



中山大學
SUN YAT-SEN UNIVERSITY

<http://atmos.sysu.edu.cn/teacher/1415>

龙卷风识别与灾害调查

白兰强

中山大学 大气科学学院

2020年7月21日



气象灾害调查案例

1. 2015年6月01日 “东方之星”客轮倾覆 (442人遇难)
2. 2015年10月4日 彩虹台风佛山龙卷 (4人遇难)
3. 2016年6月23日 江苏盐城阜宁龙卷 (98人遇难)
4. 2017年8月11日 内蒙古赤峰龙卷 (5人遇难)
5. 2018年9月17日 山竹台风佛山龙卷



目录

- 龙卷风定义与相关概念
- 龙卷风的识别
 - ✓ 雷达遥感观测
 - ✓ 地面灾害特征
- 龙卷灾害调查的意义
- 龙卷灾害调查主要内容和步骤
- 龙卷灾害调查数据整理
- 龙卷灾害定级与结果展示
- 摄影测量法简介

龙卷风定义



龙卷风定义

是一种从积状云下垂至地面的旋转空气柱。人称**大气圈灭霸**。
出现在陆地叫陆龙卷，出现在水面叫水龙卷。



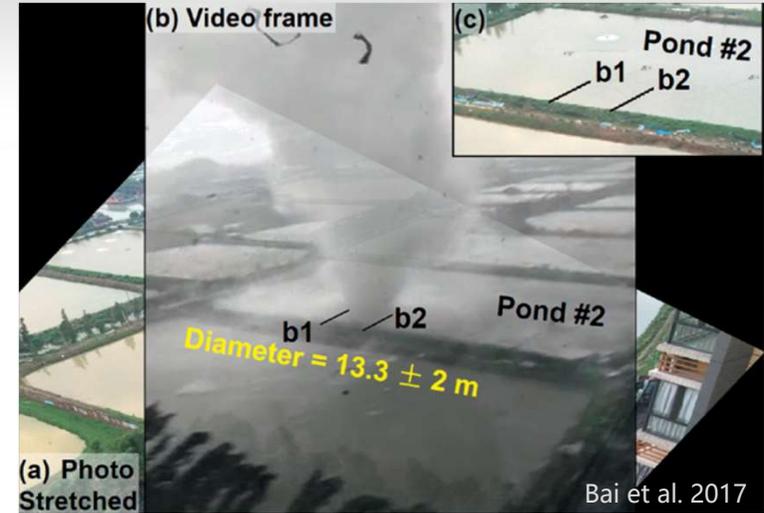
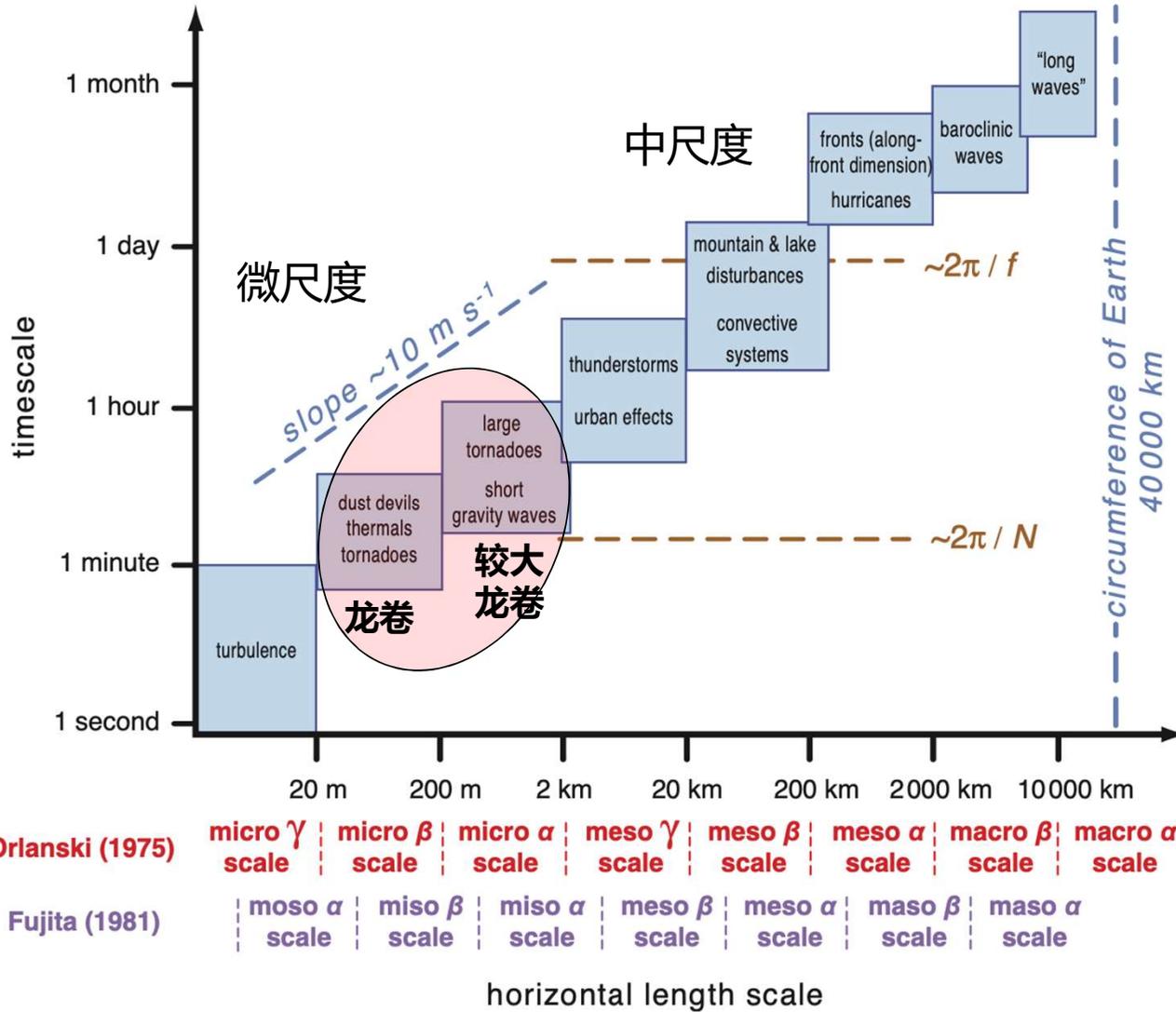
楔形 [xiē xíng]



视频来自网络

锡林浩特 2020/6/24

龙卷尺度



名词解释

Mesovortex, mesocyclone, mesoscale convective vortex, tornado vortex

ICS 07. 060
A 47



中华人民共和国气象行业标准

QX/T 478—2019

龙卷强度等级

Tornado intensity scale

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由全国气象防灾减灾标准化技术委员会(SAC/TC 345)提出并归口。

本标准起草单位:中国气象科学研究院、国家气象中心。

本标准主要起草人:姚聃、梁旭东、孙继松、郑永光、周庆亮。

2.1

龙卷 tornado

从积状云下垂到地面的旋转空气柱。

注:常表现为漏斗状云体。

[GB/T 34301—2017,定义 2.1]

2.2

漏斗云 funnel cloud

从积状云向下伸展的云,通常呈漏斗状,伴随有旋转空气柱。

注:漏斗云接地时该旋转空气柱为龙卷。

2.3

对流性风暴 convective storm

由积雨云构成的局地天气系统,常伴有雷电、大风、强降水,有时会产生冰雹甚至龙卷。

2.4

阵风风速 gust wind speed

某时刻的阵性风速。

2.5

径向速度 radial velocity

三维风速矢量沿径向的分量。

注:在多普勒天气雷达观测中也称多普勒速度。

2.6

龙卷式涡旋特征 tornadic vortex signature;TVS

龙卷中心的涡旋性气流在多普勒天气雷达上的径向速度特征。通常为气旋性,表现为雷达径向速度场上相邻方位角像素之间的强烈气旋式切向速度对。

2.7

中气旋 mesocyclone

对流性风暴中出现的呈气旋性旋转的涡旋,通常直径为 2 km~10 km。

2.8

灾害调查 damage survey

对灾害现场和天气背景情况的勘察、取证、评估和分析,以确定是否为龙卷灾害以及龙卷的灾损程度、影响范围和强度等级。

名词解释

Mesovortex, mesocyclone, mesoscale convective vortex, tornado vortex

<2 km

Mesovortex: Meso- γ -scale vortex (2–20 km; Orlanski, 1975)

中气旋 mesocyclone 2—10 km

对流性风暴中出现的呈气旋性旋转的涡旋,通常直径为 2 km~10 km。

mesoscale convective vortex

(Abbreviated MCV.)

50—200 km

A midlevel, warm-core low pressure center that develops within the stratiform region of a mesoscale convective system (MCS) as a result of latent heat release over a multihour time period. The cyclonic vortex has a diameter ranging from 50 to 200 km (31 to 124 mi) and a depth from 2.5 to 5 km (1.5 to 3.1 mi). An MCV can persist for 12 hours or more after its parent MCS has dissipated.

龙卷式涡旋特征 tornadic vortex signature;TVS

龙卷中心的涡旋性气流在多普勒天气雷达上的径向速度特征。通常为气旋性,表现为雷达径向速度场上相邻方位角像素之间的强烈气旋式切向速度对。

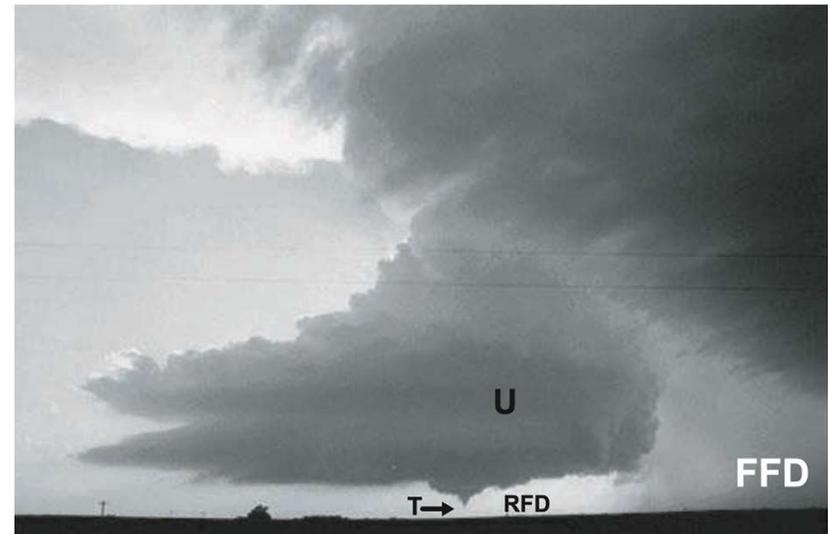
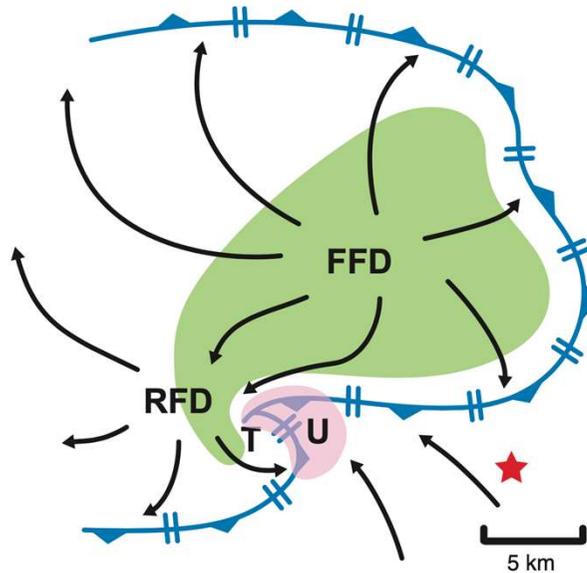
龙卷母体风暴

对美国3828个**龙卷统计**: **79% cell**; **18% QLCS**; 3% others (Trapp et al. 2005a)

对美国730个**TC龙卷统计**: **79%母体风暴为超级单体** (Edwards et al. 2012)

对美国5322个**超级单体统计**: **26%有龙卷生成** (Trapp et al. 2005b)

超级单体



Markowski and Richardson 2010

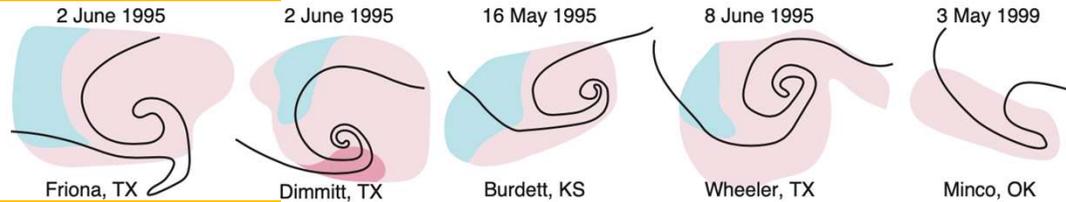
龙卷母体风暴

对美国3828个龙卷统计: **79% cell**; **18% QLCS**; 3% others (Trapp et al. 2005a)

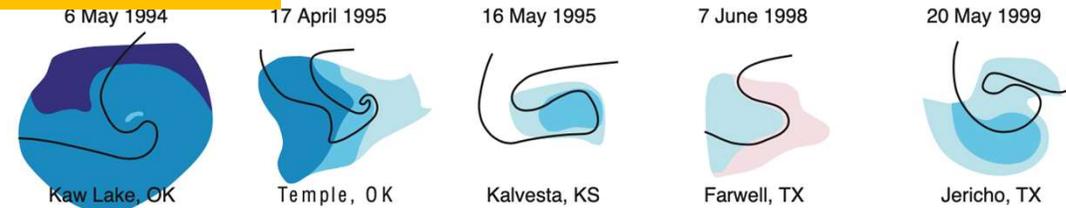
对美国730个TC龙卷统计: **79%母体风暴为超级单体** (Edwards et al. 2012)

对美国5322个超级单体统计: **26%有龙卷生成** (Trapp et al. 2005b)

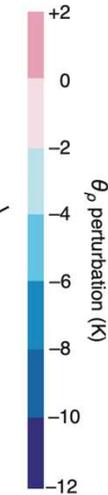
强龙卷



弱龙卷

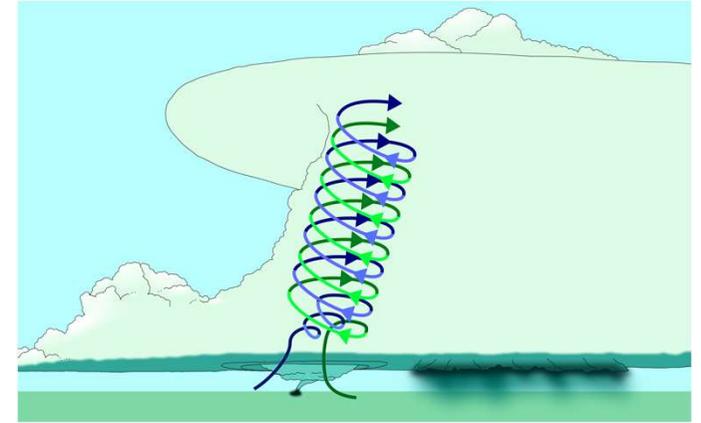
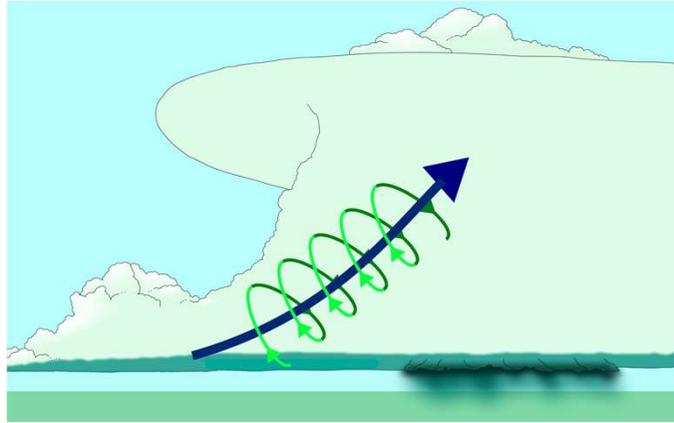
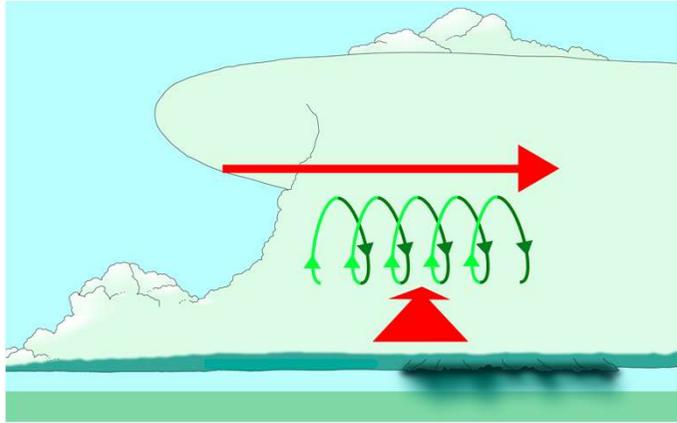


无龙卷



Markowski and Richardson 2010

中气旋的形成



From wiki, by Vanessa Ezekowitz

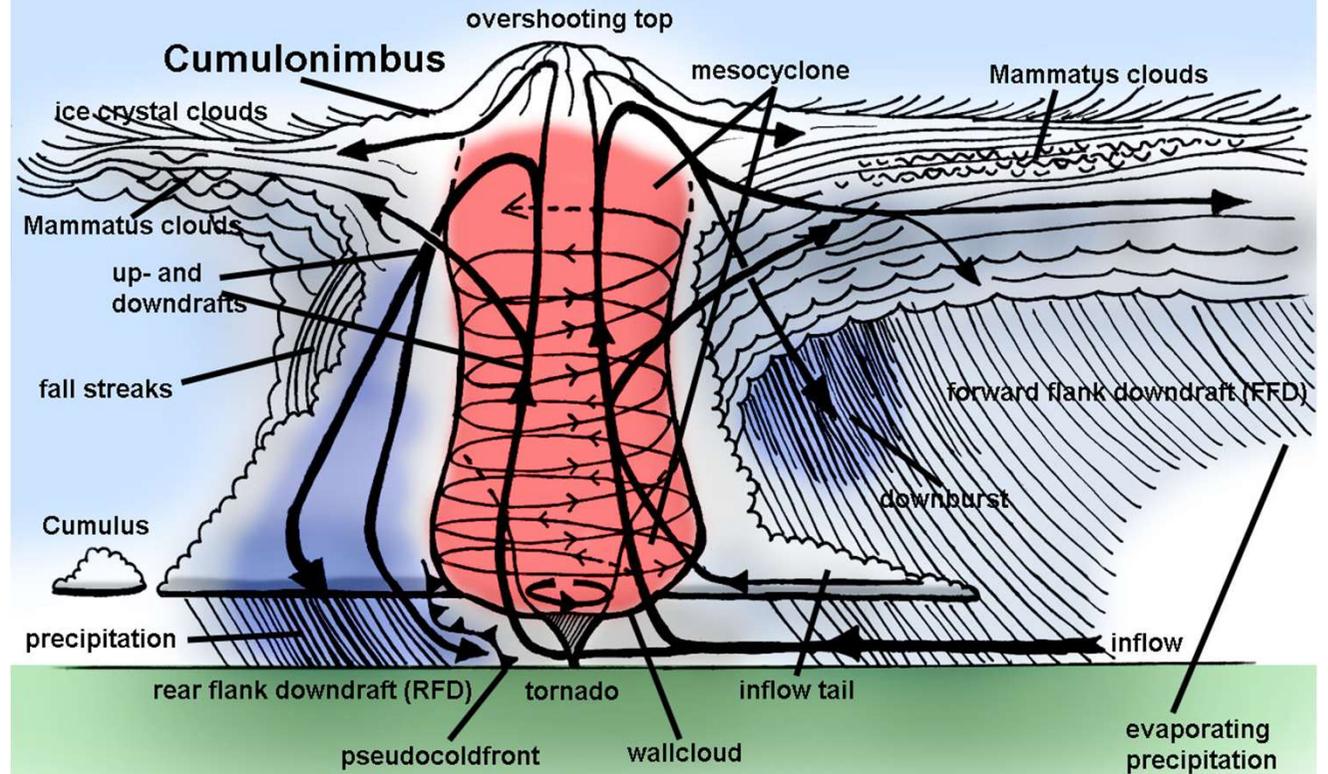


超级单体 (Supercell)

中气旋与龙卷的尺度不同



Side view of a supercell



From wiki, by Michael Graf

目录

- 龙卷风定义与相关概念
- 龙卷风的识别
 - ✓ 雷达遥感观测
 - ✓ 地面灾害特征
- 龙卷灾害调查的意义
- 龙卷灾害调查主要内容和步骤
- 龙卷灾害调查数据整理
- 龙卷灾害定级与结果展示
- 摄影测量法简介

龙卷的识别

QX/T 478—2019

ICS 07.060
A 47

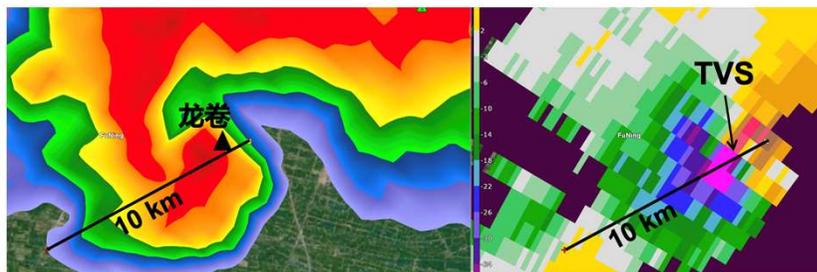
QX

中华人民共和国气象行业标准

QX/T 478—2019

3 龙卷判识

3.1 气象资料预判



出现疑似龙卷报告之后,首先应分析气象资料,判断造成风灾的天气系统。然后利用多普勒天气雷达资料,识别对流性风暴的中气旋和/或 TVS,并根据最低仰角观测确定中气旋和/或 TVS 路径。

3.2 直接判识



调研收集龙卷漏斗云影像资料(包括照片和视频),分析拍摄时间、位置、角度、人员等关键信息,结合现场调查或中气旋和/或 TVS 识别结果验证其真实性,判定龙卷是否发生。

3.3 间接判识

3.3.1 如果没有漏斗云影像资料,应在灾害发生 72 小时内开展客观详尽的灾害调查,搜集龙卷发生的判定依据。龙卷造成的灾情通常呈狭长型分布,倒伏物呈辐合或旋转状特征。如灾情与雷达观测的中气旋和/或 TVS 路径相吻合,可判定龙卷的发生。

3.3.2 如果没有漏斗云影像资料,也未能及时开展灾害调查,可通过“雷达观测中 2 km 以下高度出现中气旋”或“最低仰角观测出现 TVS”作为依据,经由专家会商确定龙卷是否发生。

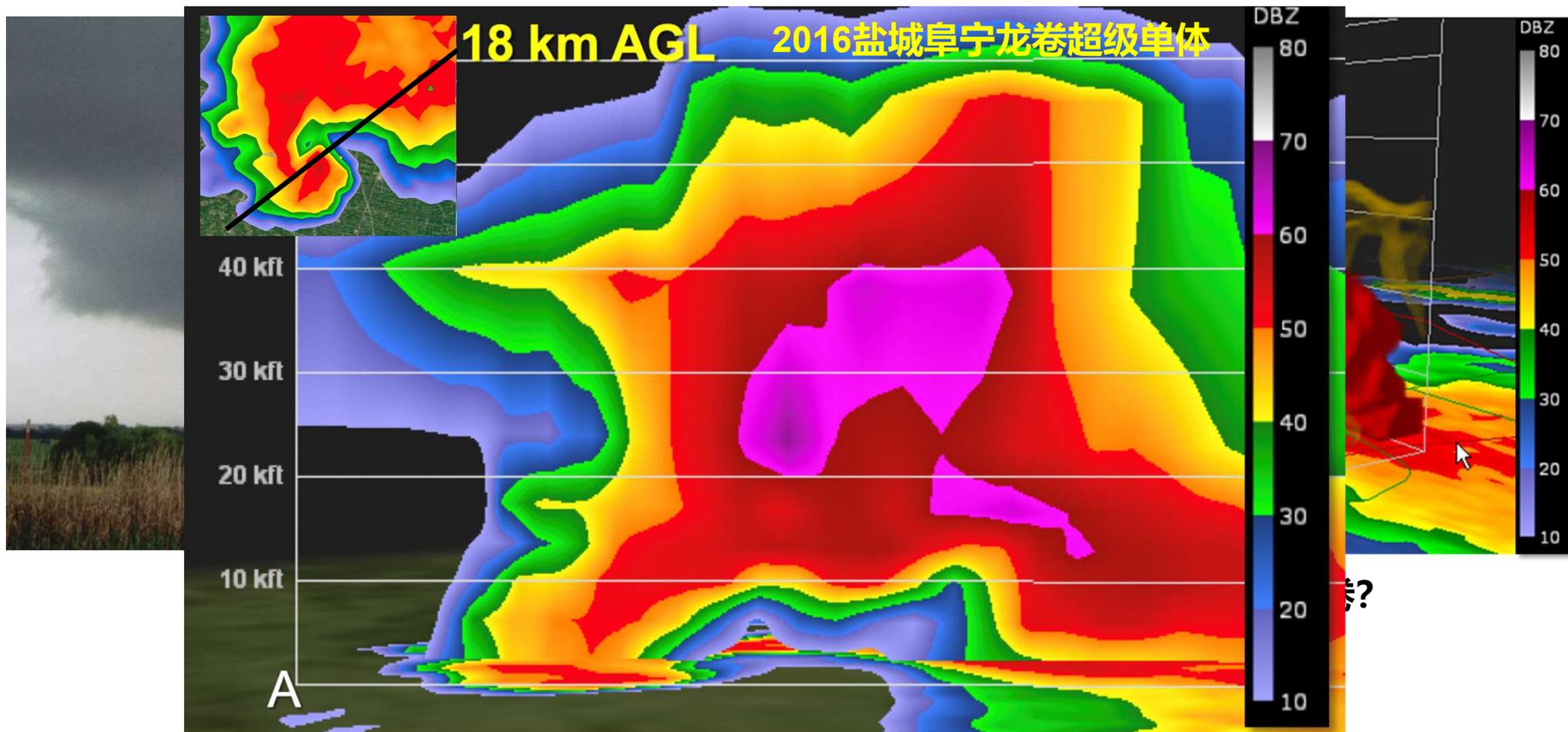
龙卷强度等级

Tornado intensity scale

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。
本标准由全国气象防灾减灾标准化技术委员会(SAC/TC 345)提出并归口。
本标准起草单位:中国气象科学研究院、国家气象中心。
本标准主要起草人:姚鹏、梁旭东、孙继松、郑永光、周庆亮。

