进一步分析相关线索。
- 阵风锋的本质是雷暴出流的冷空气，参考微下击暴流方法进一步改进，探索较好指数。
- 在原定义的基础上，计算**即时**MBPI探讨强对流产生的阵风锋，表达式为：
- $MBPI = (\theta_{se\ max} - \theta_{se\ min}) / CT$
- 原CT取20°C，对比试验CT取40°C较为合适



- 平均海拔 1100m取 850hPa 反映近地层。
- 17:00 MBPI与 850hPa模拟 风场叠加。
- 其中阵风锋 X与Z合并 后触发次 生强对流 ，沿近地层 东南风移至 银川上空， 导致.....

# 为何有3个阵风锋，为何会聚

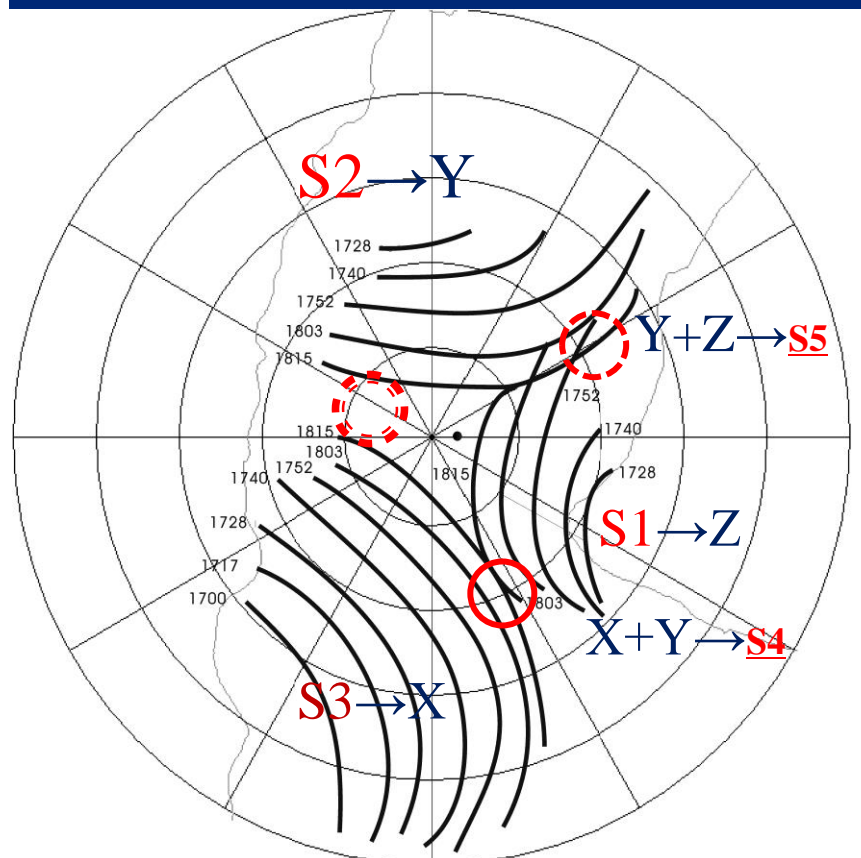
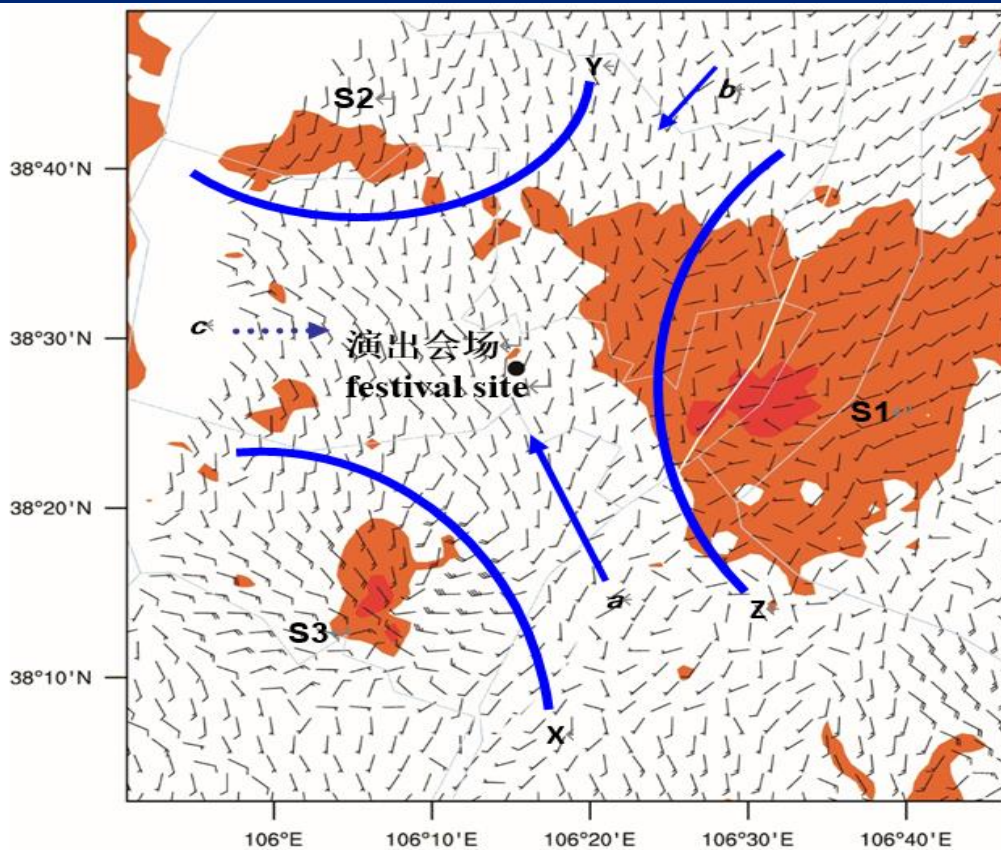
- 因为3团强冷空气从空中摔下来
- 为何会向中心汇聚
  - 因为气压梯度力：3处冷空气向下摔，**中心处暖空气**
- 3条阵风锋表现一样吗
  - 有强有弱，有快有慢



