

# 第七章：各种各样的极端天气现象

Jintai Lin 林金泰

Dept. of Atmospheric & Oceanic Sciences, School of Physics

linjt@pku.edu.cn

<http://www.pku-atmos-acm.org/>

课件改编自俞妍老师课件



# 极端天气和自然灾害

全球各种极端天气和自然灾害的发生次数



# 本章主要内容

温带气旋和锋面

热带气旋

对流单体、多单体、超级单体

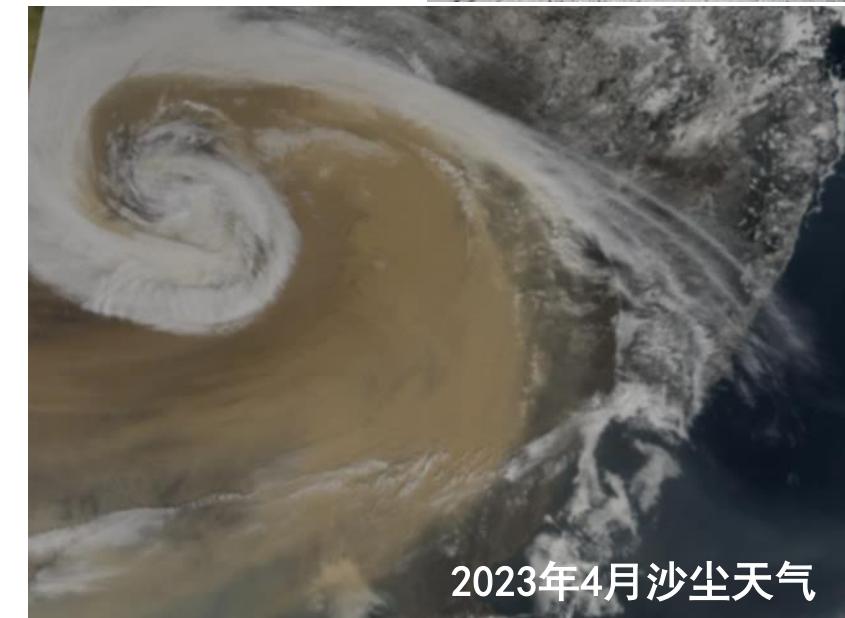
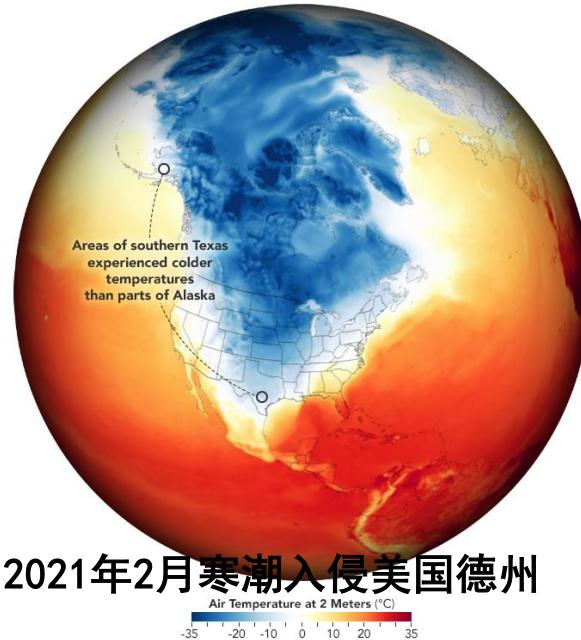
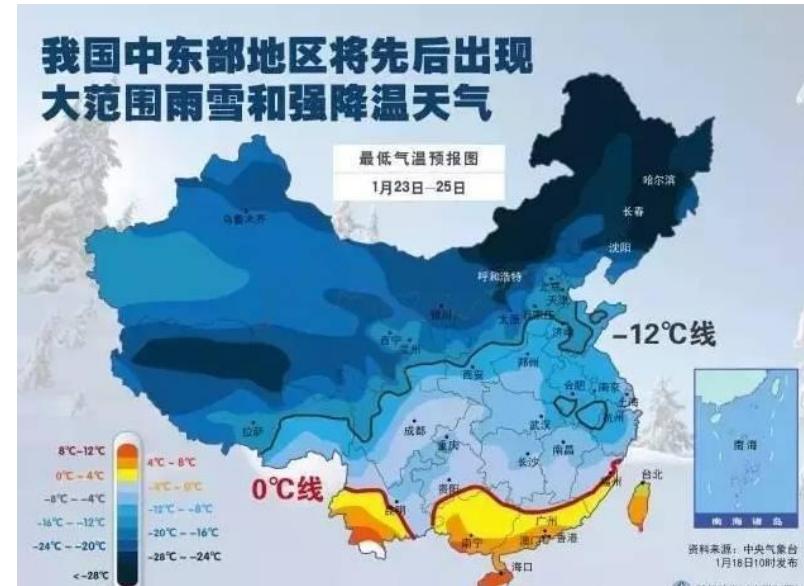
飑线、中尺度对流系统

龙卷、下击暴流

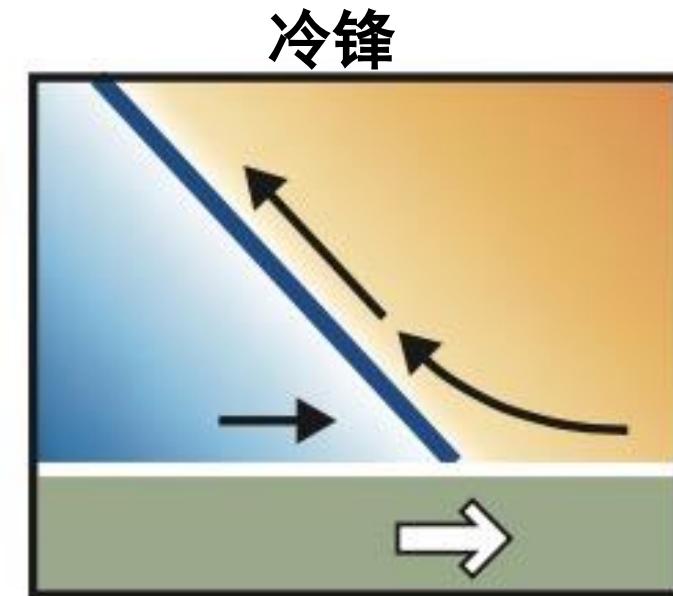
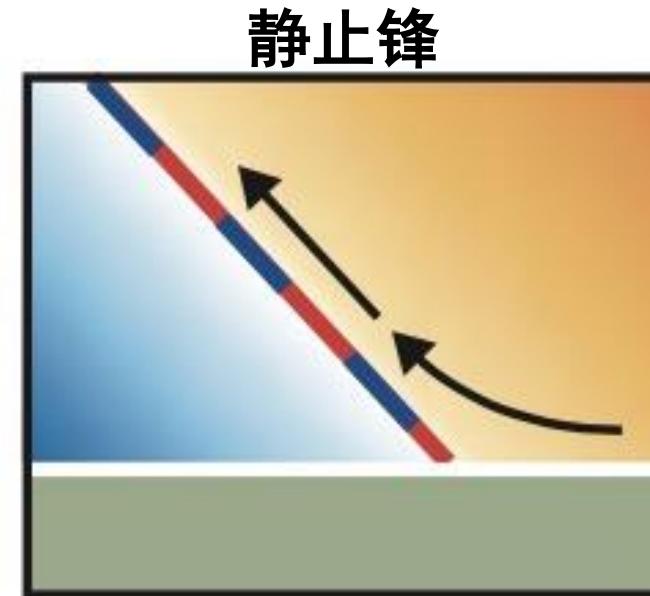
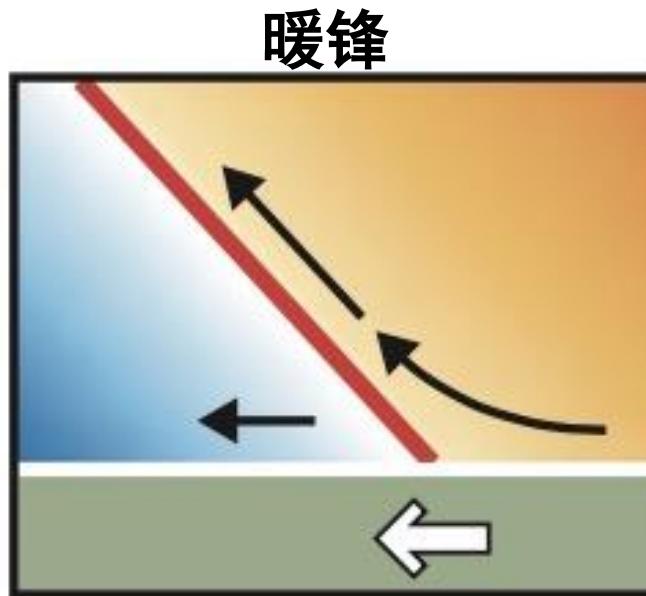
# 温带气旋



# 温带气旋引发的极端天气

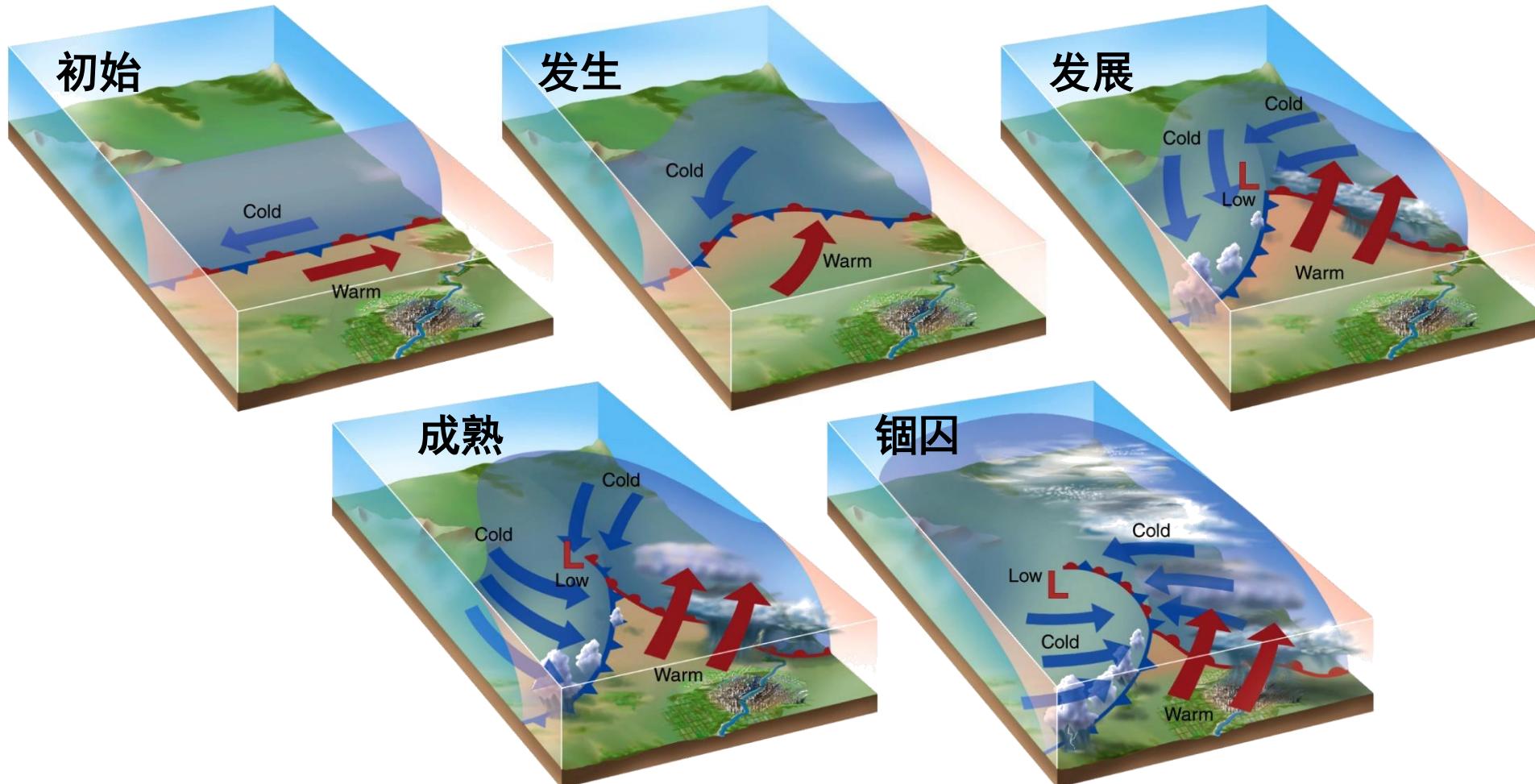


# 气团与锋面



- 不同的下垫面作用形成了冷—暖、干—湿的不同气团。
- 不同性质气团之间的交界面被称为锋面。在大气中，一般把热力学场和风场具有显著变化的狭窄倾斜带定义为锋面。
- 锋面是中纬度地区大气斜压性的反映，经常带来极端天气。

