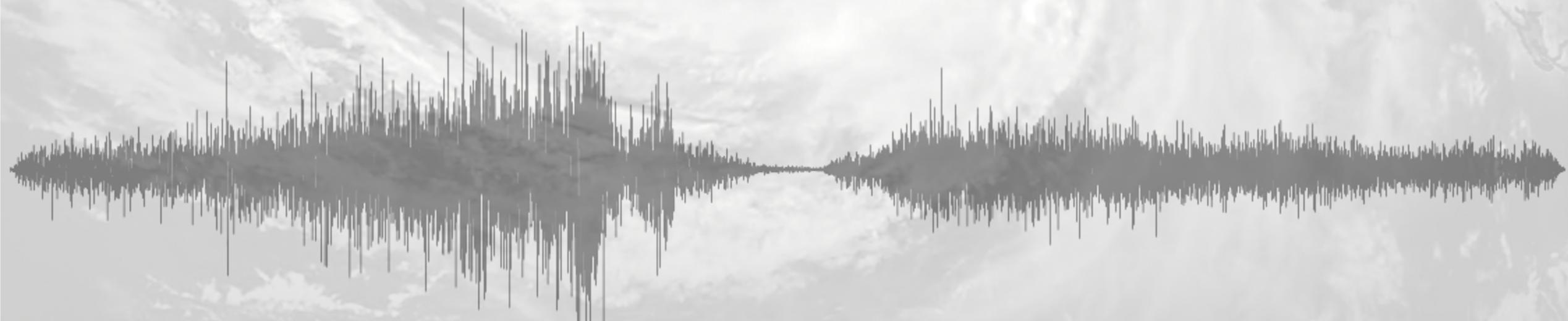


地震环境噪声中来自大气湍流的信号

——以飓风登陆事件为例

纪晴 斯坦福大学

2024/09/26



导师 & 合作者



Prof. Eric Dunham

Geophysics



Prof. Morgan O'Neill

Earth System Science



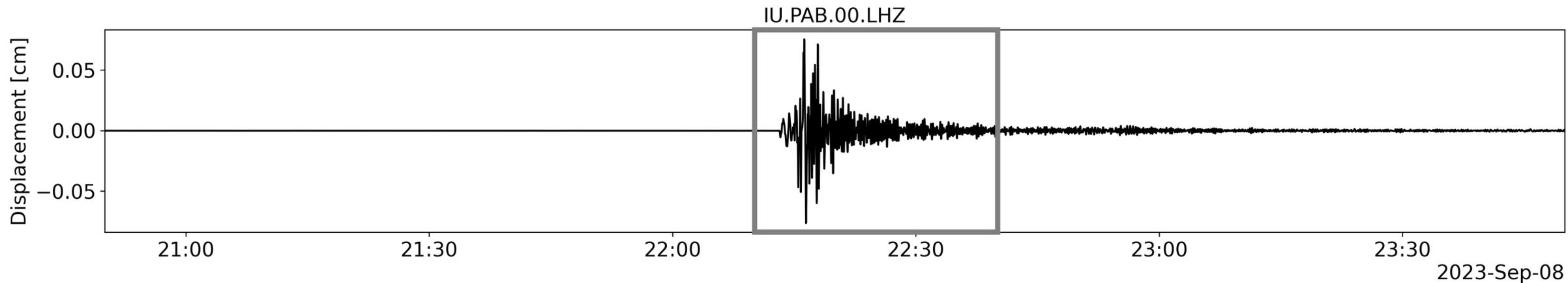
Ipshta Dey

Earth System Science



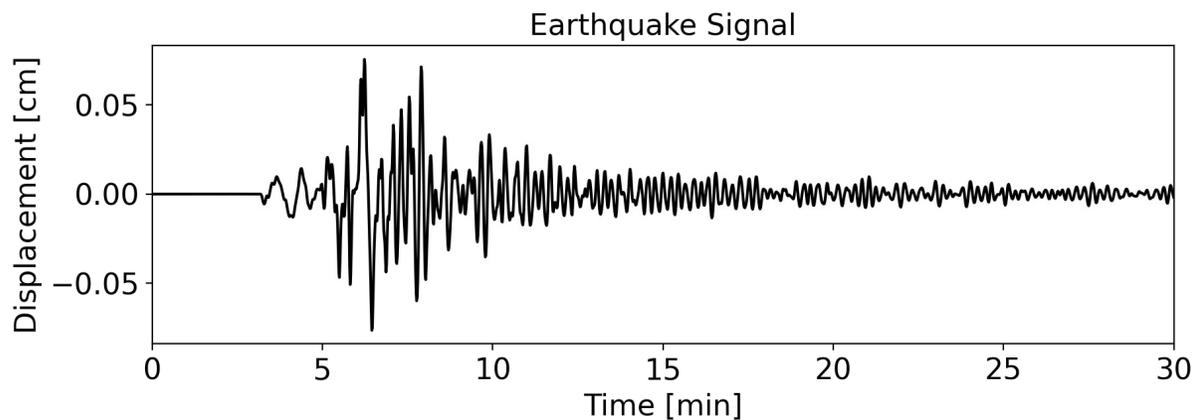
Lucia Gualtieri

地震信号 VS 环境噪声



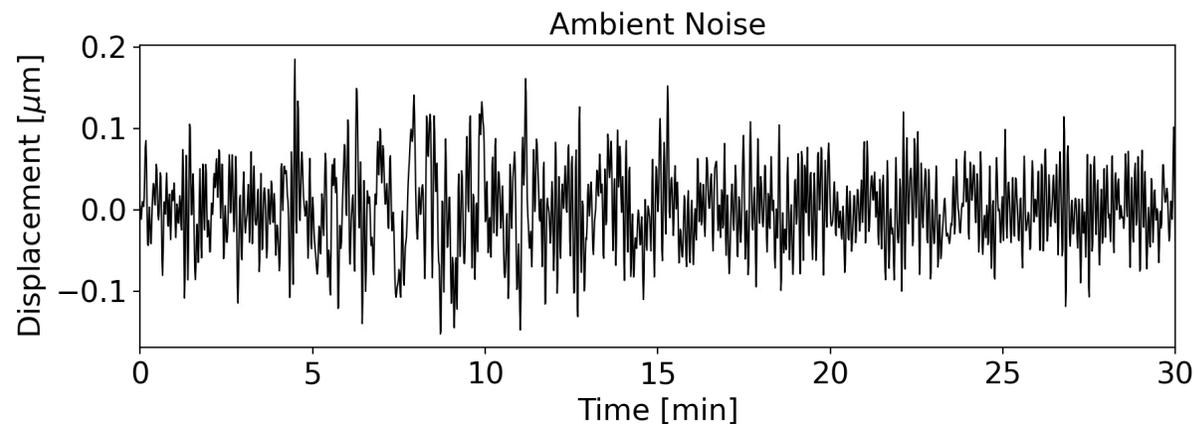
2023年9月8日摩洛哥 6.8 级地震, 位于西班牙的台站 ($\sim 9^\circ$).

垂直分量位移, 采样频率 1 Hz 的长周期通道('L'). 滤波周期 5 - 100 s.