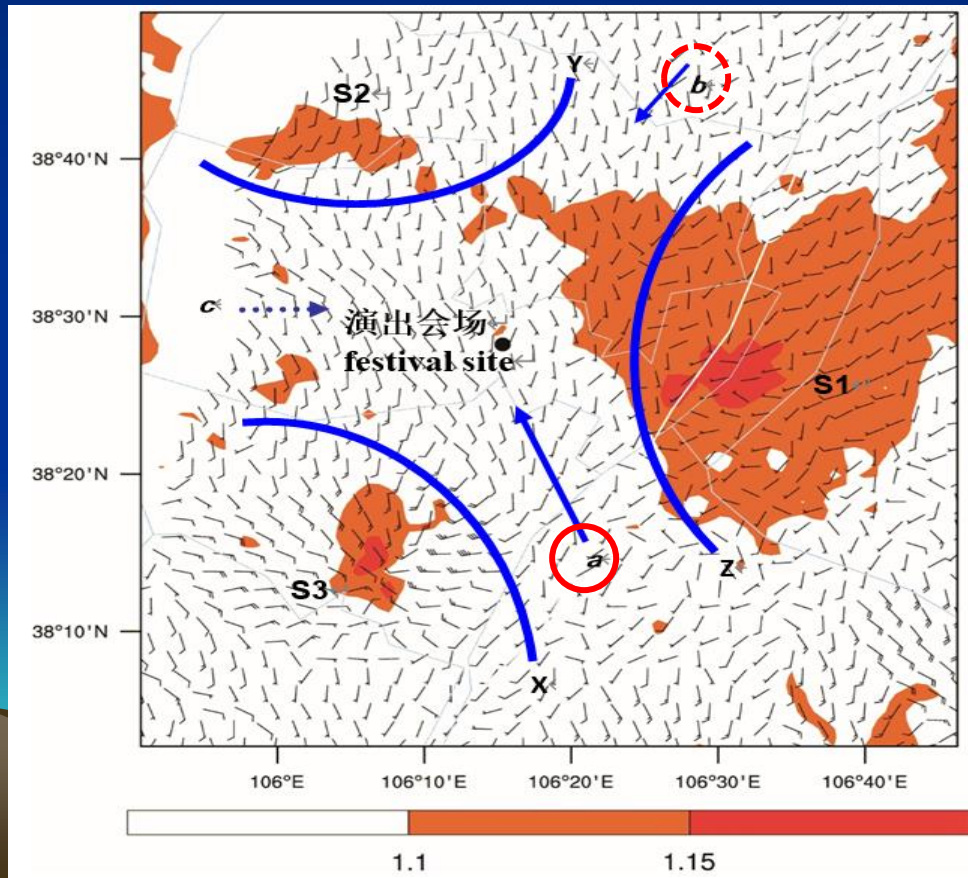


# • 触发几个对流?

- 3条阵风锋交会应有3个会合点。随着各阵风锋的推进，会合点的运动均指向其围成三角形的中心。

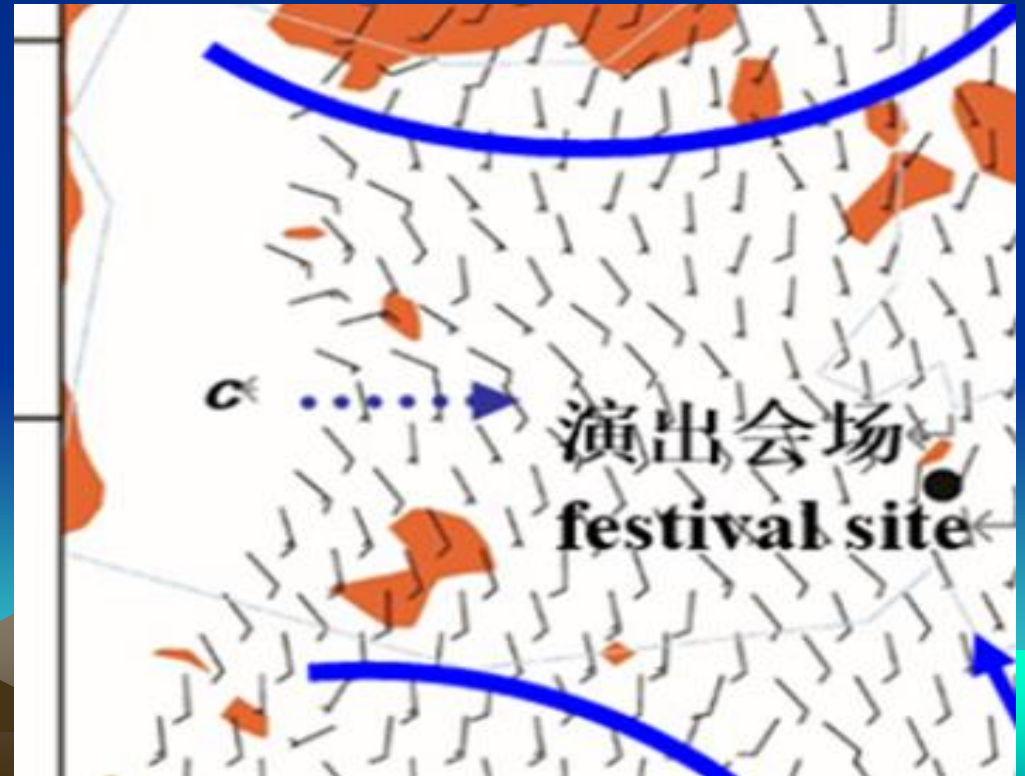


- 在哪里触发，为什么
- 东南和东北方向均触发次生对流。
- 东部的阵风锋**Z**远强于其他，25dBz以上甚至35dBz，动力强劲。其下垫面**黄河与湿地**水汽好，触发成功