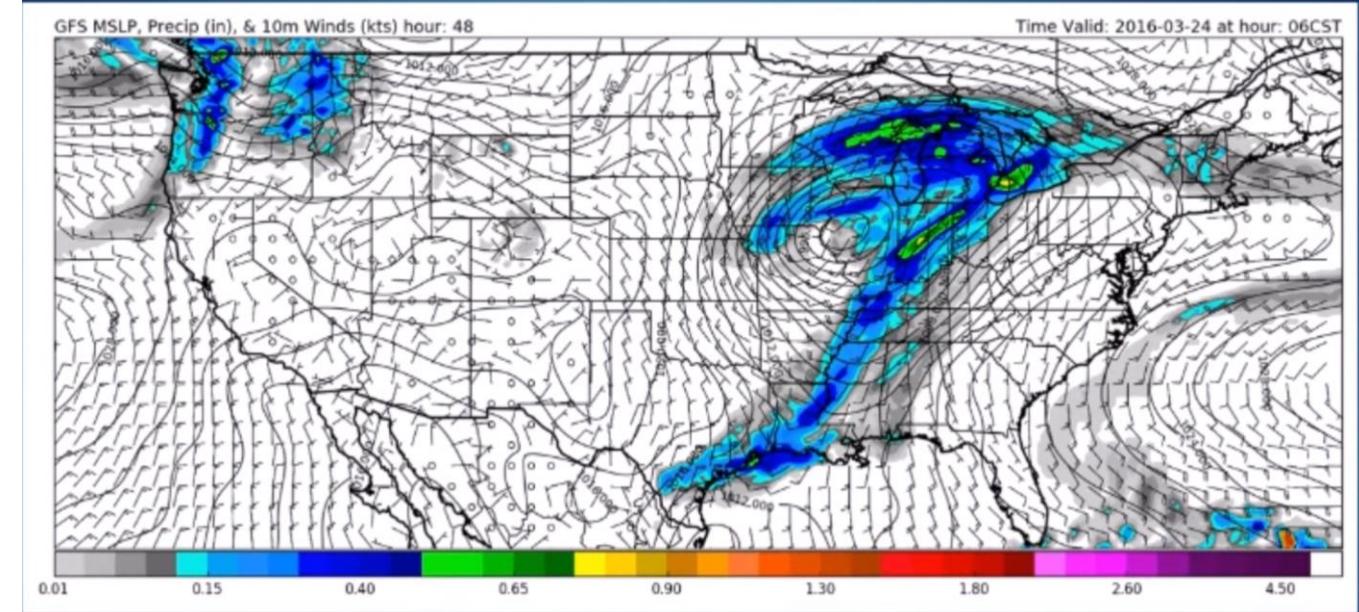
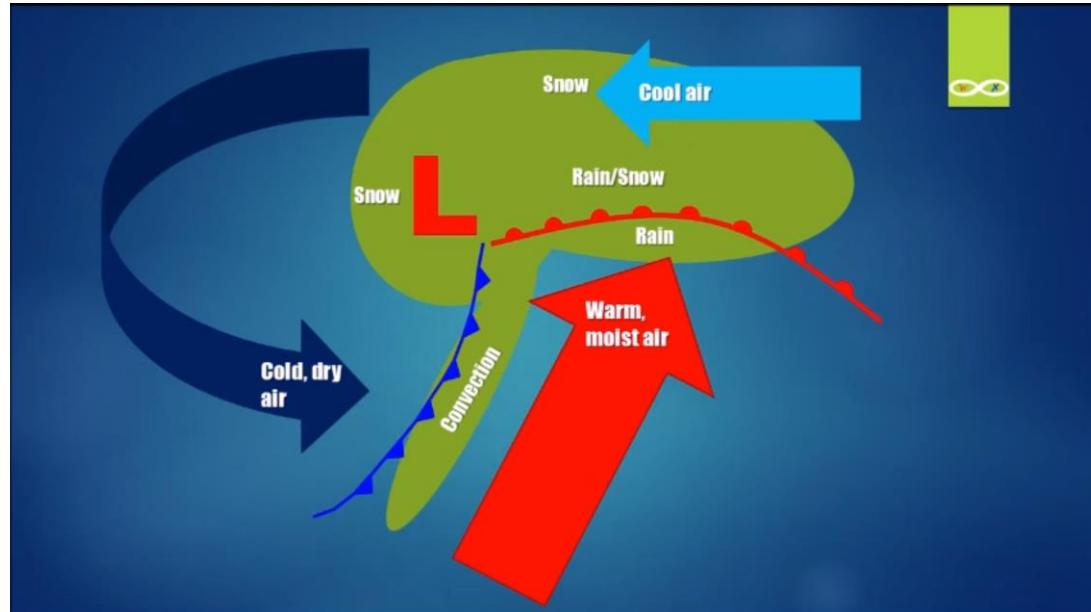
# 锋面与气旋



- 锋面和温带气旋是联系在一起的。
- 气旋一般来说由一个低压中心、一条冷锋、和一条暖锋组成。
- 气旋的生命周期大约为一个星期。

参考《天气学的发展概要—关于锋面气旋学说的四个阶段》

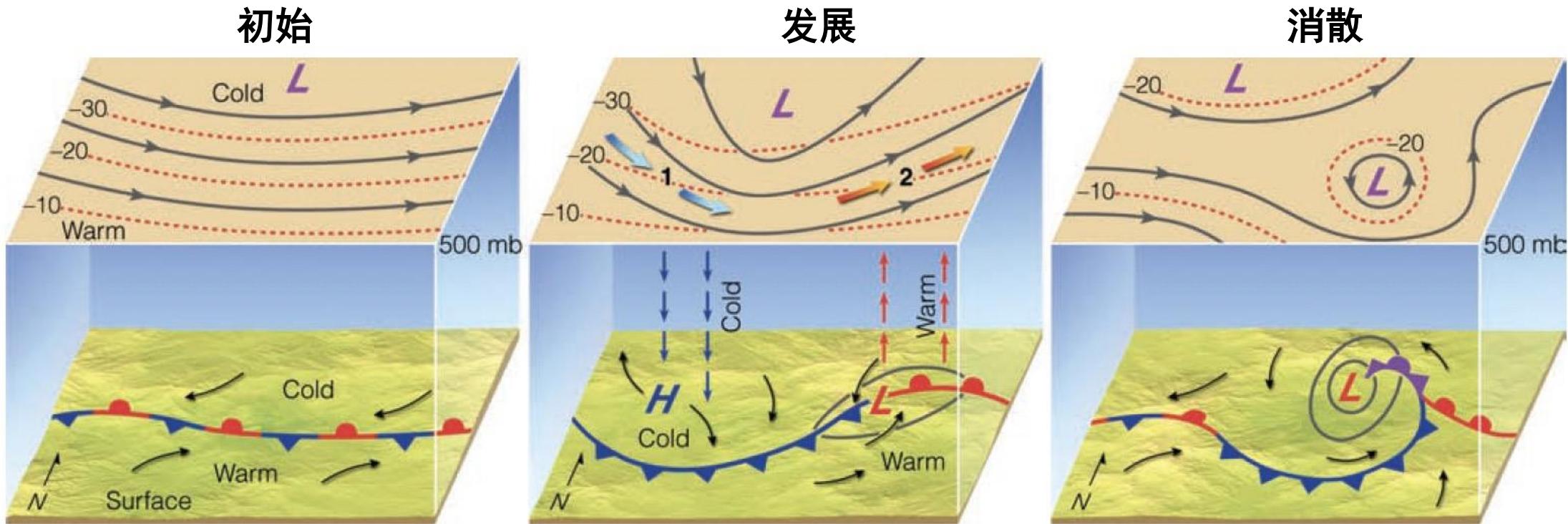
# 锋面与气旋



**Weather 101: Midlatitude cyclones:** [https://www.youtube.com/watch?v=rLmJ0tYt\\_YQ](https://www.youtube.com/watch?v=rLmJ0tYt_YQ)

**蒙古气旋:** [https://www.bilibili.com/video/BV1KZ4y1c7DC/?spm\\_id\\_from=333.337.search-card.all.click&vd\\_source=7c8c0aac7a668f8099702c26903ec5fe](https://www.bilibili.com/video/BV1KZ4y1c7DC/?spm_id_from=333.337.search-card.all.click&vd_source=7c8c0aac7a668f8099702c26903ec5fe)

# 高空急流的波动助力温带气旋发展

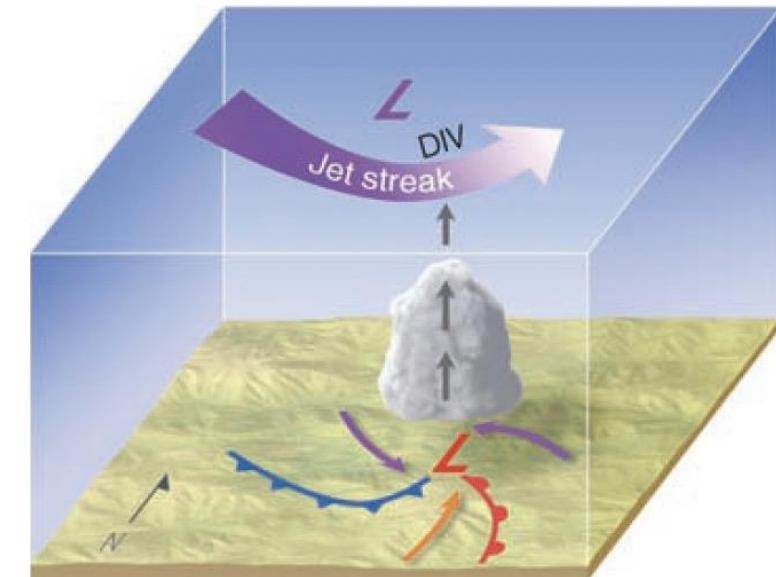
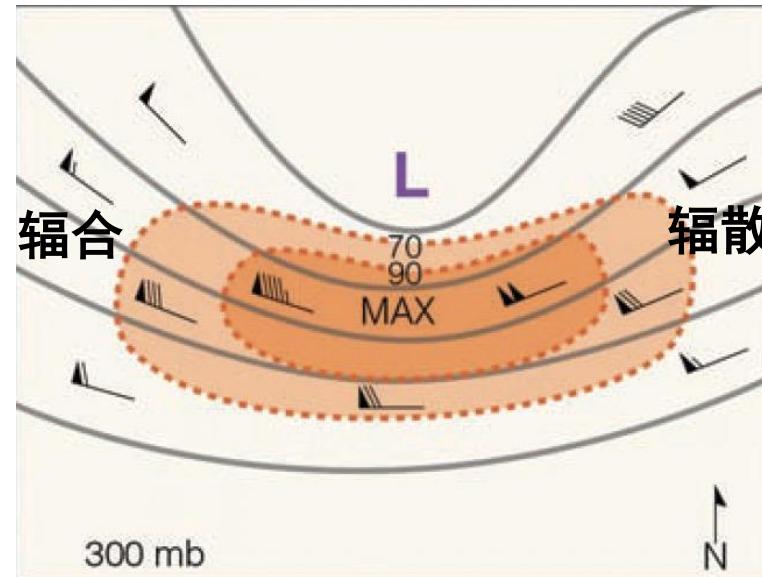
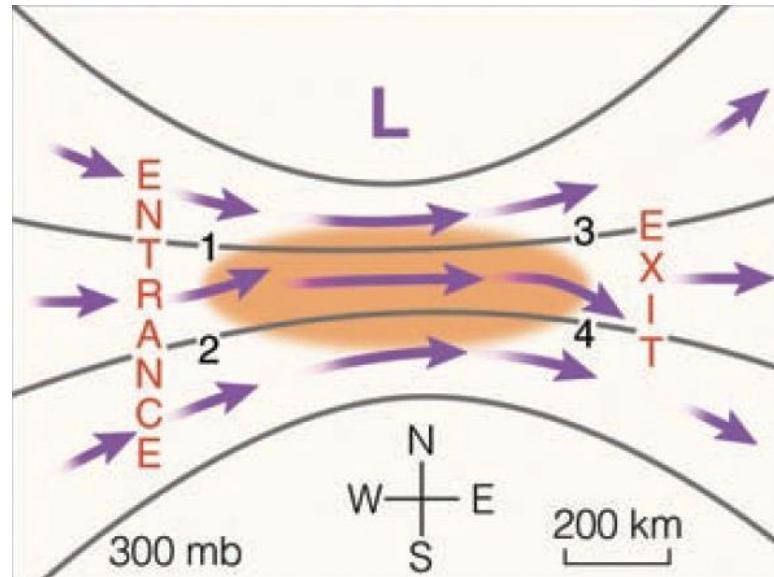


高空长波平行于地面静止锋

高空短波槽引发冷暖平流  
高空槽加强、引起垂直运动、  
加深地面高低压

天气系统东移、锢囚、地面  
与高空配置不利于气旋继续  
发展，消散

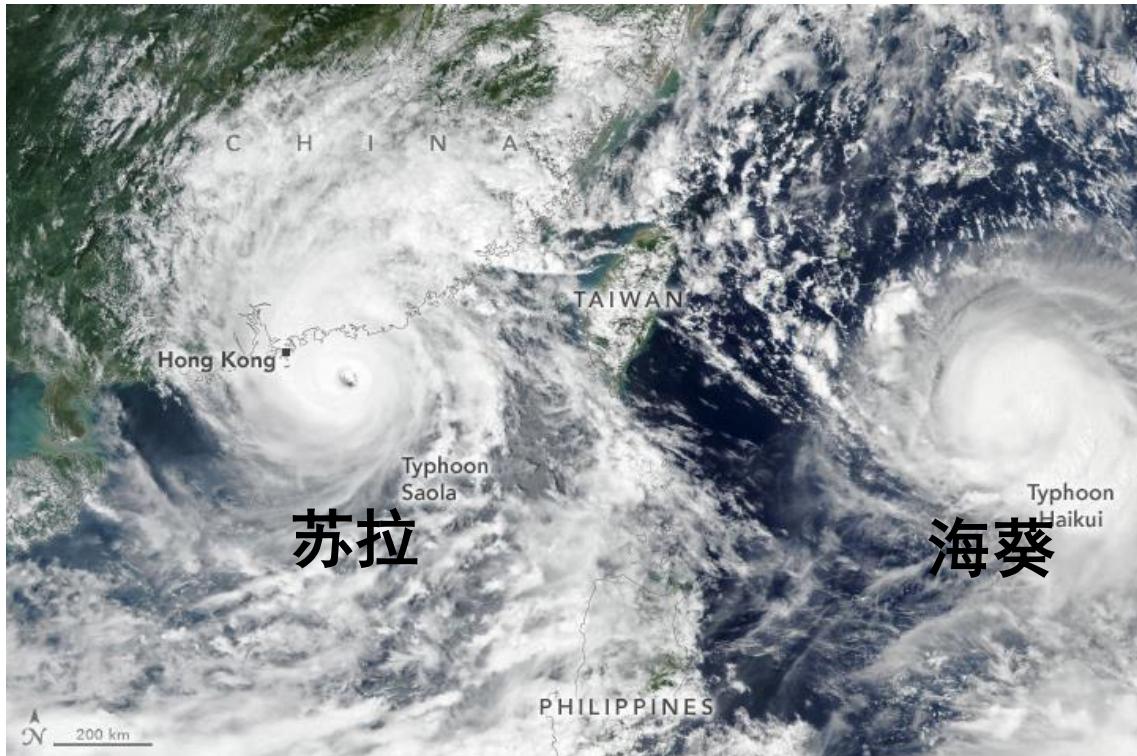
# 地面气旋和高空急流



- 若地面气旋的低压中心位于高空急流的出口处（如右图所示），上下层一致的上升运动有利于地面气旋加强。
- 反之，若地面气旋中心位于高空急流的入口处，高空的下沉气流将削弱地面的低压，不利于地面气旋的发展。