可识别的, 确定性的震相

具体波形的对应

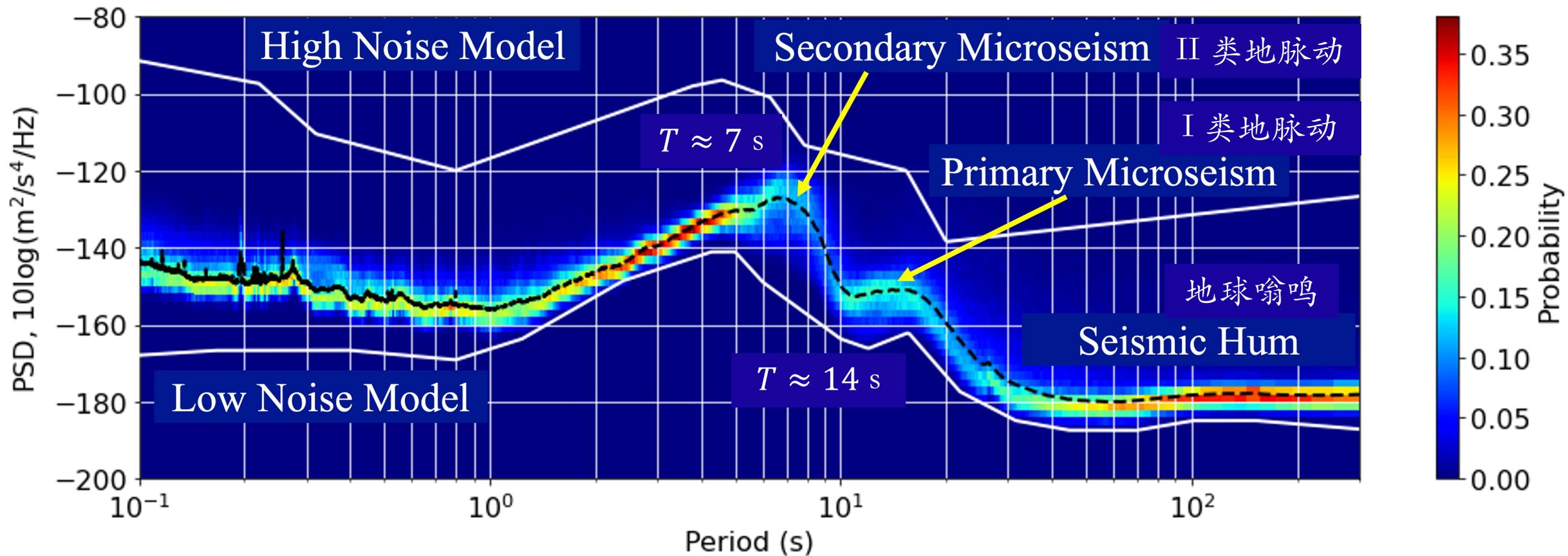


准随机信号

随机过程的统计分析

地震环境噪声的特征频谱

IU.TUC.BHZ 分析一年噪声数据

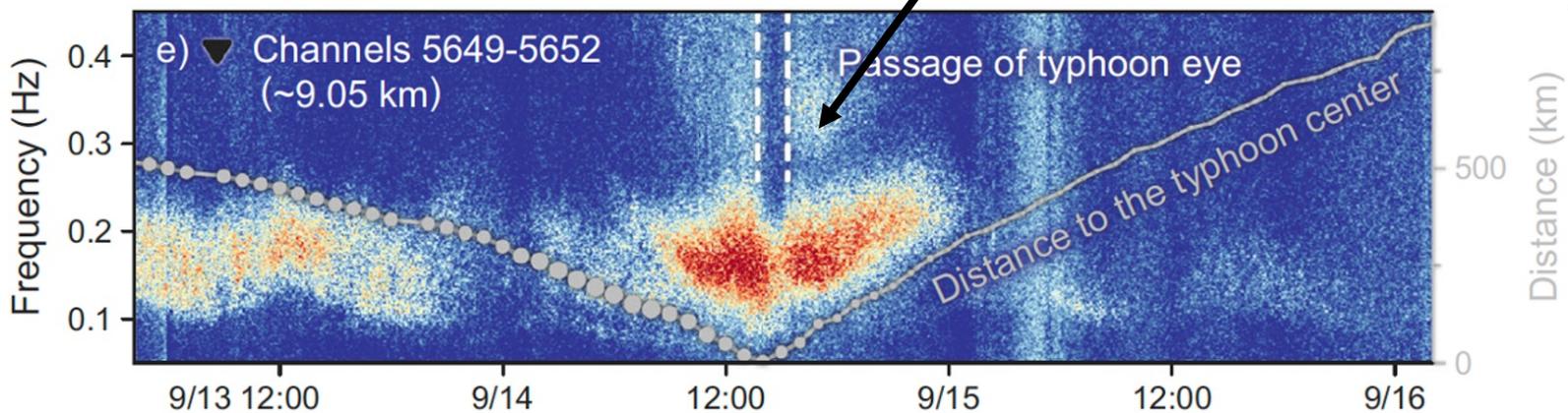
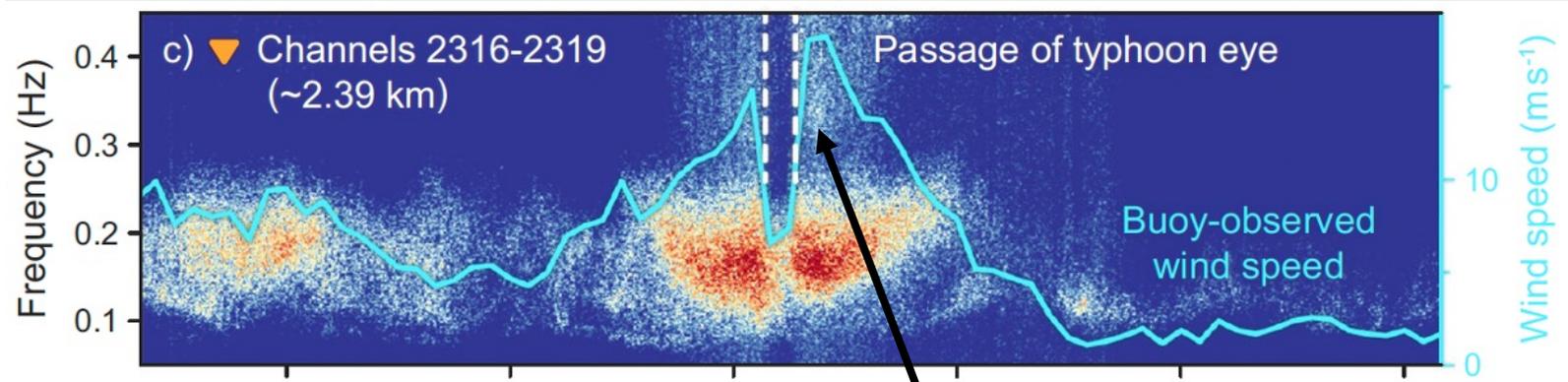
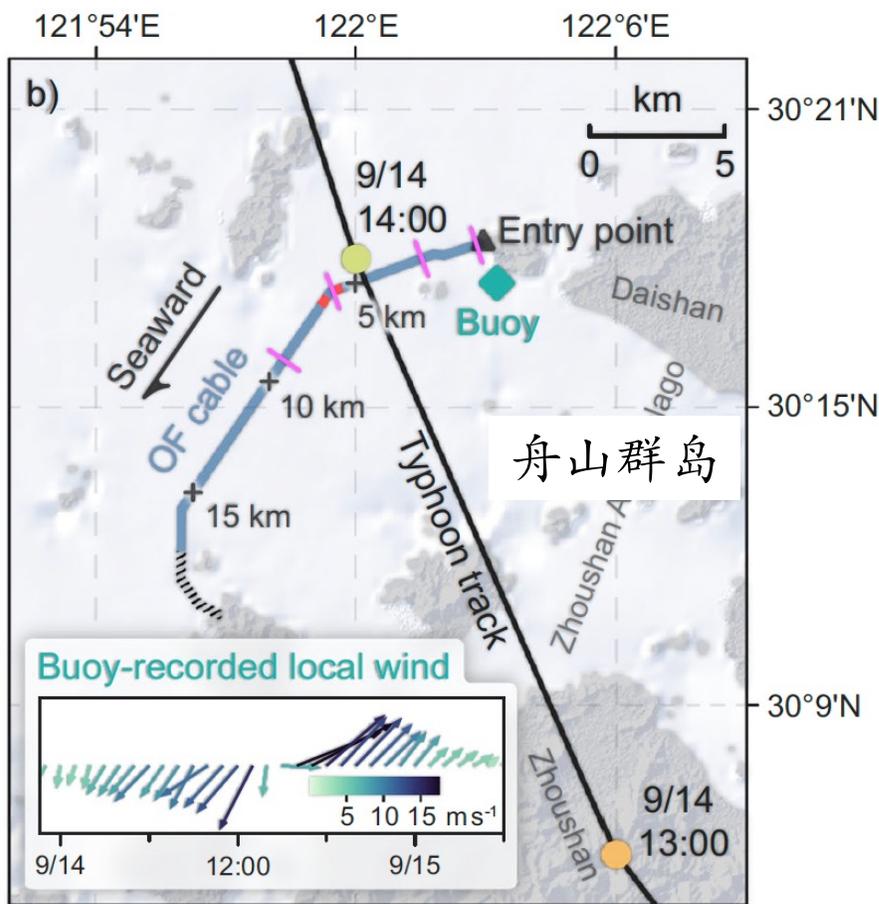


人类活动噪声

海洋噪声

大气噪声

海上风暴的地震学印记: 海底 DAS 记录为例



海浪耦合信号 ($> 0.3 \text{ Hz}$)

Lin et al. (2024, Nat. Commun.)

还可利用 DAS 记录到的海浪频散曲线, 测量洋流的速度大小和方向

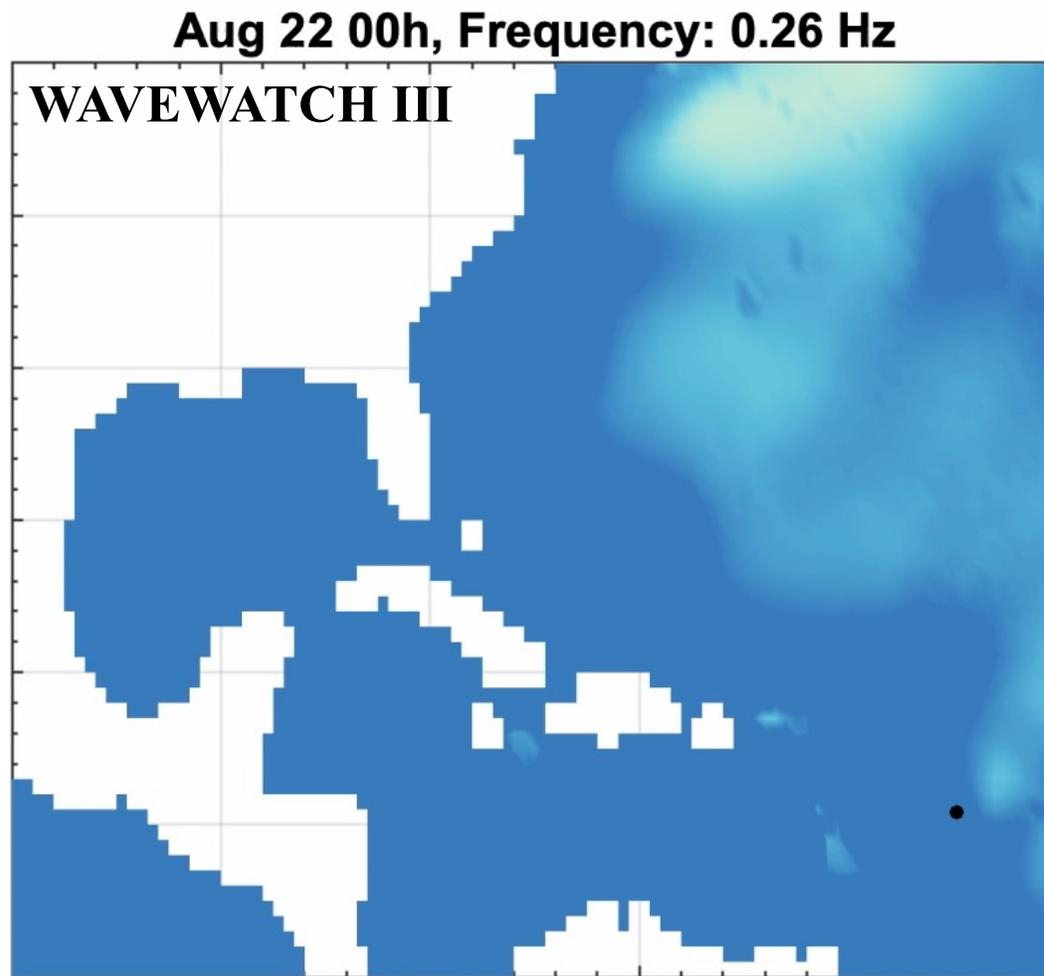
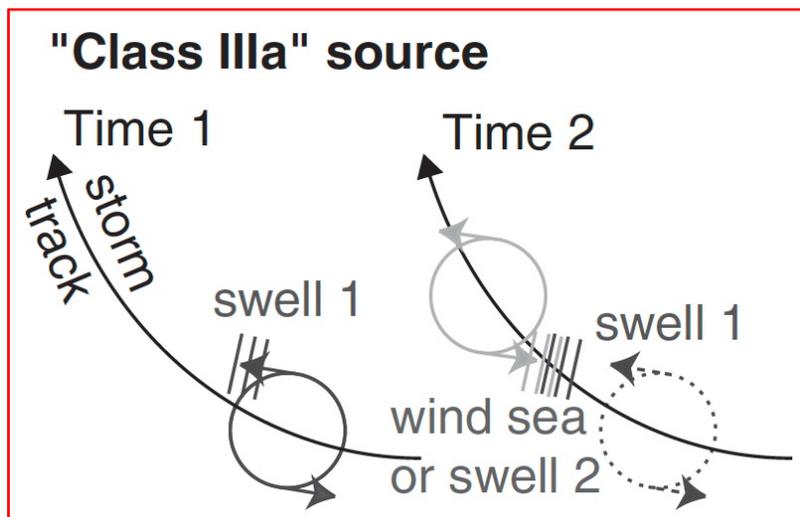
结合海浪模型获取海洋噪声源分布