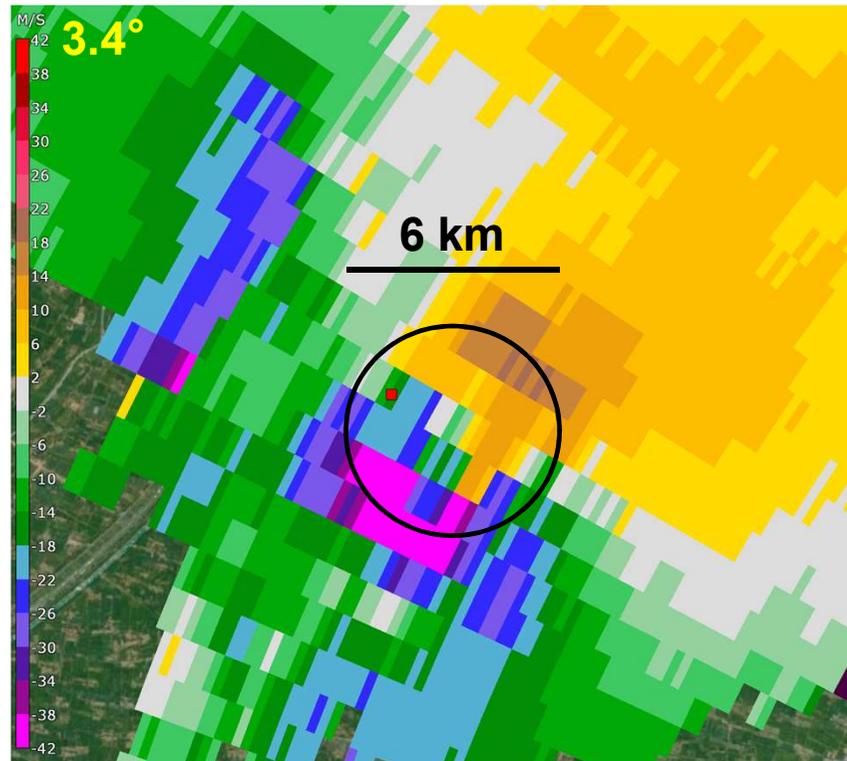
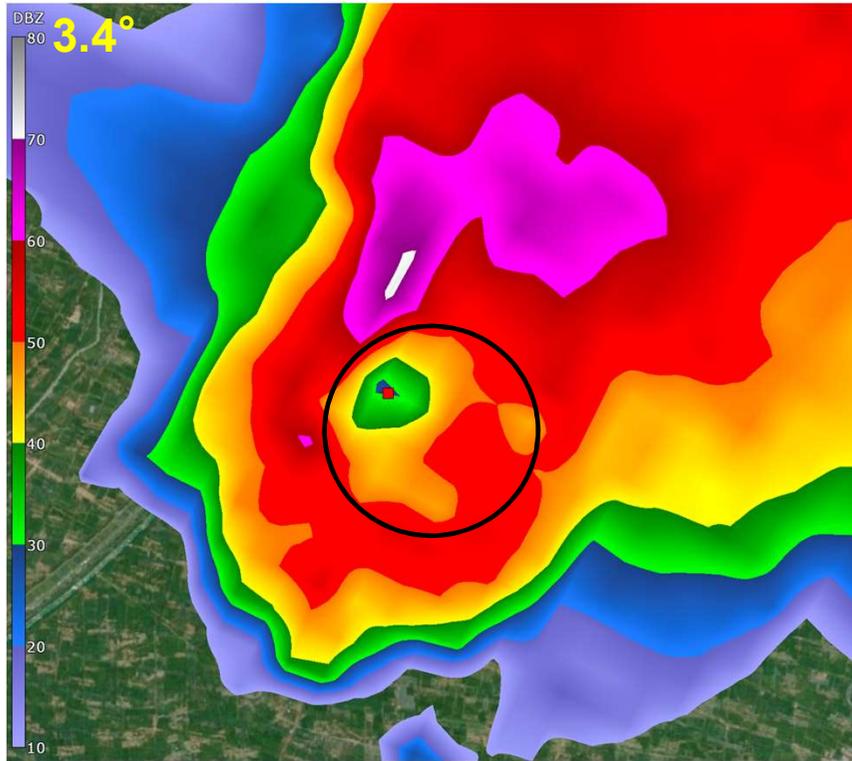
雷达遥感观测：超级单体

1、中低层仰角才能看到“钩状回波” (hook echo signature)



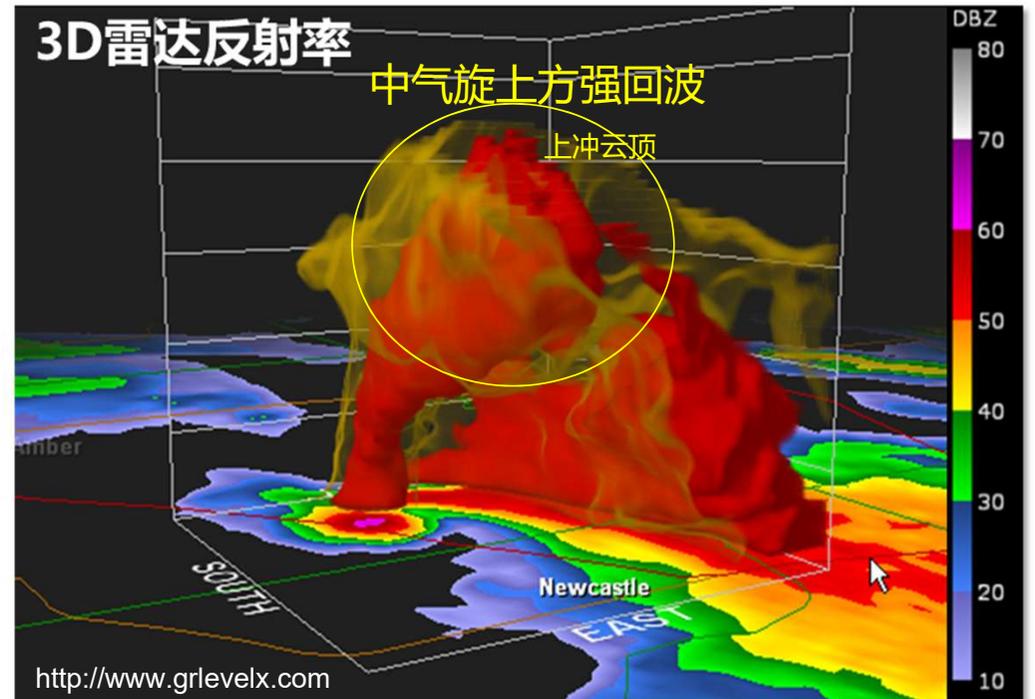
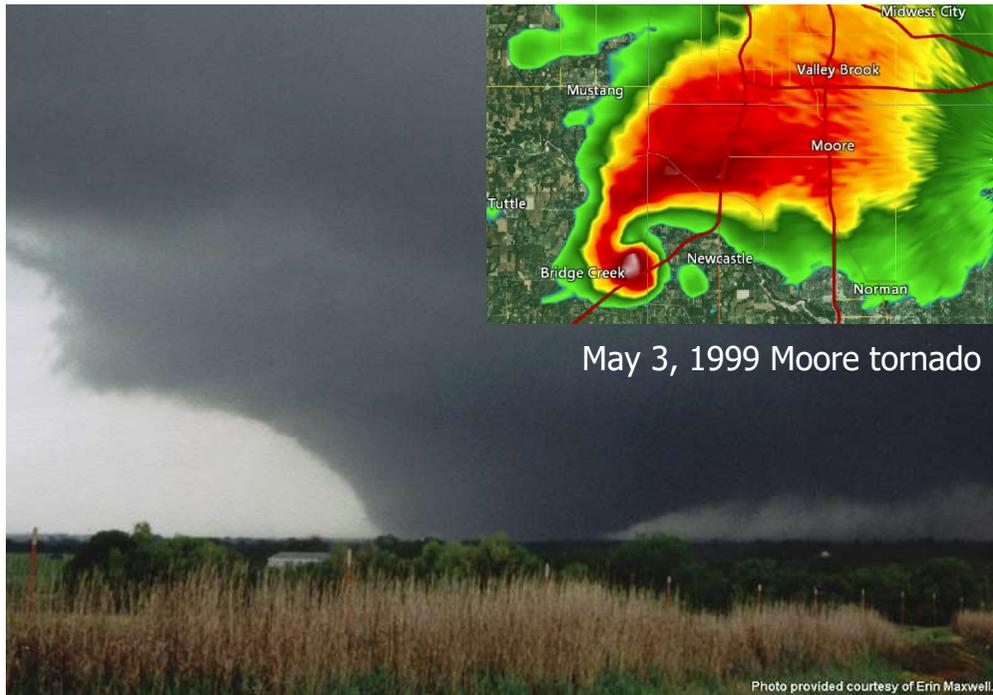
雷达遥感观测：中气旋

2016盐城阜宁龙卷超级单体



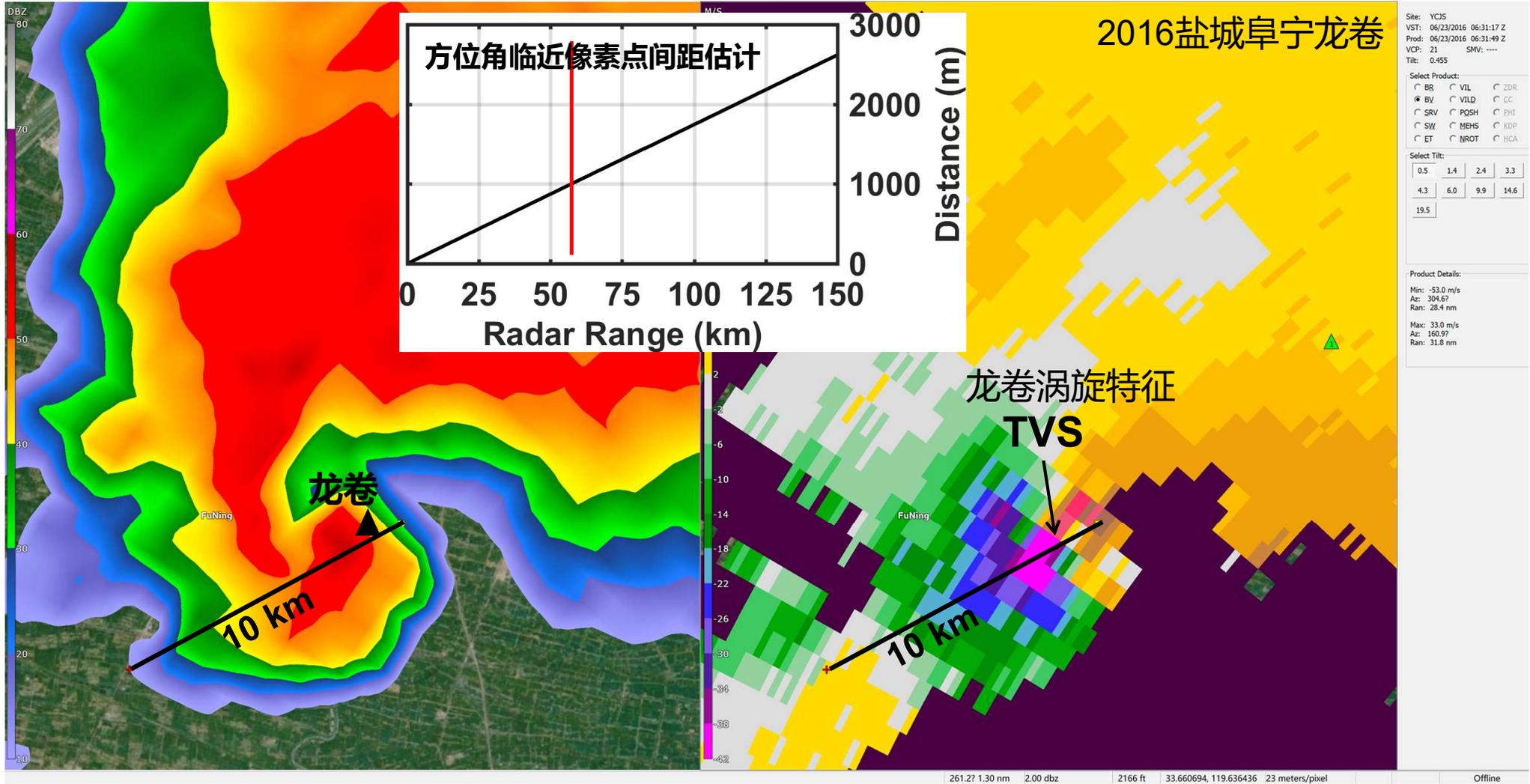
雷达遥感观测：超级单体

1、中低层仰角才能看到“钩状回波” (hook echo signature)



2、“大象鼻子” = 龙卷?

雷达遥感观测：钩状回波、TVS

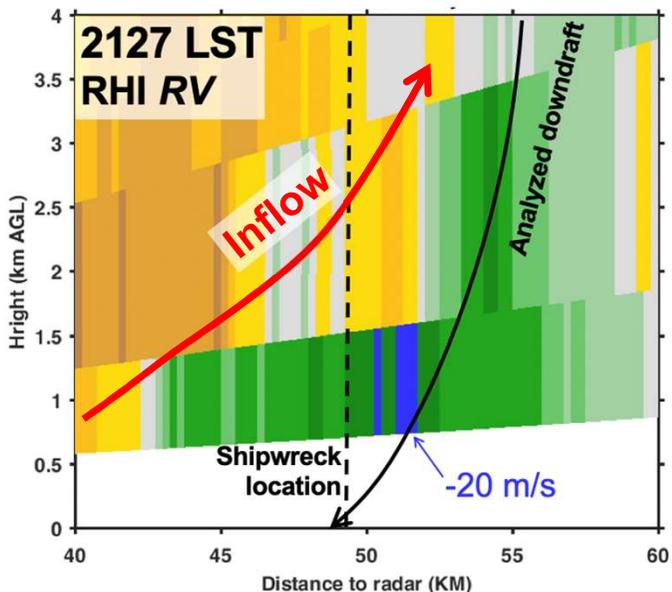


雷达遥感观测 龙卷识别

2123 LST 2.4°

(o) G8

Assuming the same scenario in Fujita (1981), surface wind speed >28 m/s.



Vertical section along the radar beam across the wreck location.

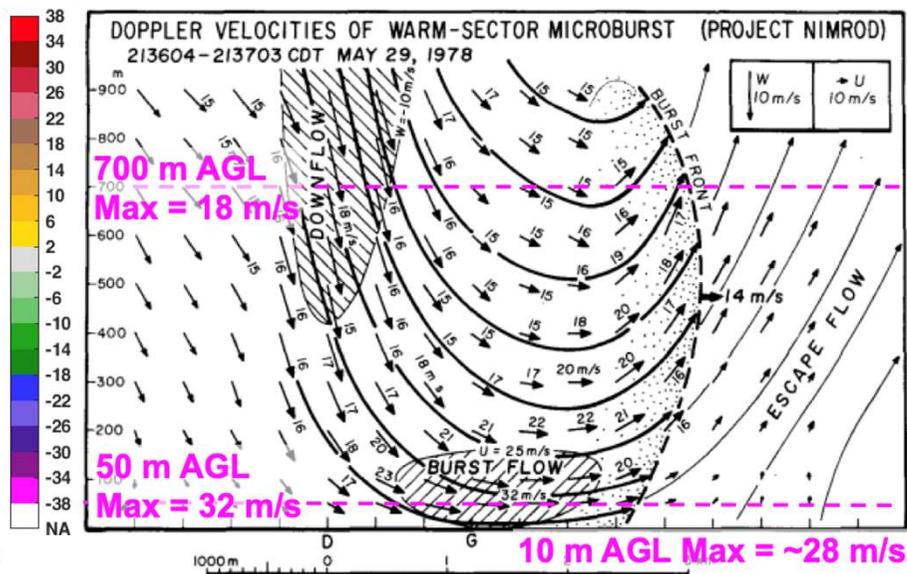
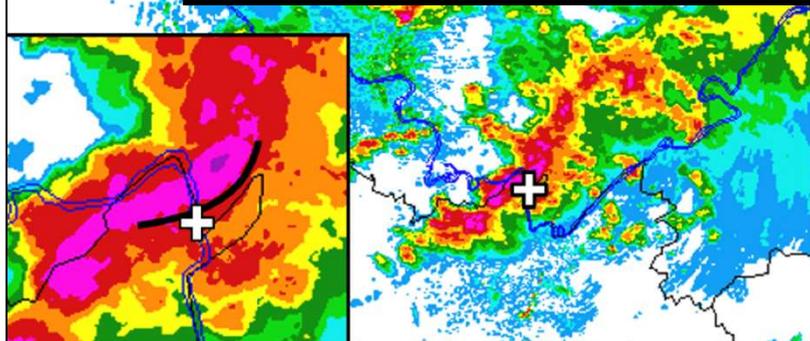
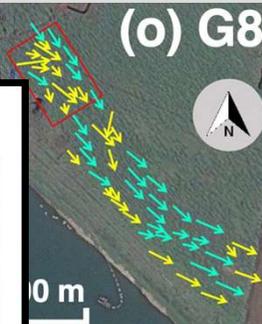
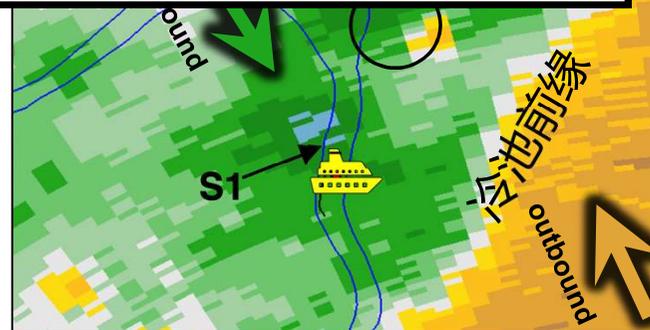


Fig. 29 in Fujita (1981): Doppler velocities of a microburst within 0.8 km of the radar.



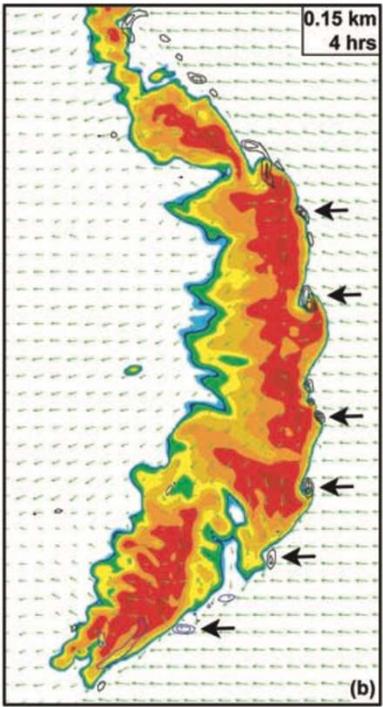
- 无TVS
- 冷池之后



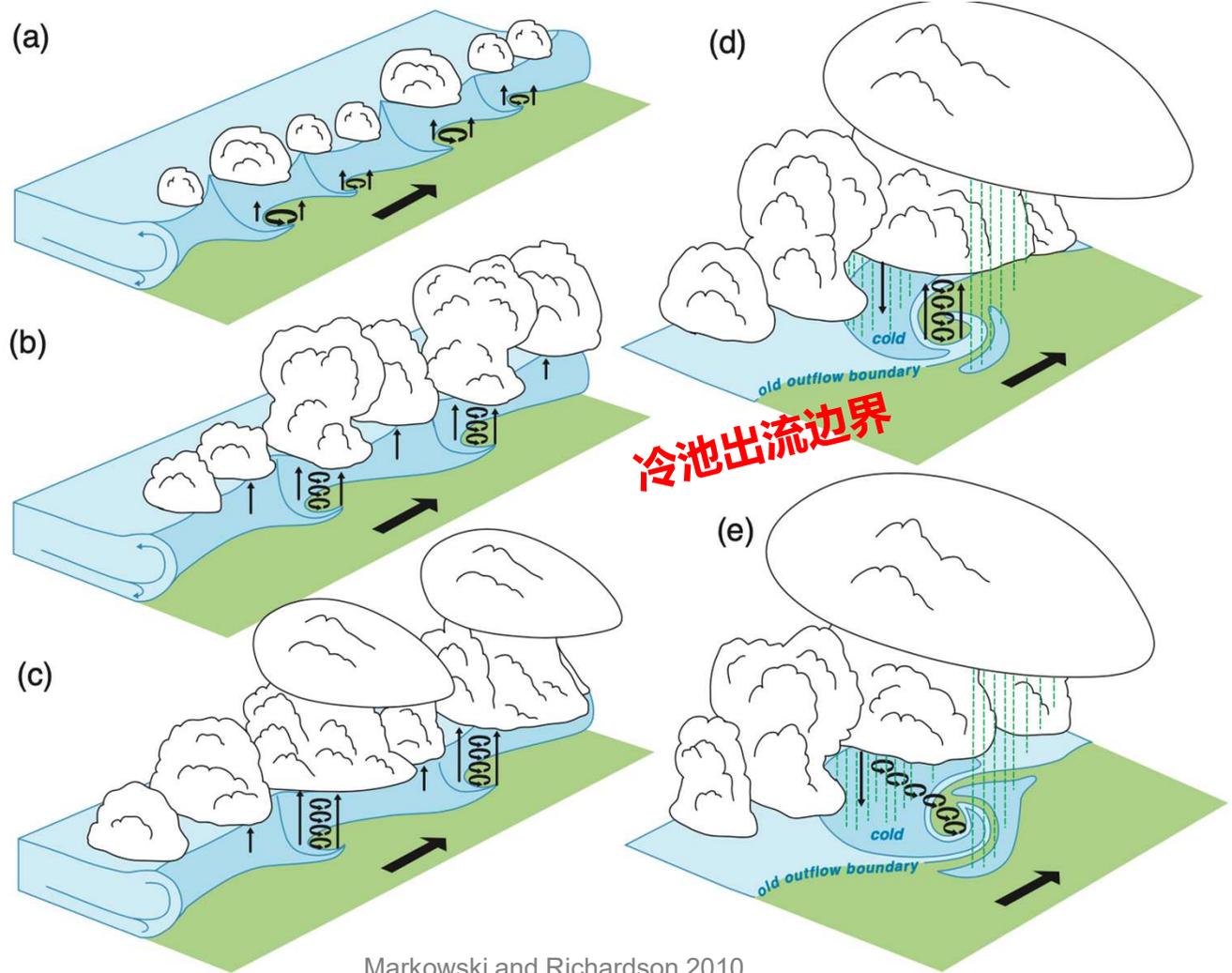
非超级单体龙卷



Figure 10.10 Landspouts near Lazbuddie, TX, on 4 June 1995. Photograph by Peter Blottman.