# 热带气旋:发生在热带与亚热带地区海面上的气旋性环流

热带西太平洋

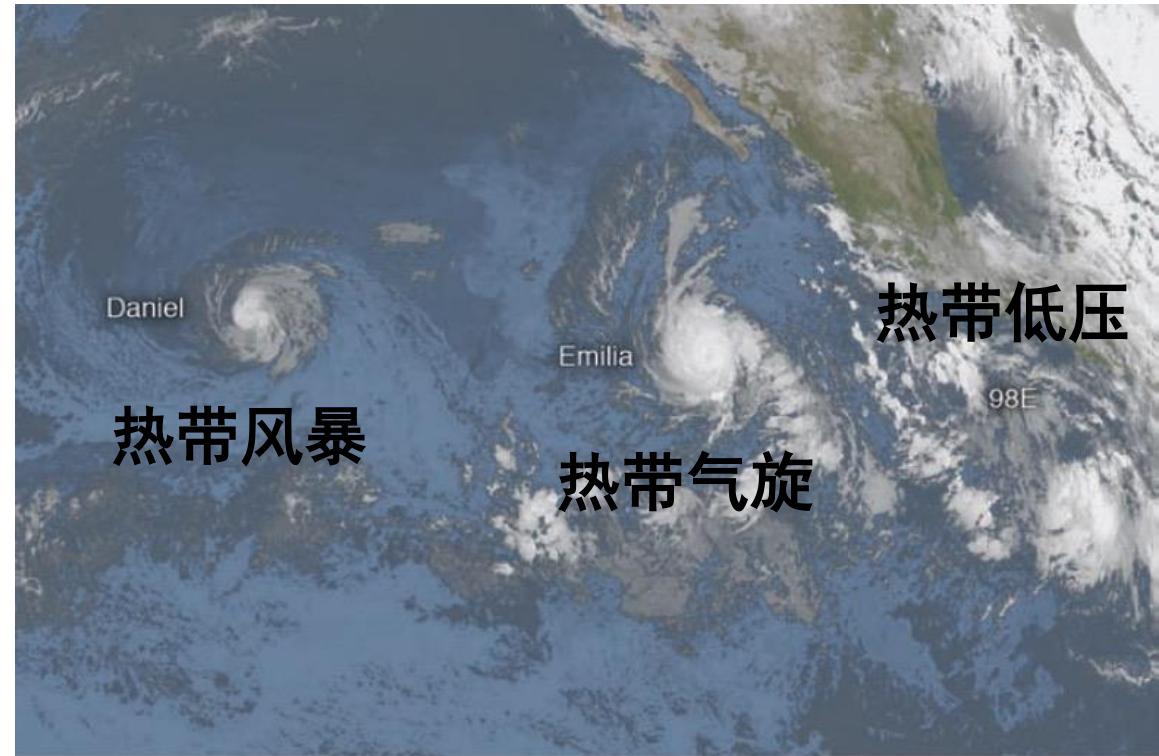


苏拉

Typhoon  
Saola

海葵

热带东太平洋



热带低压

热带风暴

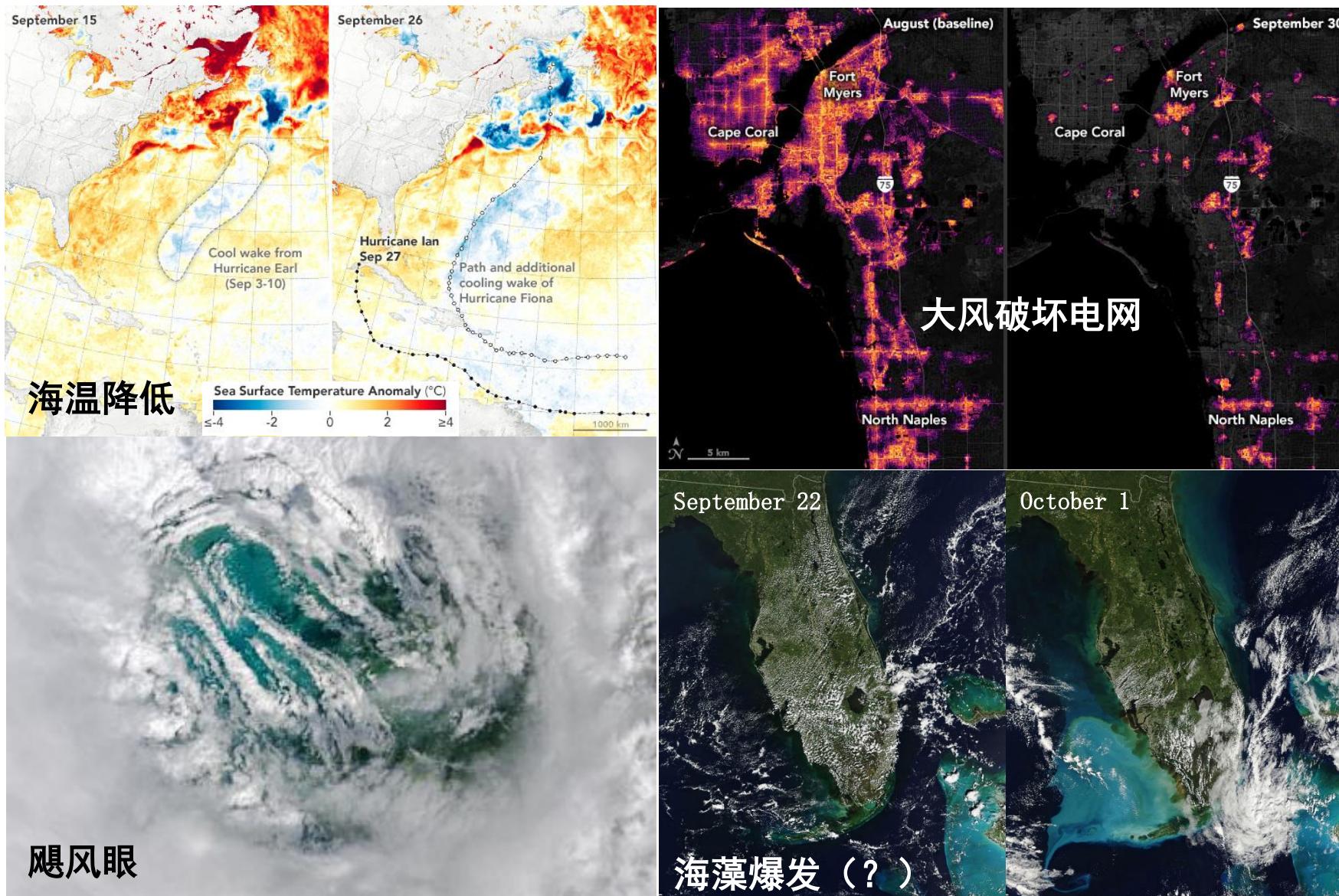
热带气旋

根据热带气旋近中心最大风速，热带气旋划分为六个等级：热带低压10.8-17.1米/秒（6-7级），热带风暴17.2-24.4米/秒（8-9级），强热带风暴24.5-32.6米/秒（10-11级），台风32.7-41.4米/秒（12-13级），强台风41.5-50.9米/秒（14-15级），超强台风 $\geq 51.0$ 米/秒（16级及以上）。

夏风的余韵-台风苏拉与海葵

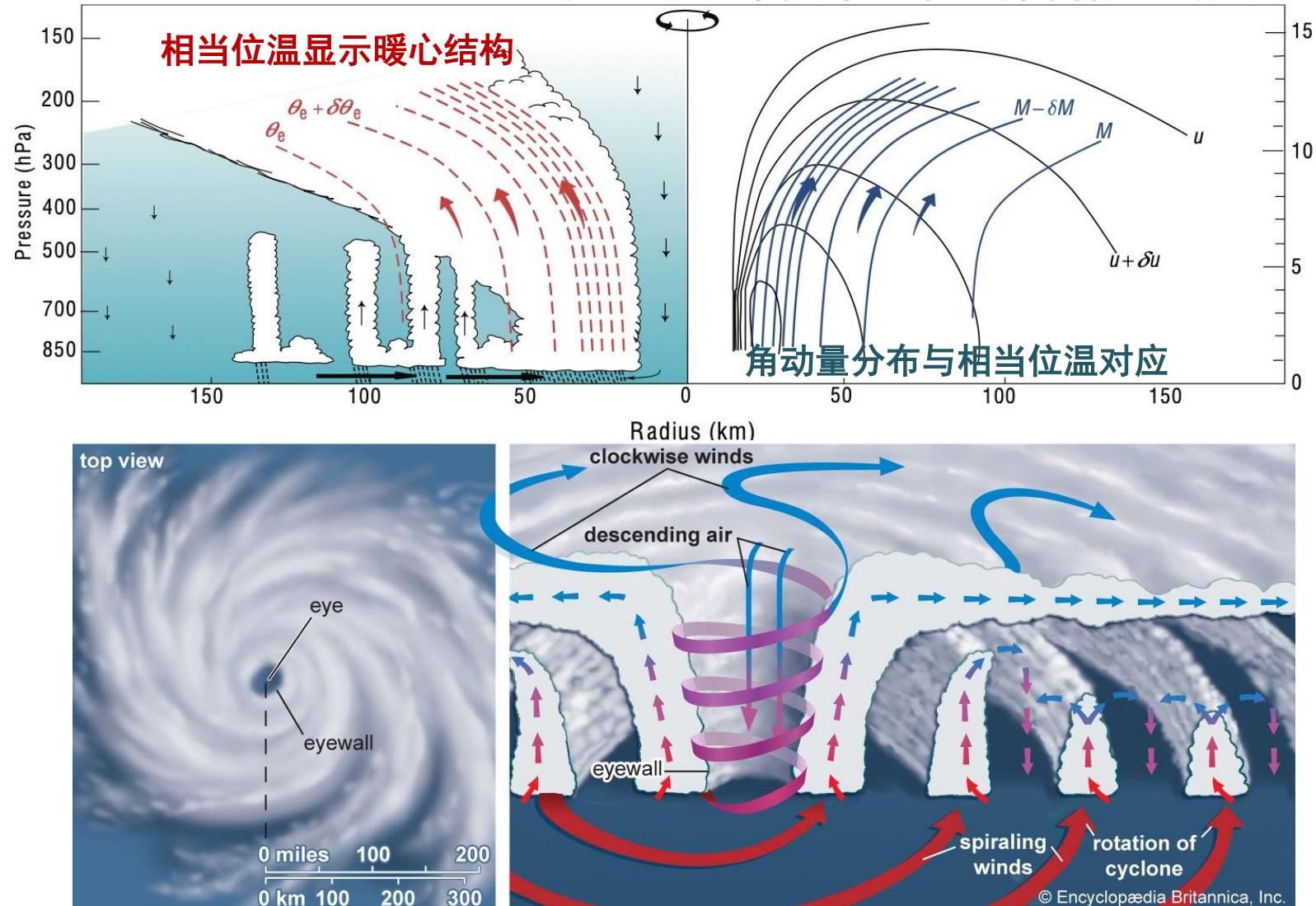
[https://www.bilibili.com/video/BV1EH4y1Q7gn/?spm\\_id\\_from=333.788&vd\\_source=6eaf73540ce40cc6cc52ac94fc4e2088](https://www.bilibili.com/video/BV1EH4y1Q7gn/?spm_id_from=333.788&vd_source=6eaf73540ce40cc6cc52ac94fc4e2088)