- 西方的次生对流？

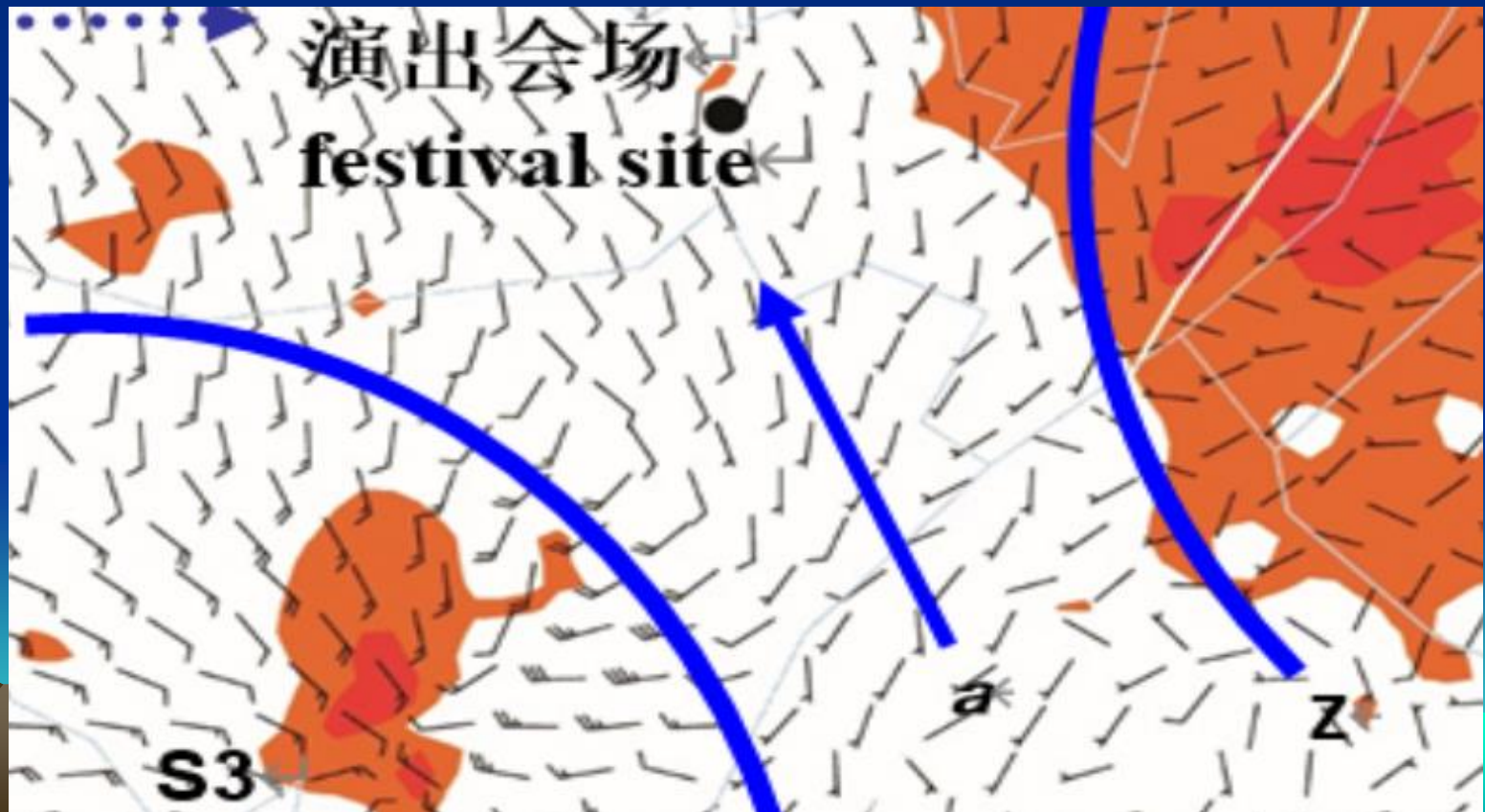
- X、Y会合点应在贺兰山脚下c。首先沙土岩石植被稀少，水汽条件差。其次贺兰山东侧下风处，西风过山后因下坡绝热增温而变干。
- 贺兰山海拔2000~3500m，雷暴冷性出流由市区1100 m左右向山爬升，环境大气因地形升高而气温降低。
- 阵风锋前后温差减小，水汽含量低，未激发出新的对流