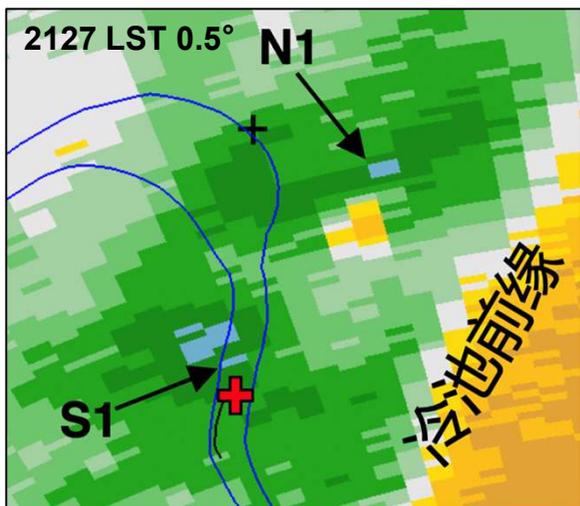
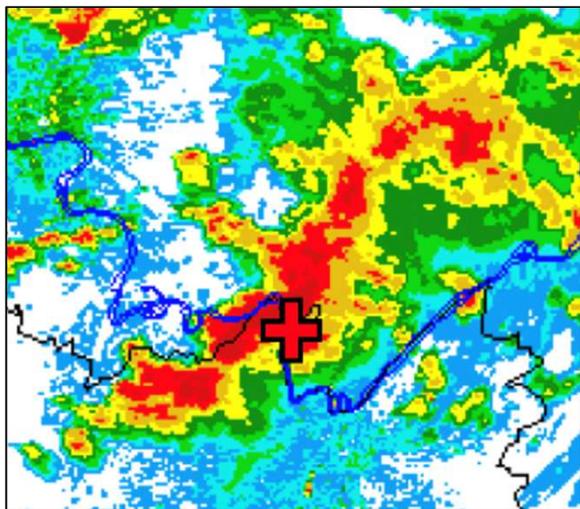


Horizontal shear instability



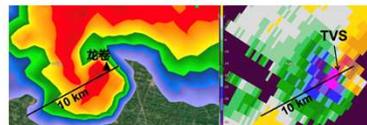
Markowski and Richardson 2010

间接判别龙卷



3 龙卷判识

3.1 气象资料预判



出现疑似龙卷报告之后, 首先应分析气象资料, 判断造成风灾的天气系统。然后利用多普勒天气雷达资料, 识别对流性风暴的中气旋和/或 TVS, 并根据最低仰角观测确定中气旋和/或 TVS 路径。

3.2 直接判识



调研收集龙卷漏斗云影像资料(包括照片和视频), 分析拍摄时间、位置、角度、人员等关键信息, 结合现场调查或中气旋和/或 TVS 识别结果验证其真实性, 判定龙卷是否发生。

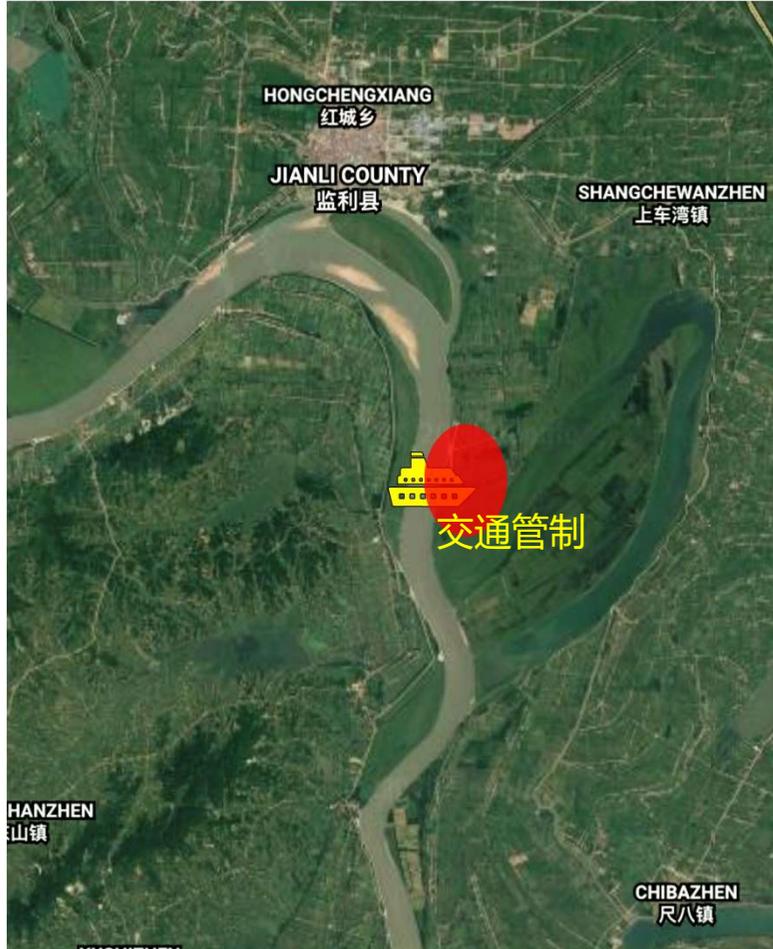
3.3 间接判识

3.3.1 如果没有漏斗云影像资料, 应在灾害发生 72 小时内开展客观详尽的灾害调查, 搜集龙卷发生的判定依据。龙卷造成的灾情通常呈狭长型分布, 倒伏物呈辐合或旋转状特征。如灾情与雷达观测的中气旋和/或 TVS 路径相吻合, 可判定龙卷的发生。

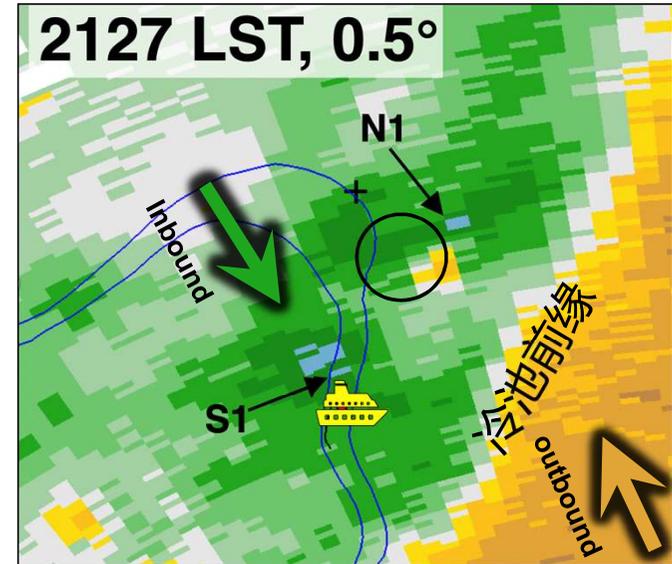
3.3.2 如果没有漏斗云影像资料, 也未能及时开展灾害调查, 可通过“雷达观测中 2 km 以下高度出现中气旋”或“最低仰角观测出现 TVS”作为依据, 经由专家会商确定龙卷是否发生。

× 爬线→弓状回波: 无TVS, 冷池之后
× 夜间: 无龙卷漏斗云影像证据

间接判别龙卷：地面调查

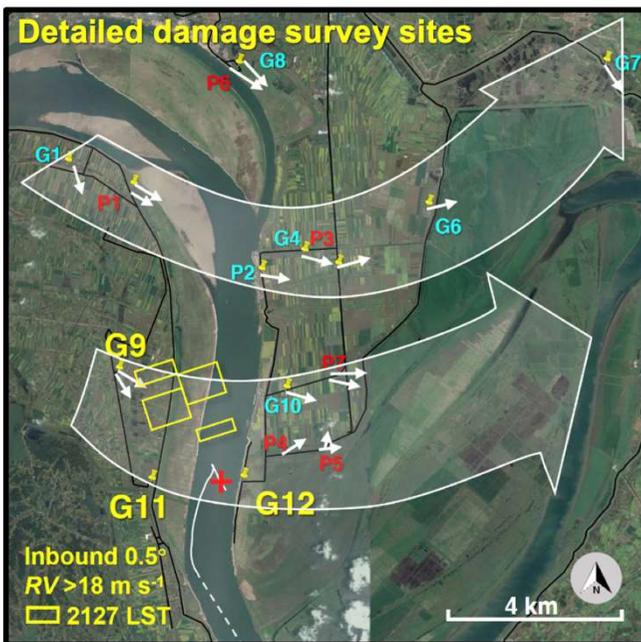


- ◆我在哪?
- ◆要去哪?
- ◆该干啥?



Gate spacing of radar beam = 250 m

间接判别龙卷：地面调查



地面沙土：无龙卷痕迹

区分下击暴流和龙卷风

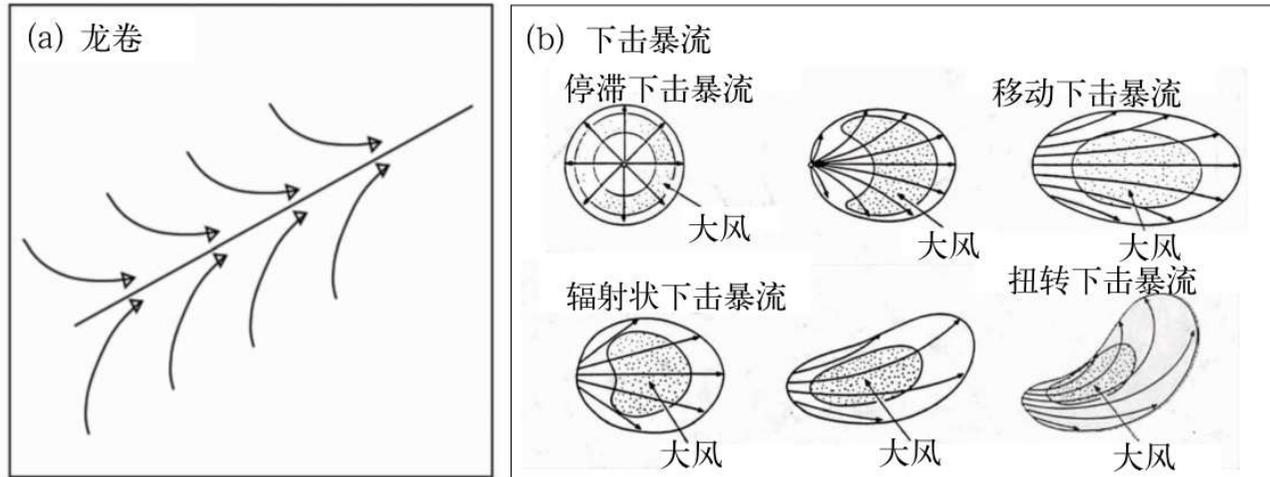


图1 龙卷(a)和不同下击暴流(b)流型

(a)引自 Doswell(2003);(b)引自 Fujita(1985),引自 Bunting 等(1993)

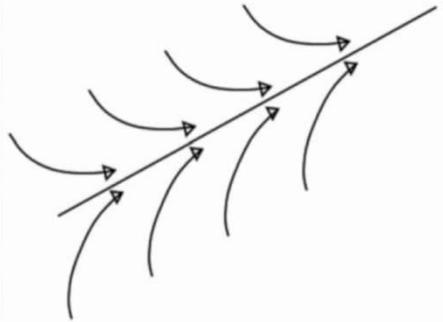
Fig.1 Tornado (a) and downburst (b) flow patterns

(a) cited from Doswell (2003); (b) cited from Fujita (1985), through Bunting et al (1993)

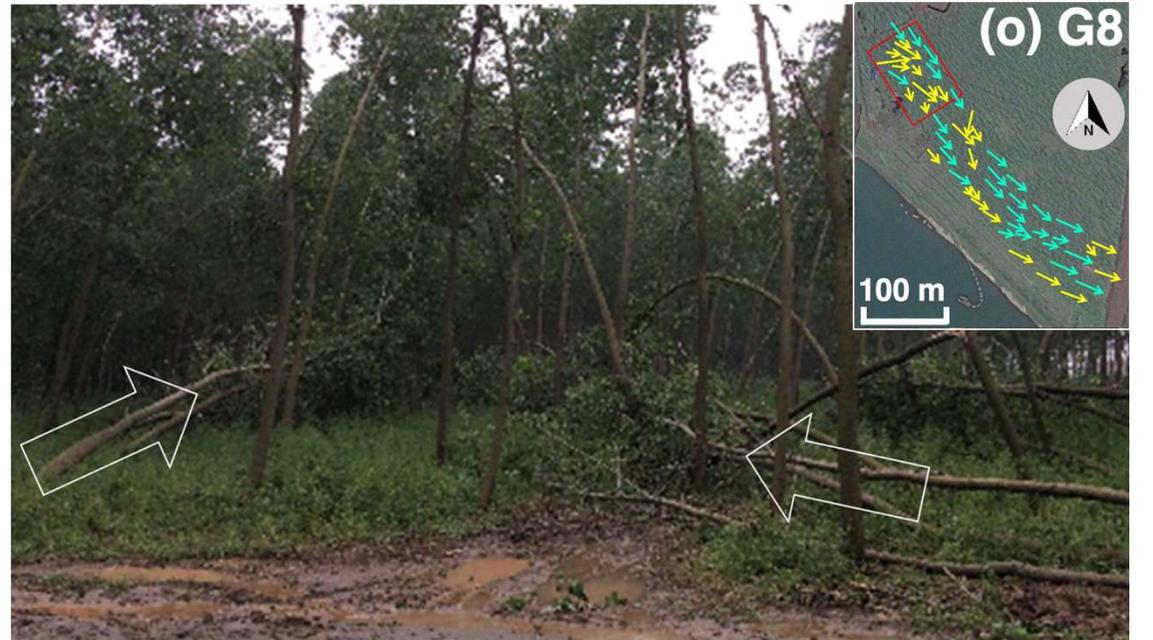
郑永光等 2016 (气象)

区分下击暴流和龙卷风

(a) 龙卷



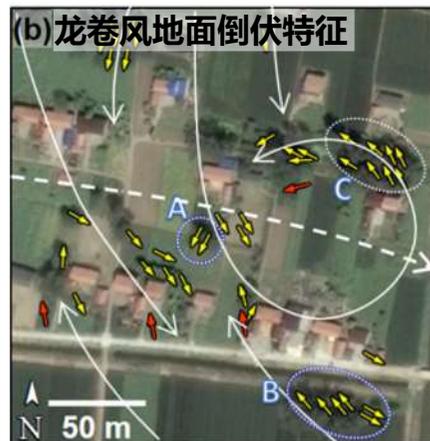
关注风暴尺度、
灾害宽度尺度的辐合!



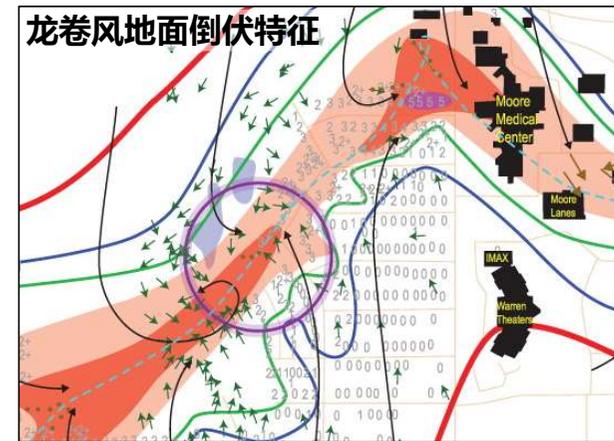
区分下击暴流和龙卷风



Bai et al. 2017 (BAMS)



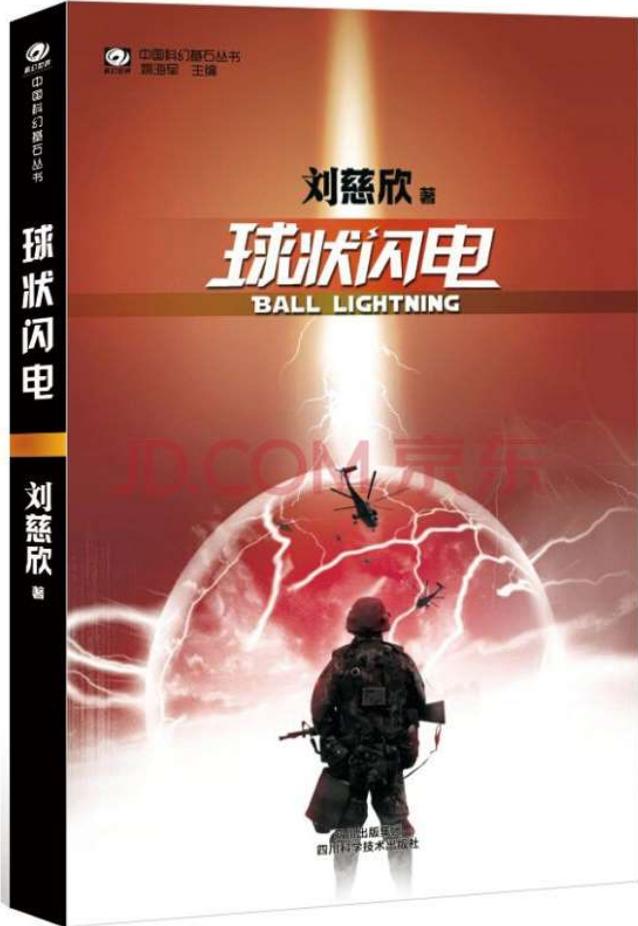
Meng et al. 2018 (WAF)



Atkins et al. 2014 (BAMS)

目录

- 龙卷风定义与相关概念
- 龙卷风的识别
 - ✓ 雷达遥感观测
 - ✓ 地面灾害特征
- 龙卷灾害调查的意义
- 龙卷灾害调查主要内容和步骤
- 龙卷灾害调查数据整理
- 龙卷灾害定级与结果展示
- 摄影测量法简介



昵图网 www.nipic.com

By:蛟龙闹海 No.20140117113951612000

2020年3月3日田纳西 EF4龙卷



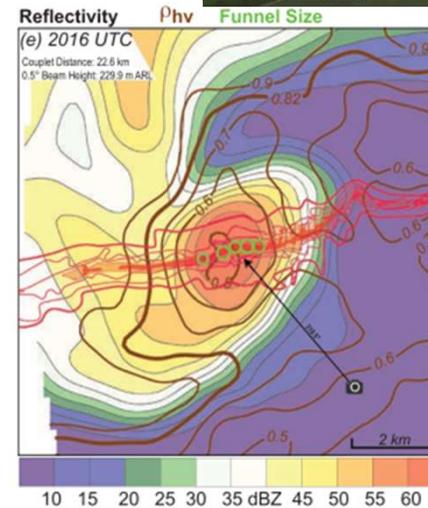
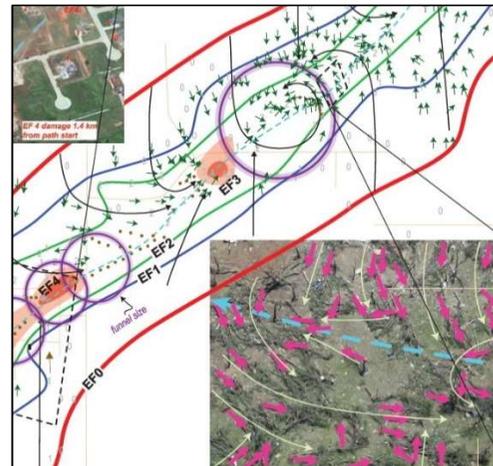
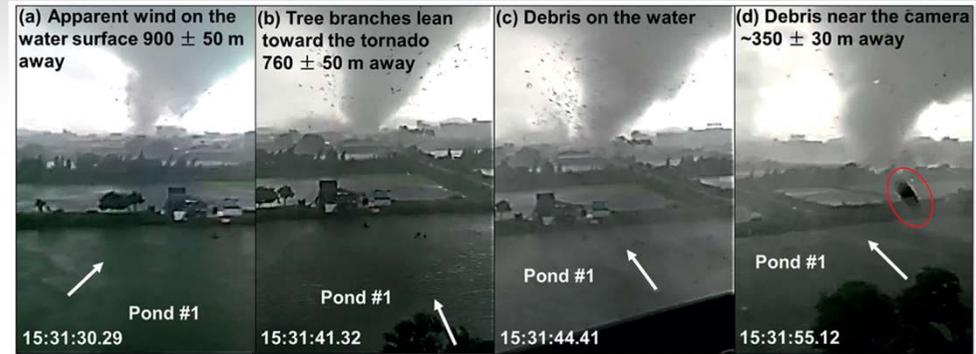
John C. Tune Airport, Nashville International's sister airport in West Nashville, "sustained significant damage due to severe weather. (WTVF via NNS)

<https://www.foxnews.com/us/nashville-tornado-damage-plane-severe-weather-tossed-tennessee>

2020 March 3

为什么要做龙卷灾害调查？

- ✓ 龙卷确认
- ✓ 建立科学数据集
- ✓ 龙卷低层风场与其伴随灾害的关系
- ✓ 人工、自然结构的抵抗能力
- ✓ 灾害路径上的风险分布
- ✓ 龙卷漏斗云、低层风场、灾害路径、雷达观测特征的配置关系
- ✓ 资源配置 如 能源（核电）、大型设施、化工、保险...
- ✓



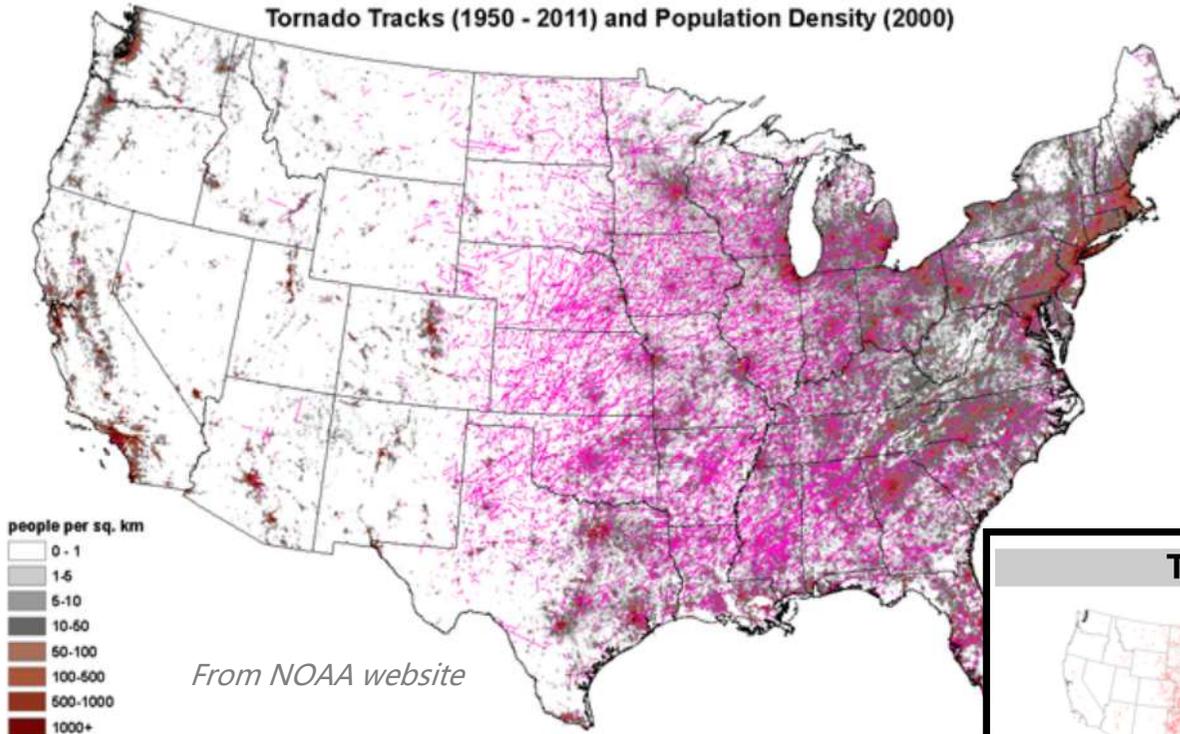
(Atkins et al. 2014)

为什么要做龙卷灾害调查?

<https://www.spc.noaa.gov/wcm/#data>

US tornado database starts from 1950.

SPC Severe GIS Page



U.S. TORNADOES* (1950-2018) *[Read format description document!](#)

[Change Log](#)

Last Update: 30 September 2019

[1950-2018_all_tornadoes.csv \(6.9 mb\)](#) Raw database dump includes all state and continuing county segments.

[1950-2018_actual_tornadoes.csv \(6.7 mb\)](#) Single tracks. No state segments or continuing county info (e.g. sg="1").

[2014-2015-onetor-dat.csv \(2.9 mb\)](#) SPC Tornado Database with identifier to connect back to DAT data.