2012年8月22日至9月1日, 飓风“艾萨克”
穿过墨西哥湾, 登陆美国路易斯安那州

海浪模型 WAVEWATCH 常用于获得 II 类地
脉动噪声源的分布

(Ardhuin et al. 2011, JGR Oceans)

强噪声源位于飓风的尾部, 跟随飓风路径



Ardhuin et al. (2019)

示意图取自 *Seismic Ambient Noise* 第三章

来自大气的环境噪声源

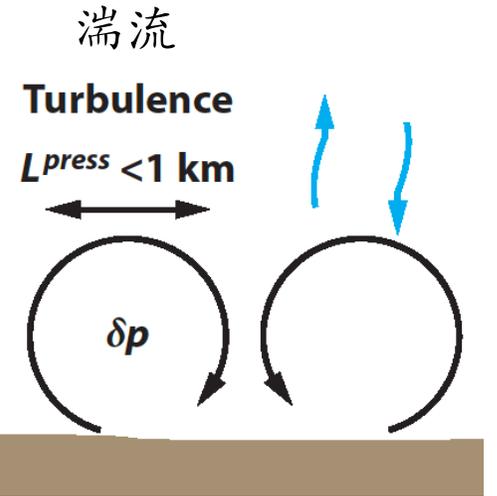
由湍流（流体的不规则无定常流动）引起的地表压强扰动 δp

简化情形: Sorrells 模型, 考虑由风引起的压力波, 其形式为 $p_0 \exp[i\omega(x/c - t)]$
(Sorrells 1971, Geophys. J. R. astr. Soc.)

噪声强度? 分布频段? 产生机制? 实际应用?

如何结合大气科学研究, 对噪声源进行更加准确的描述?

积云对流
(小尺度热对流)



Nishida (2013, Annu. Rev.)

报告内容

1. 飓风“艾萨克” (Isaac) 登陆事件的地震学**观测**
 - ✓ **地震学**视角的基本**飓风**结构
 - ✓ 不同频段, 不同噪声源, 不同噪声产生机制
2. **模拟**来自大气湍流的地震环境噪声
 - ✓ **大气湍流**模拟: 噪声源的真实描述
 - ✓ **地表震动**模拟: 局域准静态 (local quasi-static) 耦合机制
 - ✓ 模拟结果解释地表大气压强谱与垂向位移谱
3. 总结与展望: 大气-固体地球耦合 / 环境噪声 / 交叉学科……

地震学 / 地震声学

Seismology / Seismoacoustics

大气科学

Atmospheric sciences

1. 飓风“艾萨克”登陆事件的地震学观测

德克萨斯州 路易斯安那州 密西西比州 阿拉巴马州

08/30

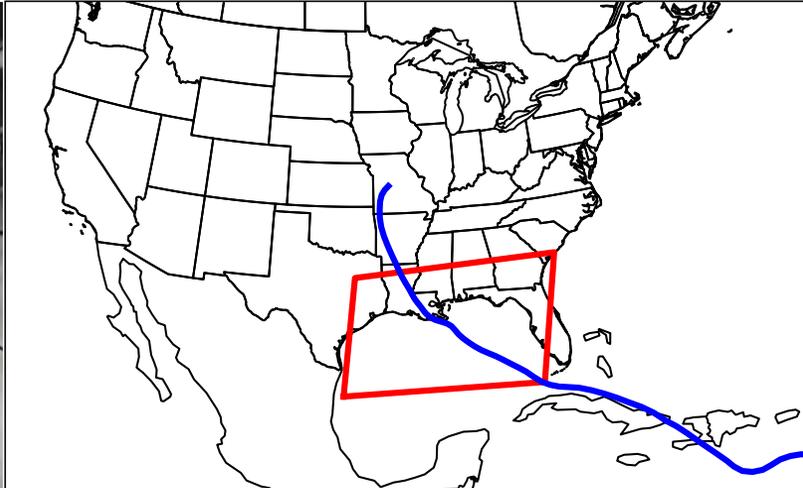
08/29

08/28

08/28

2012年8月 飓风“艾萨克”

- 一级飓风
- 热带风暴
- 飓风路径



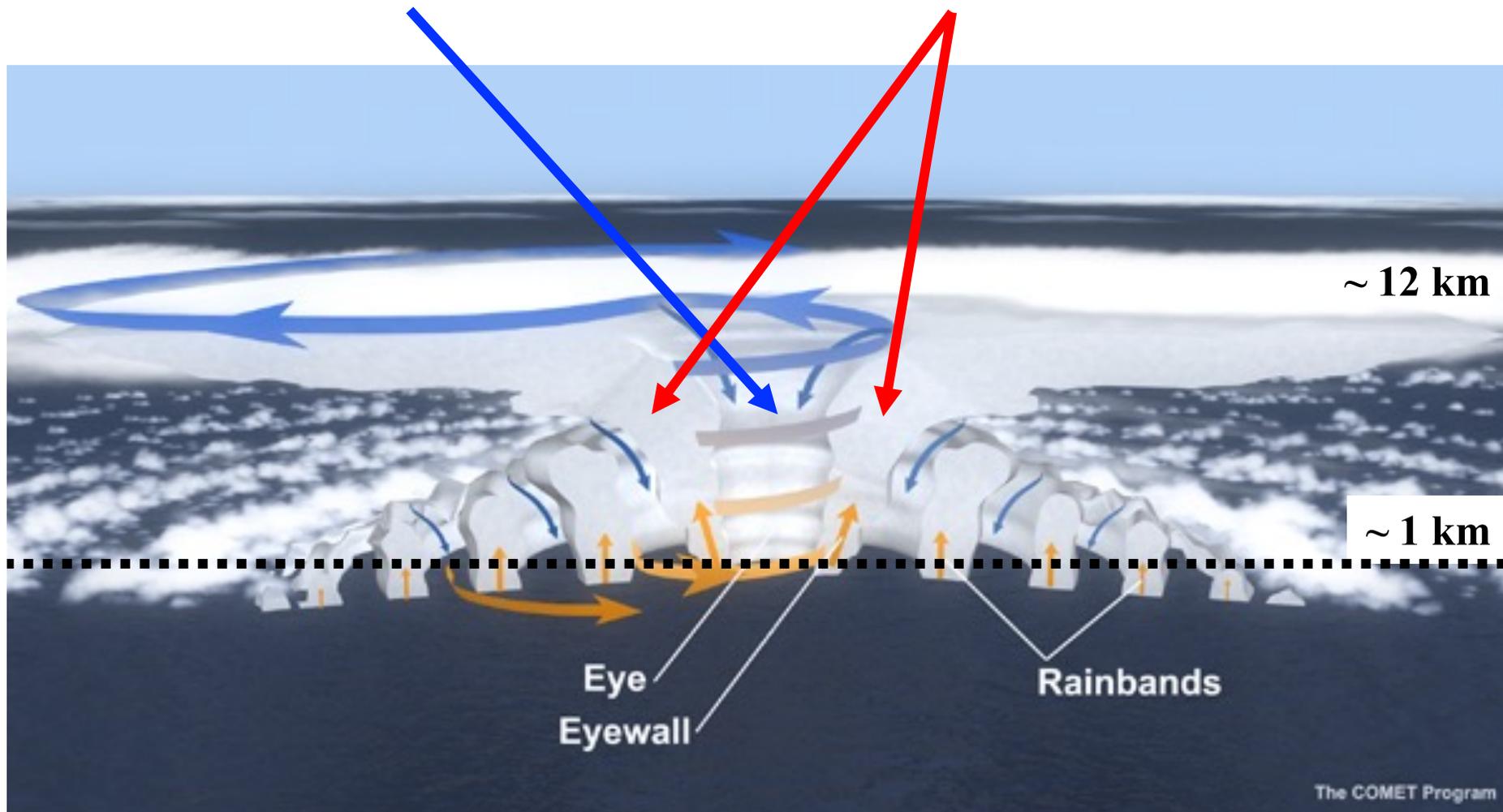
热带气旋的基本结构

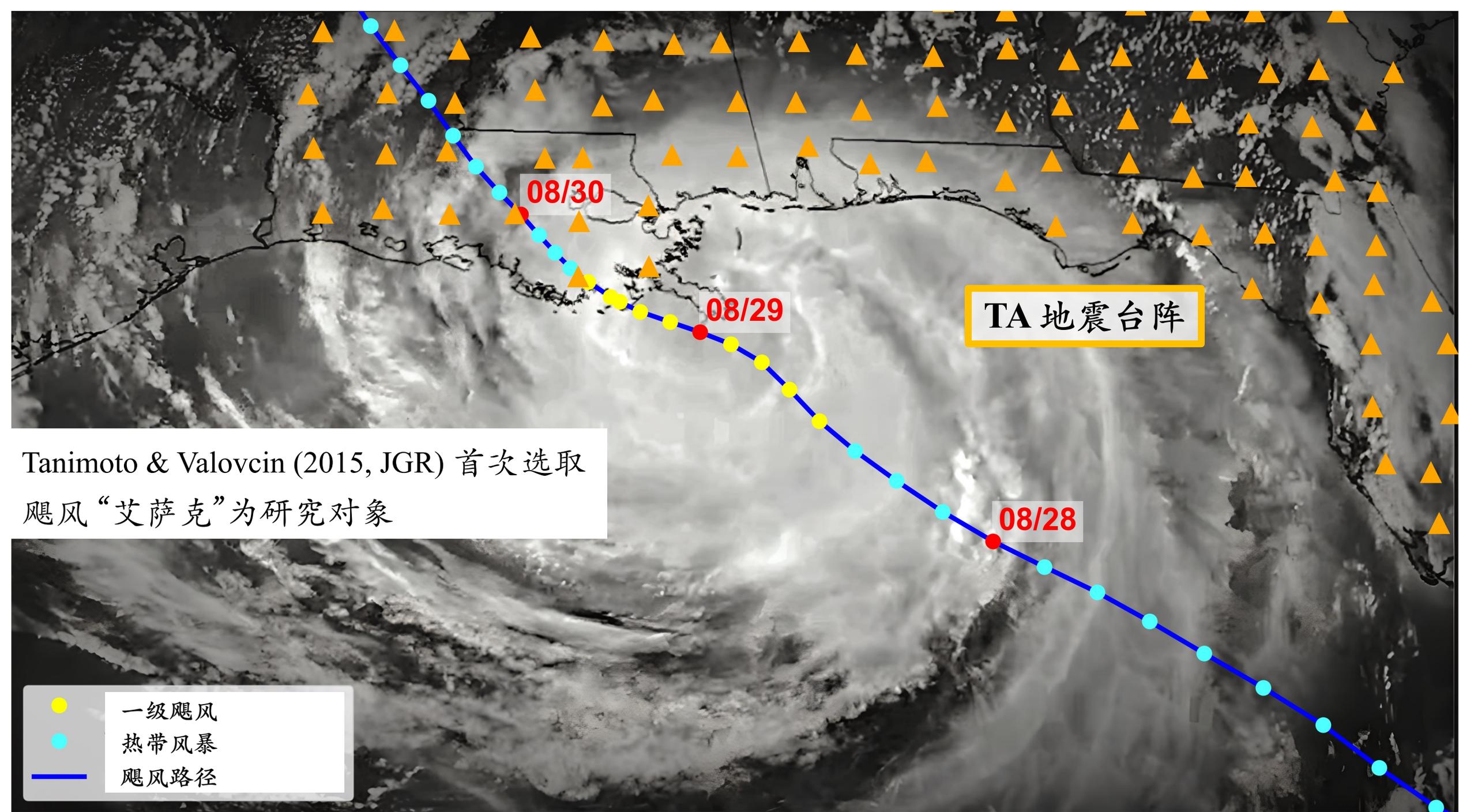
风眼 (eye)