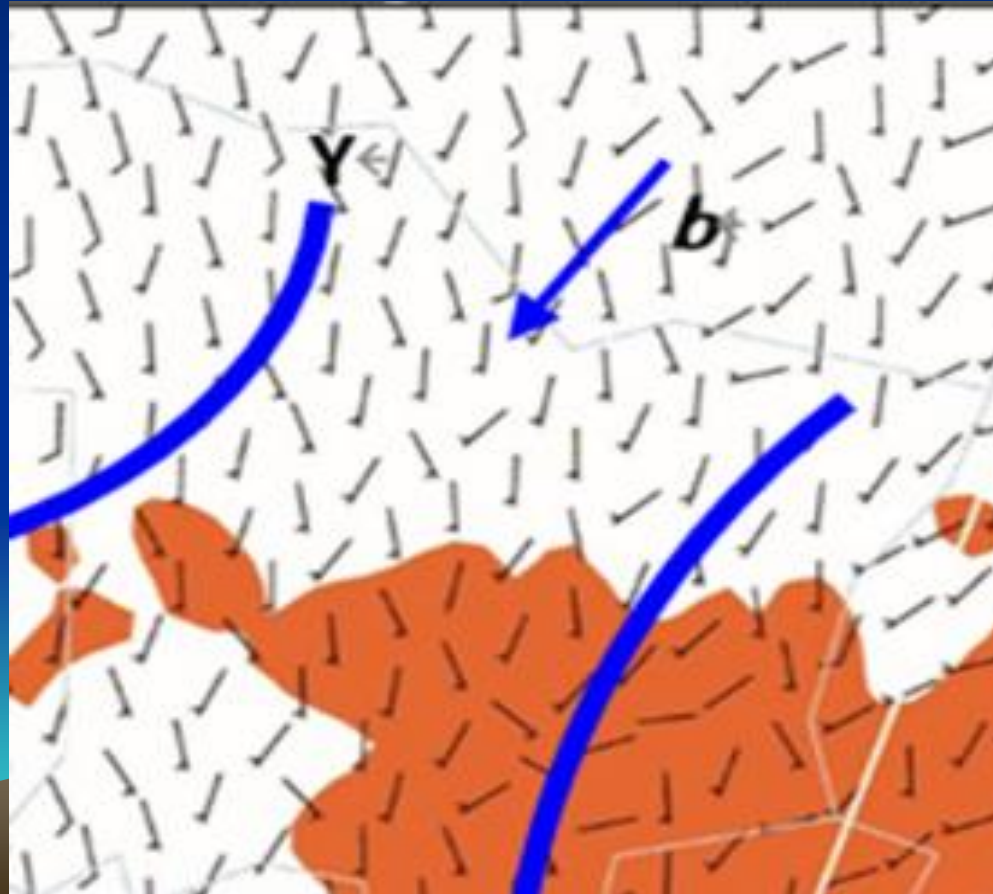
# 为何逆向快速传播

- 阵风锋X、Z会合点由东南向西北移动(矢量 $a$ ), 与近地层风场一致, 的叠加作用加速移动, 迅速影响演出会场。



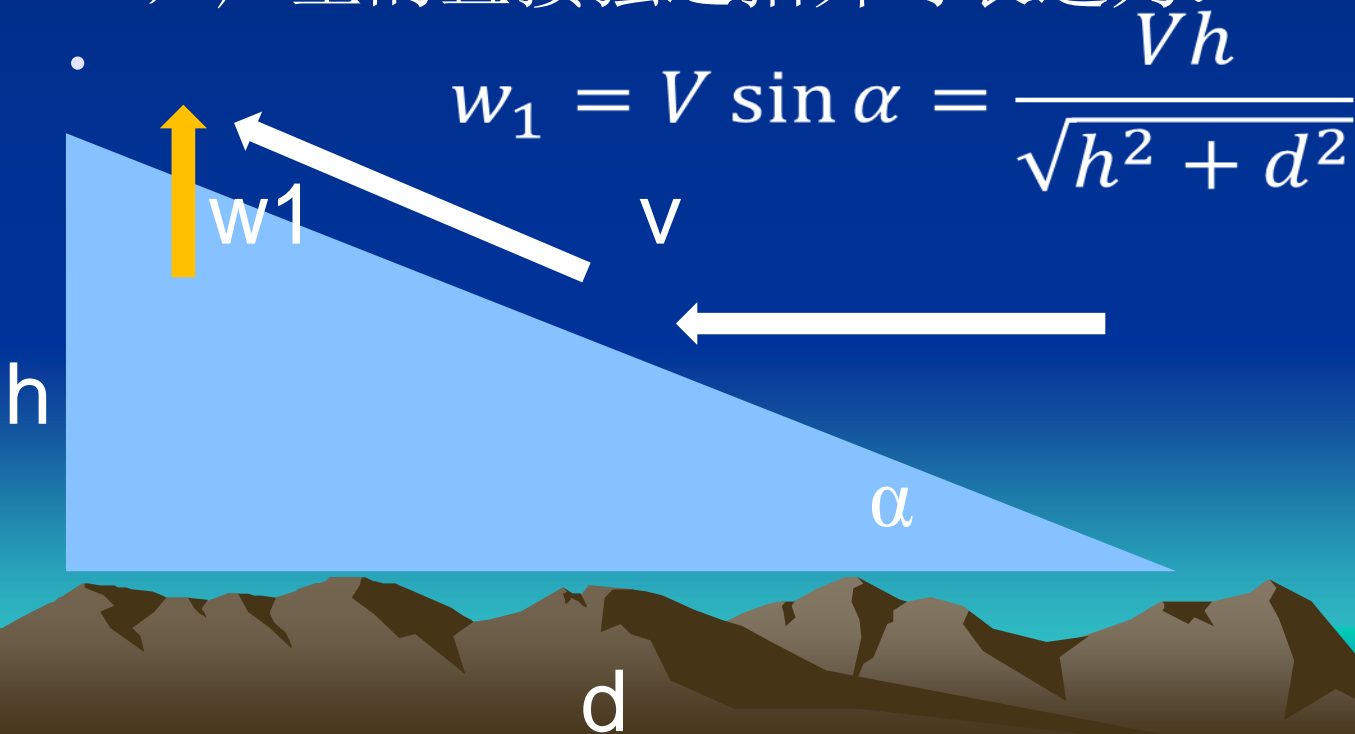


- 东北方次生对流冲过来了吗，为什么
- 准静止原地生消。
- 原因是阵风锋会合点推进矢量 $b$ ，方向与本地流场相反，所以总体运动相互抵消。且强度低，降水微弱，未产生灾害性



# 雷暴为何超强？ 1阵风锋强迫抬升

- 阵风锋运动直接强迫前方的空气抬升。对于高度为 $h$ ，前缘距最高处水平距离为 $d$ 的阵风锋，视为三角楔形。当其相对于前方空气运动速度为 $V$ 时，产生的直接强迫抬升可表述为：



# 将雷达资料代入计算，结果如下

时刻 <sup>↵</sup>	阵风锋 X <sup>↵</sup>				阵风锋 Y <sup>↵</sup>				阵风锋 Z <sup>↵</sup>			
	d km <sup>↵</sup>	h km <sup>↵</sup>	V m/s <sup>↵</sup>	W <sub>1</sub> m/s <sup>↵</sup>	d km <sup>↵</sup>	h km <sup>↵</sup>	V m/s <sup>↵</sup>	W <sub>1</sub> m/s <sup>↵</sup>	d km <sup>↵</sup>	h km <sup>↵</sup>	V m/s <sup>↵</sup>	W <sub>1</sub> m/s <sup>↵</sup>
17:00:11	3.7	2.5	2.25	1.26	↵	↵			↵	↵		