# 2022年飓风Ian过后



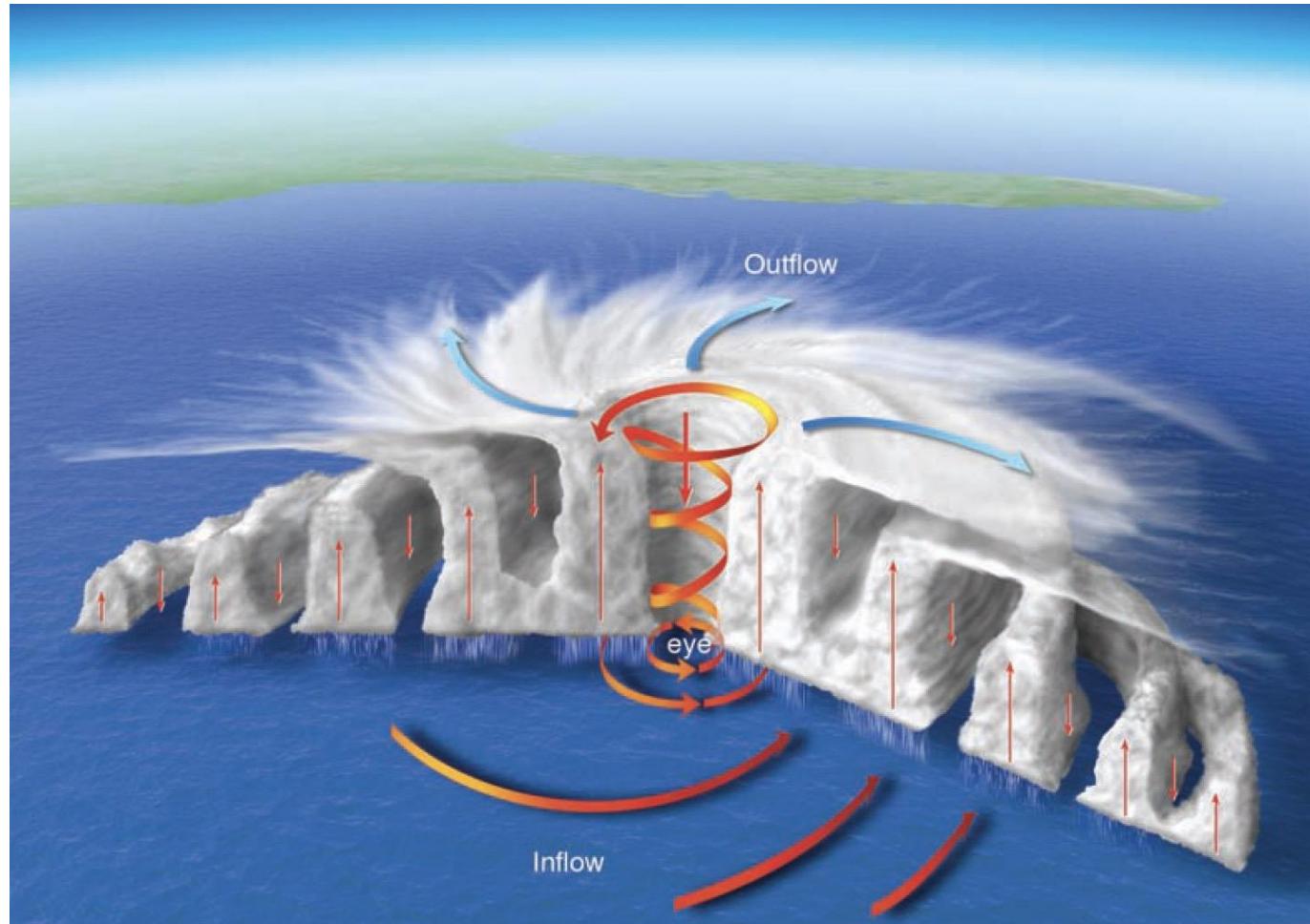
# 热带气旋的热力学和动力学结构

Q: 切向速度为什么随高度增加而减小?



- 热带气旋的平均直径大约为500 km。
- 发展成熟的热带气旋一般有一个组织完好的空间结构：眼区、眼壁和外围带状云系。
- 在深厚云区的中间，往往存在一个直径为几十公里，近似圆形的晴空少云区，称为眼区（eye）。
- 眼区外围的一圈环状的云区称为云墙或眼壁（eyewall）。最猛烈的天气现象（风和暴雨）发生在靠近飓风眼的眼壁内侧。
- 眼区中心的气压最低（1979年Tip台风中心气压达870 hPa； $V \approx 100 \text{ m/s}$ ），为下沉气流控制。而眼壁附近，为上升气流控制。

# 热带气旋的生成

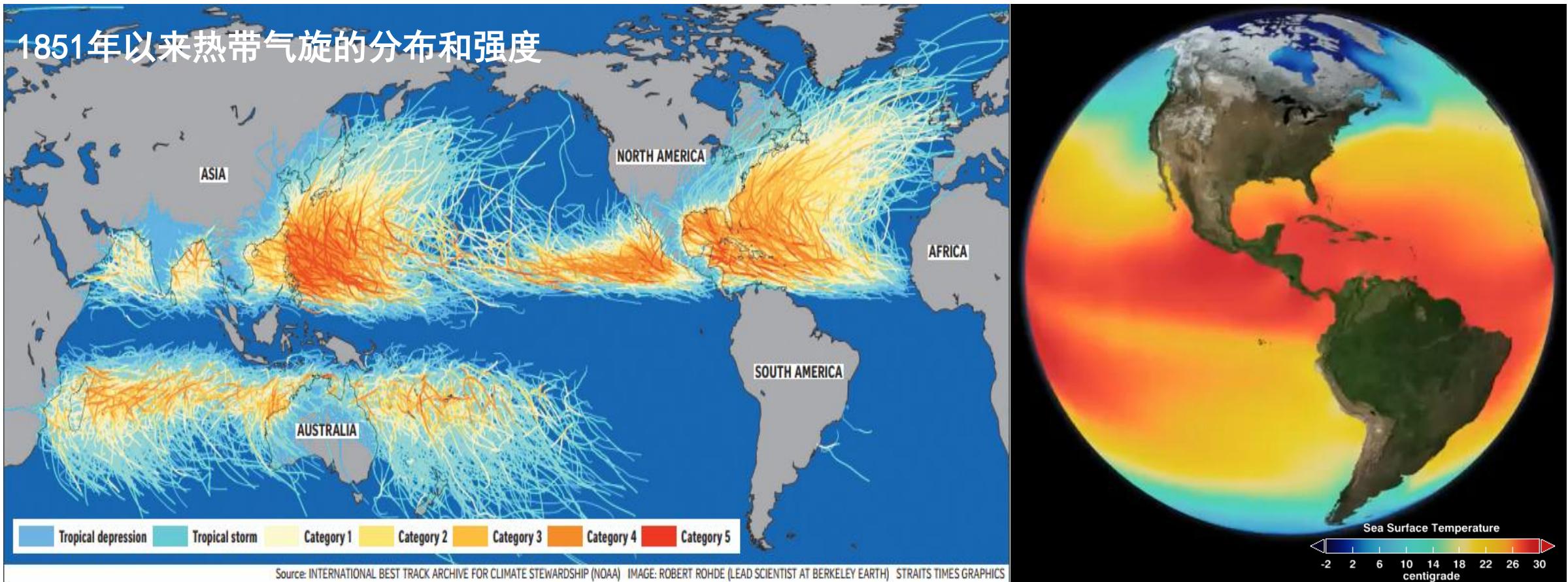


一个大气扰动形成和最终发展成为飓风至少依赖于三个条件：

- 1) 第一个条件是温暖的水域，水面温度大于 $26.5^{\circ}\text{C}$
- 2) 第二个条件是潮湿的大气，水汽的潜热释放是台风的能量来源
- 3) 第三个条件就是在海洋洋面上的风要能够变成向内旋转流动

Q：热带气旋可以在赤道生成吗？

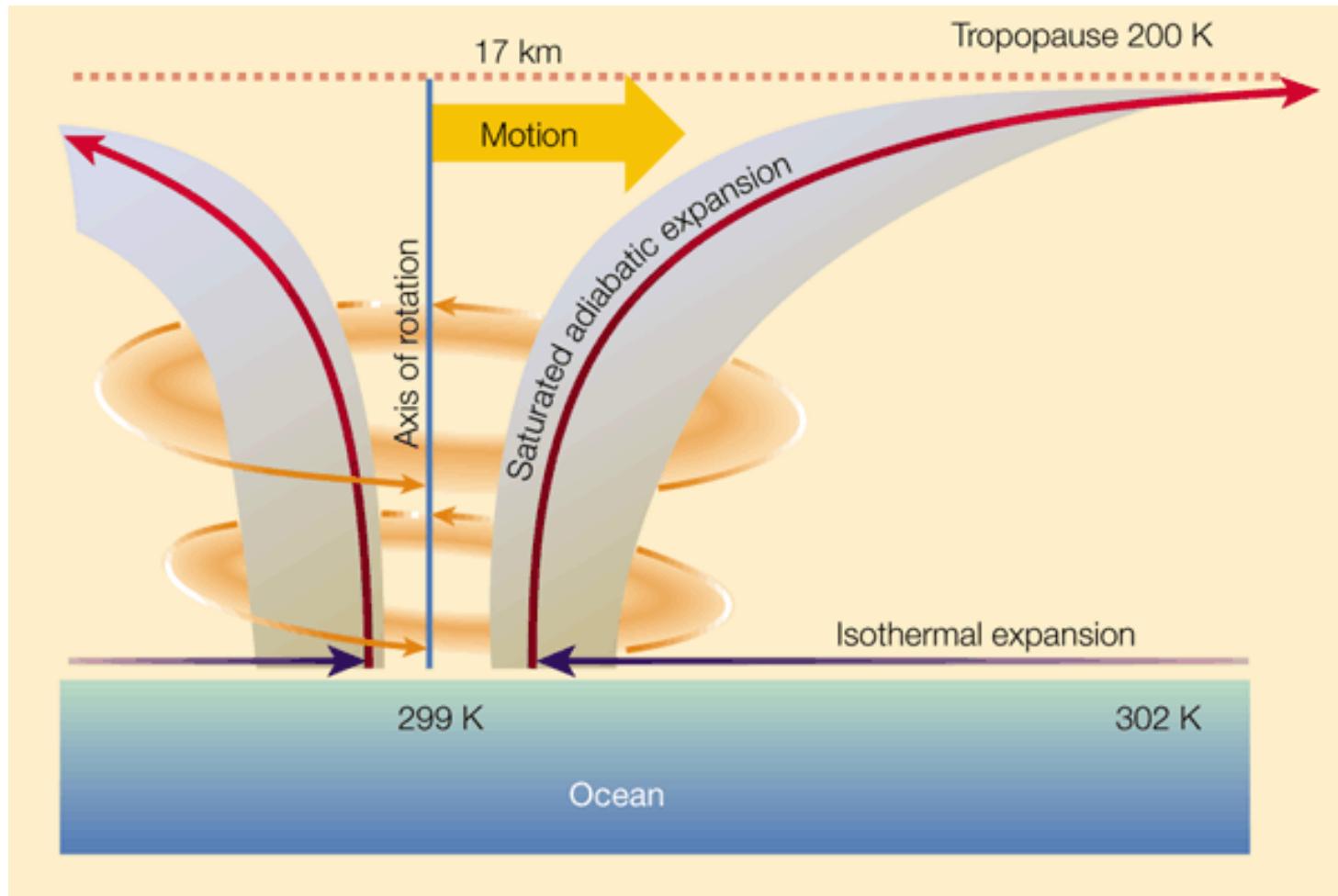
# 温暖洋面有利于热带气旋生成



全球变暖下热带气旋的总次数和高强度次数有所增加 (Webster et al. 2005 Science)

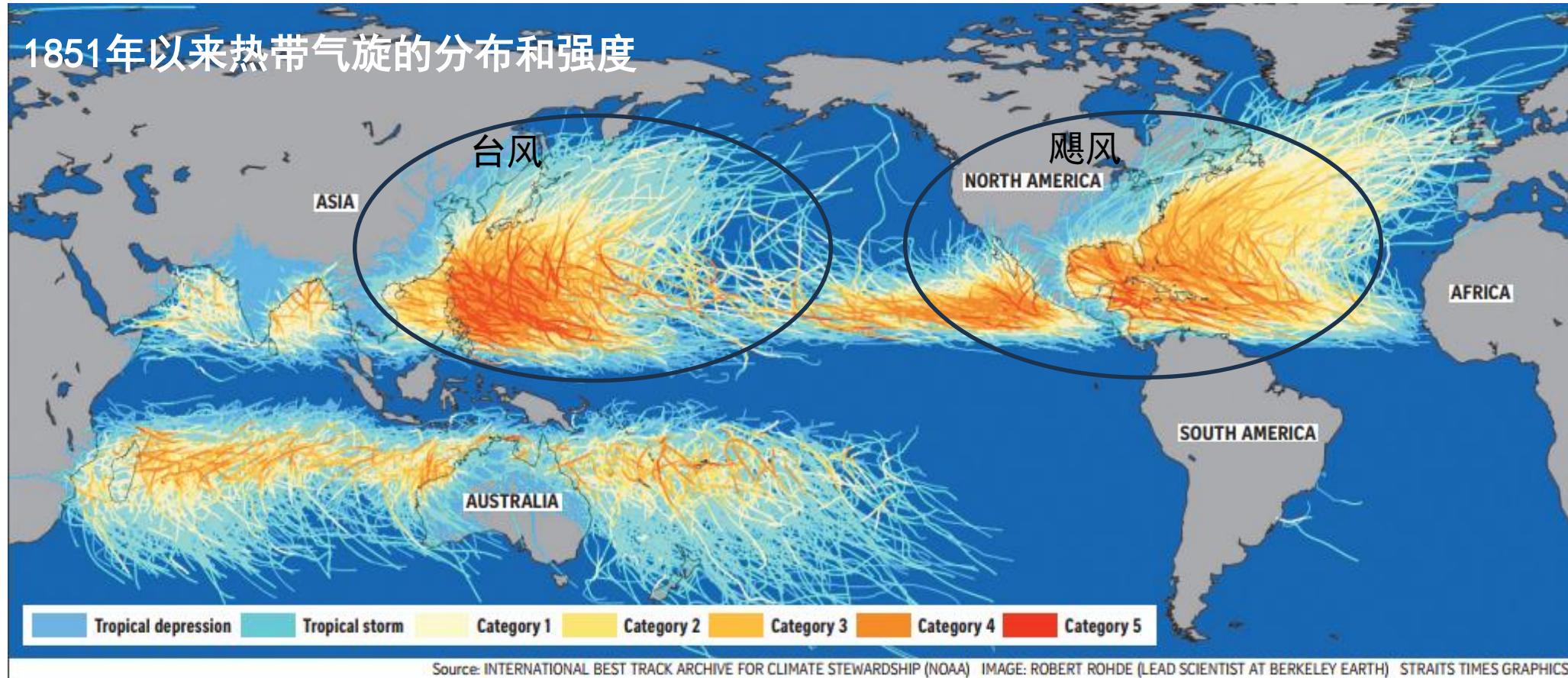
Complete 2021 Hurricane Season <https://svs.gsfc.nasa.gov/4982/>