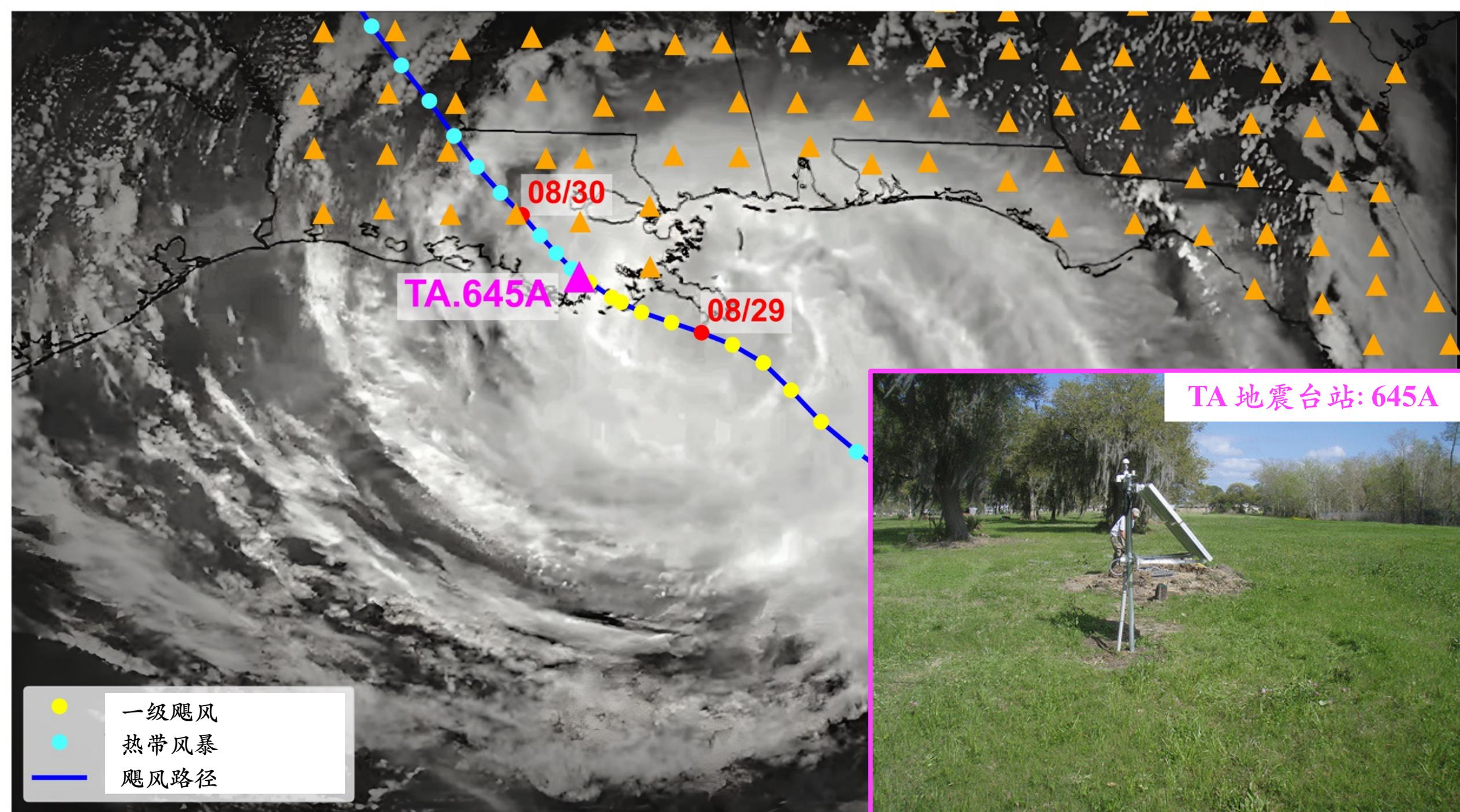
相对平静, 直径约几十公里

风眼墙 (eyewall)

风速最大的区域







配备环境监测仪器的地震台站

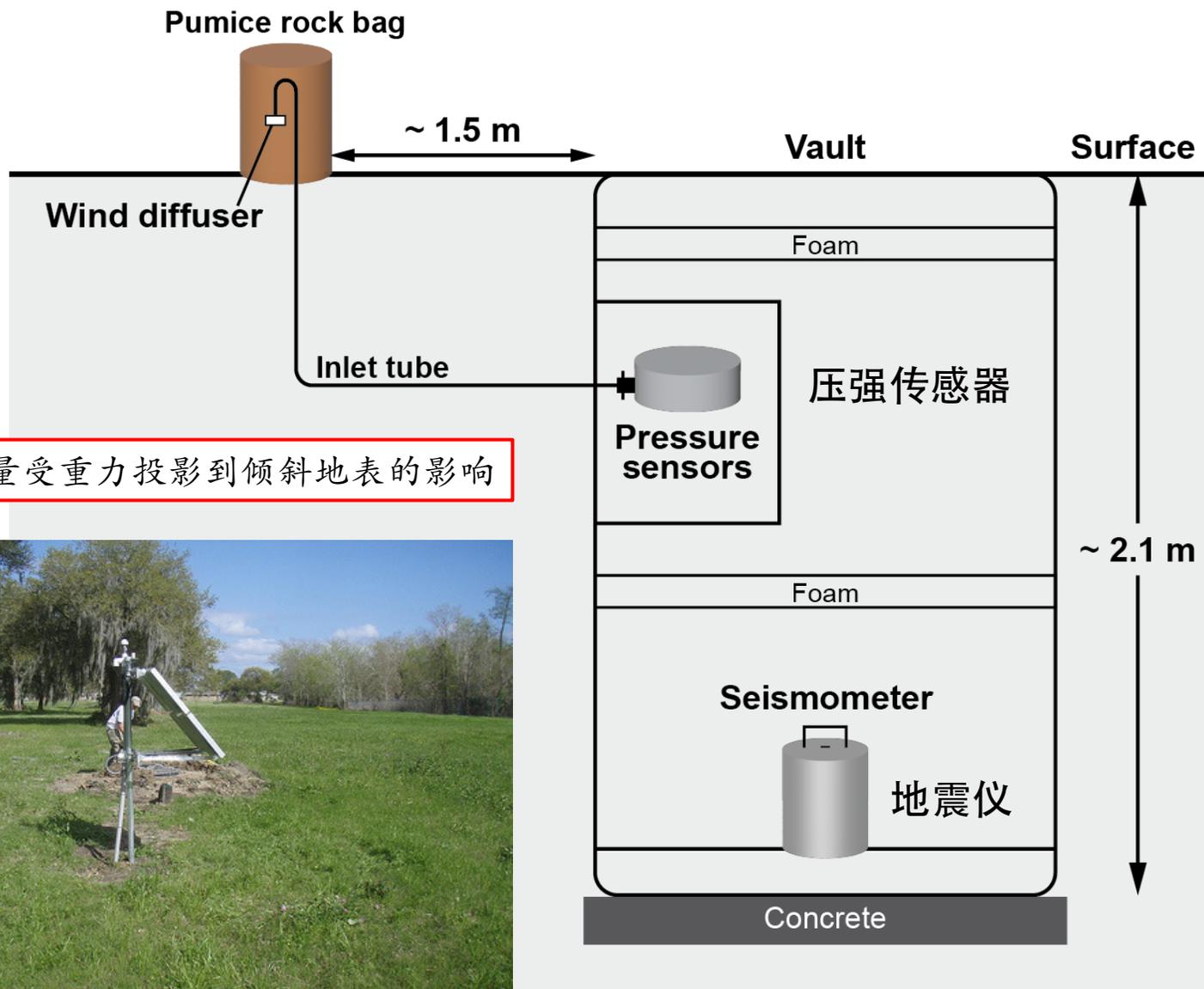
通道	观测分量
LH[ZNE]	三分量地震动
LDO	大气压强
LDF	次声信号 (infrasound)

L: 长周期 (1 Hz 采样率)

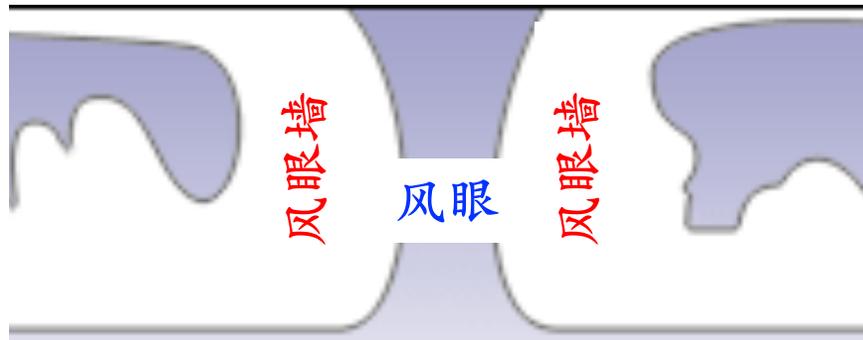
B: 宽频带 (40 Hz 采样率)