17:05:56	3.7	2.5	2.25	1.26	↵	↵			↵	↵		
17:11:42	3.7	2.5	2.25	1.26	↵	↵			↵	↵		
17:17:27	3.7	2.5	2.25	1.26	↵	↵			↵	↵		
17:23:12	3.7	2.5	2.25	1.26	↵	↵			↵	↵		
17:28:58	4.2	2.5	2.58	1.32	1.6	1	3.06	1.62	2.1	2	1.4	1
17:34:43	5.1	2.5	3.06	1.34	2.8	1	2.89	0.97	2.2	2	1.8	1.2
17:40:29	6.5	2.5	2.72	0.98	3.4	1	2.58	0.73	2.6	2	2.2	1.34
17:46:15	6.5	2.5	2.75	0.99	4.6	1	2.72	0.58	2.6	2	2	1.24
17:52:01	6.5	2.5	2.81	1.01	4.8	1	2.89	0.59	2.8	2	1.8	1.03
17:57:47	6.8	2.5	2.81	0.97	6.6	2	2.89	0.84	2.8	1.5	2.2	1.02
18:03:31	6.8	2.5	2.5	0.86	6.6	2	2.89	0.84	3.2	1.5	2.6	1.1
18:09:17	6.8	2.5	1.78	0.61	6.6	2	2.42	0.7	3.2	1.5	2	0.86
18:15:02			↵		6.6	2.4	2.42	0.83	3.2	1.5	2	0.86
平均 W <sub>1</sub>			1.11 <sup>↵</sup>				0.85 <sup>↵</sup>				1.07 <sup>↵</sup>	