# 热带气旋发展中的正反馈和热机理论



- 潜热释放是台风发展的能量来源。当初始的扰动导致暖湿空气上升，水汽凝结释放潜热，加热空气，上升运动更强，造成更多的水汽从下层输送到上层并释放更多的潜热，形成正反馈。
- 从热力学中的热机理论，我们知道热机的效率与温度差成正比  $[W \propto (T_1 - T_2), T_1 > T_2]$ 。Emanuel (1999, Nature) 等提出台风的最大强度与海面气温和对流层顶气温的温差成正比。这一理论的正确与否还需要进一步检验，但它形象地利用热机理论的概念来描述台风中的能量转换以及能量的源和汇。

# 热带气旋的移动路径



一般来说，台风生成后受热带东风引导气流的驱动向西或西北运动。当台风移动到较高纬度时，它又被中高纬度的西风驱动而移向东北。

# 台风的典型移动路径



西北太平洋的典型台风路径有三种：

**西行路径：**热带气旋从源地（指菲律宾以东洋面）一直向偏西方向移动，往往在广东、海南一带登陆。

**西北路径：**热带气旋从源地一直向西北方向移动，大多在台湾、福建、浙江一带沿海登陆。

**转向路径：**热带气旋从源地向西北方向移动，当靠近我国东部近海时，转向东北方向移动。

一般来说，台风的移动路径可根据副高边沿的500 hPa气流导向来预测。但并不绝对。

# 台风的非典型移动路径

南方都市报集团 N视频 N视频

台风“卡努”自7月28日生成至今已有十余天，其路线多次调整，如今又90°急转，或奔向我国东北，带来明显降雨。台风急转弯都是因为啥？能量会因此消耗吗？哪些台风路线堪称奇葩？

## 台风奇葩走位图鉴

• 1986年台风“韦恩”：错综复杂  
• 1991年台风“耐特”：飘忽不定  
• 2001年台风“百合”：犹疑不决

知多D

一、台风为何会急转弯？

- 1.此路不通：  
原本主导其前进方向的引导气流偏弱，而前进方向上又有强大的系统阻拦，比如副热带高压。例：“杜苏芮”、“卡努”。.....
- 2.拉拉扯扯：  
当两个或多个相距较近的台风“拉拉扯扯”发生相互作用时，可能改变原本路径。例：“烟花”和“查帕卡”。

二、台风急转弯会消耗能量吗？

台风的能量变化是诸多因素共同作用的结果。当自身热力条件满足时，如果转向后恰恰进入较温暖海域或从陆地重回海洋，都可能增强其能量。如果长时间原地打转，或出现海表下层冷水上翻等现象，台风能量就会削弱。

出品：南方都市报、N视频 资料来源：中国气象报社、中国气象台·台风网

西北太平洋的非典型台风路径有几种典型类型：南海台风突然北上、蛇形摆动路径、双台风互旋等。

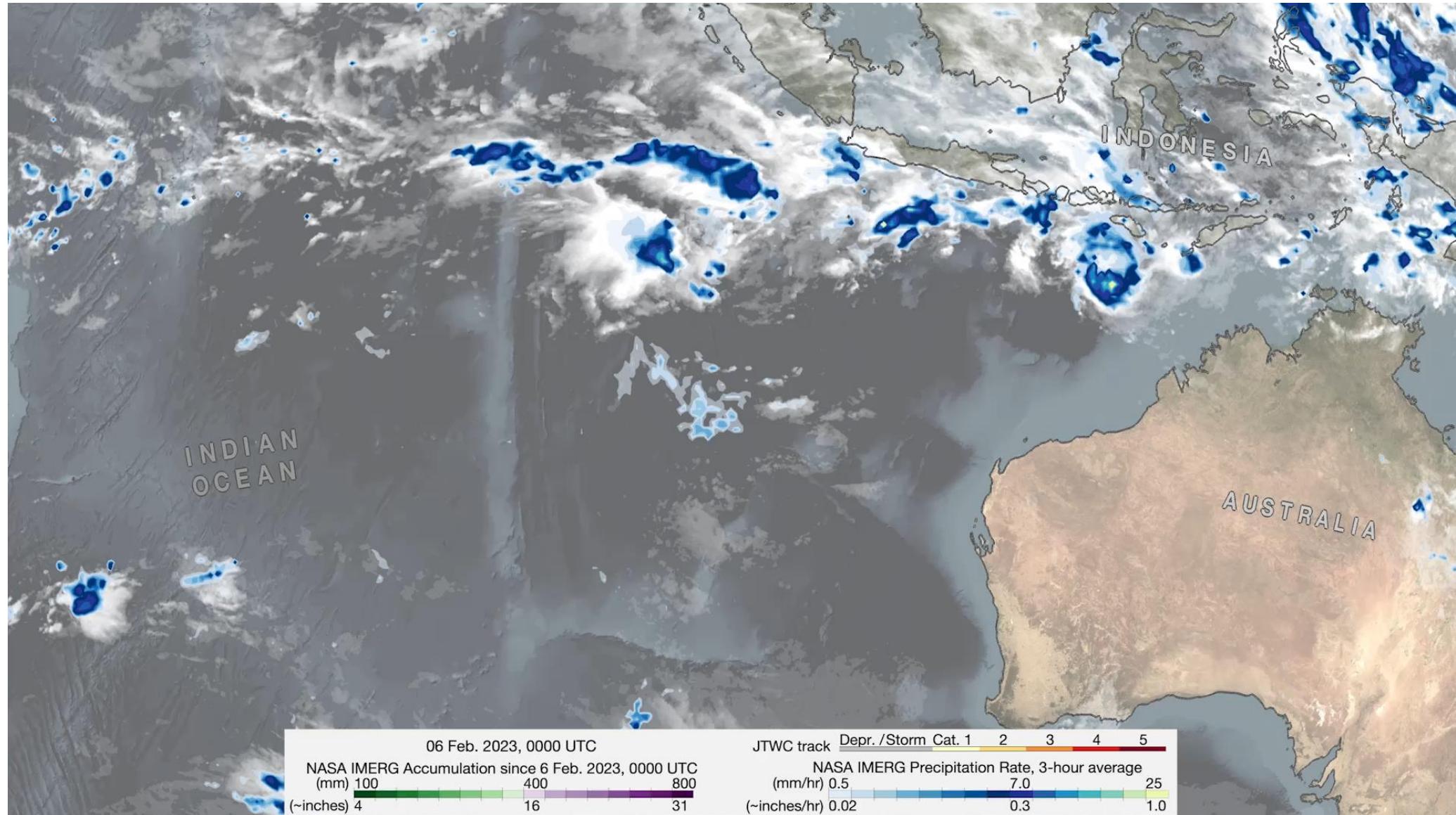


预报台风路径太难了！

中国台风，迷之走位！

[https://www.bilibili.com/video/BV1Z34y1u7Zm/?spm\\_id\\_from=444.41.list.card\\_archieve.click&vd\\_source=6eaf73540ce40cc6cc52ac94fc4e2088](https://www.bilibili.com/video/BV1Z34y1u7Zm/?spm_id_from=444.41.list.card_archieve.click&vd_source=6eaf73540ce40cc6cc52ac94fc4e2088)

# 其他海域的热带气旋路径也难以预测



# 温带气旋与热带气旋比较

▼ TABLE 1 Comparison of Hurricanes with Midlatitude Cyclonic Storms

CONDITIONS	TYPE OF STORM	
	Hurricane	Mid-Latitude Cyclone
Wind flow	Counterclockwise (NH) Clockwise (SH)	Counterclockwise (NH) Clockwise (SH)
Strongest winds	Near surface; around eye	Aloft, in jet stream
Surface pressure	Lowest at center	Lowest at center
Vertical structure	Weaken with height; high pressure aloft; warm-core low	Strengthens with height, low pressure aloft; cold-core low
Air in center	Sinking	Rising
Weather fronts	No	Yes
Energy source	Warm water; release of latent heat	Horizontal temperature contrasts

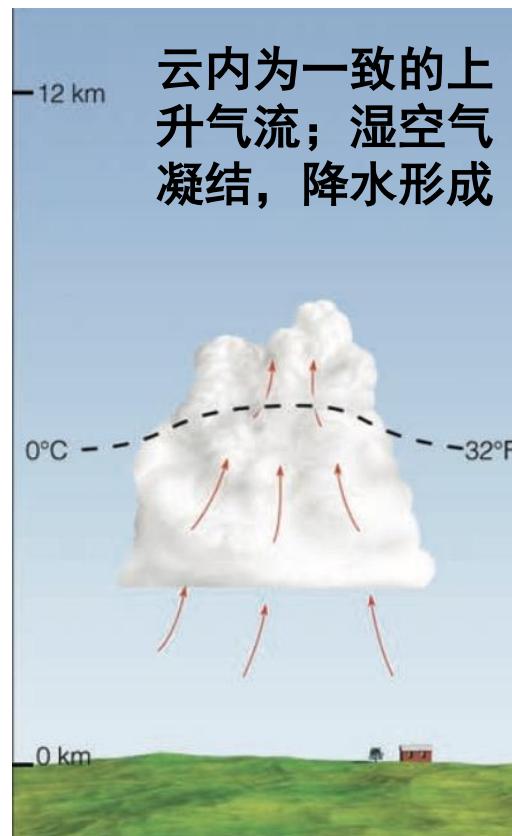
# 强对流

- 强对流天气：强降雨、冰雹、龙卷、飑线（线状或带状对流系统）、雷暴、闪电、下击暴流、雷雨大风等。
- 强对流天气特点：发展速度快，局地性强，破坏性大，分布广，发生频繁。

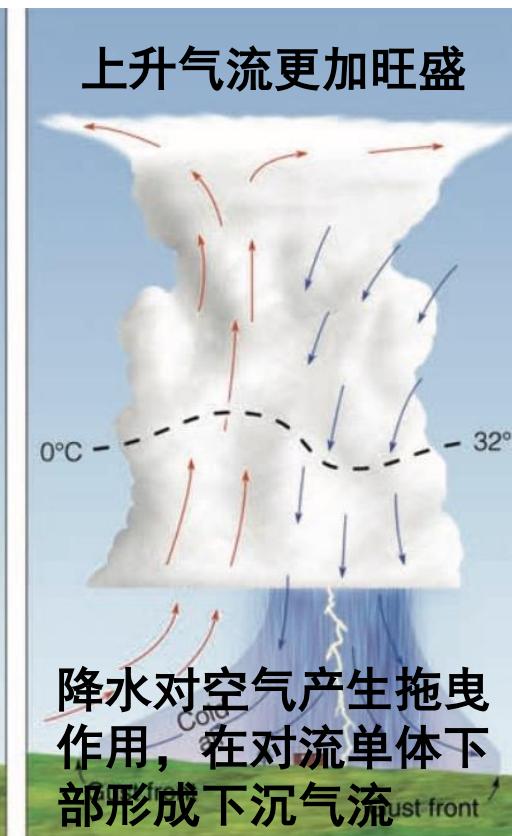


# 对流单体 Convection Cell

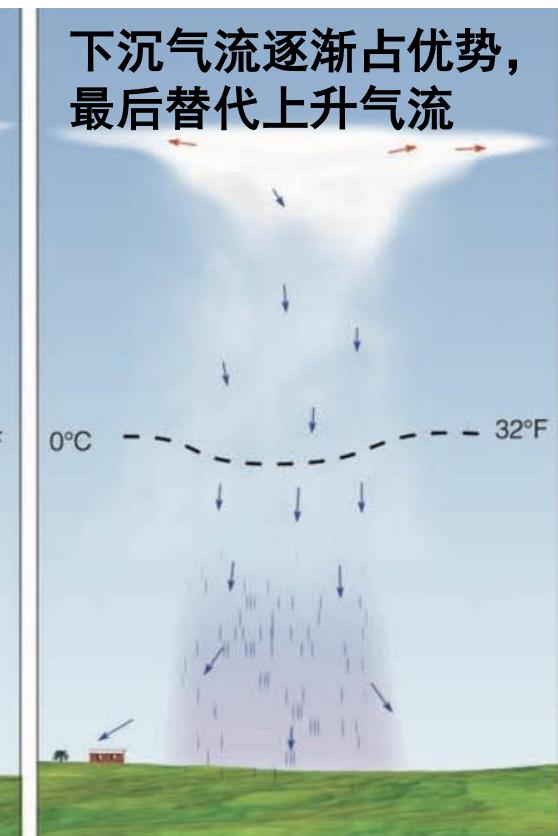
- 对流单体是指形成雷雨的单个对流活动。
- 通常把一个上升运动区（垂直速度约10 m/s，水平范围从十至数十千米，垂直伸展几乎达到整个对流层）称为一个对流单体。