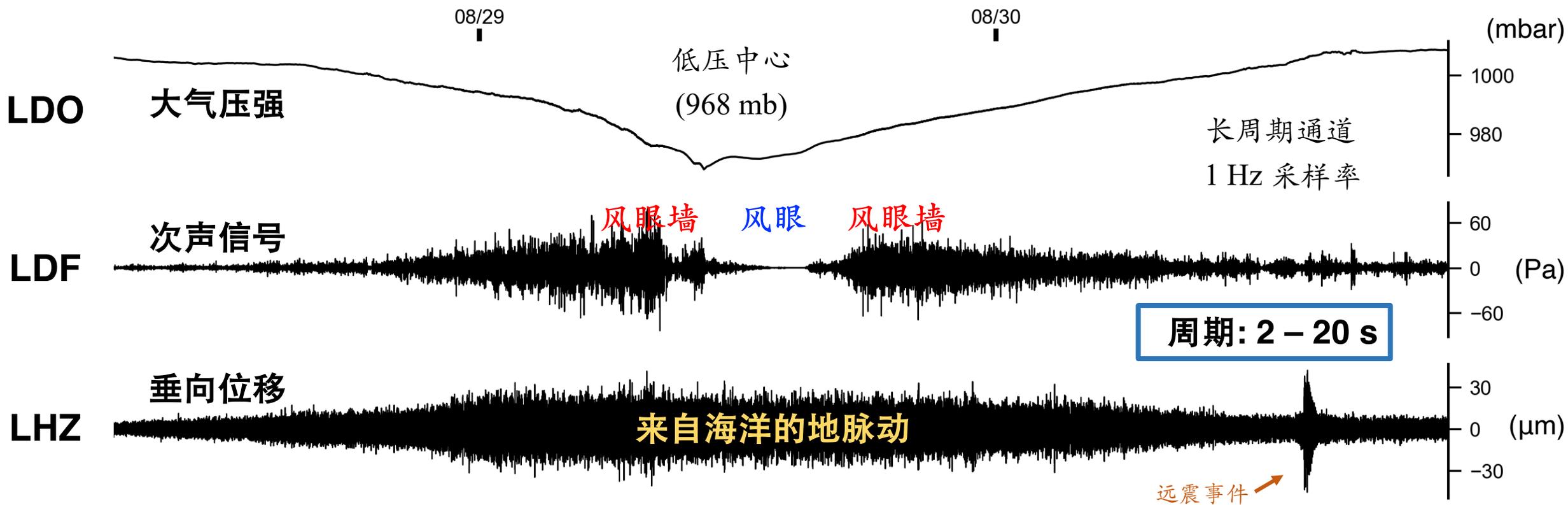
注: 长周期水平分量受重力投影到倾斜地表的影响



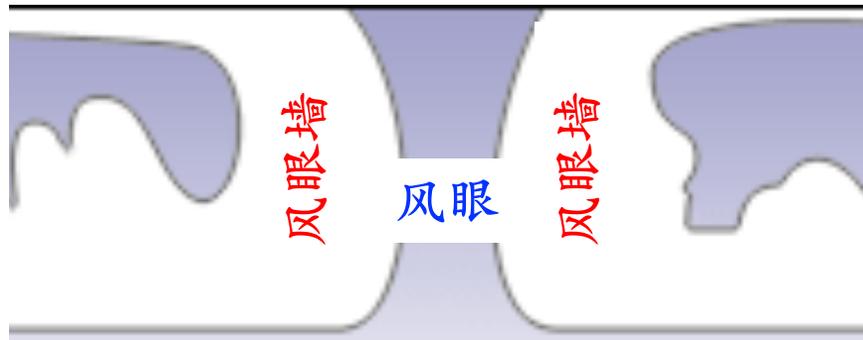
飓风路径上的地震台站



▲ TA 地震台站

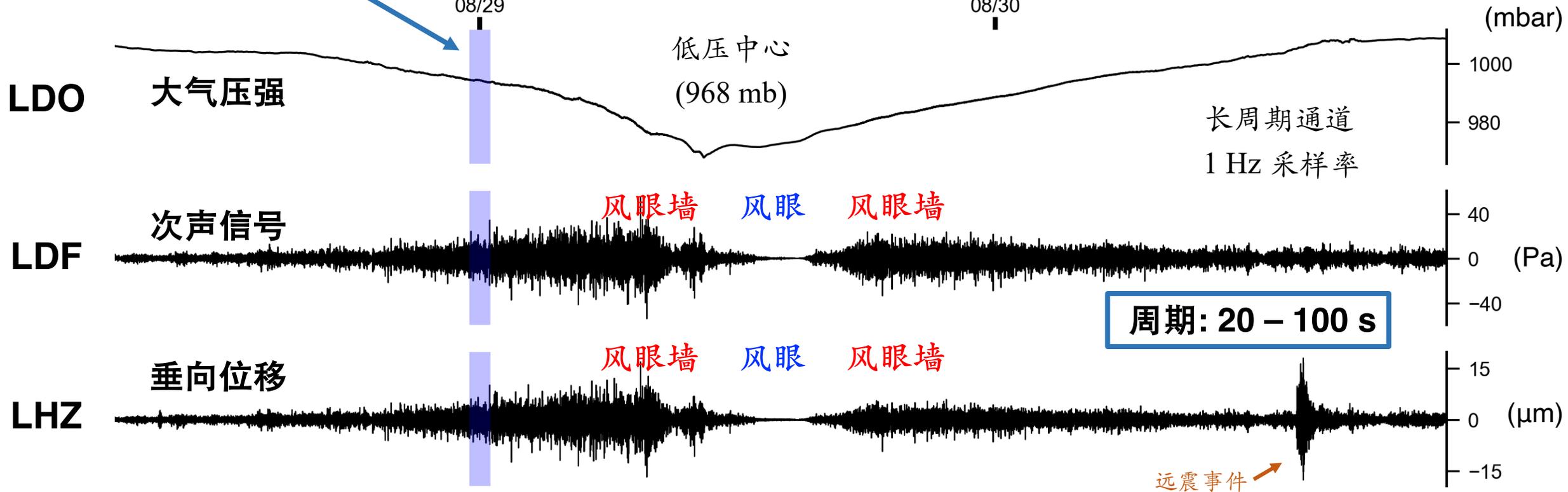


飓风路径上的地震台站



TA 地震台站

一小时记录
 $R = 105 \text{ km}$



一则生动的新闻报道

—2024—

09/14

08:53:28

来源：新华每日电讯

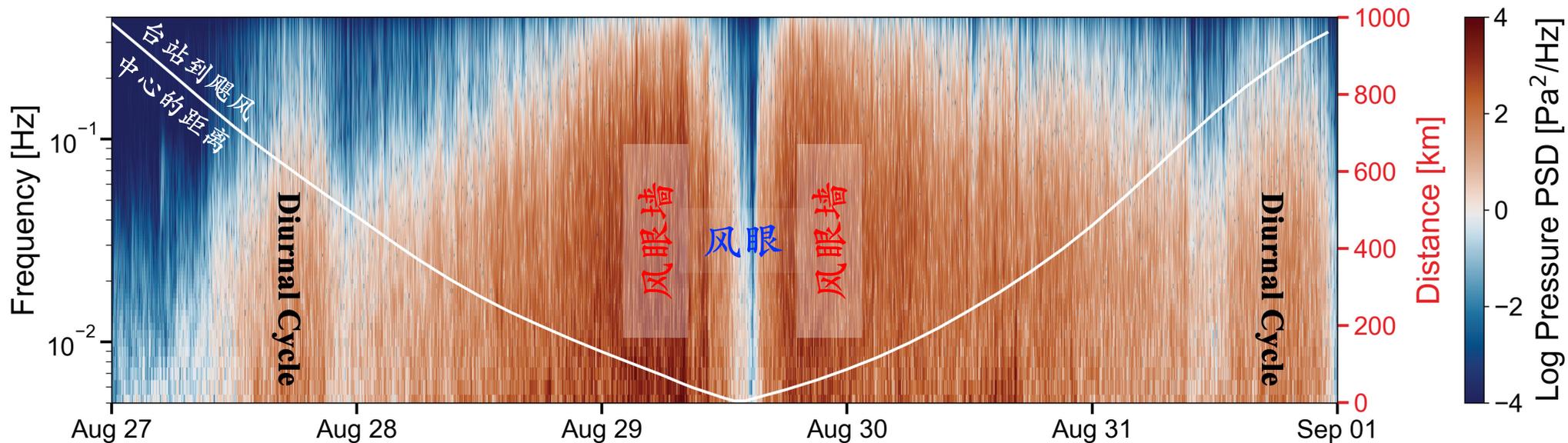
我们追进了“摩羯”台风眼

(9月6日) 22时20分左右，台风在湛江市徐闻县角尾乡沿海再次登陆，离我们所在的位置距离不到30公里。

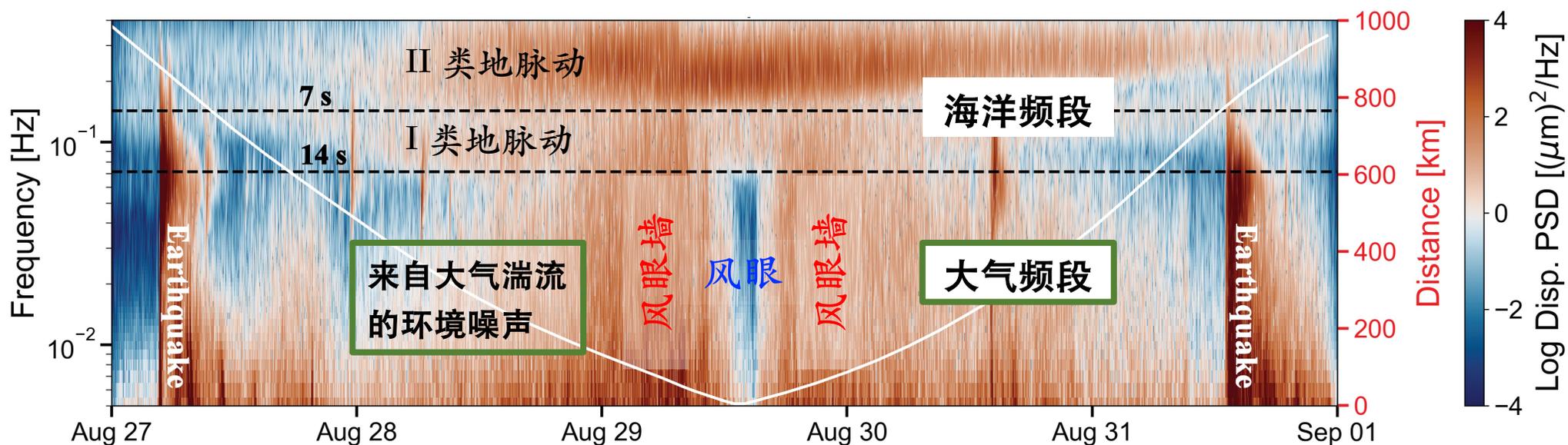
22时左右，台风眼悄然掠过头顶。忽然间，风雨骤停，一片死寂中透露出前所未有的宁静。在台风眼中，记者感受到一种难以言喻的震撼与敬畏。一边是毁灭性的力量，狂风、暴雨、巨浪，无情地肆虐着大地与海洋；另一边，则是不可思议的宁静与祥和，仿佛是两个截然不同的世界，在这里奇妙地交汇、共存。