平均为**1.01 m/s**。从第一条阵风锋到次生触发大致**4500s**。  
 平均直接强迫抬升空气已到达地面之上**4545m**。  
 当时自由对流高度(LFC)**667 hPa**，海拔**3533 m**，即地之表上**2433 m**大致为**2400m**。直接强迫造成的空气**上升高度**已远超**LFC**，从而产生自由对流。

## 2 挤压辐合导致的强迫上升

- 阵风锋的高度 $H=2160\text{m}$ ，会合用时 $t=4500\text{s}$ 。
- 平均高度为 $H$ 的阵风锋，围住空气面积由 $S_a$ 减小到 $S_b$ ，空气的体积减少： $(S_a - S_b) \times H$
- 假设被围区域的面积线性减小，则过程中平均的面积 $(S_a + S_b)/2$ 。
- 挤压导致的平均强迫上升运动：

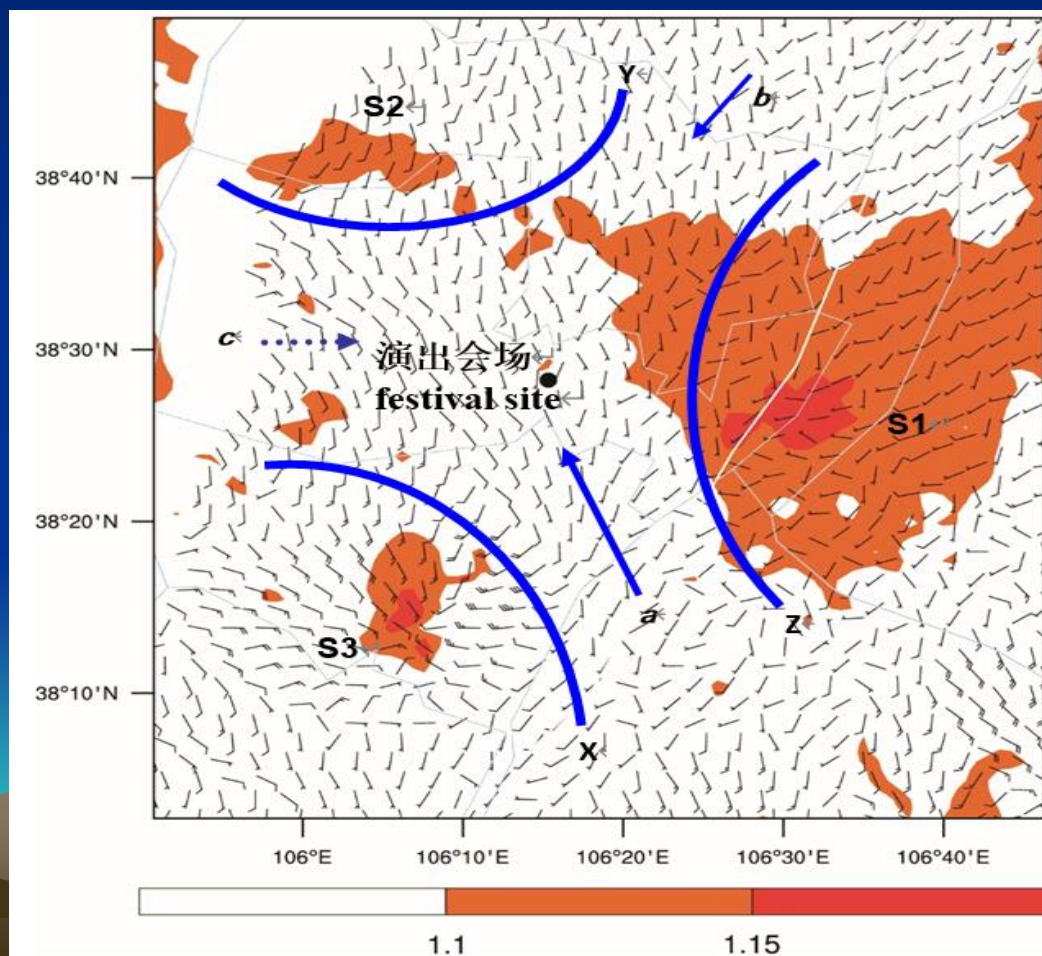
$$N_2 = \frac{(S_a - S_b) \times H}{\frac{(S_a + S_b)}{2} \times t} = \frac{2(S_a - S_b) \times H}{(S_a + S_b) \times t}$$





- 3地形爬坡
- $v \sim 0$ 。由东向西  $u < 0$ ，与雷达观测到的次生雷暴移动路径一致。地形特点为：东部黄河湿地海拔较低，西部贺兰山区较高，地形造成了强迫上升。

仅考虑沿黄河到贺兰山缓慢上坡过程，黄河一带的海拔为1103m，会合点处的海拔约1110m，速度  $W3=0.02\text{m/s}$ ，**相对有限。**



# • 谁关键：Z很重要

- 东部的阵风锋Z最强，动力触发
- Z由东部向西推进，总体逐步爬坡
- 与其他两者合围造成暖空气更密集加强锋面。西侧贺兰山封闭，更加有利于新生对流触发。
- 贡献了来自湿地更加充沛的水汽