积云阶段



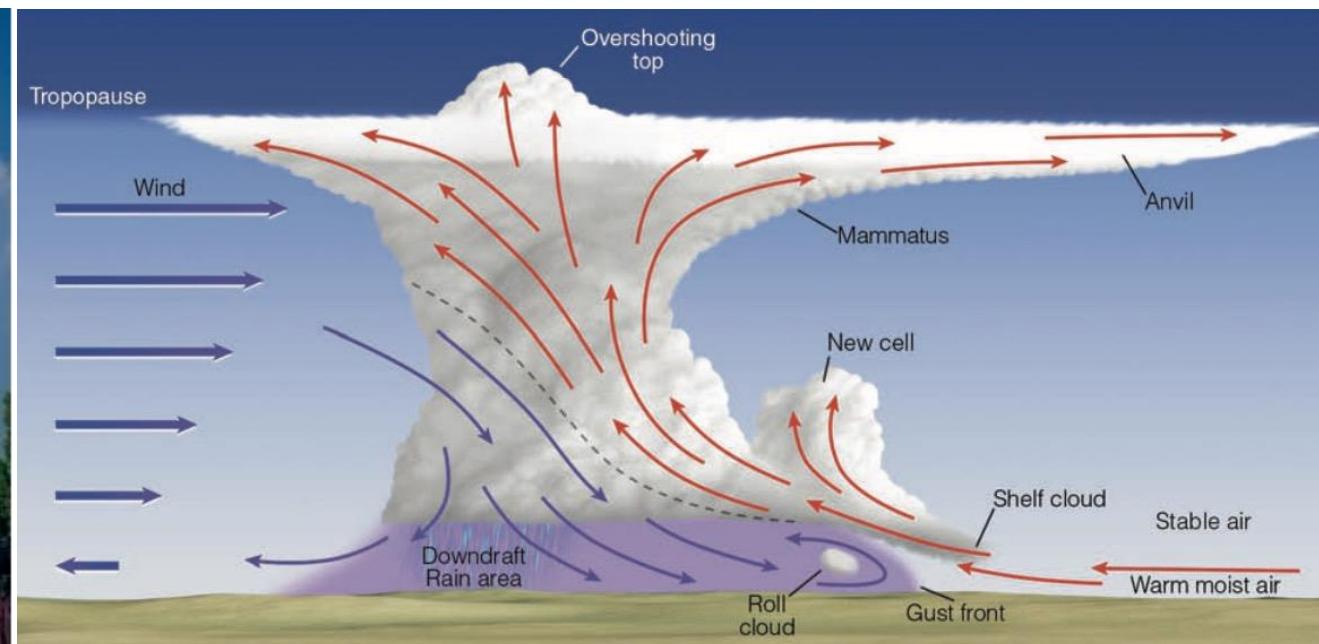
成熟阶段



消散阶段

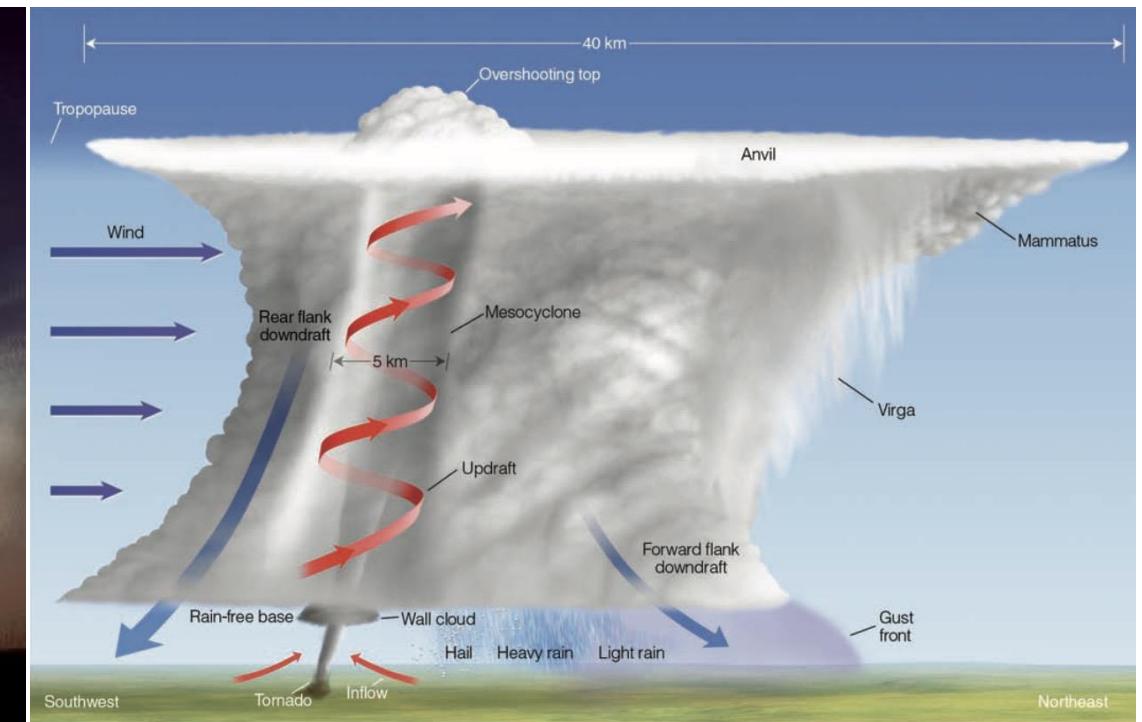
# 多单体 Multi-cell Cluster

- 由一些处于不同发展阶段的生命期短暂的对流单体组成，是具有统一环流的系统。水平尺度30-50 km，垂直方向上可进入平流层，持续数小时。
- 在多单体风暴中每个对流单体都可能有冷的下沉和水平外流，这些外流结合起来形成大的阵风锋，沿阵风锋前沿有气流辐合，通常在风暴移动方向上辐合最强，这种辐合促使沿阵风锋附近新的上升气流发展。
- 一般单体每隔5-10分钟形成，并存在30-45分钟。这样，风暴是向前传播的，而不是连续地向前移动。



# 超级单体 Super Cell

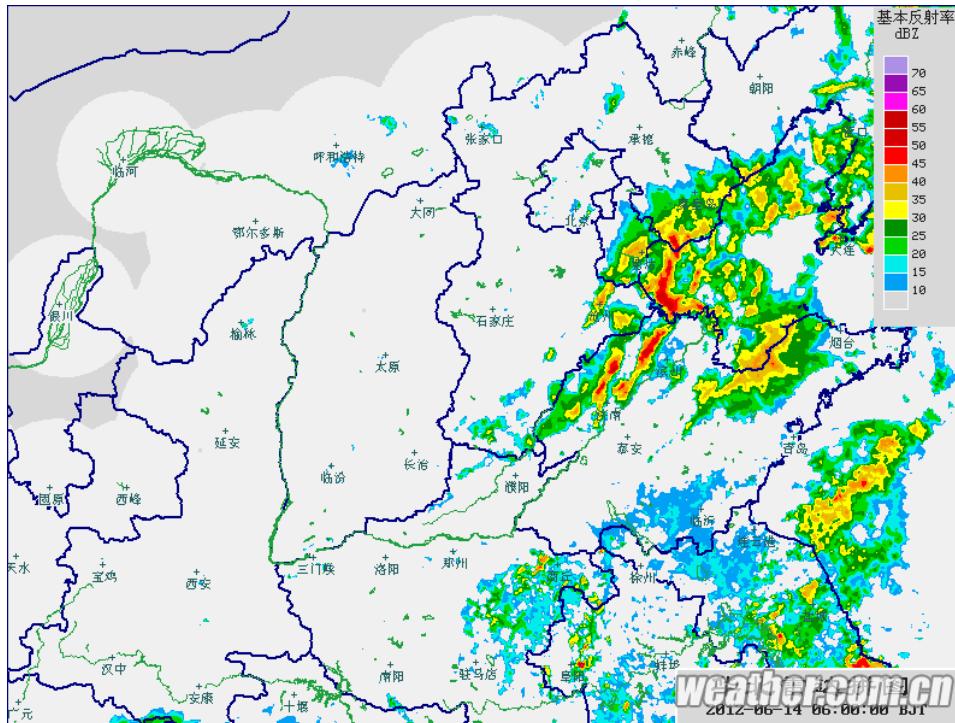
- 直径在20-40km、生命期在数小时以上，比普通单体雷暴更巨大、更持久、天气更猛烈的单体强雷暴系统。
- 是一个近稳态、高度组织化的环流系统，通常有一个中尺度涡旋（Mesocyclone）。
- 超级单体经常包含在更大尺度的冷锋、飑线和台风中。