次声波与地震信号的小波 (wavelet) 时频分析

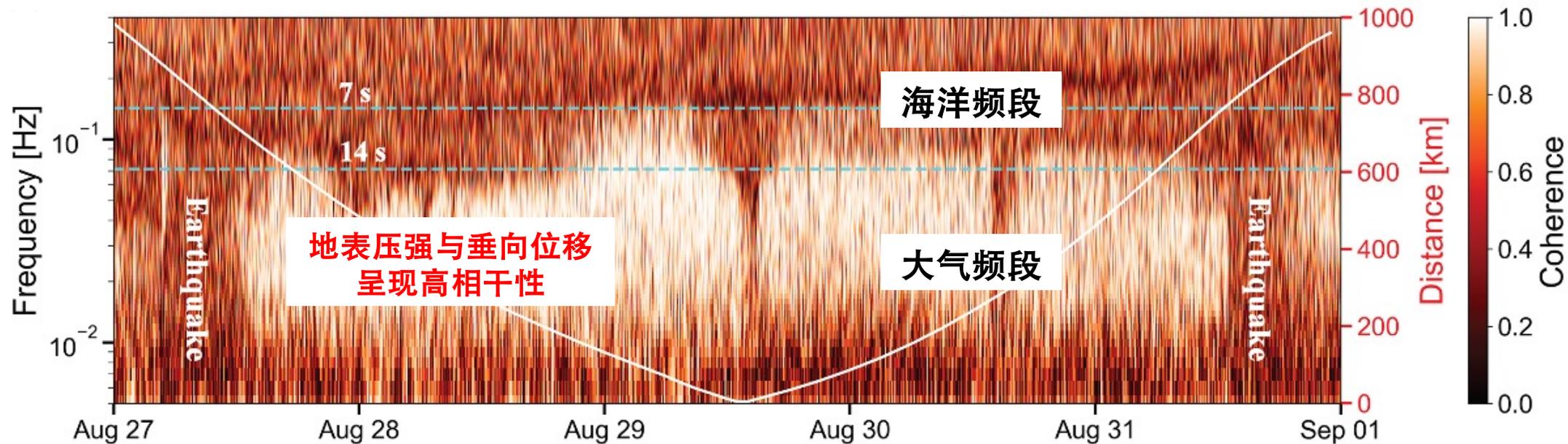
地表压强



地表垂向位移



相干性 (coherence) 分析指向准静态耦合机制

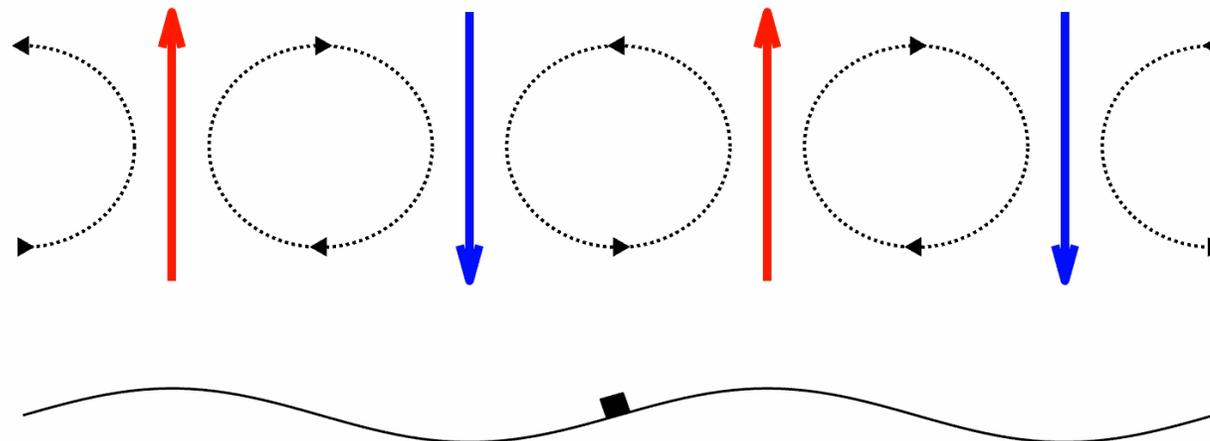


简化情形: Sorrells 模型

(Sorrells 1971, Geophys. J. R. astr. Soc.)

风 \rightarrow 单向压力波

风 \leftrightarrow 湍流 本研究



地震台站提供了飓风内部的观测

对于**大气科学**, 飓风内部的情况由专业飞机观测进行数据采集



- 航行十分危险, 数据集非常稀有
- 对于飓风边界层 (大气层底部 1 km) 的认识仍十分欠缺

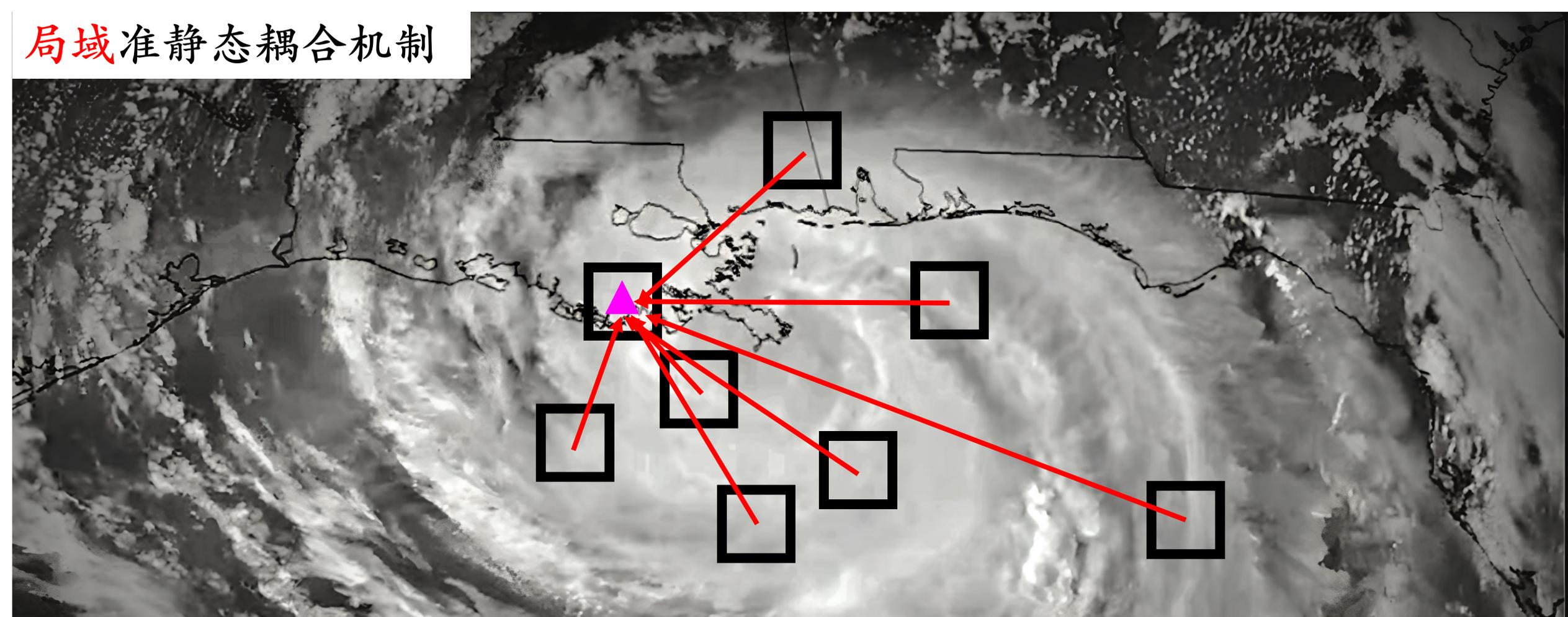
地震台站作为辅助大气科学 研究的地表无人观测站

对于**地震环境噪声**, 飓风登陆作为强噪声源, 是研究大气-固体地球耦合的合适情景

- 结合湍流的相关知识, 获得对于噪声源的更为真实的描述
- 扩展至更为普遍的风噪声 (wind noise) 研究, 可用于约束浅层地下介质的弹性参数 (e.g., Wang & Tanimoto 2020, 关注地下 ~ 100 m 深度)

2. 模拟来自大气湍流的地震环境噪声

局域准静态耦合机制



- 对于飓风尺度的模拟, 我们首先采用 Tanimoto & Valovcin (2015) 的框架, 将飓风分解为若干独立的垂直点力源

局域准静态耦合机制

该机制符合以下论述:

- 压强与垂向位移的高相干性
- 地下浅部的松软沉积层
- 准静态近似 $\frac{\omega r}{c_{seis}} \ll 1$

其它例子:

- 海底地震仪记录的长周期海洋噪声 (Crawford et al. 1991)
- 海底 DAS 记录提取海洋波的频散 (Williams et al. 2019)

- 对于飓风尺度的模拟, 我们首先采用 Tanimoto & Valocin (2015) 的框架, 将飓风分解为若干独立的垂直点力源
- 我们发现, 主要的贡献来自于台站周边 $\sim \text{km}$ 的区域 (Ji & Dunham, 2024)
- 距离台站远处区域激发的面波贡献十分微弱, 并非如 Tanimoto & Valocin (2015) 结论所示