TORNADO	HAIL	DAMAGING WIND
2018_torn.csv (0.1 mb) Updated: 30 Sep 2019	2018_hail.csv (0.8 mb) Updated: 30 Sep 2019	2018_wind.csv (1.7 mb) Updated: 30 Sep 2019
2017_torn.csv (0.2 mb)	2017_hail.csv (1.2 mb)	2017_wind.csv (2.0 mb)
2016_torn.csv (0.1 mb)	2016_hail.csv (1.1 mb)	2016_wind.csv (1.9 mb)
2015_torn.csv (0.1 mb)	2015_hail.csv (0.9 mb)	2015_wind.csv (1.5 mb)
2014_torn.csv (0.1 mb)	2014_hail.csv (0.9 mb)	2014_wind.csv (2.8 mb)
2013_torn.csv (0.1 mb)	2013_hail.csv (1.0 mb)	2013_wind.csv (1.5 mb)
2012_torn.csv (0.1 mb)	2012_hail.csv (1.4 mb)	2012_wind.csv (1.7 mb)
2011_torn.csv (0.2 mb)	2011_hail.csv (2.0 mb)	2011_wind.csv (2.5 mb)
2010_torn.csv (0.1 mb)	2010_hail.csv (1.1 mb)	2010_wind.csv (1.6 mb)
2009_torn.csv (0.1 mb)	2009_hail.csv (1.4 mb)	2009_wind.csv (1.5 mb)

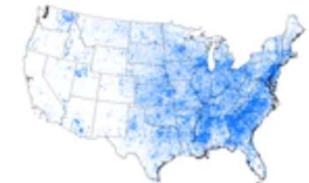
Tornadoes (1950-2018), Wind/Hail (1955-2018)



Download Tornadoes:
Paths or Initial Points



Download Hail:
Paths or Initial Points

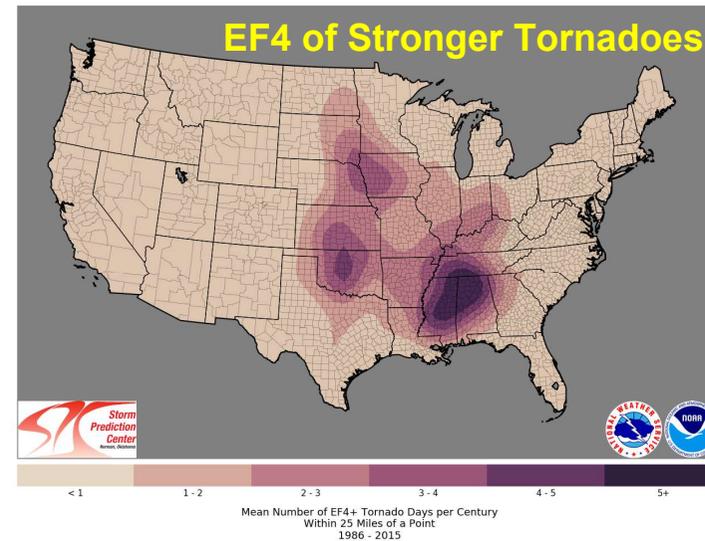
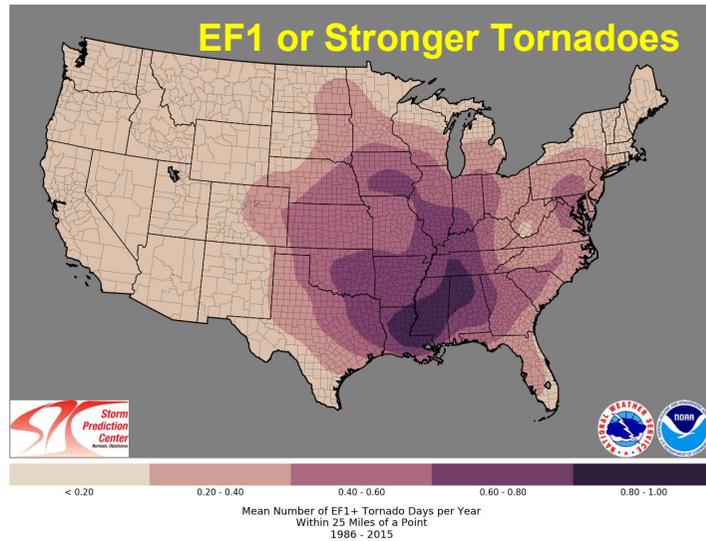
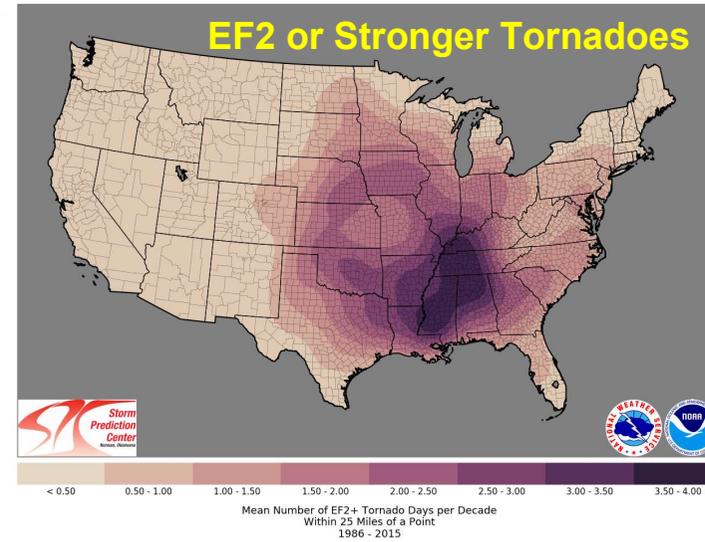
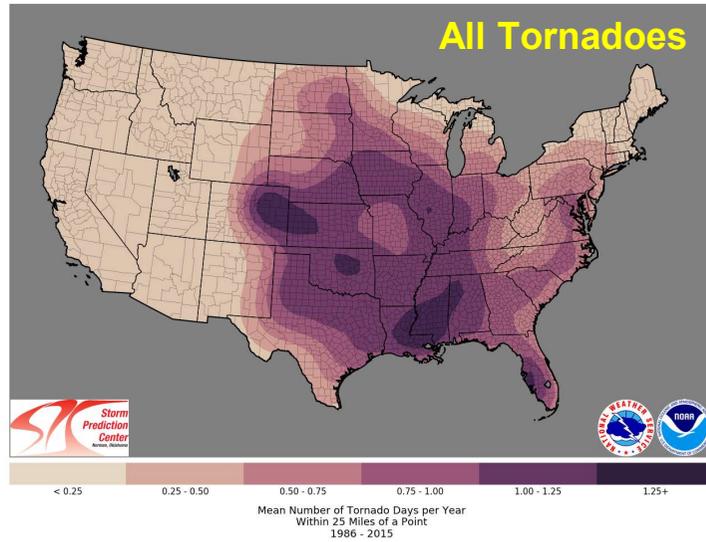


Download Wind:
Paths or Initial Points

U.S. map depicting tornado tracks and population density. (Click to go to SPC Seve

为什么要做龙卷灾害调查？

Tornado climatology



目录

- 龙卷风定义与相关概念
- 龙卷风的识别
 - ✓ 雷达遥感观测
 - ✓ 地面灾害特征
- 龙卷灾害调查的意义
- **龙卷灾害调查主要内容和步骤**
- 龙卷灾害调查数据整理
- 龙卷灾害定级与结果展示
- 摄影测量法简介

龙卷灾害调查：调查什么？

调查原则：**准确、定量**

目的导向：**业务报告** vs **建立数据库/科学研究**

调查内容：

- 区分“下击暴流”和“龙卷风”
- 龙卷触地、消亡的时间、地点
- 目击者、照片、视频
- 龙卷最大强度定级
- 龙卷涡旋地面位置确认，与雷达TVS坐标比对
- **Damage indicators (DI)倒伏方向、GPS坐标、风速评级**
- 龙卷灾害带长度、宽度
-

业务 (快! 准!)

科研
(与时间赛跑)



Atkins et al. 2014 (BAMS)

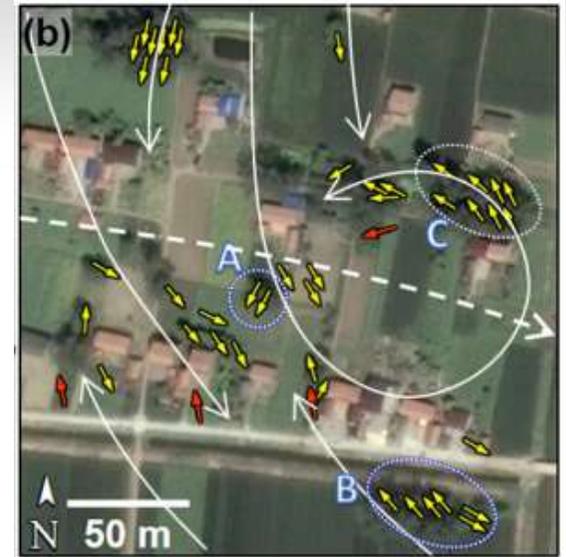
龙卷灾害调查：两种主要途径

地面调查：

- 区分龙卷和下击暴流
- 龙卷触地、消亡的时间、地点
- 目击者、照片、视频
- 龙卷涡旋中心位置确认
- 倒伏方向、GPS坐标（定量）
-

航拍调查：

- 区分龙卷和下击暴流
- 全局信息
- 龙卷灾害带长度、宽度



区分下击暴流和龙卷风

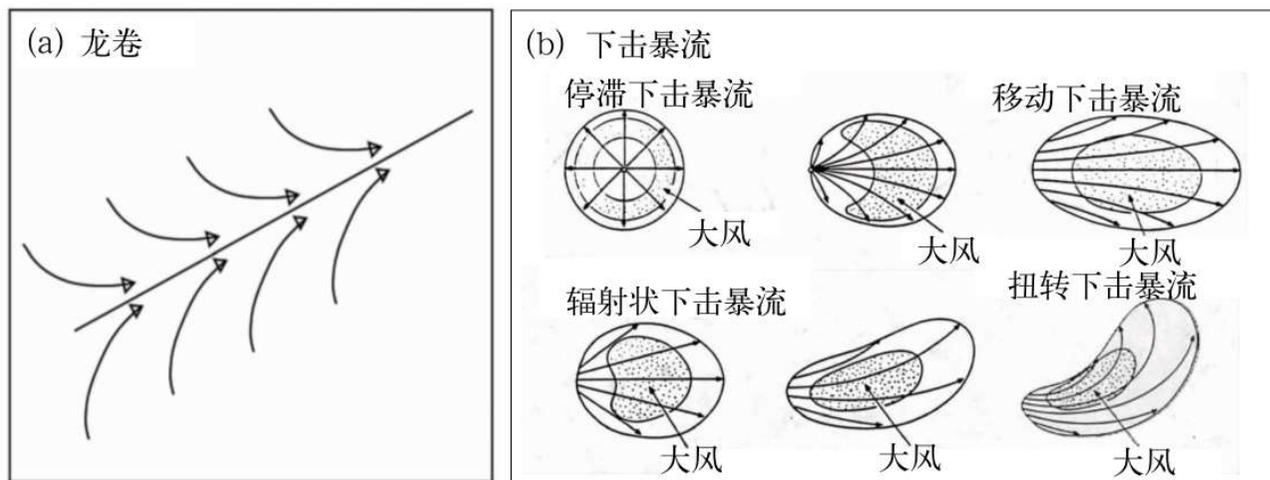


图 1 龙卷(a)和不同下击暴流(b)流型

(a)引自 Doswell(2003);(b)引自 Fujita(1985),引自 Bunting 等(1993)

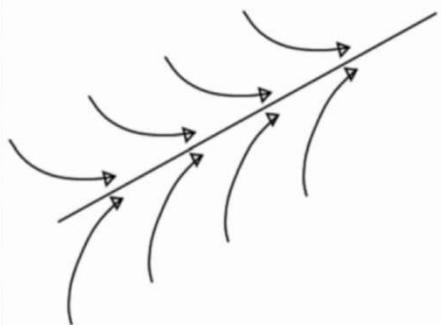
Fig. 1 Tornado (a) and downburst (b) flow patterns

(a) cited from Doswell (2003); (b) cited from Fujita (1985), through Bunting et al (1993)

郑永光等 2016 (气象)

区分下击暴流和龙卷风

(a) 龙卷



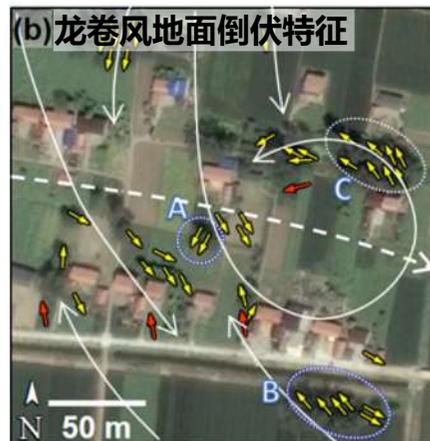
关注风暴尺度、
灾害宽度尺度的辐合!



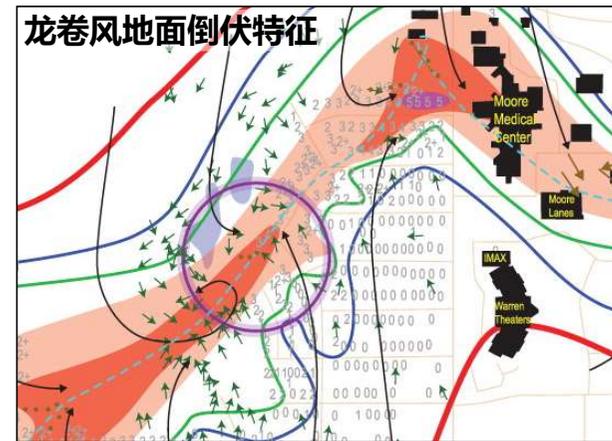
区分下击暴流和龙卷风



Bai et al. 2017 (BAMS)



Meng et al. 2018 (WAF)



Atkins et al. 2014 (BAMS)

前期准备工作: 衣食住行

- ✓ 提前租车 (大功率车载充电插口)
- ✓ 无人机 (尽可能多的电池)
- ✓ 订住宿, 争取住受灾点附近 (时间极其宝贵)
- ✓ 买5号电池
- ✓ 长袖、长裤、运动鞋
- ✓ 雨靴、凉拖鞋
- ✓ 矿泉水、饼干、面包
- ✓ 药箱 (酒精消毒纸、藿香正气水、创可贴 ...)
- ✓ 驱蚊水
- ✓ 遮阳帽、防晒衣、防晒霜



前期准备工作：长裤



前期准备工作: 无人机



乘坐民航飞机，一人仅可带
“2块”无人机电池！

使用轻便小巧的无人机



最大飞行海拔高度 [3]

6000m 6000m

最大遥控距离 (FCC)

*FCC 为美国强制性认证

8000m 8000m

障碍物感知能力

全向感知

全向感知

相机

4K 相机
一英寸哈苏相机
记录十亿种色彩

4K 相机
两倍光学变焦相机
4800 万像素超解析照片

最大照片分辨率

20MP

12MP

重量

907g

905g



御 MAVIC 2 PRO



御 MAVIC 2 ZOOM

续航时间 [1]

31 分钟

31 分钟

最大续航里程 (无风环境) [2]

18km

18km

前期准备工作: 调查装备



- 多套电池 (>6)
- 多套电源 (>2)
- 多套桨叶 (>2)
- 充电保姆 (>1)
- 两部遥控器
- 大功率插线板



- ✓ 无人机 (小巧轻便, 多个电池, micro SD读卡器)
- ✓ 多台GPS (多星定位, 5号电池型, 拒绝充电)
- ✓ 微单 (拒绝单反)
- ✓ 笔记本电脑 (长续航、轻薄、拒绝Mac)
- ✓ 移动硬盘(exfat格式)、U盘
- ✓ 手机
- ✓ 充电宝
- ✓ 指南针
- ✓ 望远镜
- ✓ 卷尺
- ✓ 5号电池
- ✓ 笔记本、多支笔
- ✓ Jeep
- ✓



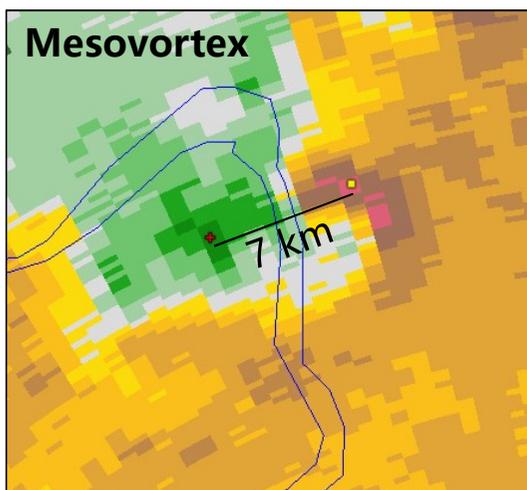
前期准备工作：雷达基数据

雷达基数据： **Level II**

雷达可视软件： **推荐 GR2Analyst 2.0**
(WSR-88D格式)

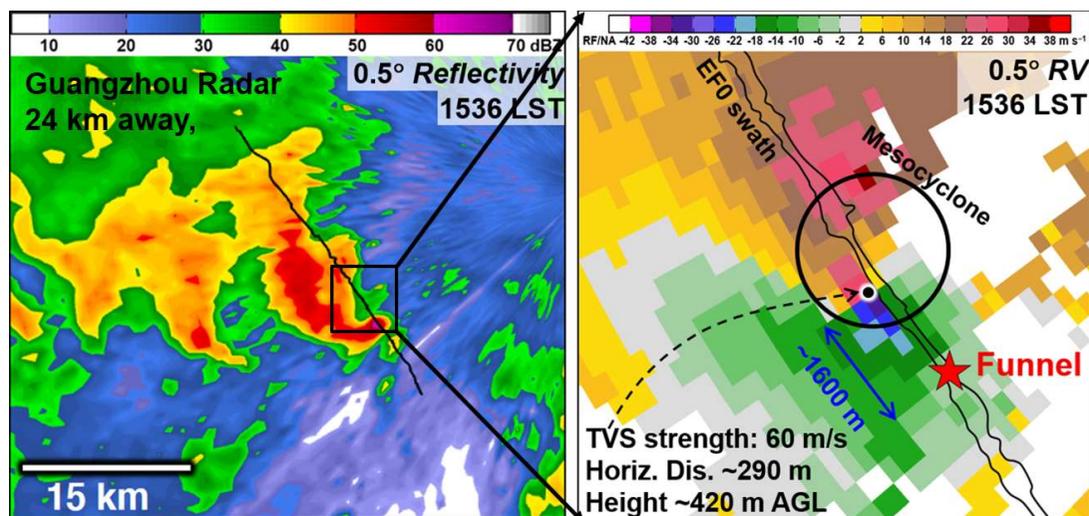
记录内容：

- 定位龙卷母体系统 (经纬度)、移动方向
- 定位龙卷TVS (经纬度—至少精确至千分位)



Tornadic Vortex Signature

The Doppler velocity signature of a tornado or of an incipient tornado-like circulation aloft (AMS Glossary).



前期准备工作：雷达基数据

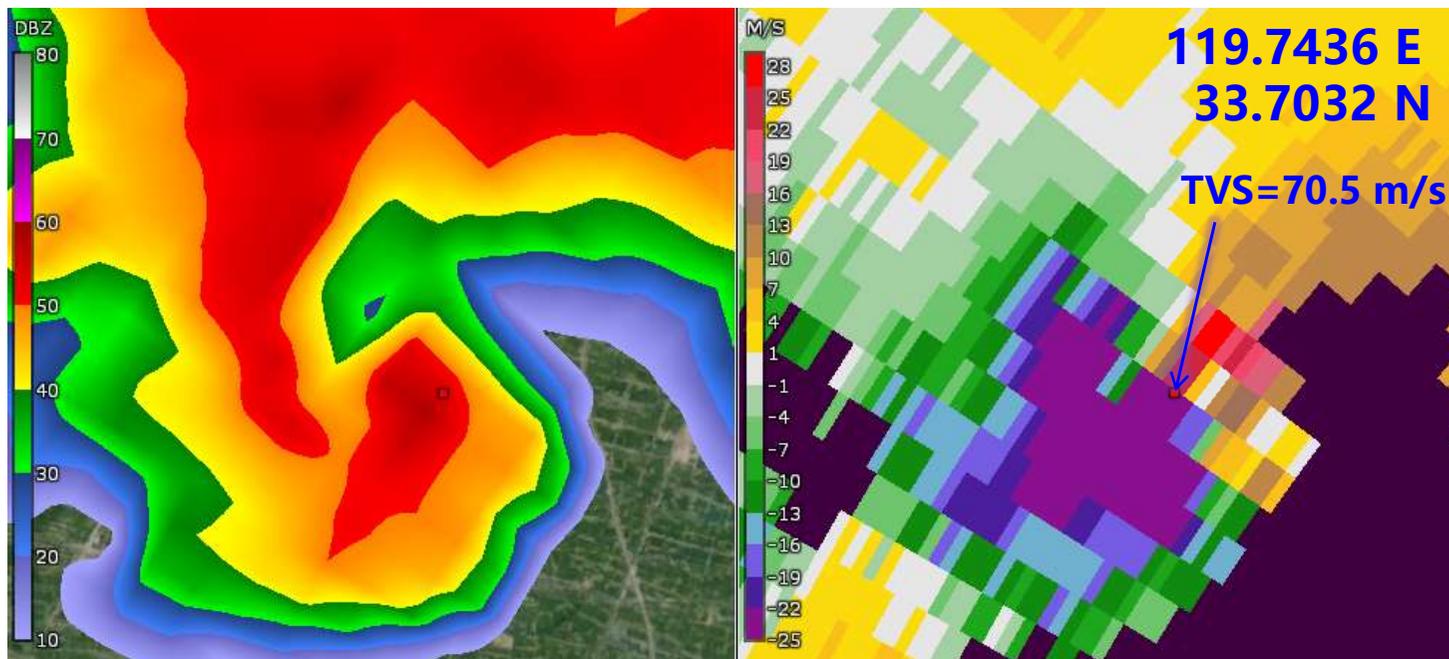
雷达基数据： **Level II**

雷达可视软件： **推荐 GR2Analyst 2.0**
(WSR-88D格式)

记录内容：

- 定位龙卷母体系统 (经纬度)、移动方向
- 定位龙卷TVS (经纬度—至少精确至千分位)

14:14	119.5887	33.6844
14:19	119.6409	33.6900
14:25	119.6921	33.6953
14:31	119.7477	33.7048
14:36	119.7894	33.7132
14:42	119.8193	33.7240
14:48	119.8491	33.7341
14:54	119.8876	33.7507



23°N附近：
百分位精确度：1025米
千分位精确度：**102米**
万分位精确度：10.2米

前期准备工作：雷达基数据

雷达基数据：**Level II**

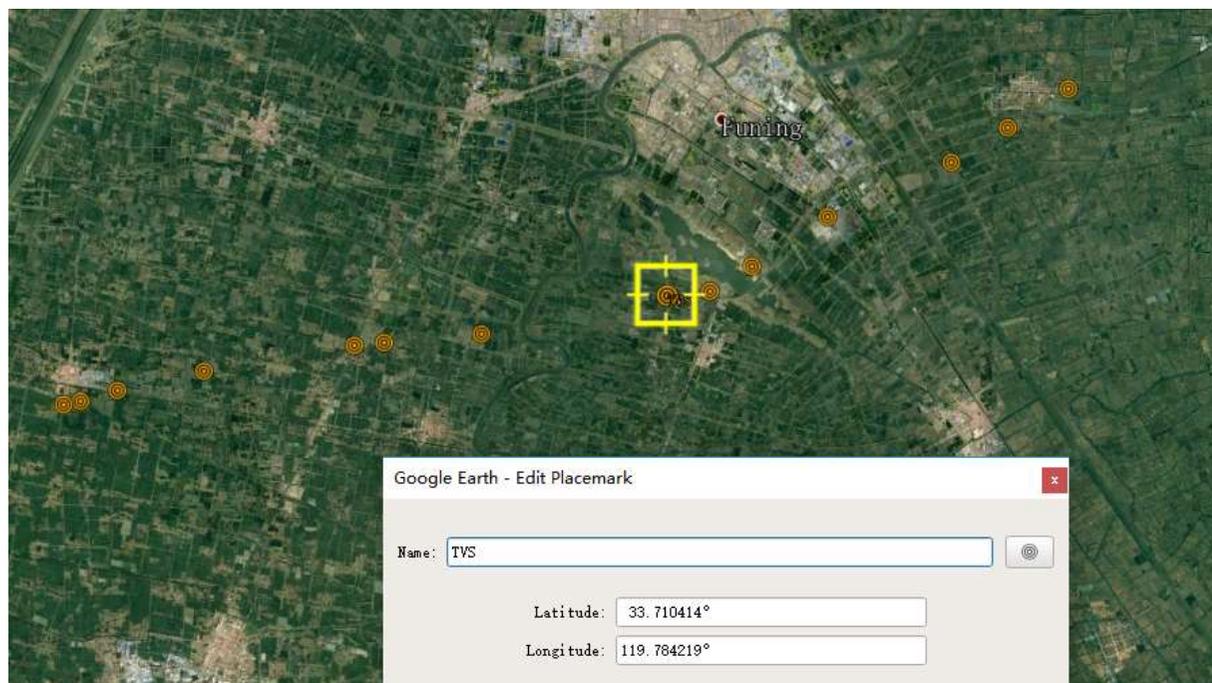
雷达可视软件：**推荐 GR2Analyst 2.0**
(WSR-88D格式)

记录内容：

- 定位龙卷母体系统 (经纬度)、移动方向
- 定位龙卷TVS (经纬度—至少精确至千分位)