# 中尺度对流系统 Mesoscale Convective Systems

飑线

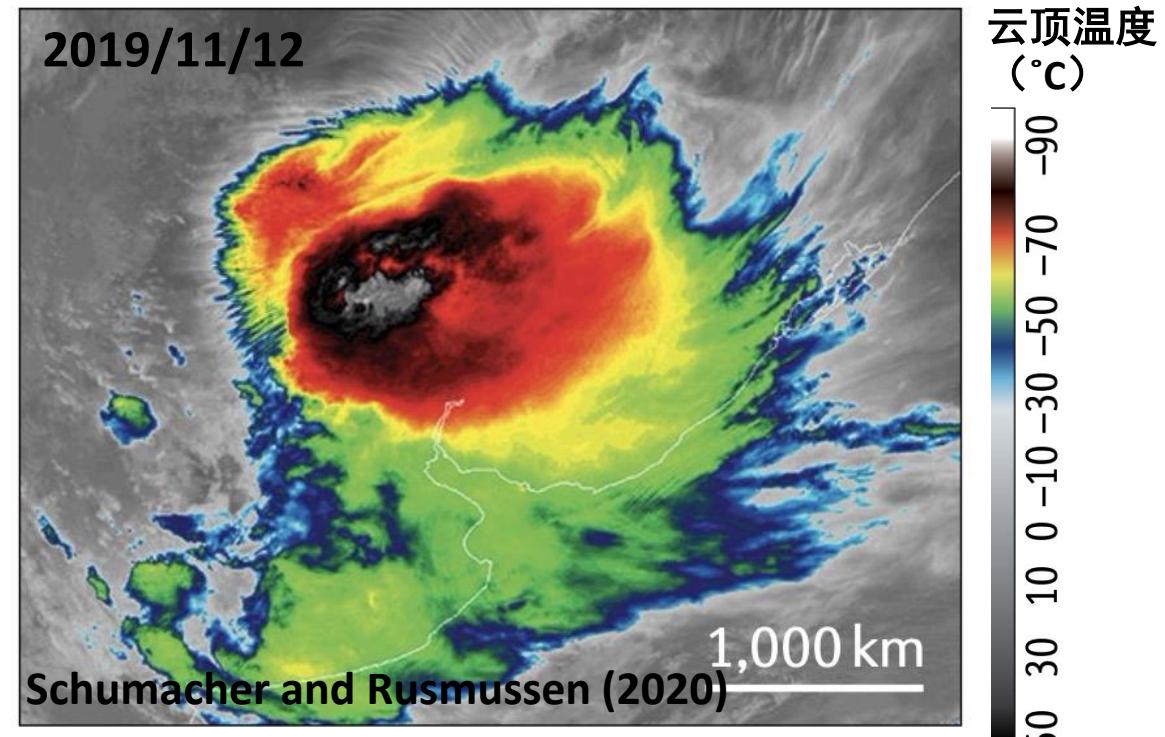
Squall Line



许多雷暴单体侧向排列而形成的强对流云带。水平长度约为几十到几百公里，宽度为几十到两百公里，属于典型的线状中尺度对流系统，经常和冷锋联系在一起。

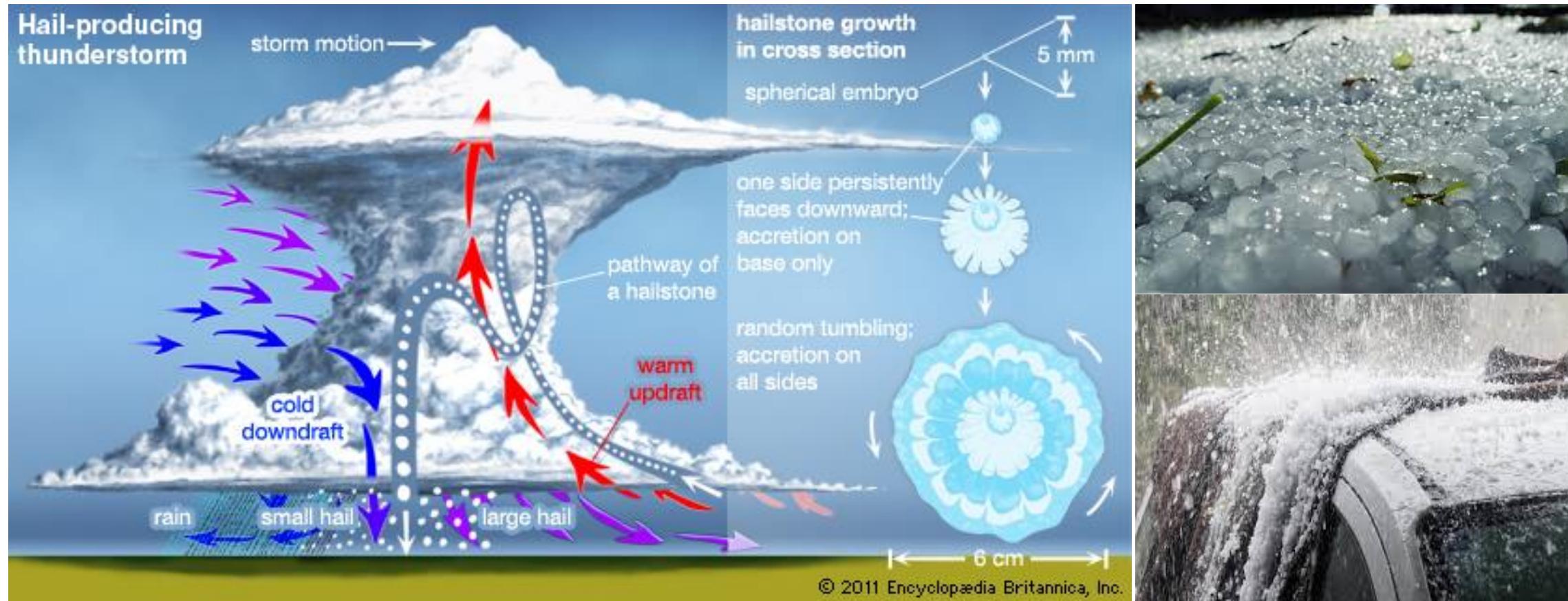
中尺度对流复合体

Mesoscale Convective Complex



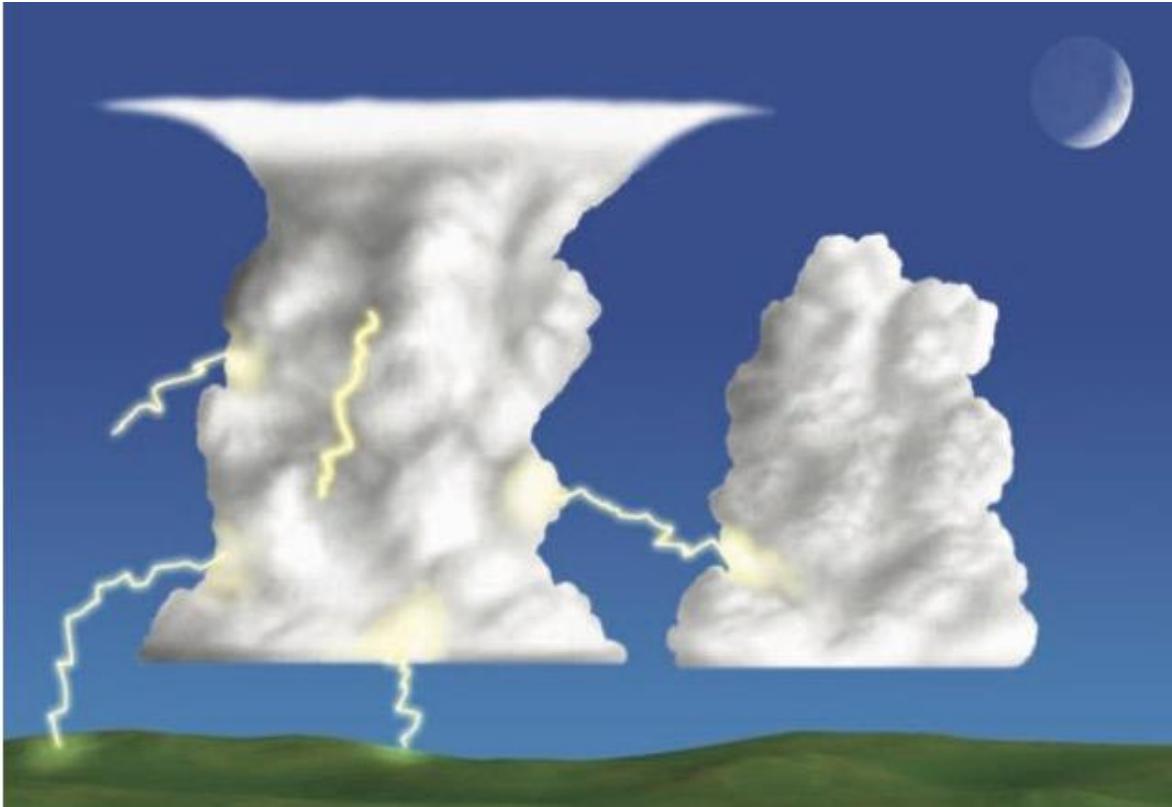
MCC是一种生命期长达6小时以上，水平面积比雷暴和飑线大得多的近于圆形的巨大云团。它顶部的红外温度很低，表示它的云塔很高，经常可以达到十几公里以上。

# 强对流和冰雹



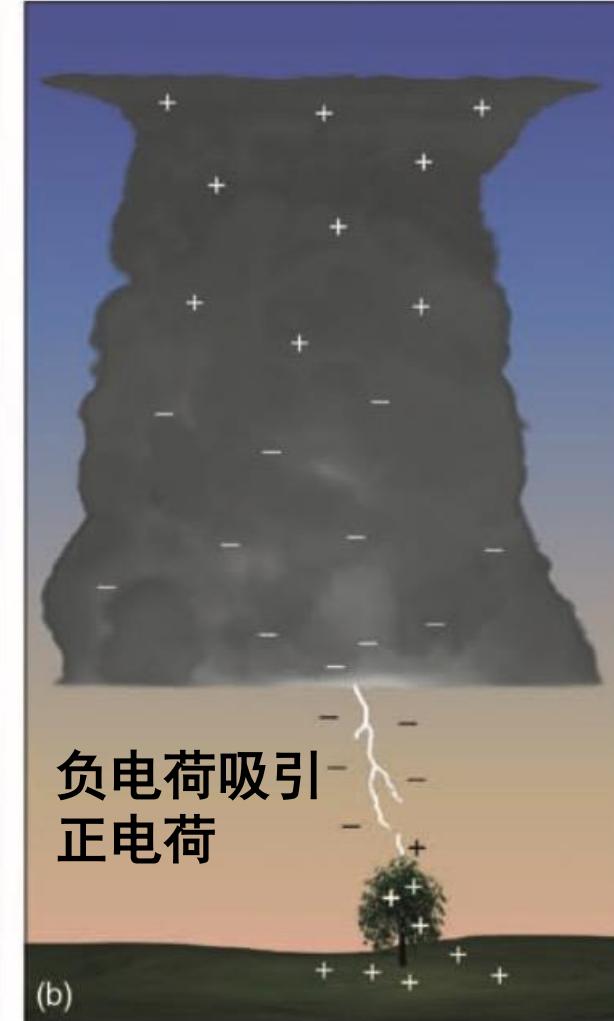
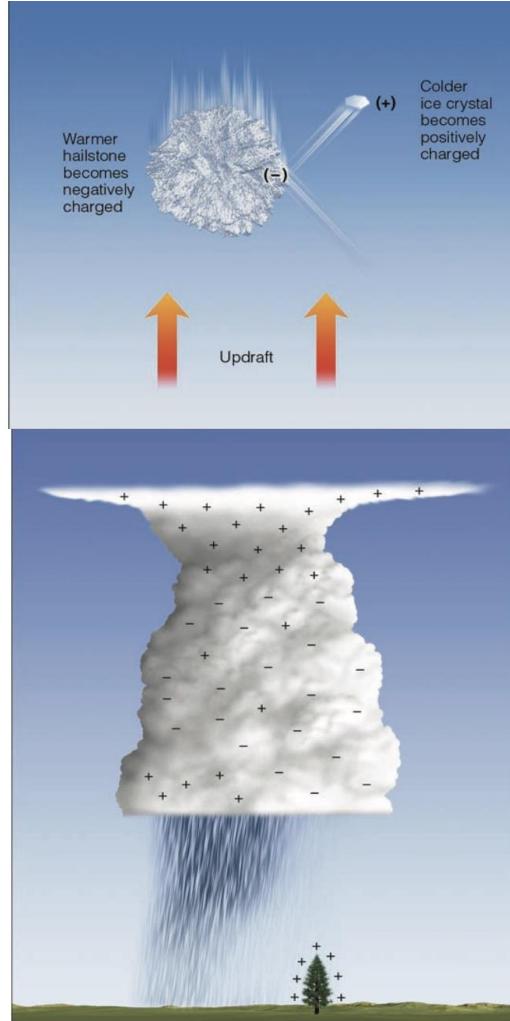
- 冰雹都产生在发展旺盛的积雨云中，通过碰并增长形成。
- 积雨云高层的冰晶提供冰雹胚胎，称为雹胚。与过冷水碰并。
- 积雨云中**强的上升气流使得冰晶在云中停留的时间较长，最终结为冰雹。**

# 强对流和闪电/雷暴



- 闪电是发生在云的内部、云之间、云与地之间的放电现象。
- 一般云-地之间的闪电（地闪）对我们造成比较大的危害。
- 闪电是NOx的重要来源，但我们不清楚其排放量、分布和变化。

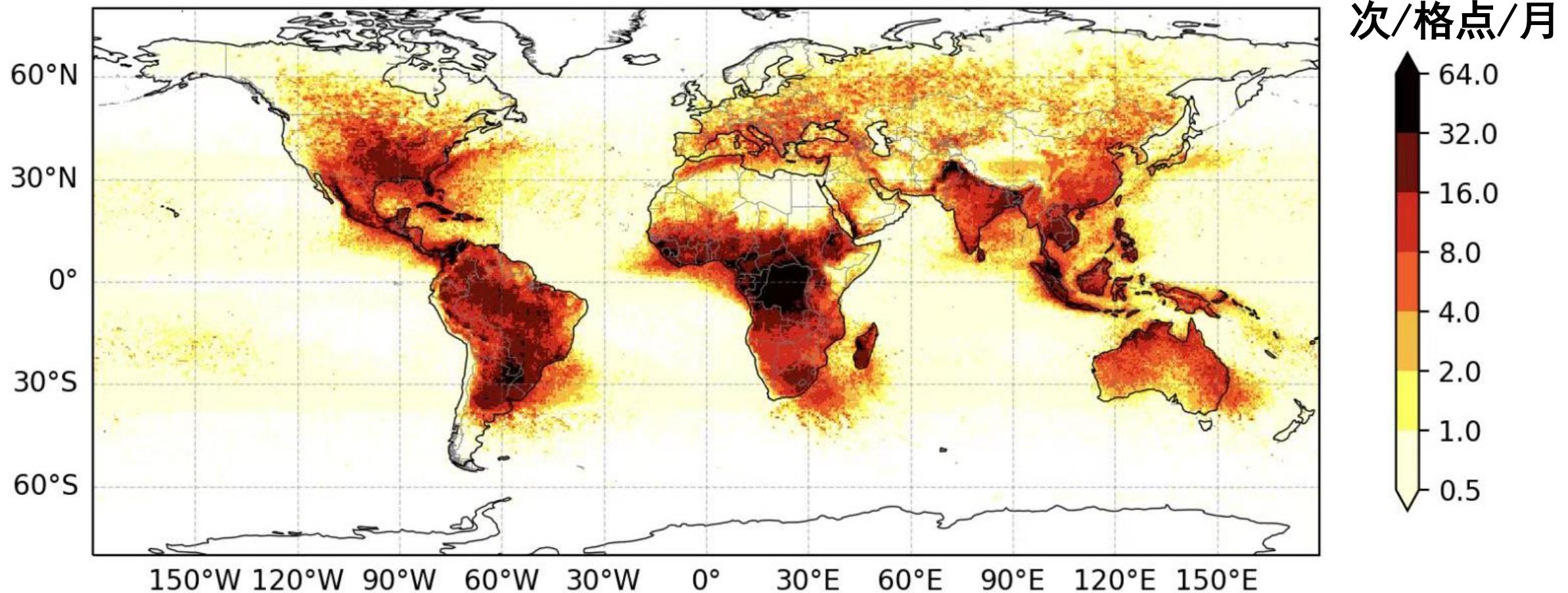
# 强对流和雷暴



当局部电压达到当时条件下空气的击穿电压时，该空气介质的局部便会电击穿而持续成为等离子体，使电流能够通过原本绝缘的空气。

# 闪电/雷暴多发于对流旺盛的地区

闪电的全球分布



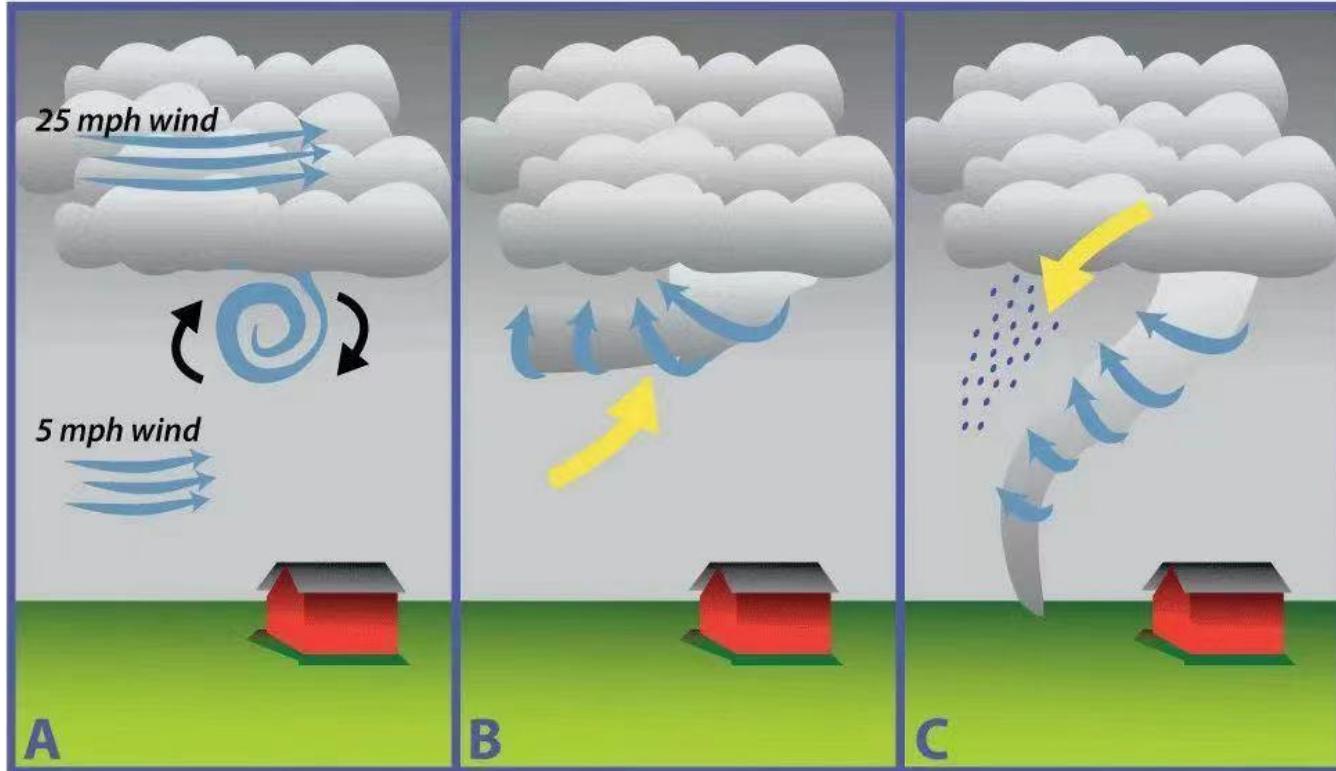
感谢苏洪萱同学整理数据

# 龙卷 Tornado

- 龙卷是自积雨云底部伸出来的漏斗状的涡旋云柱。一般产生于超级单体。
- 龙卷伸展到地面时引起的强烈旋风，称为龙卷风。
- 龙卷是强旋转、长而细的气柱，其平均直径约为100米，从积状云延伸到地面。龙卷的风速最大可达100–200米/秒。其风速分布自中心向外增大，在距中心数十米的区域达到极大值，再往外，风速迅速减小。