- 进一步证实，水汽对雷暴意义重大，西北干旱区近地层水汽条件往往是天气系统和天气过程的关键。同时也证实，下垫面地形、近地层流场等情况会影响阵风锋，对其触发对流情况产生不同作用。
- 过程表明，强阵风锋与有利的水汽条件相结合可触发强烈的次生对流。较弱的阵风锋与有利的水汽条件相结合也可触发弱次生对流。而水汽条件不佳的地域，相对不强的阵风锋未触发次生对流。

- 灾害预警往往取决于对其移动的预报。不考虑具体情况简单外推未必行。可能因环境风场加速运动而影响迅速，时间大为提前。基本静止、原地生消的对流，则更应高度警觉，关注其降水累加效果。
- 本地年均降水仅为180mm，而一个次生对流在1h内降水19.5 mm，表明其强度超常。当日下午已经发生原生对流，不稳定能量有所释放，空气中的部分水汽也通过降水而有所减少，条件并不特别有利，且而黄河湿地区域水汽充沛，平常也可具备较好的条件所以水汽并不特别。从对流的机制来说，本次过程中造成异常强度最核心的因素是上升运动

- 从强迫上升来看，首先阵风锋运动的直接抬升效应  $W1=1.01\text{m/s}$ ， $\gg$  LFC。其次围拢挤压  $W2=0.71\text{m/s}$   $\gg$  LFC。  $W3=0.02\text{m/s}$ 。从数值来看  $W3: W2: W1=1: 35.5: 50.5$ ，或者说沿地形强迫上升占垂直运动的1.1%，围拢挤压占40.9%，直接强迫占58.0%。
- 本次阵风锋除了一般的推进强迫外，特殊的合围效应对异常强烈的次生对流产生了巨大的贡献。



# 天气现象， 哪些灾害

- 为何暴雨， 为何闪电
  - 充足水汽， 极强的上升运动
- 为何冰雹
  - 400hPa温度露点差高达 $26^{\circ}\text{C}$ ， 干层十分明显， 另 $0^{\circ}\text{C}$ 层在4km上下，  $-20^{\circ}\text{C}$ 层高度在400hPa附近： 冰雹的标准配置
- 为何大风
  - 极强MBPI。 原指数对下击暴流除以20， 我们除以40才达相同数值。 次生对流在进一步西移后， 19: 18出现了下击暴流特征。 距雷达中心水平距离11.25km、 垂直高度98m处， 最大值为30m/s
- 强烈降温
  - 极强MBPI对应的强冷性出流

# 灾害预报依据

- 400hPa温度露点差高达 $26^{\circ}\text{C}$ ，干层十分明显，应考虑冰雹。另 $0^{\circ}\text{C}$ 层高度在4km上下， $-20^{\circ}\text{C}$ 层高度在400hPa附近：冰雹经典配置。
- 400hPa干层加强下沉冷空气，与冰雹、强降水高速降落的拖曳气流动力效应相配合，结合雷暴出流，会有显著局地雷暴大风和气温骤降现象。
- 低层水汽并非极为充沛，冰雹颗粒不会很大。
- 应考虑暴雨、雷电、冰雹以及大风预警

# 线索：时间提前量

- 阵风锋演变(强度dBz, 长宽高km<sup>3</sup>, 速度km/h, 预计会合用时min)

时刻	阵风锋 X				阵风锋 Y				阵风锋 Z			
	强度	长×宽×高	速度	会合用时	强度	长×宽×高	速度	会合用时	强度	长×宽×高	速度	会合用时
17:00:11	30	32.1×3.7×2.5	8.1	103								
17:05:56	25	39.6×3.7×2.5	8.1	97								
17:11:42	25	41.2×3.7×2.5	8.1	91								
17:17:27	25	43.8×3.7×2.5	8.1	85								
17:23:12	25	45.3×3.7×2.5	8.1	79								
17:28:58	25	47.1×4.2×2.5	9.3	63	15	9.7×1.6×2	11.0	57	25	15.7×2.1×2	5.2	82
17:34:43	25	51.2×5.1×2.5	11.0	49	15	16.9×2.8×2	10.4	56	25	16.9×2.2×2	6.4	67
17:40:29	20	65.3×6.5×2.5	9.8	47	15	28.6×3.4×2	9.3	55	25	24.4×2.6×2	7.9	49
17:46:15	20	65.7×6.5×2.5	9.9	41	15	45.9×4.6×2	9.8	46	25	52.7×2.6×2	7.3	44
17:52:01	20	68.4×6.5×2.5	10.1	35	20	59.8×4.8×2	10.4	37	35	55.3×2.8×2	6.4	43
17:57:47	20	64.5×6.8×2.5	10.1	22	20	64.3×6.6×2	10.4	31	35	58.6×2.8×1.5	7.8	31
18:03:31	20	62.9×6.8×2.5	9.0	16	20	64.1×6.6×2	10.4	23	35	55.2×3.2×1.5	9.3	21
18:09:17	15	62.9×6.8×2.5	6.4	15	20	57.3×6.6×2	8.7	16	35	55.2×3.2×1.5	7.3	17
18:15:02					20	57.3×6.6×2.5	8.7	14	35	55.2×3.2×1.5	7.3	13