加载谷歌地球、标记TVS位置：

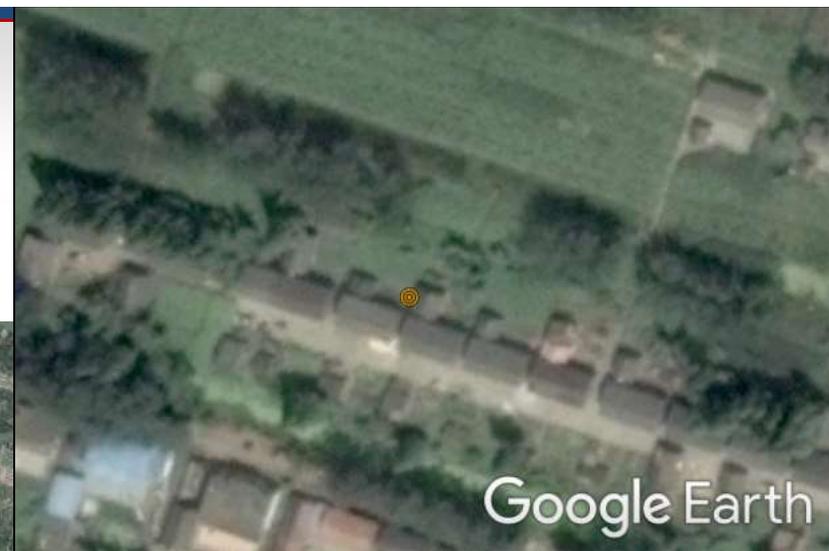
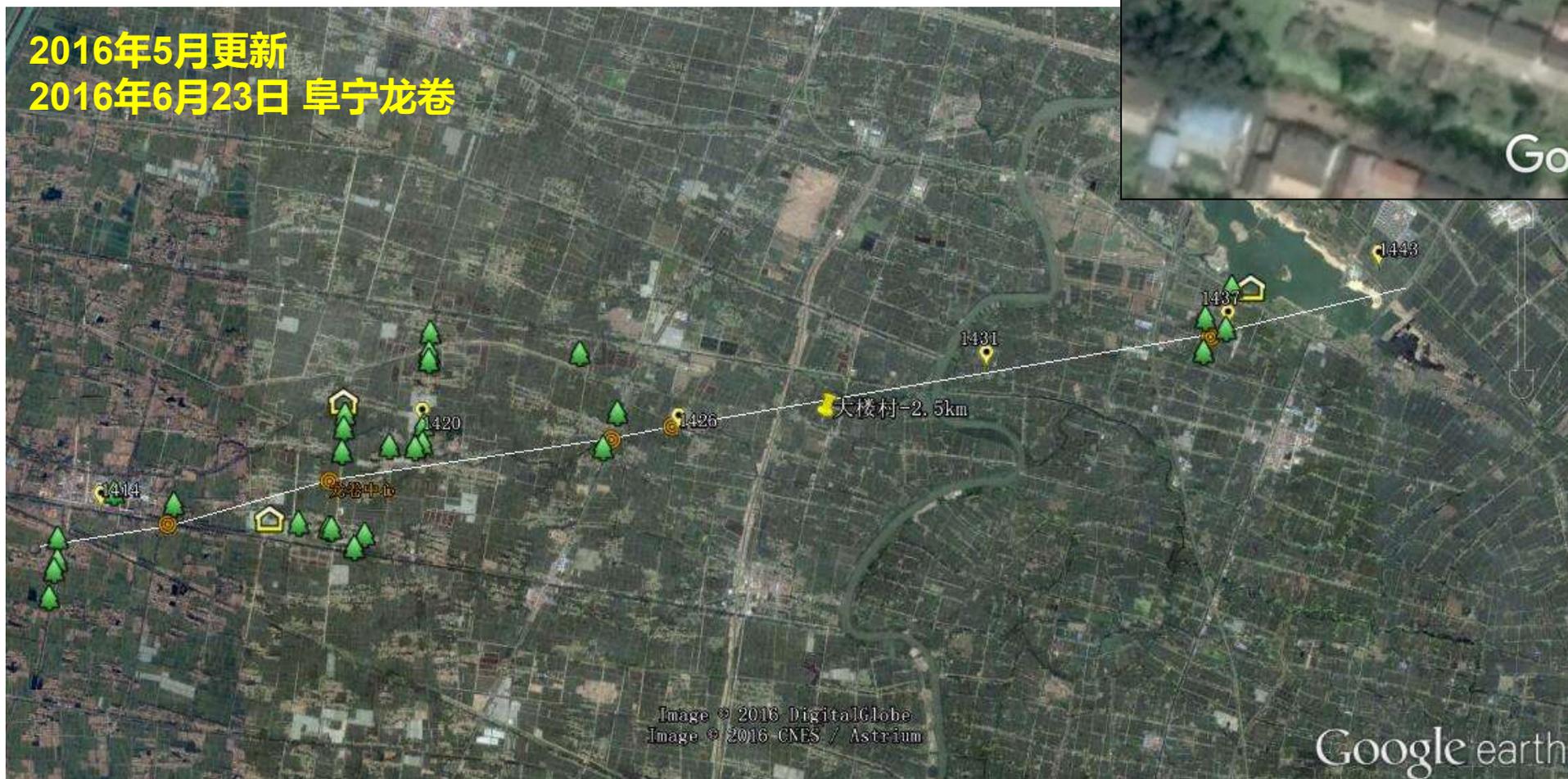
14:14	119.5887	33.6844
14:19	119.6409	33.6900
14:25	119.6921	33.6953
14:31	119.7477	33.7048
14:36	119.7894	33.7132
14:42	119.8193	33.7240
14:48	119.8491	33.7341
14:54	119.8876	33.7507



前期准备工作：谷歌地球

加载谷歌地球最新的卫星照片。

2016年5月更新
2016年6月23日 阜宁龙卷



前期准备工作：谷歌地球、行车地图

雷达基数据： **Level II**

雷达可视软件： **推荐 GR2Analyst 2.0**
(WSR88D格式)

记录内容：

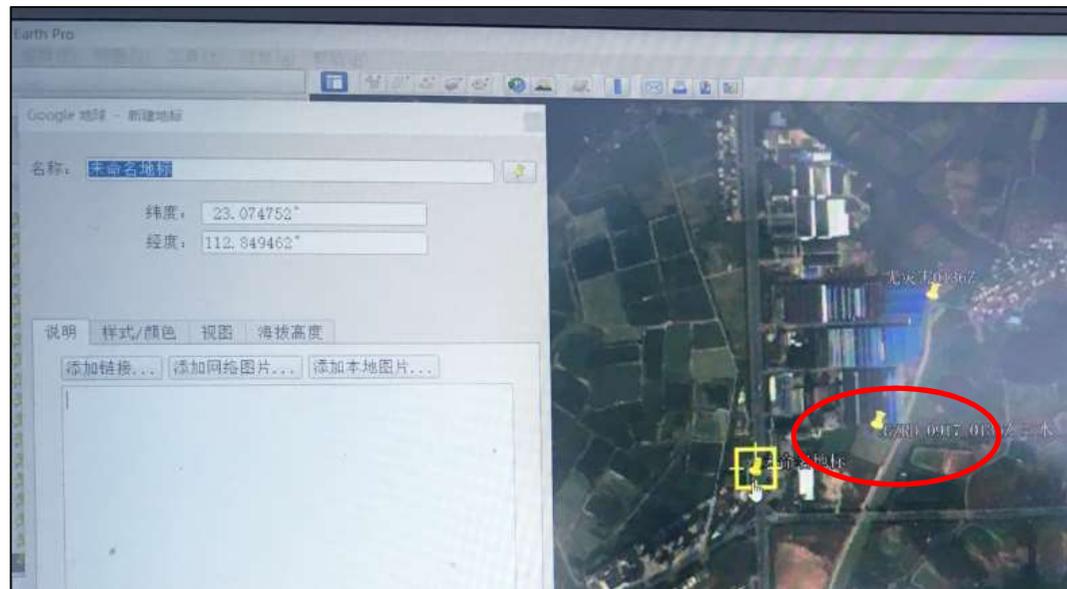
- 定位龙卷母体系统 (经纬度)、移动方向
- 定位龙卷TVS (经纬度—至少精确至千分位)

加载谷歌地球、标记TVS位置

行车地图中标记TVS位置：

14:14	119.5887	33.6844
14:19	119.6409	33.6900
14:25	119.6921	33.6953
14:31	119.7477	33.7048
14:36	119.7894	33.7132
14:42	119.8193	33.7240
14:48	119.8491	33.7341
14:54	119.8876	33.7507

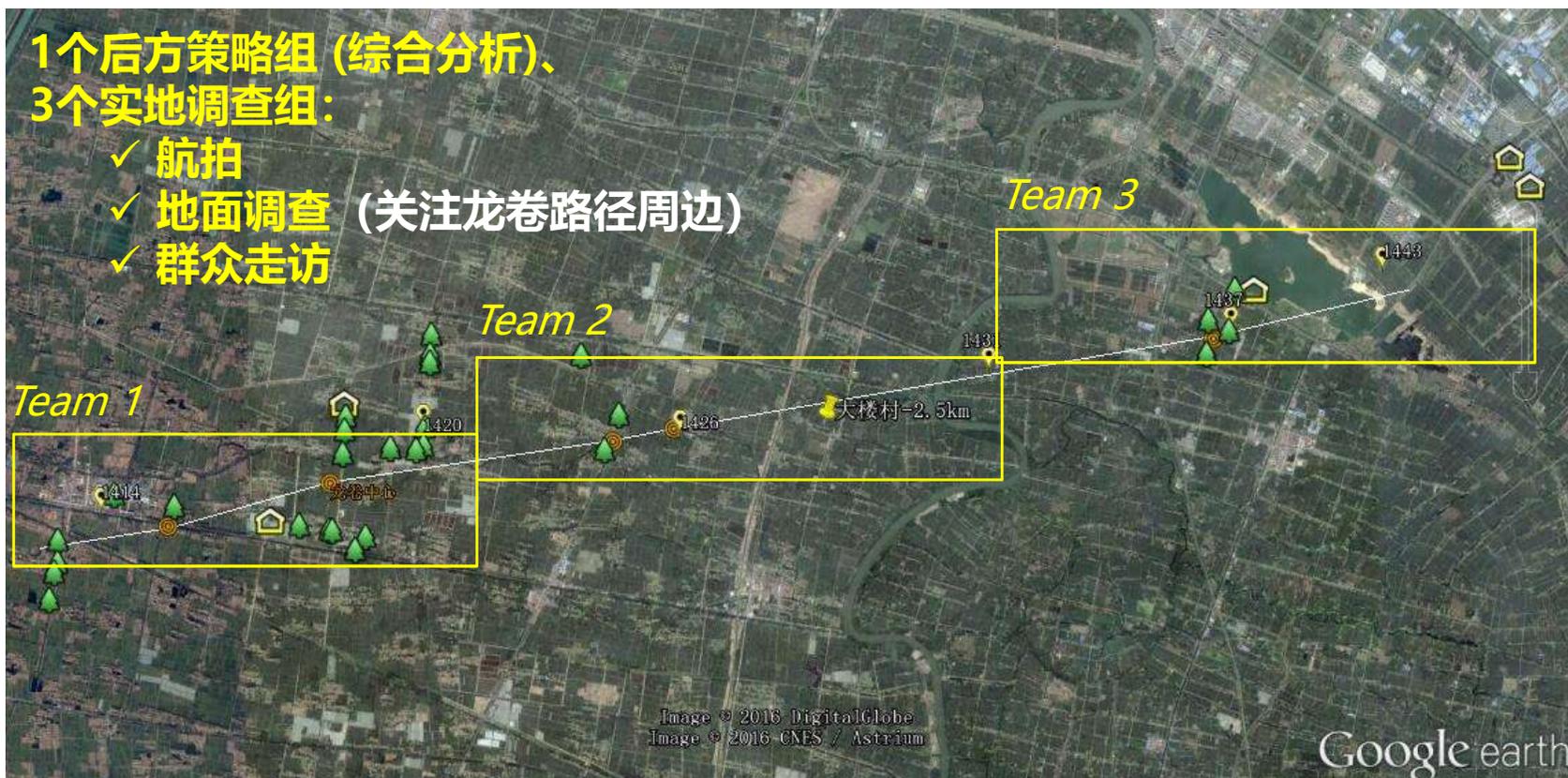
以上准备工作尽量在出发前、飞机上完成！



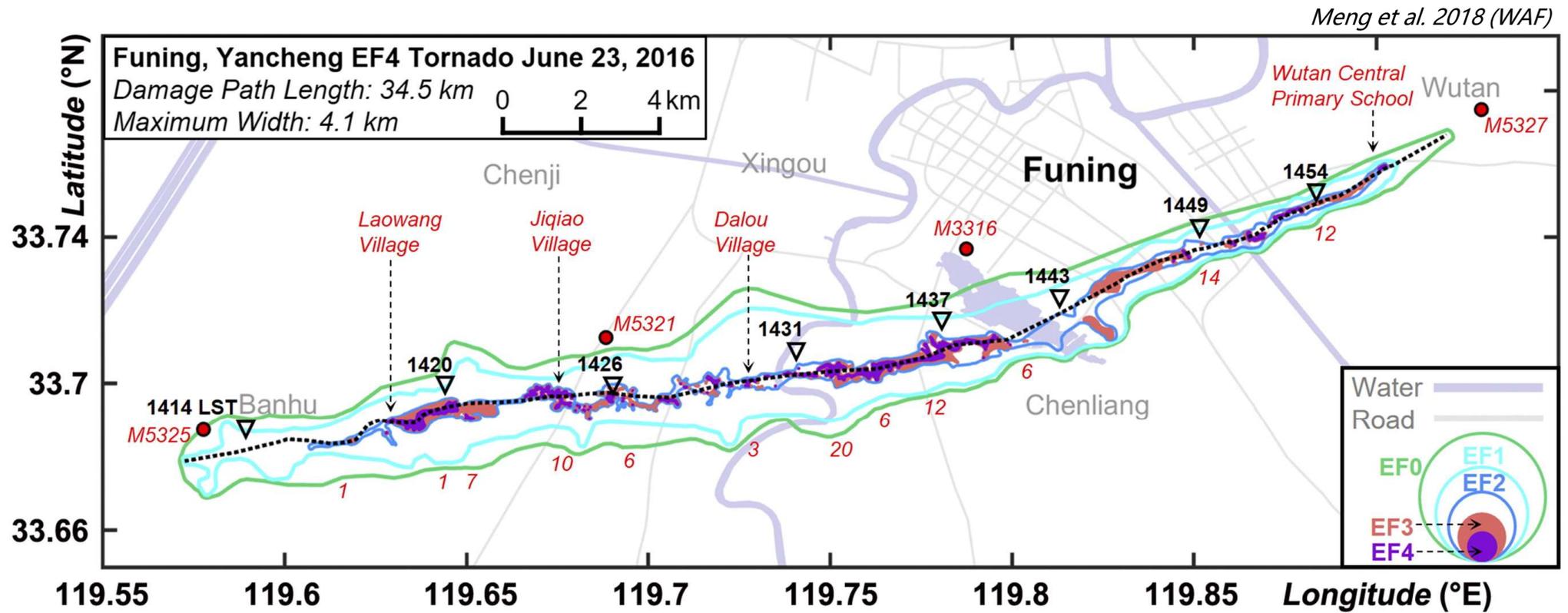
前期准备工作：团队协作

- ✓ 与当地气象部门联系：获得理解和可能的支持。
- ✓ 制定方案，分组行动：视情况分优先级。
- ✓ 组建微信群：保持交流，及时分享有效信息。

到达灾害地当日内，或现场调查前完成！

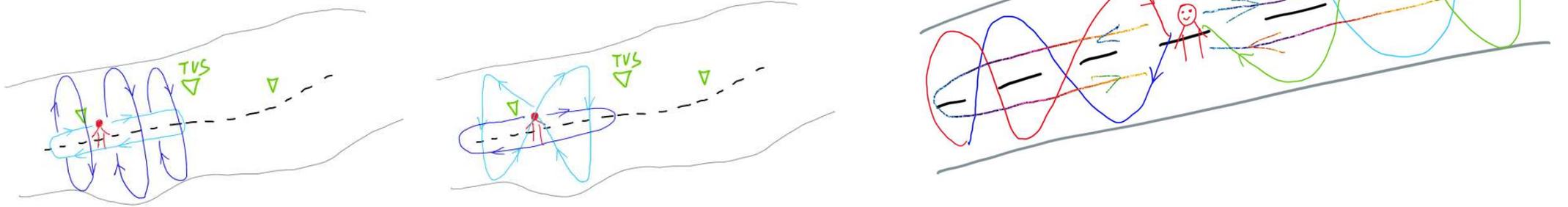


灾害现场：航拍与地面调查



灾害现场：航拍

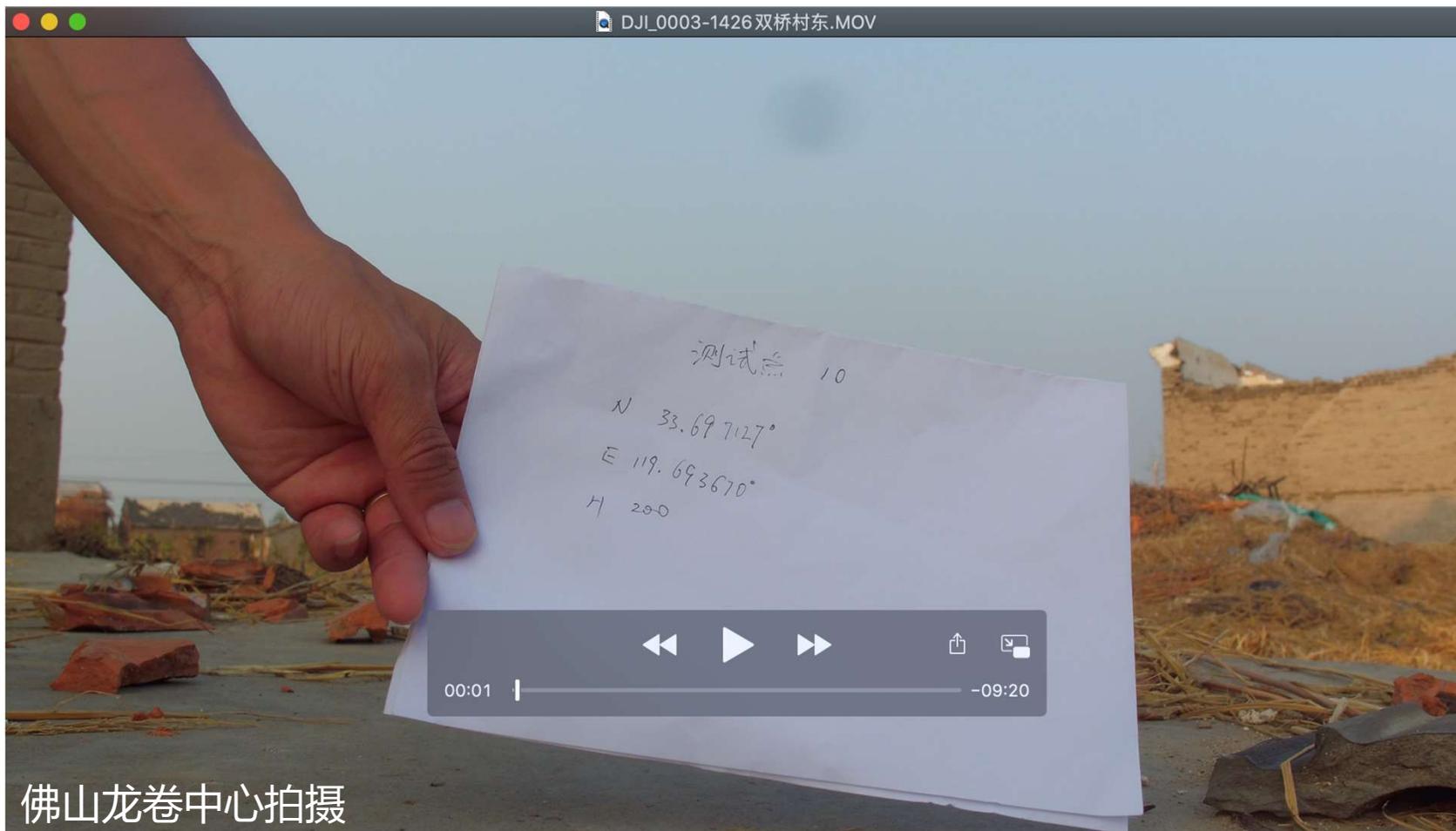
制定航拍计划



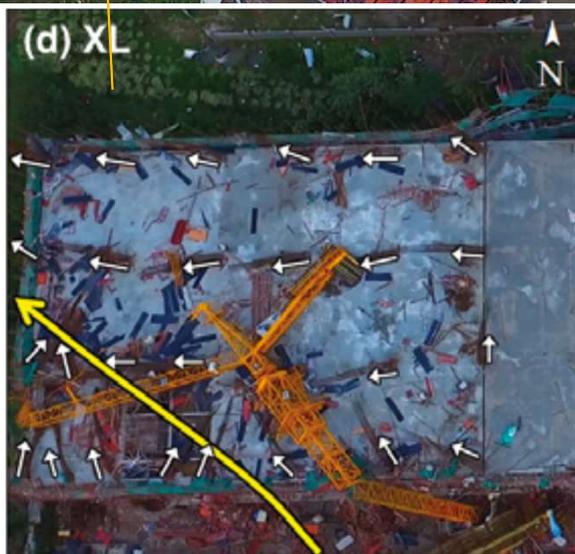
灾害现场：航拍

记录拍摄经纬度

名称	修改日期	大小
DJI_0000.MOV	2014年1月1日 00:00	4.11 GB
DJI_0001.MOV	2016年6月24日 16:05	1.13 GB
DJI_0002.MOV	2016年6月24日 16:51	1.93 GB
DJI_0003.MOV	2016年6月24日 17:58	1.34 GB



灾害现场：航拍关键细节



灾害现场：航拍

DI可能会被其他职能部门迅速清理，不要浪费一分一秒。

无人机高度：200米

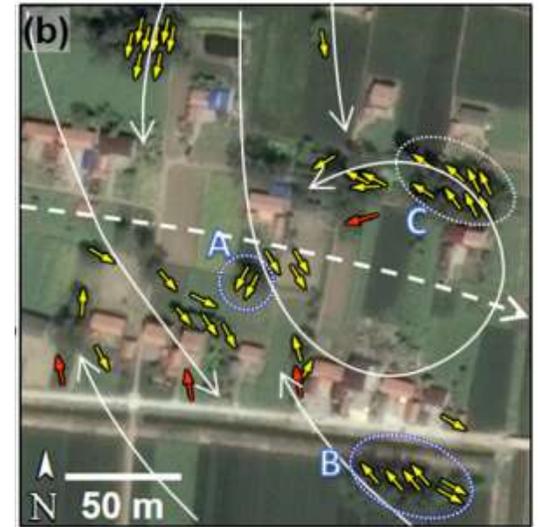
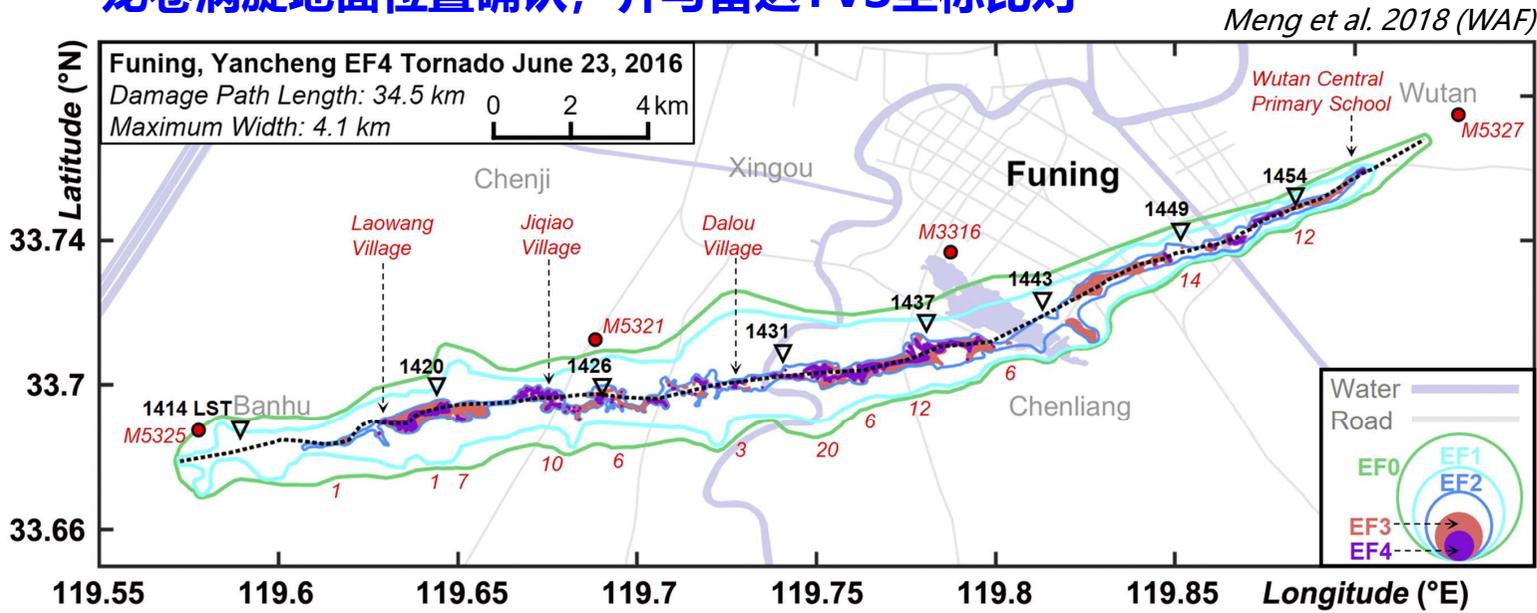