模拟来自大气湍流的局域准静态响应

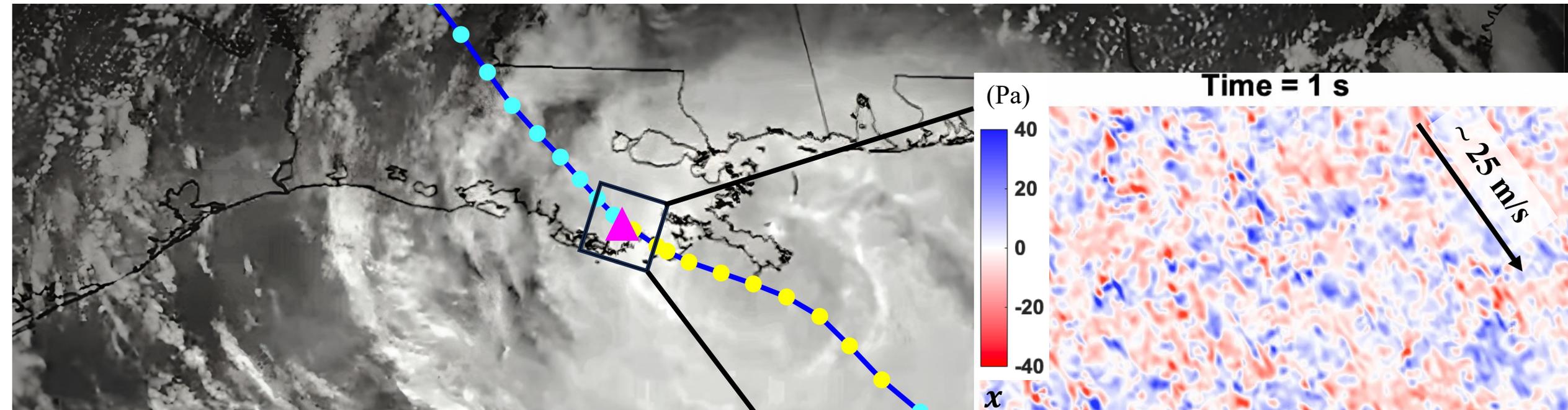
局域

利用湍流模拟, 获得小区域中的
地表压强场 ($\sim 5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$)

准静态

在每个时间点, 求解给定地表边界
条件下的静态分层半空间弹性问题
(传播矩阵法)

飓风内部湍流的大涡模拟 (Large Eddy Simulation, LES)



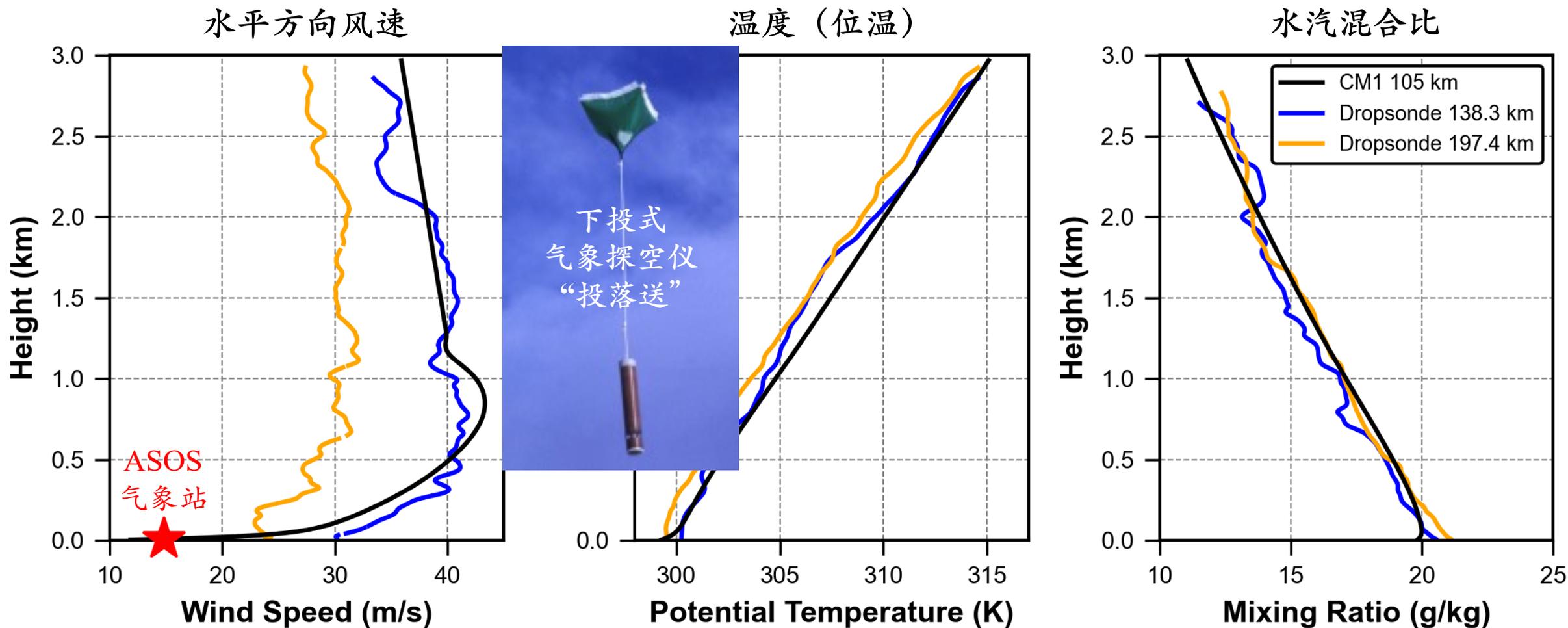
	x (径向)	y (角向)	z (垂向)
区域大小	5.12 km	5.12 km	~ 3 km
网格大小	20 m	20 m	~ 10 m

解析尺度: > 网格大小, 求解低通滤波的 Navier-Stokes 方程 **大涡**
未解析尺度: < 网格大小, 子网格尺度模型对湍流进行描述

到飓风中心距离	10 m 风速	风阻系数
R = 105 km	S10 \approx 14.4 m/s	$C_d = 1.35 \times 10^{-2}$

Bryan *et al.* (2017, Boundary Layer Meteor.)
Chen *et al.* (2021, J. Atmos. Sci.)

利用飓风观测数据约束湍流模拟



使用 **Cloud Model 1 (CM1)** 进行湍流的大涡模拟, 利用下投式气象探空仪 (**dropsonde**) 数据约束垂直剖面的风速结构, 同时保证符合实际情况的热力学状态

准静态模拟大气湍流引起的垂向地表位移

对于每个时间点 t

传播矩阵法

$$\mathbf{U}(z_{\text{top}}) = e^{\mathbf{A}h} \mathbf{U}(z_{\text{btm}}),$$

地表设置空间周期性边界条件, 即湍流模拟得到的压强场

$$U_3 = 0, \quad U_4 = -\tilde{p}(k_x, k_y), \quad \text{at } z = 0$$



$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = 0$
水平方向
Fourier变换

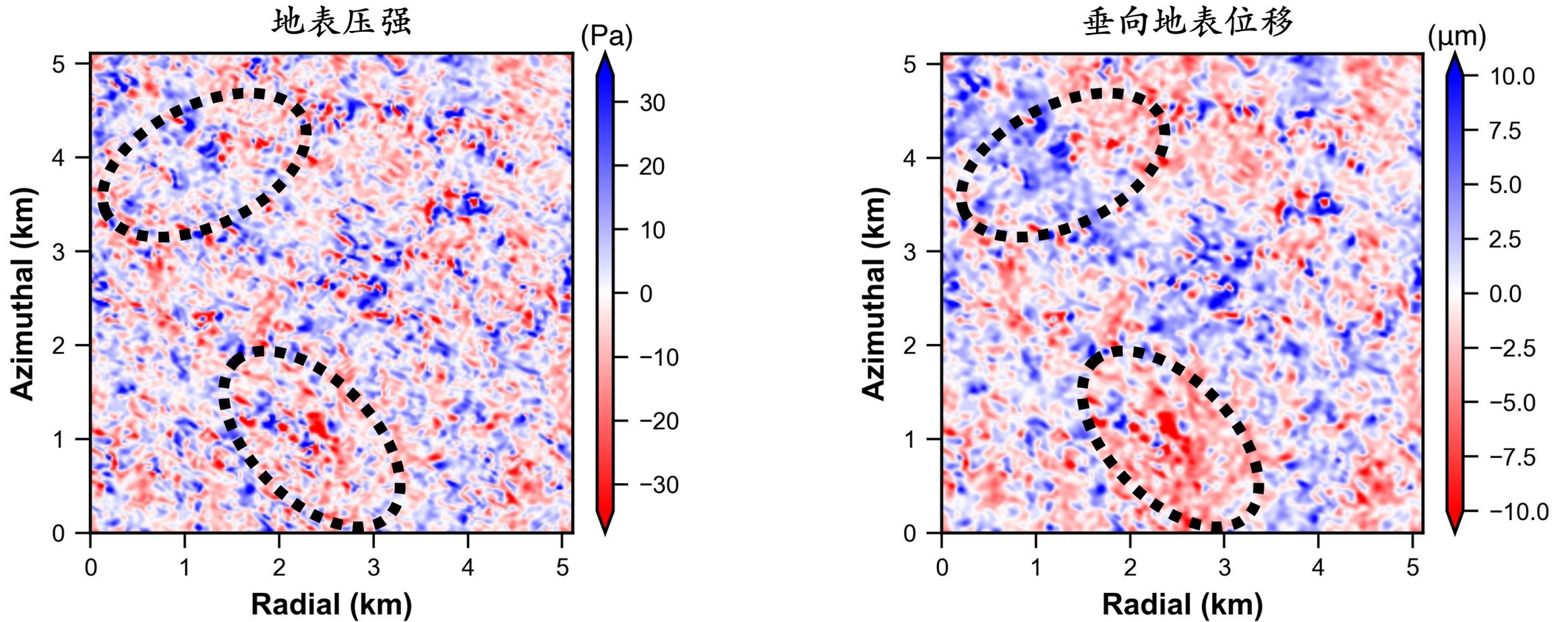
$$\frac{d\mathbf{U}}{dz} = \frac{d}{dz} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -k & \frac{1}{\mu} & 0 \\ \frac{k\lambda}{\lambda+2\mu} & 0 & 0 & \frac{1}{\lambda+2\mu} \\ \frac{4\mu k^2(\lambda+\mu)}{\lambda+2\mu} & 0 & 0 & -\frac{k\lambda}{\lambda+2\mu} \\ 0 & 0 & k & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \mathbf{A}\mathbf{U}$$

弹性半空间中的一般解

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = c_1 \begin{bmatrix} \frac{1}{2k\mu} \\ \frac{1}{2k\mu} \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} + c_2 \begin{bmatrix} \frac{\lambda+2\mu}{2k^2\mu(\lambda+\mu)} \\ -\frac{1}{2k^2(\lambda+\mu)} \\ \frac{1}{k} \\ 0 \end{bmatrix}$$