# 龙卷的形成



1. 大气的不稳定性产生强烈的上升气流，由于急流中的最大过境气流的影响，它被进一步加强。
2. 由于与在垂直方向上速度和方向均有切变的风相互作用，上升气流在对流层的中部开始旋转，形成中尺度涡旋。
3. 随着中尺度涡旋向地面发展和向上伸展，它本身变细并增强。同时，一个小面积的辐合，即初生龙卷在气旋内部形成，形成长龙卷核心。
4. 当发展的涡旋到达地面高度时，地面气压急剧下降，地面风速急剧上升，形成长龙卷。

How do tornadoes form? - James Spann

[https://www.youtube.com/watch?v=ImWh9jV\\_1ac](https://www.youtube.com/watch?v=ImWh9jV_1ac)

# 龙卷风强度分级 Enhanced Fujita Scale



EF0 [65-85 mi/hr]



EF1 [86-110 mi/hr]



EF2 [111-135 mi/hr]



EF3 [136-165 mi/hr]

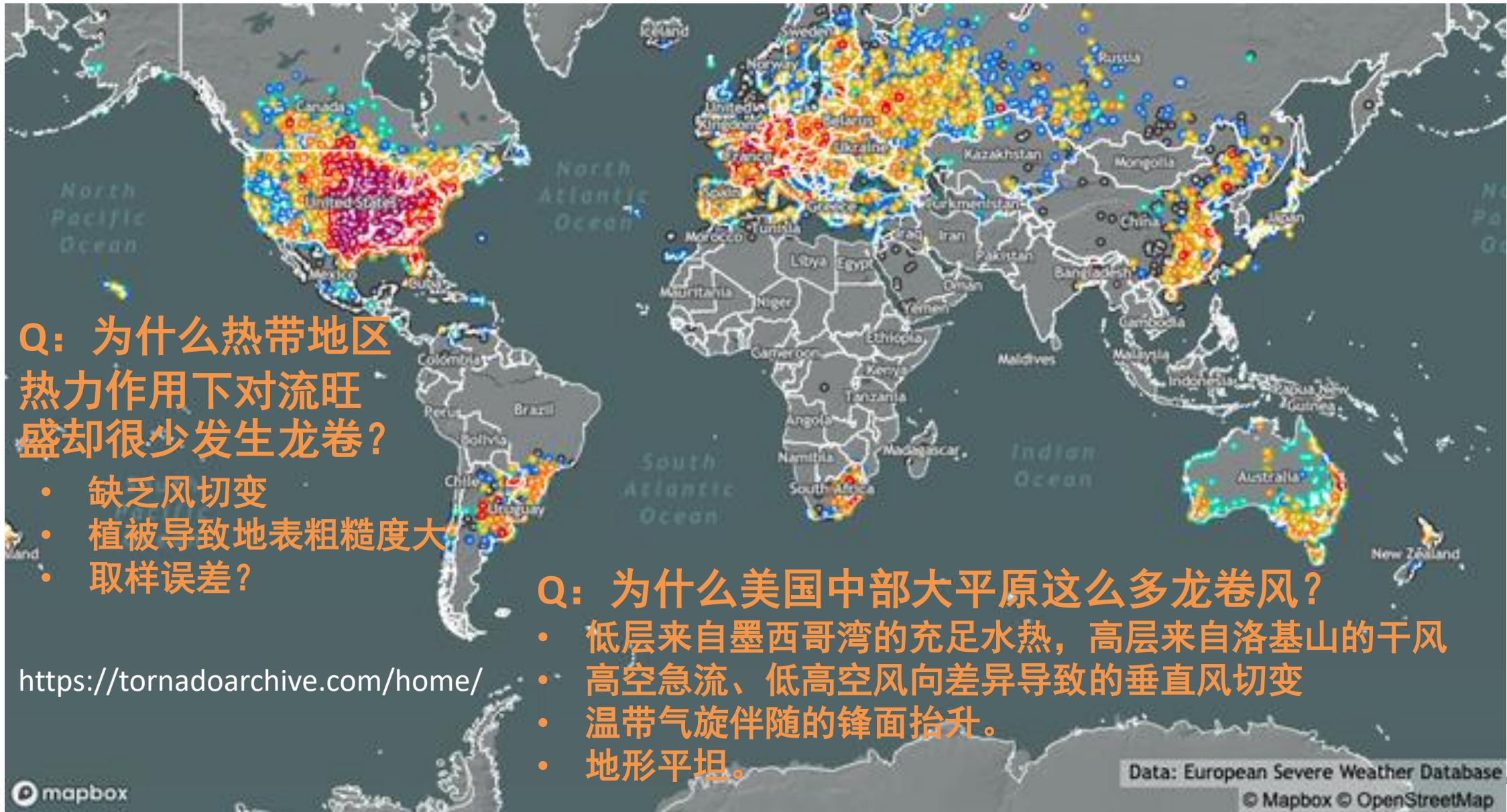


EF4 [166-200 mi/hr]

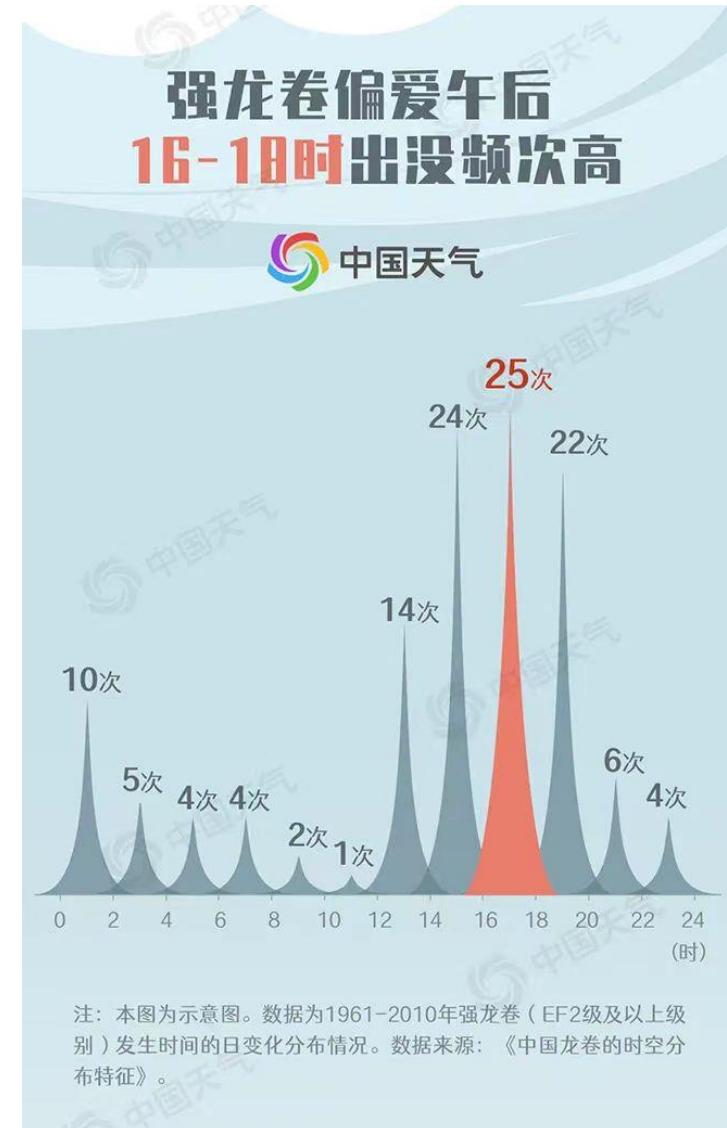
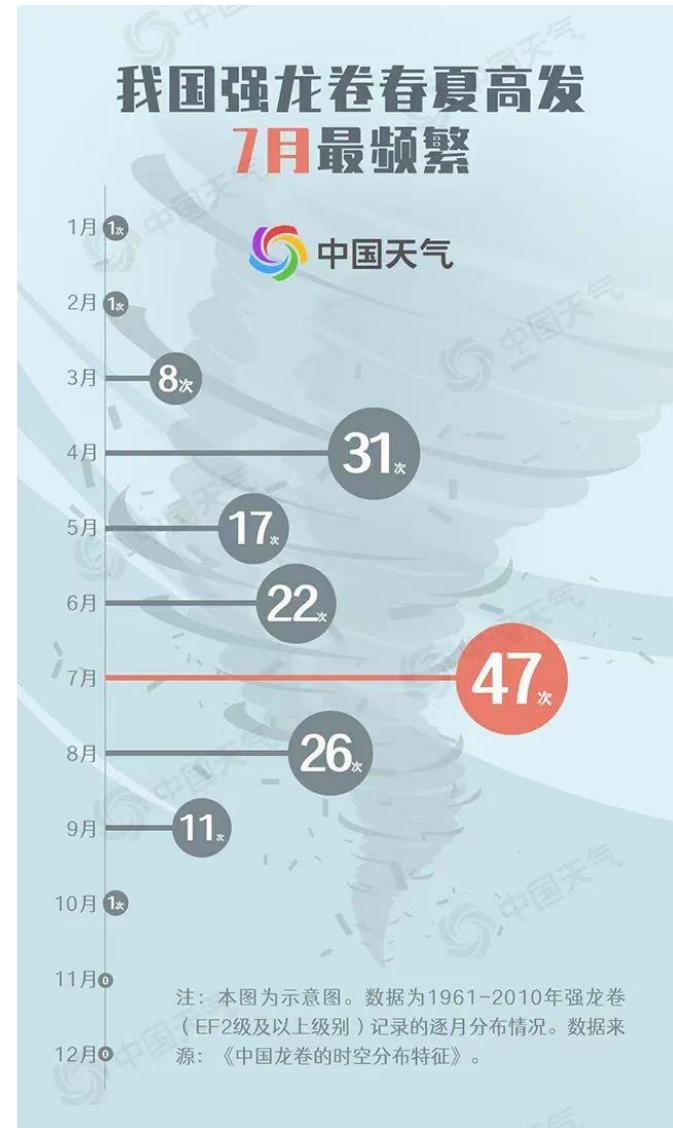


EF5 [Over 200 mi/hr]

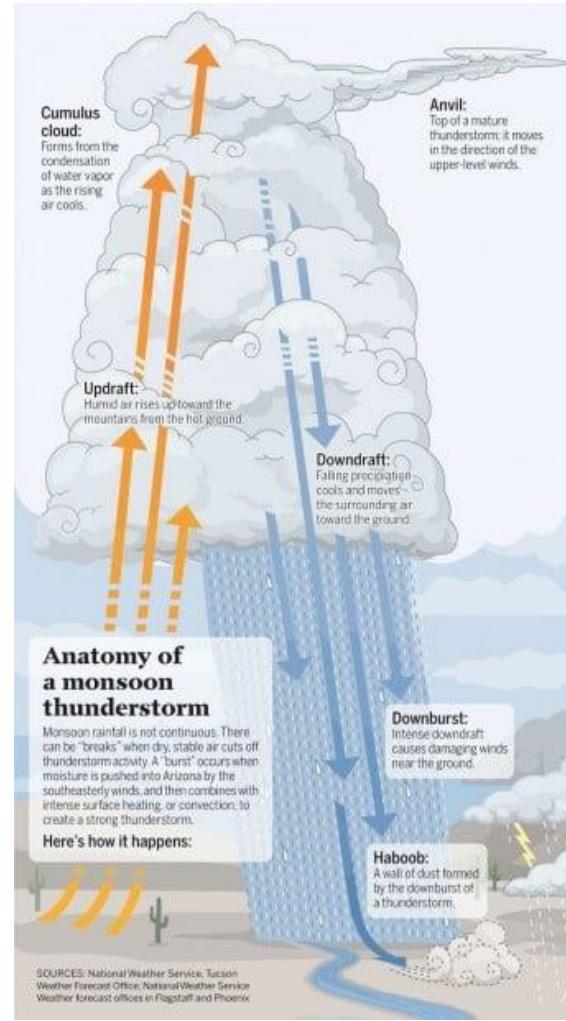
# 世界各地的龙卷风



# 我国的龙卷风



# 下击暴流引发沙尘暴



# 追风者们：“热爱可以跨越山海”



视频来源：刘屹靖

【世界气象日】一群追风者的故事  
[https://www.bilibili.com/video/BV1Ka411b7XJ/?spm\\_id\\_from=333.788.recommend\\_more\\_video.3&vd\\_source=6eaf73540ce40cc6cc52ac94fc4e2088](https://www.bilibili.com/video/BV1Ka411b7XJ/?spm_id_from=333.788.recommend_more_video.3&vd_source=6eaf73540ce40cc6cc52ac94fc4e2088)

跨越27000公里，追逐中国超级风暴【世界气象日·特别呈现】  
[https://www.bilibili.com/video/BV1QU4y1d7qd/?spm\\_id\\_from=333.999.0.0&vd\\_source=6eaf73540ce40cc6cc52ac94fc4e2088](https://www.bilibili.com/video/BV1QU4y1d7qd/?spm_id_from=333.999.0.0&vd_source=6eaf73540ce40cc6cc52ac94fc4e2088)

“Haboob: A Decade of Dust” by Mike Olbinski  
<https://www.youtube.com/watch?v=JkDBmsGIG7U&list=PLGVnr1LzOcyXPBwUcns7MMe1CN5EIT3wZ&index=6>

# 本章作业 ddl = 2024年5月20日 13:00

1. 为什么沙尘天气往往出现在春季？这与温带气旋有没有关系？
2. 闪电通常发生于什么气象条件下？影响闪电发生频率的气象因素有哪些？
3. 在一个超级单体云底，我们观测到一个半径为2 km的旋转上升气流，旋转周期约为15分钟。空气密度约为 $1 \text{ kg m}^{-3}$ 。在旋转上升气流的内部，假设空气近似刚体旋转（角速度不随半径变化），请估算支撑这个旋转气流的气压差（从旋转气流边界到旋转中心）。