- ✓ 抓紧时间，充分利用无人机电池。
- ✓ 分清主次：优先全局，之后再拍细节。
- ✓ 路径上仔细拍细节。
- ✓ 不同飞行高度。

拍全局：视野可以调得宽广，4K视频放大仍可查看某些细节。

灾害现场：地面调查

龙卷涡旋地面位置确认，并与雷达TVS坐标比对



- 龙卷涡旋地面位置与最低层仰角TVS空间距离不会太远;
- 先从灾害最严重的地方找起;
- Swath-scale convergent center (包括人字形倒伏和局地旋转)

灾害现场：群众走访

- ✓ 询问当时天气状况，受损情况，关注时间信息。
- ✓ 询问龙卷触地时间、地点（交叉比对海量信息）
- ✓ 手机照片、视频（**勿使用微信传，以免抹除时间戳**；比对手机北京时间，精确到秒）。
- ✓ 留意道路等监控设备位置。
- ✓ 及时共享讯息。
- ✓ 勿拍照发微博、朋友圈。
- ✓



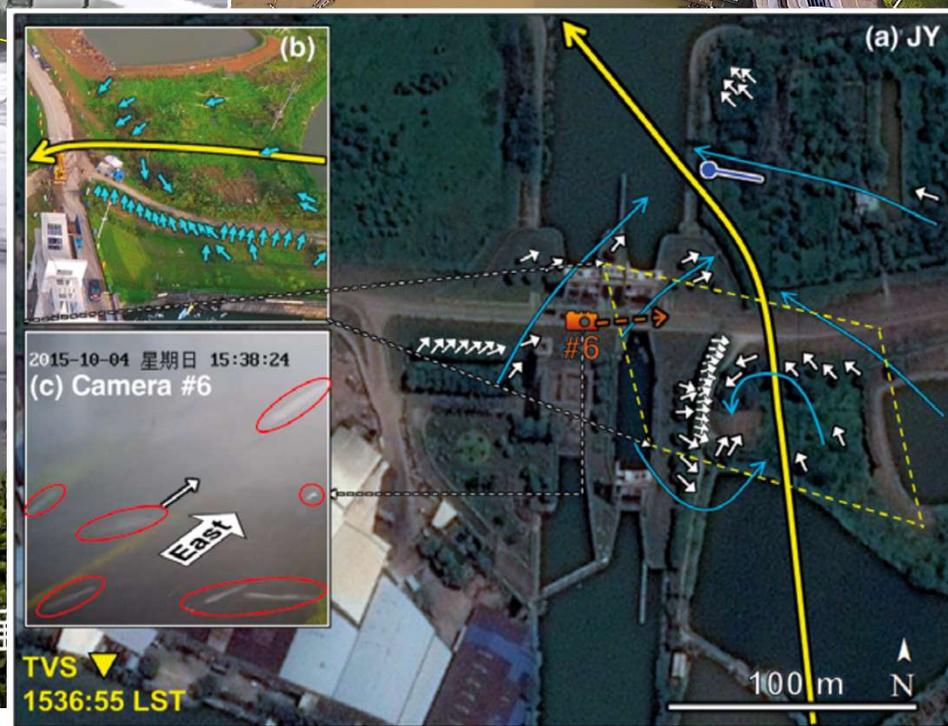
灾害现场：群众走访

搜集监控视频



灾害现场：群众走访

搜集监控视频



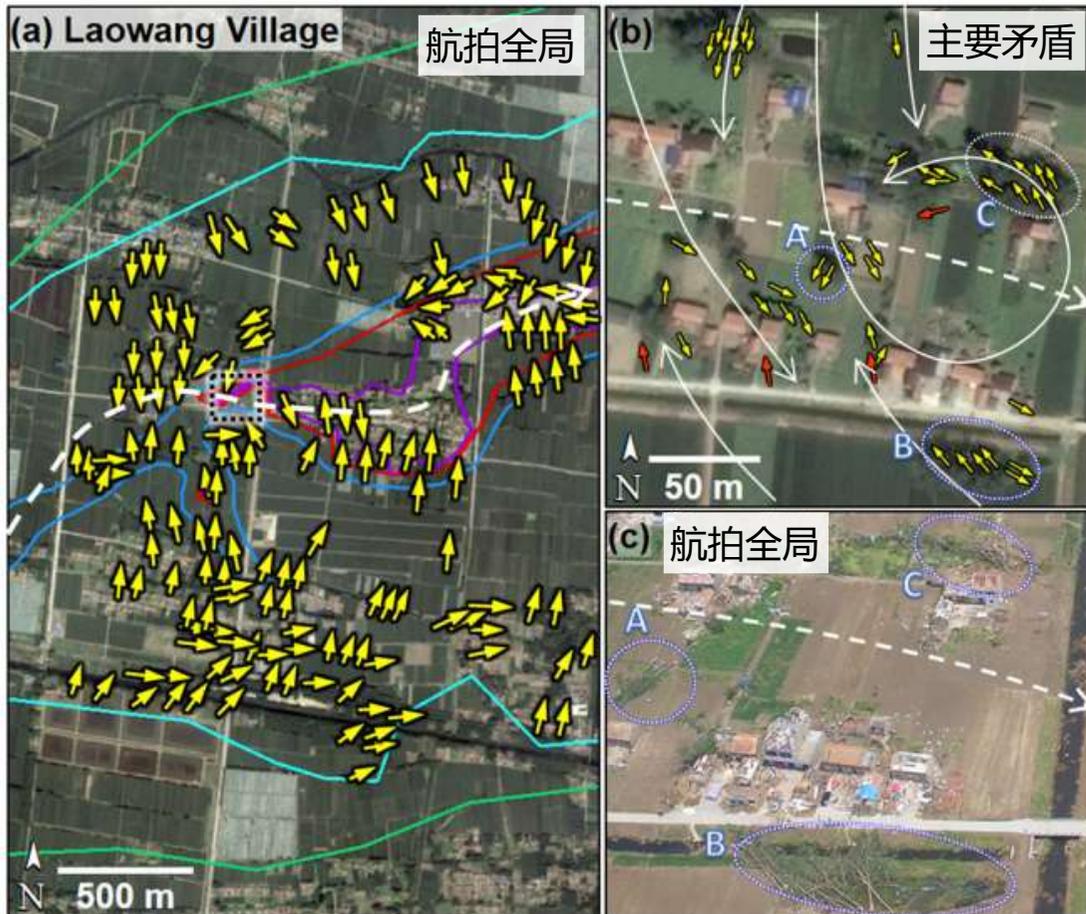
灾害现场：定位孤立地标

估计GPS坐标在后期分析中的空间不确定性。

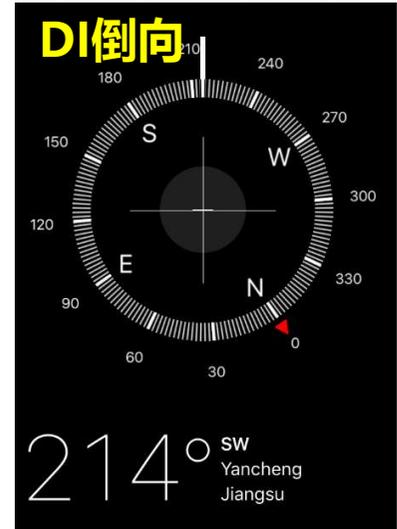


灾害现场：DI倒伏方向、位置

测定关键DI倒伏方向 (抓主要矛盾...)



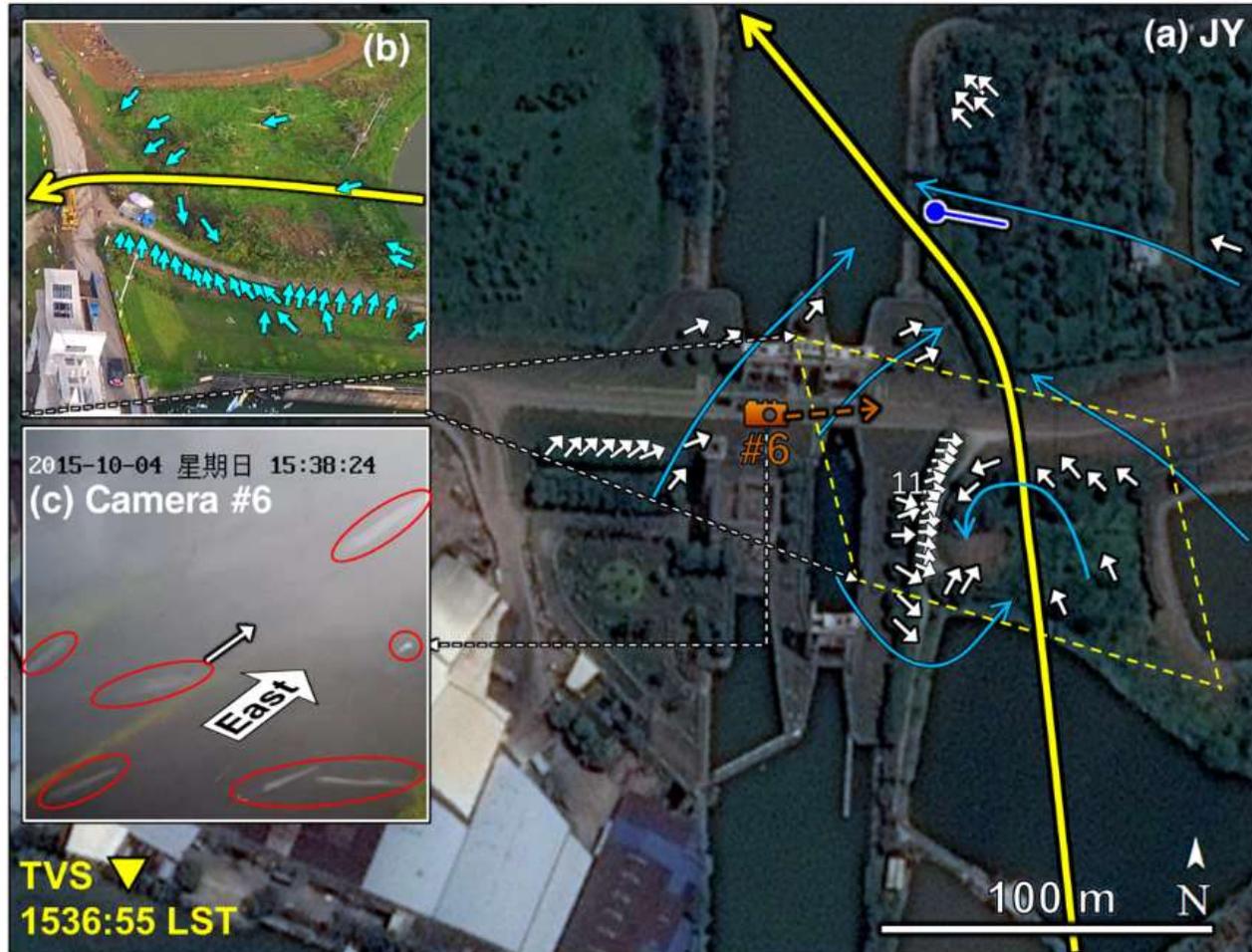
Meng et al. 2018 (WAF)



灾害现场：DI倒伏方向、位置

测定关键DI倒伏方向 (抓主要矛盾...)

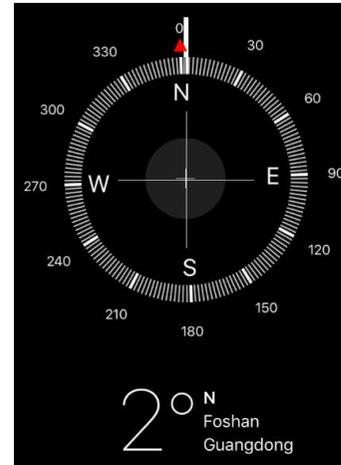
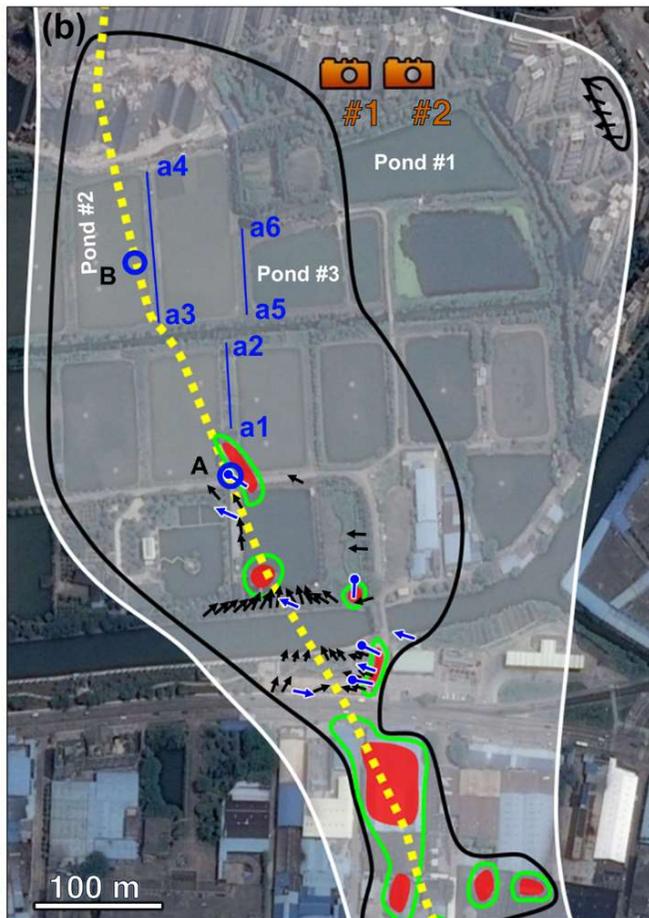
雷达TVS附近详细测量



Bai et al. 2017 (BAMS)

灾害现场：DI倒伏方向、位置

测定关键DI倒伏方向 (抓主要矛盾...)

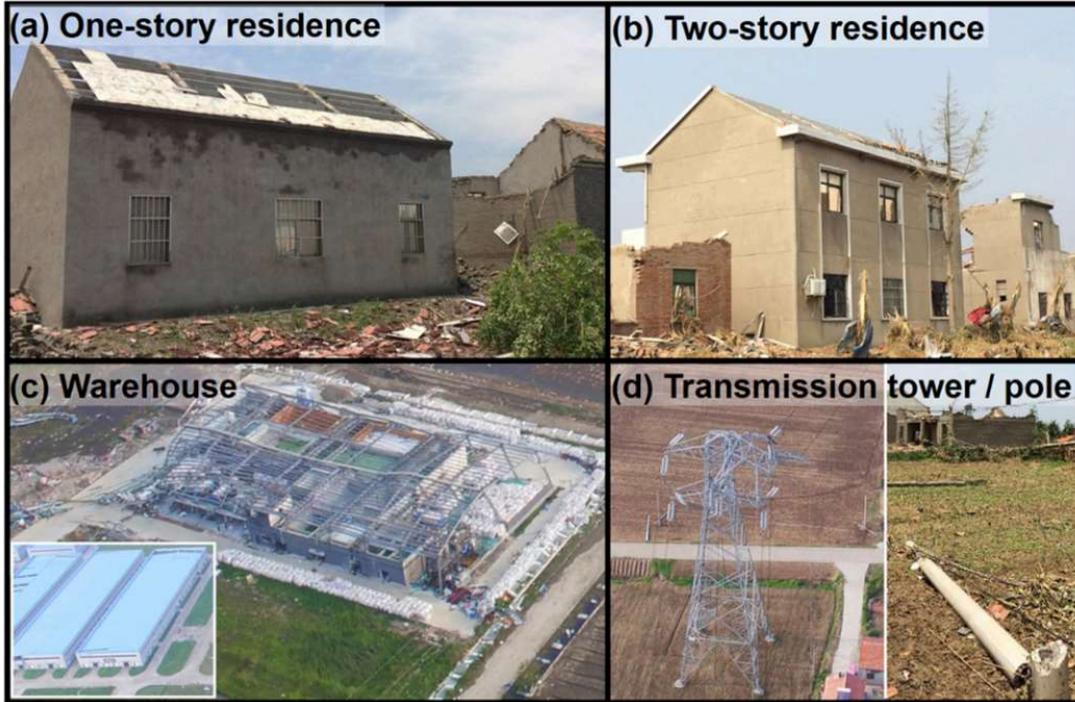


Bai et al. 2017 (BAMS)

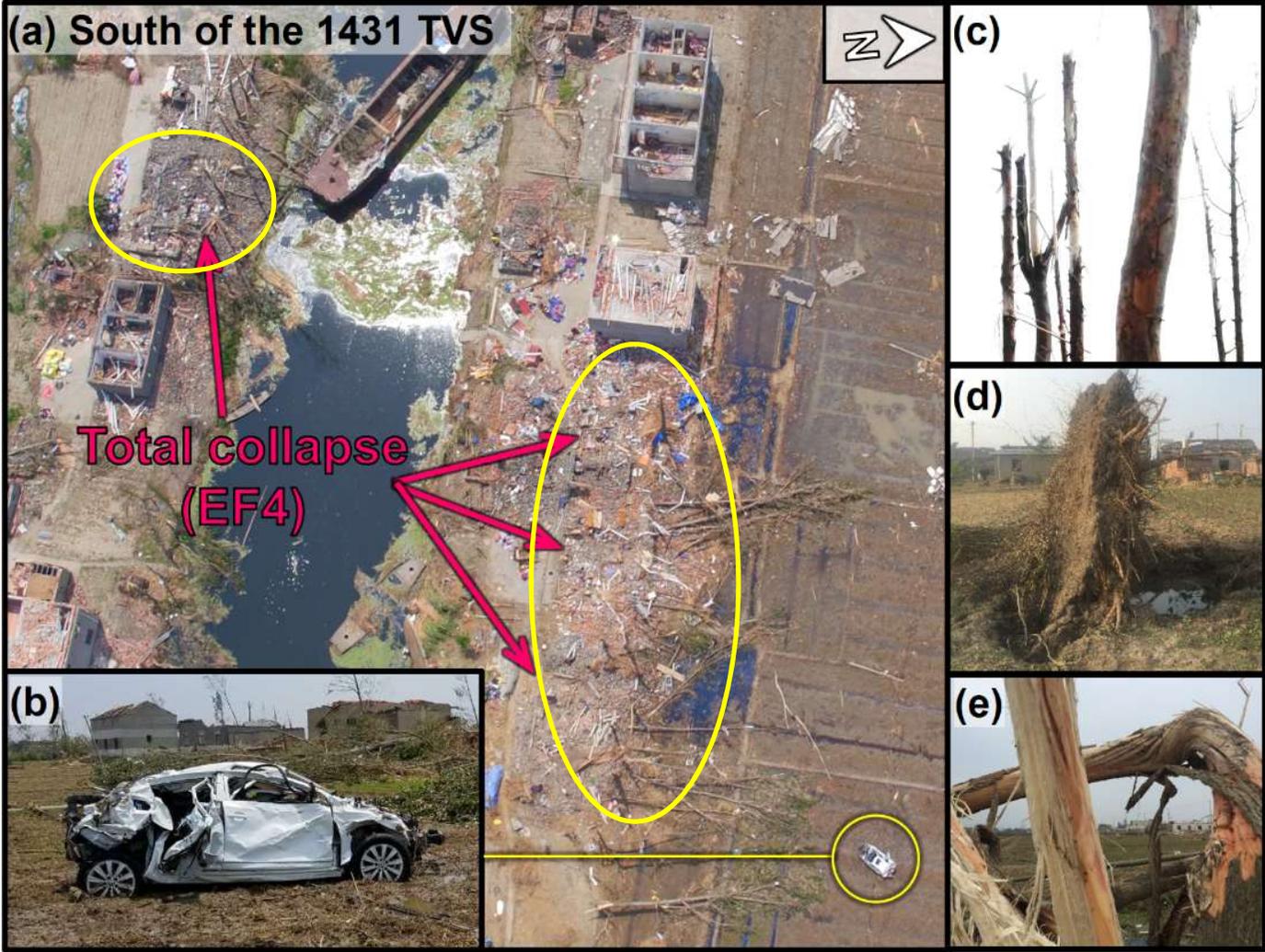
灾害现场：建筑细节

记录建筑结构等关键信息

关闭相机背景虚化



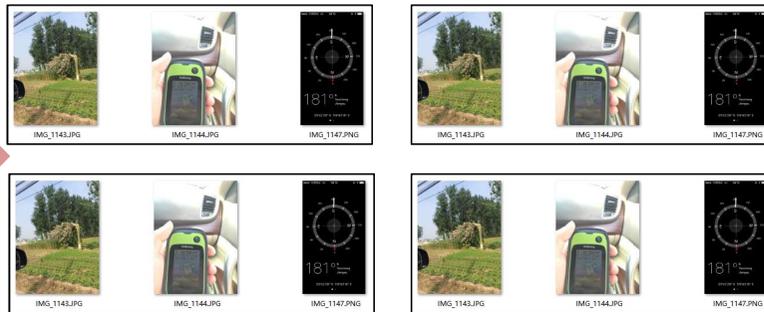
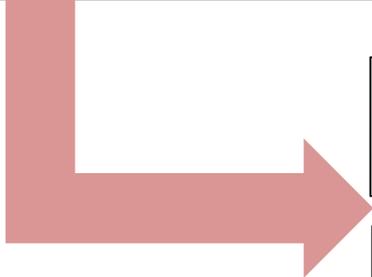
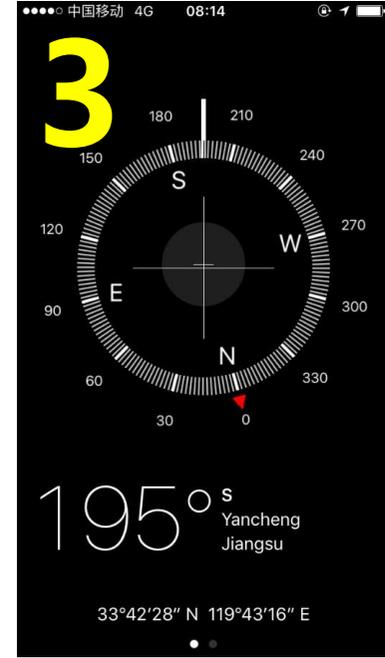
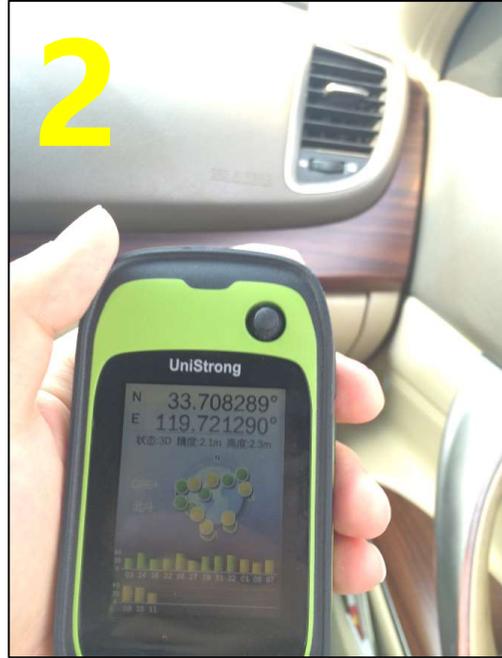
航拍与地面调查互补



Meng et al. 2018 (WAF)