一般地面辐合线碰撞后15~30min产生对流风暴。本次生对流在阵风锋会合后2~4个体扫周期，即12~24min发展后进入强盛。在阵风锋合并、新生对流逐渐发展之后，仍有临近预警的宝贵时间。



# 持续时间与消亡

- 大气环流和天气系统均无长时间过程的特征
- CAPE 2206 J/kg, 较弱垂直切变符合短生命史, 非组织风暴特点, 持续约1hr
- 19:00旺盛对流最大回波面积100km<sup>2</sup>, 强度55~60dBz, VIL27kg/m<sup>2</sup>。有逆风区
- 20:00次生对流云团迅速减弱消亡, 强度小于30dBz, 回波顶高降到8km以下。大气中水汽因降到地面而减少, VIL降至5kg/m<sup>2</sup>, 辐散场,
- 移过会场后有下击暴流

# 概念模型

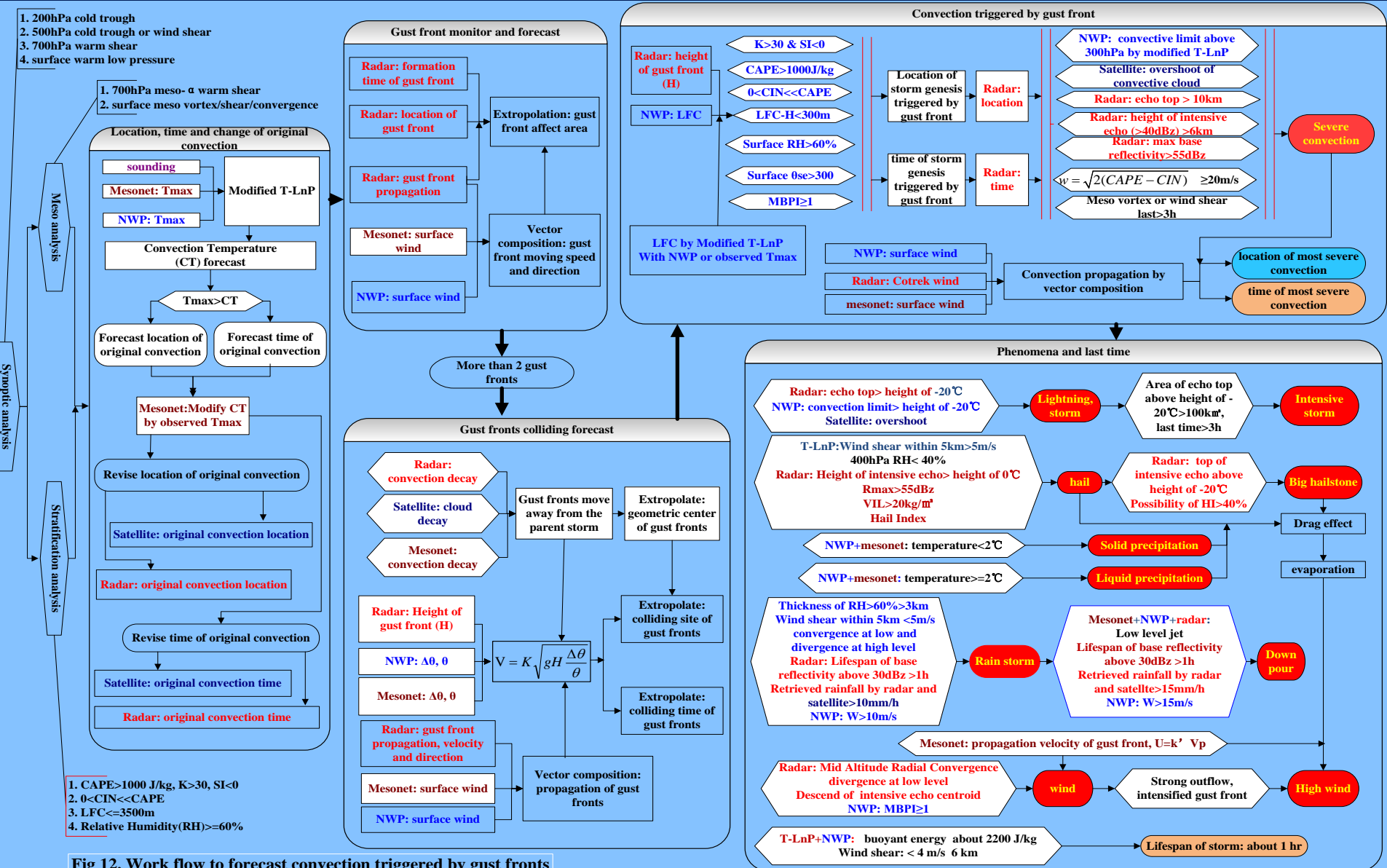


Fig 12. Work flow to forecast convection triggered by gust fronts

• 敬请批评指正

• 成都信息工程大学 胡文东

• 136 8344 7260

• Hu.wendong@163.com