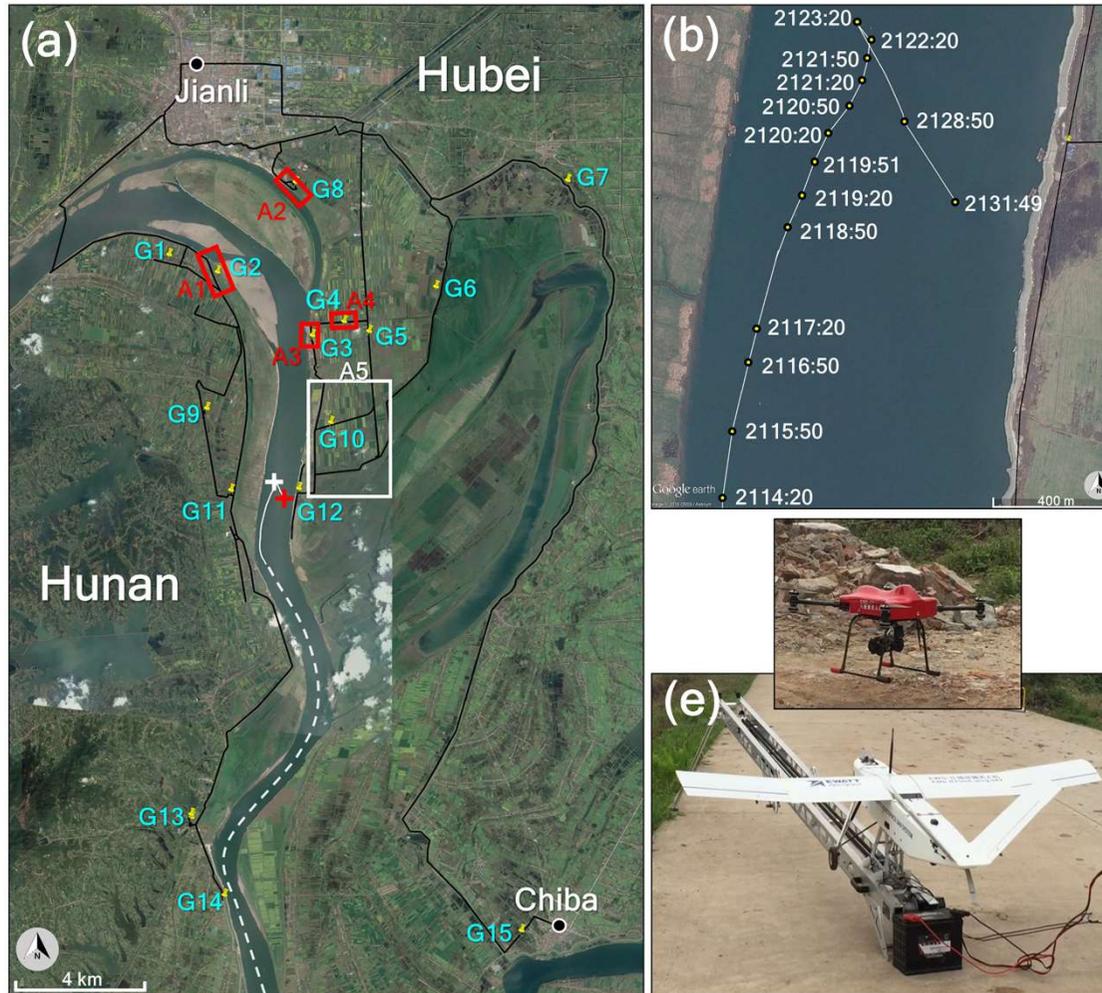
行车途中

行车途中也不能闲着：拍照记录、GPS定位、倒伏方向



策略组

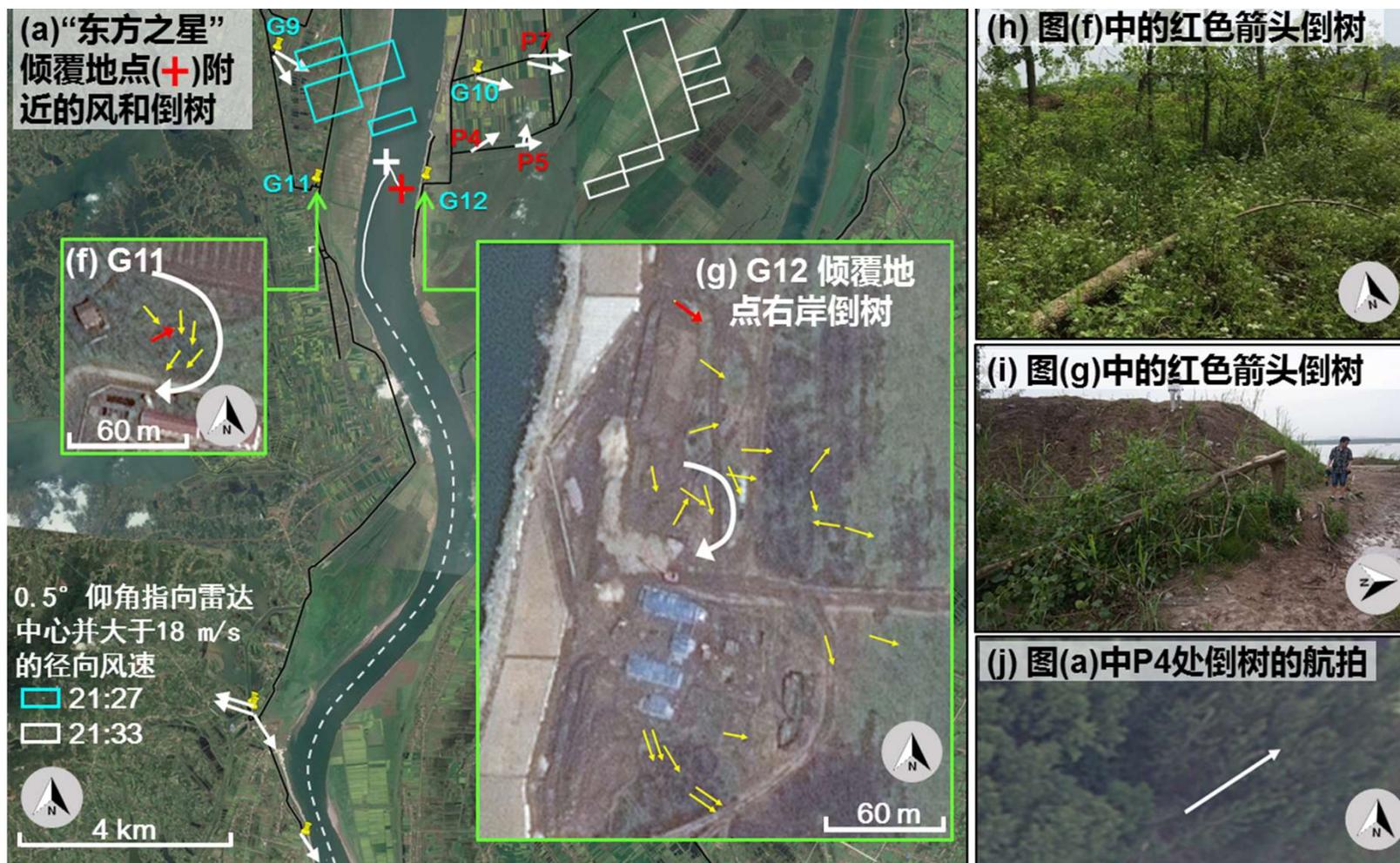
整理数据、综合分析 → 查漏补缺 → 航拍组、地面调查组



Meng et al. 2016 (Sci. Bull.)

策略组

整理数据、综合分析 → 查漏补缺 → 航拍组、地面调查组



Meng et al. 2016 (Sci. Bull.)

小结

前期准备工作

- 雷达基数据。
- 雷达可视软件。
- 定位龙卷母体系统与移动方向、定位龙卷TVS。
- 加载谷歌地球(街道尺度)、标记TVS位置。
- 行车地图中标记TVS及待考察位置。
-

灾害现场 (安全、迅速、不添乱、尊重、不发微博朋友圈)

- 龙卷涡旋地面位置确认，并与雷达TVS坐标比对。
- 制定航拍计划，分小组分段航拍。
- 定位孤立地标，估计GPS坐标在后期分析中的空间不确定性。
- 测定关键DI倒伏方向。
- 记录建筑结构等关键信息。
- 行车途中拍照记录、GPS定位、倒伏方向。
-

常遇到的难题

不准确的信息:

- 时间
- 地点

信息缺失

- 无目击者
- 无灾害指示物
- 灾害指示物被快速清理



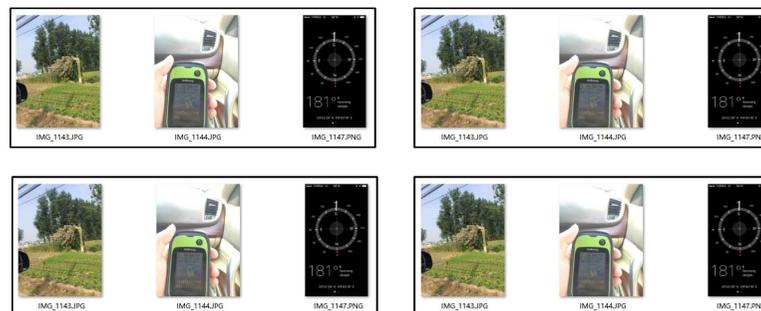
目录

- 龙卷风定义与相关概念
- 龙卷风的识别
 - ✓ 雷达遥感观测
 - ✓ 地面灾害特征
- 龙卷灾害调查的意义
- 龙卷灾害调查主要内容和步骤
- **龙卷灾害调查数据整理**
- 龙卷灾害定级与结果展示
- 摄影测量法简介

数据集

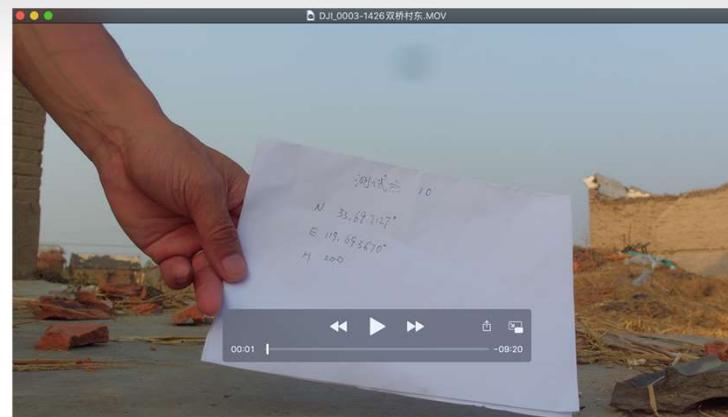
- ✓ 雷达基数据 (Level II)
- ✓ 实地照片、GPS坐标、DI倒伏方向
- ✓ 航拍视频
- ✓ 龙卷视频、照片 (来自当地政府、居民、媒体、网络)
- ✓ 孤立地标 GPS坐标、照片
- ✓ 建筑结构、树木种类记录等
- ✓ 群众走访记录
- ✓ 道路监控
- ✓ 商户监控
- ✓ 地面气象站
- ✓ 探空
- ✓ 卫星
- ✓

- ▶ 手机照片-白兰强-2016.06.24
- ▶ 手机照片-白兰强-2016.06.25
- ▶ 手机照片-白兰强-2016.06.26



数据集

- ✓ 雷达基数据 (Level II)
- ✓ 实地照片、GPS坐标、DI倒伏方向
- ✓ 航拍视频
- ✓ 龙卷视频、照片 (来自当地政府、居民、媒体、网络)
- ✓ 孤立地标 GPS坐标、照片
- ✓ 建筑结构、树木种类记录等
- ✓ 群众走访记录
- ✓ 道路监控
- ✓ 商户监控
- ✓ 地面气象站
- ✓ 探空
- ✓ 卫星
- ✓



- ▶ 佛山-江苏盐城-20160624
- ▶ 佛山-江苏盐城-20160625-1
- ▶ 佛山-江苏盐城-20160625-2
- ▶ 佛山-江苏盐城-20160626
- ▶ 佛山-江苏盐城-20160627

名称

- DJI_0004-27日早-大楼村最南.MOV
- DJI_0015-27日早-湖南侧.MOV
- DJI_0032-27日午-补拍起点.MOV

数据集

- ✓ 雷达基数据 (Level II)
- ✓ 实地照片、GPS坐标、DI倒伏方向
- ✓ 航拍视频
- ✓ 龙卷视频、照片 (来自当地政府、居民、媒体、网络)
- ✓ 孤立地标 GPS坐标、照片
- ✓ 建筑结构、树木种类记录等
- ✓ 群众走访记录
- ✓ 道路监控
- ✓ 商户监控
- ✓ 地面气象站
- ✓ 探空
- ✓ 卫星
- ✓



数据集

- ✓ 雷达基数据 (Level II)
- ✓ 实地照片、GPS坐标、DI倒伏方向
- ✓ 航拍视频
- ✓ 龙卷视频、照片 (来自当地政府、居民、媒体、网络)
- ✓ 孤立地标 GPS坐标、照片
- ✓ 建筑结构、树木种类记录等
- ✓ 群众走访记录
- ✓ 道路监控
- ✓ 商户监控
- ✓ 地面气象站
- ✓ 探空
- ✓ 卫星
- ✓



数据集

- ✓ 雷达基数据 (Level II)
- ✓ 实地照片、GPS坐标、DI倒伏方向
- ✓ 航拍视频
- ✓ 龙卷视频、照片 (来自当地政府、居民、媒体、网络)
- ✓ 孤立地标 GPS坐标、照片
- ✓ 建筑结构、树木种类记录等
- ✓ 群众走访记录
- ✓ 道路监控
- ✓ 商户监控
- ✓ 地面气象站
- ✓ 探空
- ✓ 卫星
- ✓



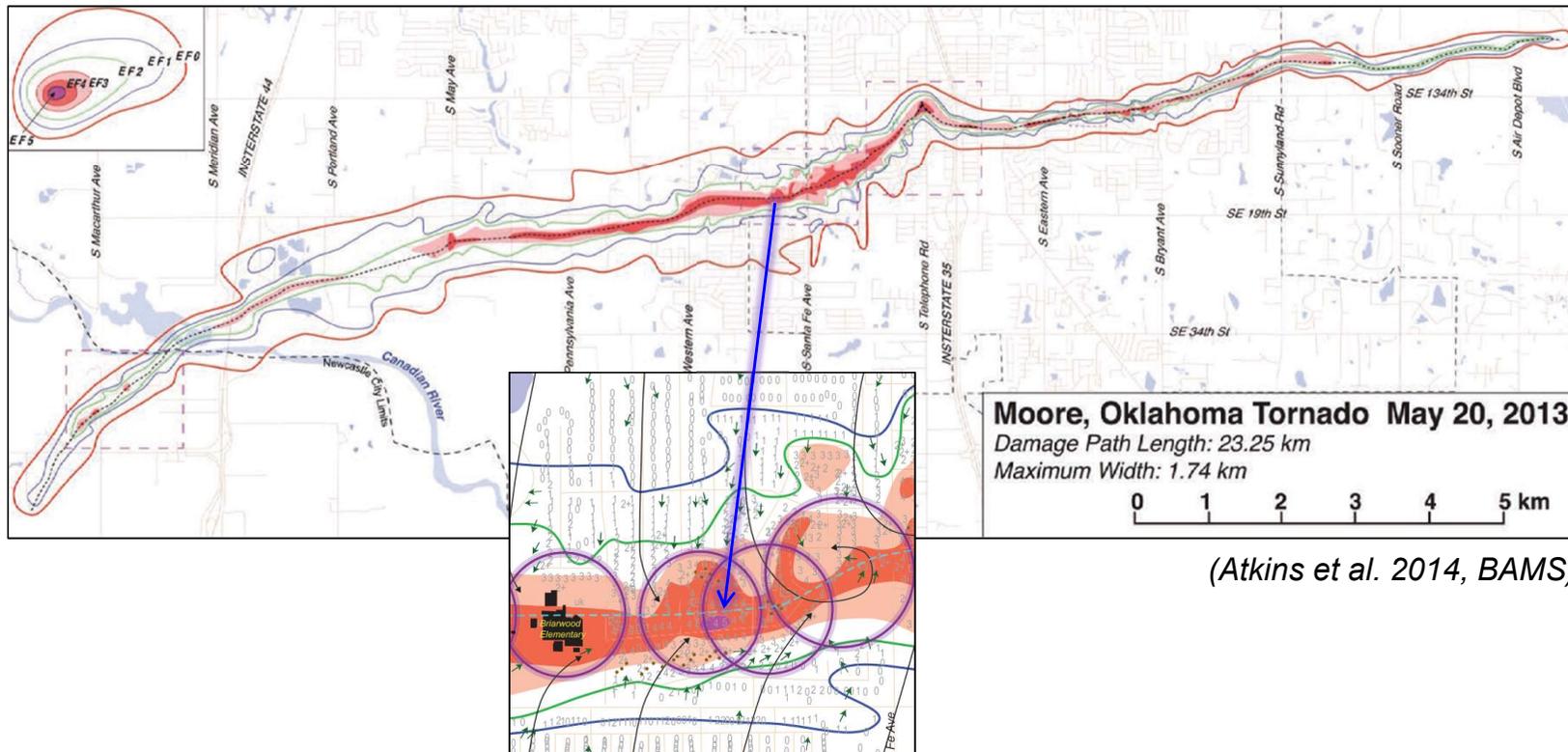
目录

- 龙卷风定义与相关概念
- 龙卷风的识别
 - ✓ 雷达遥感观测
 - ✓ 地面灾害特征
- 龙卷灾害调查的意义
- 龙卷灾害调查主要内容和步骤
- 龙卷灾害调查数据整理
- 龙卷灾害定级与结果展示
- 摄影测量法简介

后期龙卷灾害定级

龙卷强度：全路径**最强**地面灾害对应的龙卷等级。

Rate the tornado intensity by applying the highest rated DI, provided there is supporting evidence of similar damage intensity immediately surrounding the DI.



后期龙卷灾害定级



(Atkins et al. 2014, BAMS)

后期龙卷灾害定级

示例 (盐城阜宁龙卷2016)



后期龙卷灾害定级

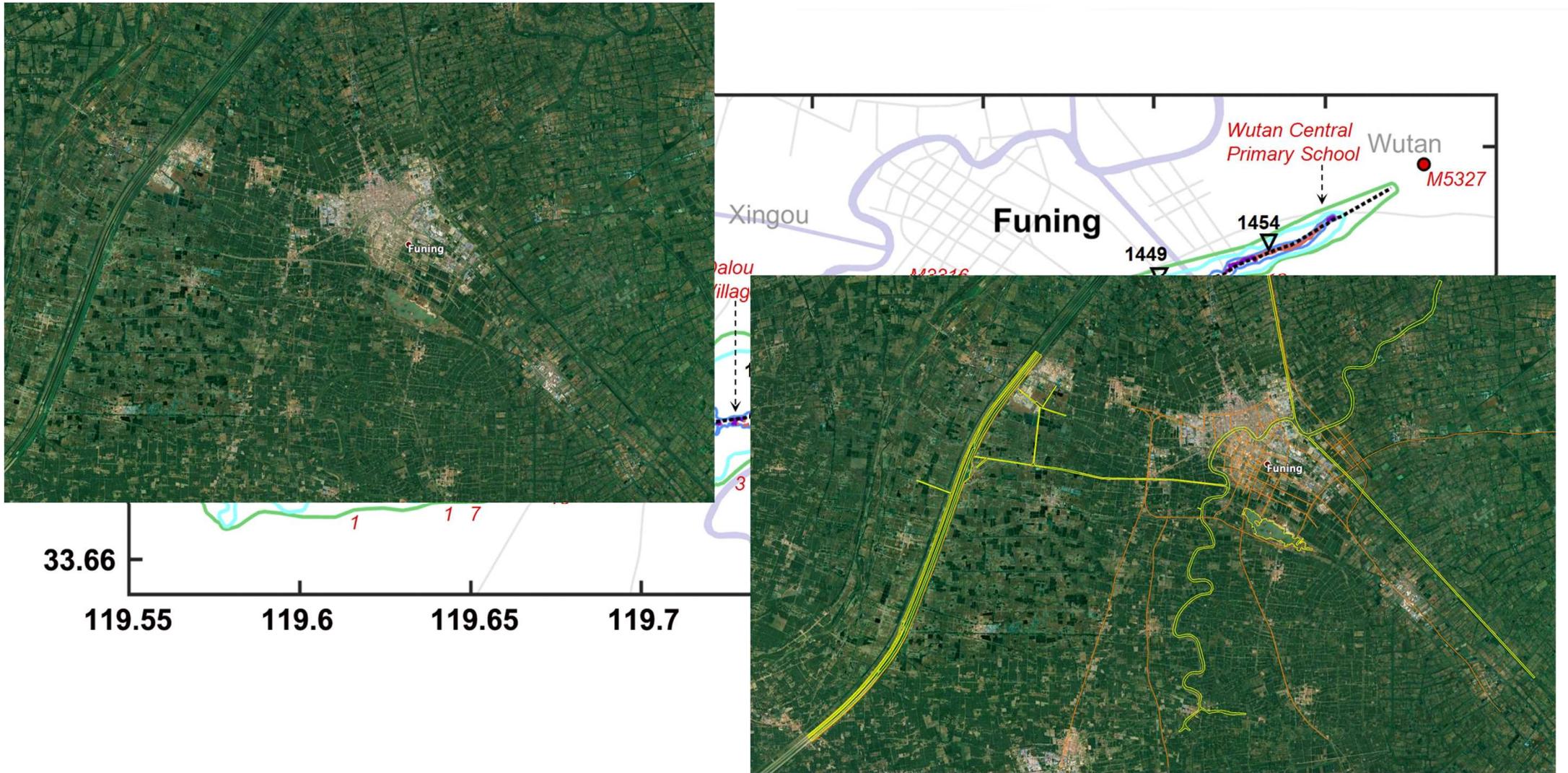
示例：所有定级DI均标定在Google Earth中。



后期龙卷灾害定级



后期龙卷灾害定级与结果展示



后期龙卷灾害定级

Enhanced Fujita Scale (EF-Scale)

Became operational on February 1, 2007 in the U.S.

28 Damage Indicators (DIs)

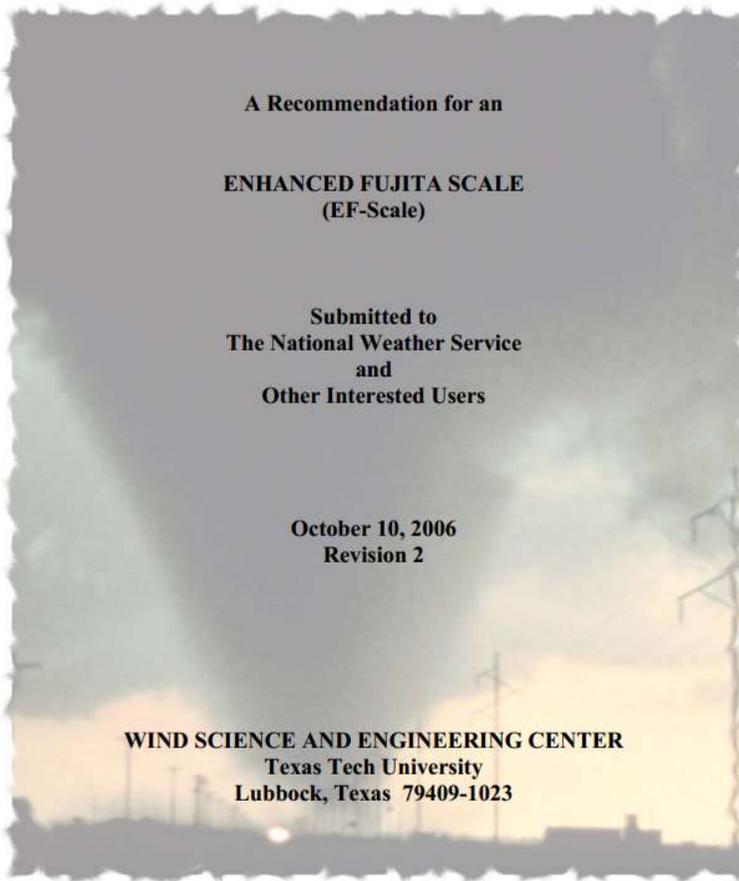


Table 3. Damage Indicators for EF Scale

DI No.	Damage Indicator (DI)
1	Small Barns or Farm Outbuildings (SBO)
2	One- or Two-Family Residences (FR12)
3	Manufactured Home – Single Wide (MHSW)
4	Manufactured Home – Double Wide (MHDW)
5	Apartments, Condos, Townhouses [3 stories or less] (ACT)
6	Motel (M)
7	Masonry Apartment or Motel Building (MAM)
8	Small Retail Building [Fast Food Restaurants] (SRB)
9	Small Professional Building [Doctor's Office, Branch Banks] (SPB)
10	Strip Mall (SM)
11	Large Shopping Mall (LSM)
12	Large, Isolated Retail Building [K-Mart, Wal-Mart] (LIRB)
13	Automobile Showroom (ASR)
14	Automobile Service Building (ASB)
15	Elementary School [Single Story; Interior or Exterior Hallways] (ES)
16	Junior or Senior High School (JHSH)
17	Low-Rise Building [1-4 Stories] (LRB)
18	Mid-Rise Building [5-20 Stories] (MRB)
19	High-Rise Building [More than 20 Stories] (HRB)
20	Institutional Building [Hospital, Government or University Building] (IB)
21	Metal Building System (MBS)
22	Service Station Canopy (SSC)
23	Warehouse Building [Tilt-up Walls or Heavy-Timber Construction](WHB)
24	Electrical Transmission Lines (ETL)
25	Free-Standing Towers (FST)
26	Free-Standing Light Poles, Luminary Poles, Flag Poles (FSP)
27	Trees: Hardwood (TH)
28	Trees: Softwood (TS)

Enhanced Fujita Scale (EF-Scale)

Table 3. Damage Indicators for EF Scale

DI No.	Damage Indicator (DI)
1	Small Barns or Farm Outbuildings (SBO)
2	One- or Two-Family Residences (FR12)
3	Manufactured Home – Single Wide (MHSW)
4	Manufactured Home – Double Wide (MHDW)
5	Apartments, Condos, Townhouses [3 stories or less] (ACT)
6	Motel (M)
7	Masonry Apartment or Motel Building (MAM)
8	Small Retail Building [Fast Food Restaurants] (SRB)
9	Small Professional Building [Doctor's Office, Branch Banks] (SPB)
10	Strip Mall (SM)
11	Large Shopping Mall (LSM)
12	Large, Isolated Retail Building [K-Mart, Wal-Mart] (LIRB)
13	Automobile Showroom (ASR)
14	Automobile Service Building (ASB)
15	Elementary School [Single Story; Interior or Exterior Hallways] (ES)
16	Junior or Senior High School (JHSH)
17	Low-Rise Building [1-4 Stories] (LRB)
18	Mid-Rise Building [5-20 Stories] (MRB)
19	High-Rise Building [More than 20 Stories] (HRB)
20	Institutional Building [Hospital, Government or University Building] (IB)
21	Metal Building System (MBS)
22	Service Station Canopy (SSC)
23	Warehouse Building [Tilt-up Walls or Heavy-Timber Construction](WHB)
24	Electrical Transmission Lines (ETL)
25	Free-Standing Towers (FST)
26	Free-Standing Light Poles, Luminary Poles, Flag Poles (FSP)
27	Trees: Hardwood (TH)
28	Trees: Softwood (TS)

(WSEC 2006)



Enhanced Fujita Scale (EF-Scale)

此类基础设施可直接与中国类比。

Typical Construction

- Single wood poles with wood cross arms
- Single steel or concrete poles with metal cross arms
- Metal trussed towers

单位: mph

DOD*	Damage description	EXP	LB	UB
1	Threshold of visible damage	83	70	98
2	Broken wood cross member	99	80	114
3	Wood poles leaning	108	85	130
4	Broken wood poles	118	98	142
5	Broken or bent steel or concrete poles	138	115	149
6	Collapsed metal truss towers	141	116	165

* DOD is degree of damage



ETL: Single Wood Pole



ETL: Single Steel Pole



ETL: Metal Truss Tower (WSEC 2006)

灾害定级流程

确定DI种类

对应灾害描述

确定DOD

对应EF等级

m s ⁻¹	20	35	53	72	94	117	142
mph	45	79	118	162	210	262	317
F scale	F0	F1	F2	F3	F4	F5	
EF scale	EF0	EF1	EF2	EF3	EF4	EF5	
mph	65	86	111	136	166	200	
m s ⁻¹	29	38	50	61	74	89	

Meng and Yao 2014

Enhanced Fujita Scale (EF-Scale)

METAL BUILDING SYSTEM (MBS)



MBS: Metal roof and wall panels; gable roof shape; Z or C-shaped purlins and girts; single-bay rigid frames; x-bracing parallel to ridge



(WSEC 2006)



Meng et al. 2018 (WAF)

Enhanced Fujita Scale (EF-Scale)

ONE-AND TWO-FAMILY RESIDENCE (FR12)



(WSEC 2006)

MANUFACTURED HOMES – SINGLE WIDE (MHSW)



MHSW: DOD 4: Complete uplift of roof; most walls remain standing

Enhanced Fujita Scale (EF-Scale)

硬木：橡木、枫木、桦木、白蜡木

单位：mph

DOD*	Damage description	EXP	LB	UB
1	Small limbs broken (up to 1" diameter)	60	48	72
2	Large branches broken (1"-3" diameter)	74	61	88
3	Trees uprooted	94	76	118
4	Trunks snapped	107	93	134
5	Trees debarked with only stubs of largest branches remaining	143	123	167

软木：松树、云杉、冷杉、铁杉、雪松、水杉、柏树

DOD	Damage description	EXP	LB	UB
1	Small limbs broken (up to 1" diameter)	60	48	72
2	Large branches broken (1" – 3" diameter)	75	62	88
3	Trees uprooted	87	73	113
4	Trunks snapped	104	88	128
5	Trees debarked with only stubs of largest branches remaining	131	112	153

(WSEC 2006)

EF评级示例

m s ⁻¹	20	35	53	72	94	117	142
mph	45	79	118	162	210	262	317
F scale	F0	F1	F2	F3	F4	F5	
EF scale	EF0	EF1	EF2	EF3	EF4	EF5	
mph	65	86	111	136	166	200	
m s ⁻¹	29	38	50	61	74	89	

Meng and Yao 2014

确定DI种类

对应灾害描述

确定DOD

对应EF等级



DOD*	Damage description	EXP	LB	UB
1	Threshold of visible damage	65	53	80
2	Loss of roof covering material (<20%), gutters and/or awning; loss of vinyl or metal siding	79	63	97
3	Broken glass in doors and windows	96	79	114
4	Uplift of roof deck and loss of significant roof covering material (>20%); collapse of chimney; garage doors collapse inward; failure of porch or carport	97	81	116
5	Entire house shifts off foundation	121	103	141
6	Large sections of roof structure removed; most walls remain standing	122	104	142
7	Exterior walls collapsed	132	113	153
8	Most walls collapsed, except small interior rooms	152	127	178
9	All walls	170	142	198
10	Destruction of engineered and/or well constructed residence; slab swept clean	200	165	220

* DOD is degree of damage

EF评级示例

m s ⁻¹	20	35	53	72	94	117	142
mph	45	79	118	162	210	262	317
F scale	F0	F1	F2	F3	F4	F5	
EF scale	EF0	EF1	EF2	EF3	EF4	EF5	
mph	65	86	111	136	166	200	
m s ⁻¹	29	38	50	61	74	89	

Meng and Yao 2014

确定DI种类

对应灾害描述

确定DOD

对应EF等级

DOD*	Damage description	EXP	LB	UB
1	Threshold of visible damage	67	54	83
2	Inward or outward collapsed of overhead doors	89	75	108
3	Metal roof or wall panels pulled from the building	95	78	120
4	Column anchorage failed	117	96	135
5	Buckling of roof purlins	118	95	138
6	Failure of X-braces in the lateral load resisting system	138	118	158
7	Progressive collapse of rigid frames	143	120	168
8	Total destruction of building	155	132	178

* DOD is degree of damage



Enhanced Fujita Scale (EF-Scale)

<https://training.weather.gov/wdtd/courses/EF-scale/>

软件演示

  **WARNING DECISION TRAINING DIVISION**
NOAA/ NATIONAL WEATHER SERVICE

WDTD HOME MAIN COURSES TRAINING INFO TRAINING TOOLS SUPPORT INFO NEWS SEARCH ABOUT

Local forecast by "City, St" or ZIP code
 [Location Help](#)

News Headline Here
28 June 2018: WDTD introduces the [Damage Assessment Toolkit course](#).

The new EFkit: A PC-based tool kit, version 2 updated 2008



DOD: 5 Uplift of roof decking; significant loss of roof covering (>20%); loss of rooftop HVAC equipment (1/4) **100 EF1**

地面仔细确认

<https://www.ustornadoes.com>

参考自 *Tony Lyza*



Credit: NWS Louisville

地面仔细确认



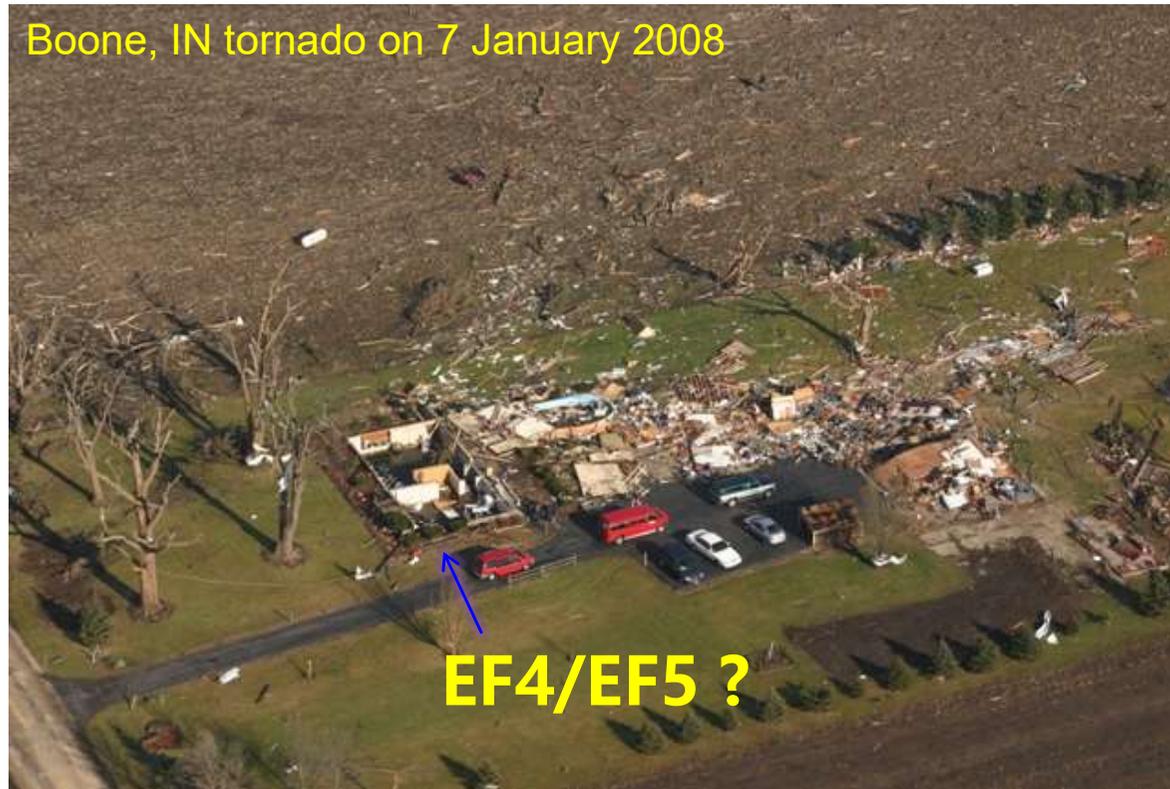
Credit: NWS Louisville

→ EF4 damage in four separate southern Indiana counties.

地面仔细确认

<https://www.ustornadoes.com>

参考自 *Tony Lyza*



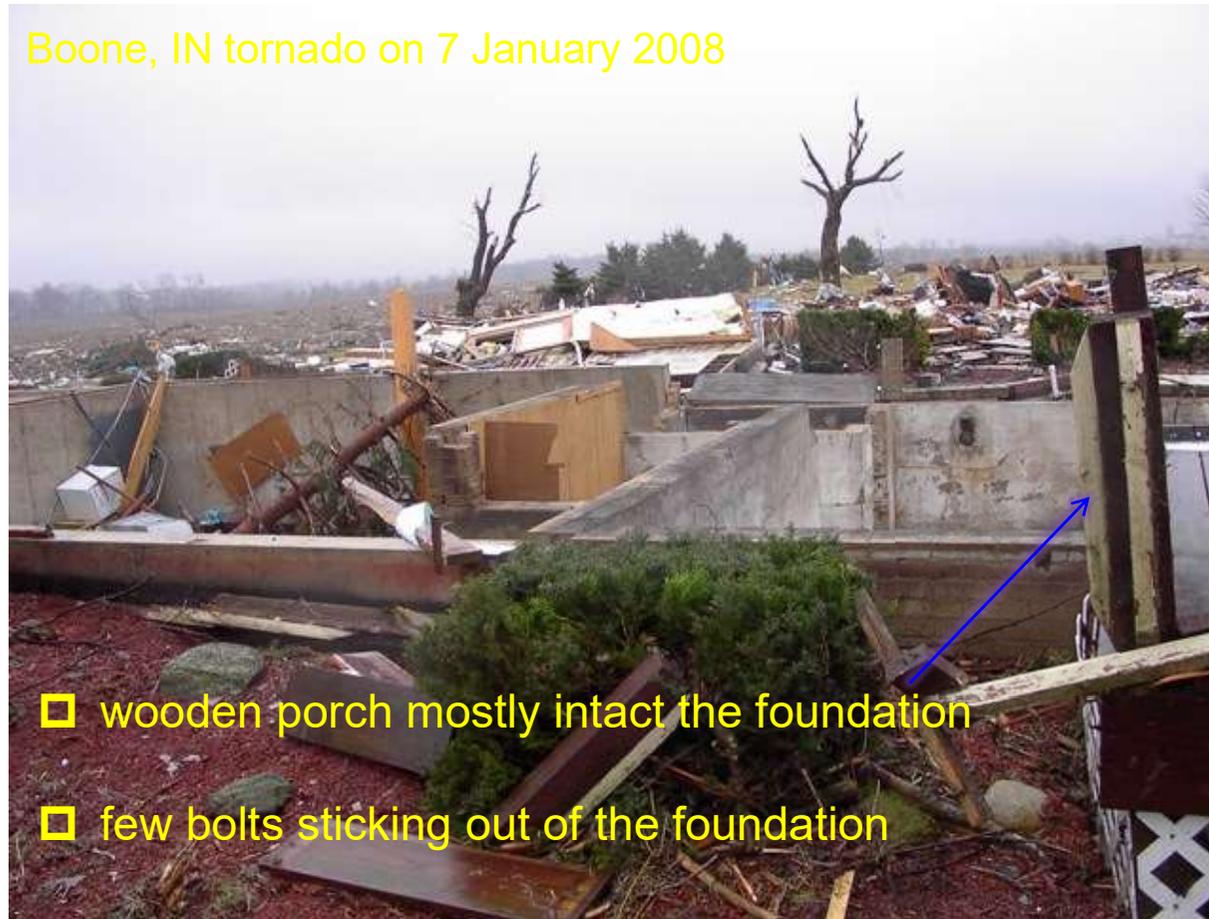
Credit: NWS Chicago/Romeoville

地面仔细确认

<https://www.ustornadoes.com>

参考自 Tony Lyza

Boone, IN tornado on 7 January 2008



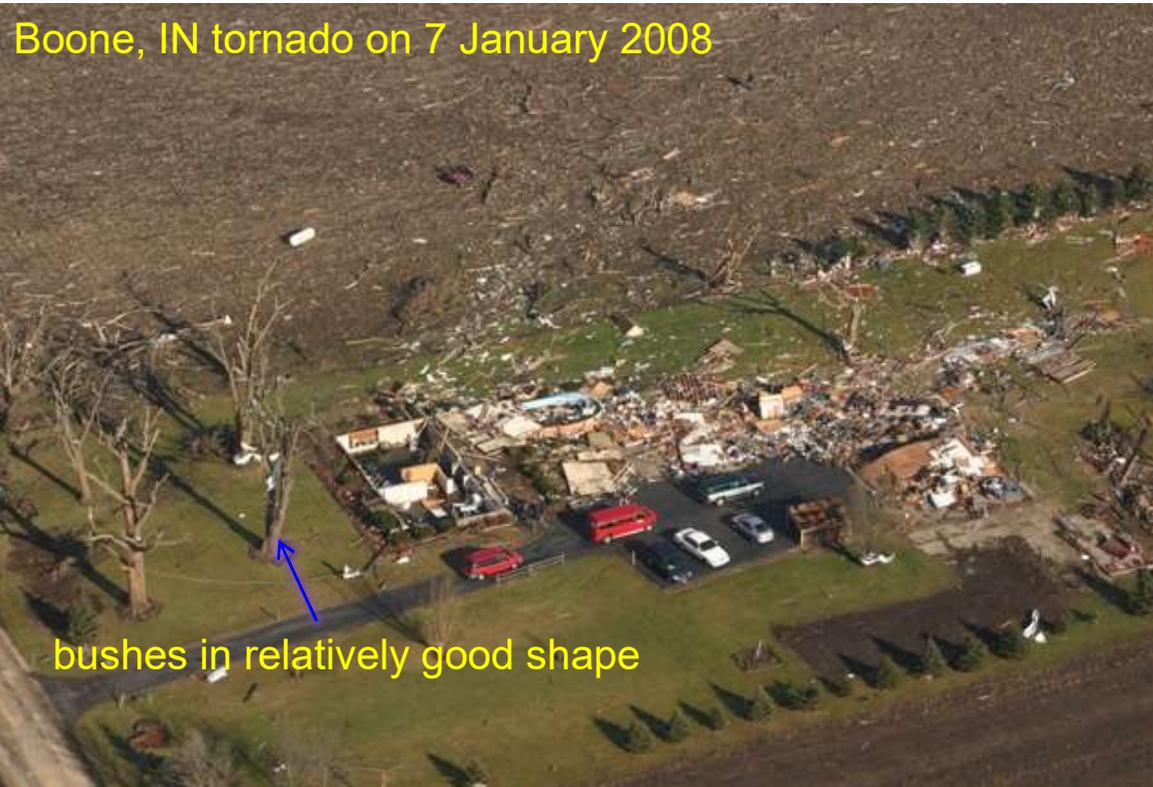
- wooden porch mostly intact the foundation
- few bolts sticking out of the foundation

Credit: NWS Chicago/Romeoville

地面仔细确认

<https://www.ustornadoes.com>

参考自 *Tony Lyza*



Credit: NWS Chicago/Romeoville

→ Rated EF3.

目录

- 龙卷风定义与相关概念
- 龙卷风的识别
 - ✓ 雷达遥感观测
 - ✓ 地面灾害特征
- 龙卷灾害调查的意义
- 龙卷灾害调查主要内容和步骤
- 龙卷灾害调查数据整理
- 龙卷灾害定级与结果展示
- 摄影测量法简介

漏斗云地面直径的估计

Photogrammetry (摄影测量法)

(Atkins et al. 2012, MWR)

Photogrammetry is the process of placing an **accurate azimuth/elevation** grid on a photo thus allowing the analyst to extract quantitative information such as the positions of clouds (e.g., Rasmussen et al. 2003; Zehnder et al. 2007). The photogrammetry process requires knowing the **precise position of the photographer** and the location of at least one **distinguishable landmark on the horizon**. Using **spherical trigonometry**, the **effective focal length** is then calculated for a panorama of pictures taken at the photo site (**camera tilt angle = 0°**). The azimuths of other distinguishable horizon landmarks in the panorama can then be found.



(Atkins et al. 2014, BAMS)



FIG. 3. Image of the Dimmitt, TX, tornado of 2 Jun 1995 obtained by the "CAM-1" VORTEX intercept team using Super-VHS video. The four survey landmarks are marked with arrowheads near the survey point, and azimuth and elevation notated in decimal degrees. From left to right, the landmarks are a faint power pole, the left roof peak of the barn, a power pole to the right of the barn, and the top of the second power pole from the image edge. The Cartesian grid overlay was generated in graphics drawing software and magnified, translated, and rotated to find a subjective best fit with the survey data.

(Erik Rasmussen et al. 2003, JAOT)

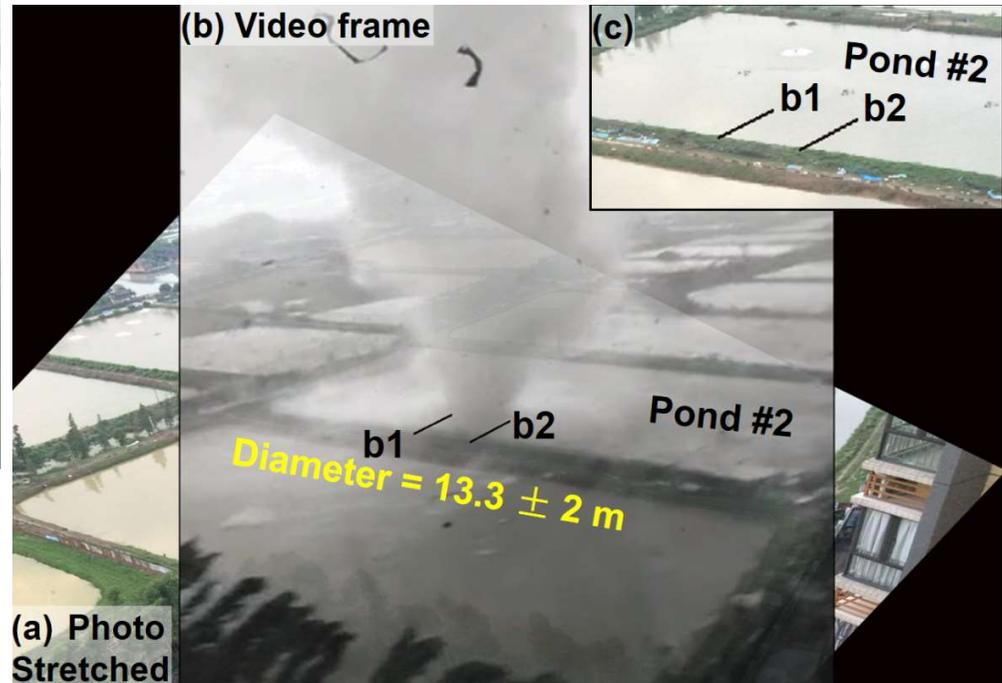
漏斗云地面直径的估计



Bai et al. 2017 (BAMS)

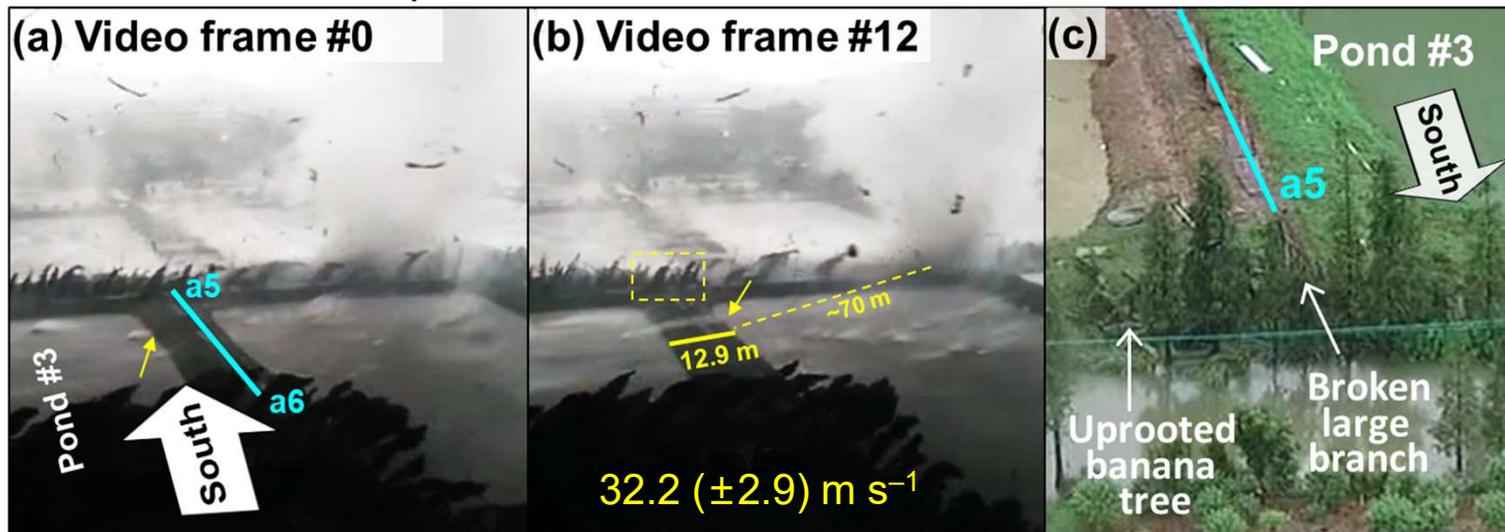


后期拍摄



基于视频估计龙卷近地面风速

视频帧率 = 29.914 fps



Bai et al. 2017 (BAMS)



中华人民共和国国家标准

GB/T 34301—2017

龙卷灾害调查技术规范

Technical specifications for tornado damage investigation

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由中国气象局提出。

本标准由全国气象防灾减灾标准化技术委员会(SAC/TC 345)归口。

本标准起草单位：江苏省气候中心、江苏省气象科学研究所、江苏省气象信息中心。

本标准主要起草人：许遐祯、陈兵、王瑞、项瑛、黄世成、程婷。

2017-09-07 发布

2018-04-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会 发布

5 调查内容和方法

5.1 调查范围

5.1.1 龙卷灾害的调查范围为龙卷发生所在的县(市、区、旗)。

5.1.2 龙卷灾害现场的调查宜沿着龙卷路径进行,应包括龙卷路径两侧范围内的所有遭破坏的物象、目击者。

5.2 对气象观测、探测资料的调查

5.2.1 气象台站概况

调查气象台站类别、观测和探测的内容、方式等,并注明气象站与龙卷灾害现场的水平距离、方位。

5.2.2 卫星、雷达探测资料

应调查收集龙卷灾害发生所在区域的气象卫星云图、雷达探测资料,收集并查看多普勒雷达龙卷式涡旋特征、中气旋分析产品等。

5.2.3 气象台站地面观测资料

调查地面气象观测记录,包括龙卷发生时的风向、风速、最大风速、极大风速、气压和最大变压、云状和云量、温度、湿度、降水量、天气现象及其持续时间等。

5.3 对目击者、报告者的调查和采访

5.3.1 对目击者、报告者进行现场采访,询问是否看到接地的漏斗云和地面旋转的碎屑、沙尘,收集和记录目击者对龙卷发生及影响的定性与定量描述,收集目击者拍摄的影像记录。

5.3.2 对目击者、报告者的调查和采访应与灾害现场调查同时进行,宜采用采访、现场记录或录音、录像等方式进行,目击者、报告者应在灾害调查表上签字确认。

5.3.3 调查和采访的内容包括:

- 龙卷发生时的基本情况,主要是持续时间、移动路径、直径大小等;
- 龙卷的性状,包括有无明显的漏斗云,是否接地;
- 龙卷的破坏情况,包括对建筑物、构筑物或设施设备、交通工具、人和动物、植物的破坏,破坏位置、数量、方式和程度等;
- 龙卷产生的飞射物情况,包括种类、体积、形状、重量,飞射物的飞行距离、高度、对地物的破坏及本身的损坏情况;
- 其他。

5.3.4 应对目击者、报告者描述的灾损情况进行现场核查和确认,并收集其所持有的影音影像等资料。

5.4 对灾害现场的调查

5.4.1 调查方法

5.4.1.1 利用测量工具对龙卷路径长度、龙卷路径宽度和受损对象的位置、方位、尺寸进行测量,测量仪



中山大學
SUN YAT-SEN UNIVERSITY

<http://atmos.sysu.edu.cn/teacher/1415>

谢谢!

白兰强

中山大学 大气科学学院

2020 年 7 月 21 日