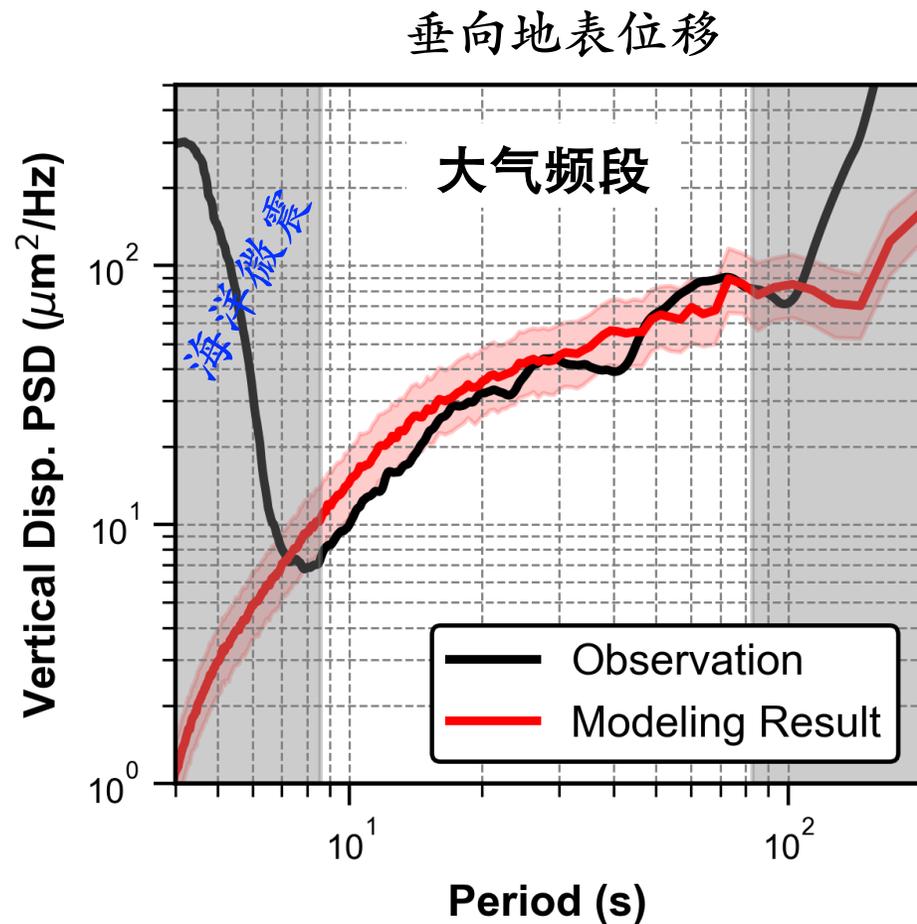
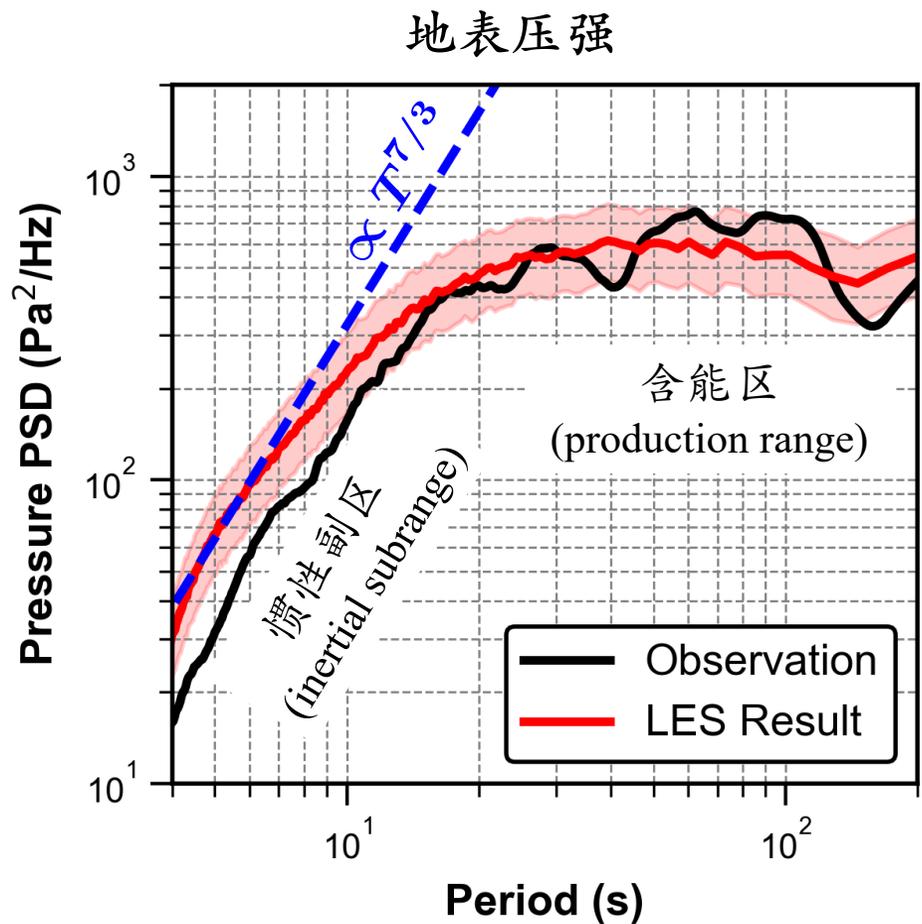
$$\begin{aligned} -kU_1 &= ik_x \tilde{u}_x + ik_y \tilde{u}_y, & U_2 &= \tilde{u}_z, \\ -kU_3 &= ik_x \tilde{\sigma}_{xz} + ik_y \tilde{\sigma}_{yz}, & U_4 &= \tilde{\sigma}_{zz}, \end{aligned}$$

准静态模拟大气湍流引起的垂向地表位移



弹性介质的静态响应等效于波数域的低通滤波

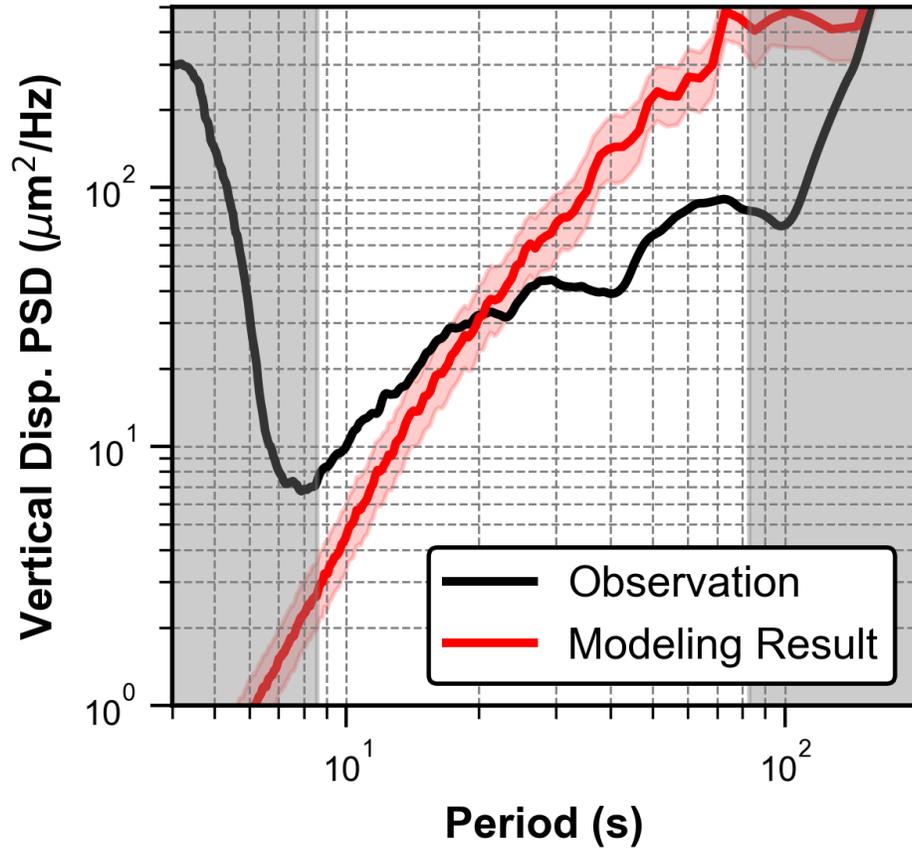
解释观测压强与垂向位移谱



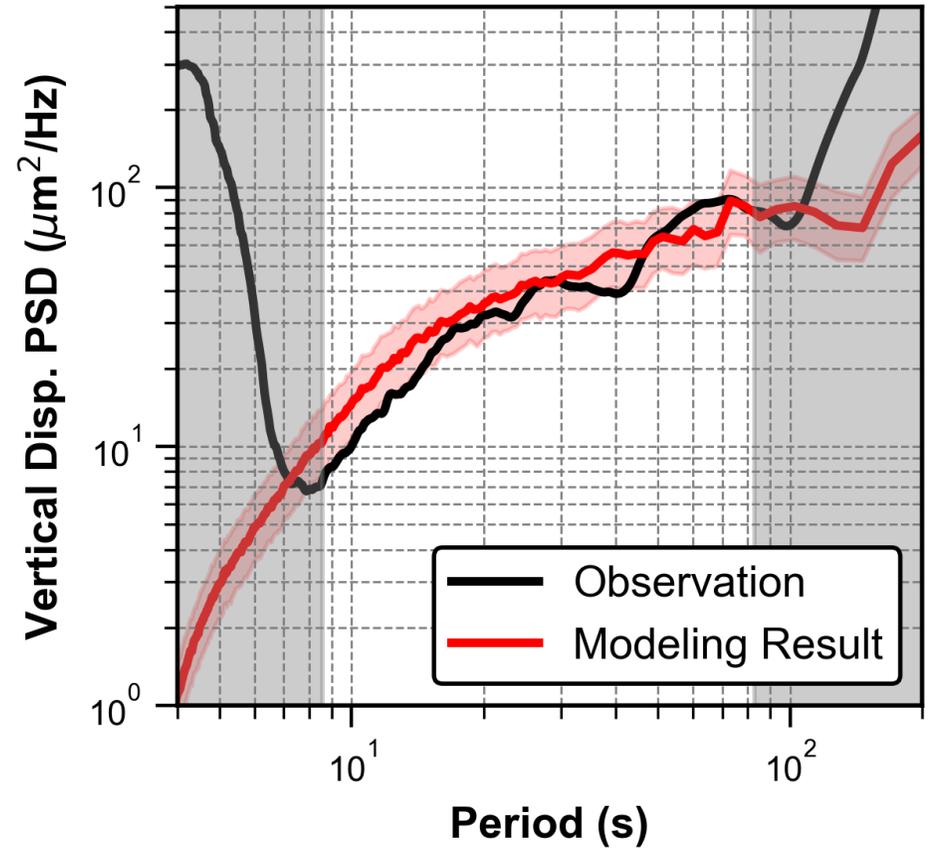
Kolmogorov 局域各向同性湍流假设: 惯性副区 (inertial subrange) 的压强谱 $\propto T^{7/3}$
大气频段的地震环境噪声, 可以由地下介质对湍流压强场的准静态响应解释

均匀半空间与分层介质的比较

垂向地表位移 (半空间)

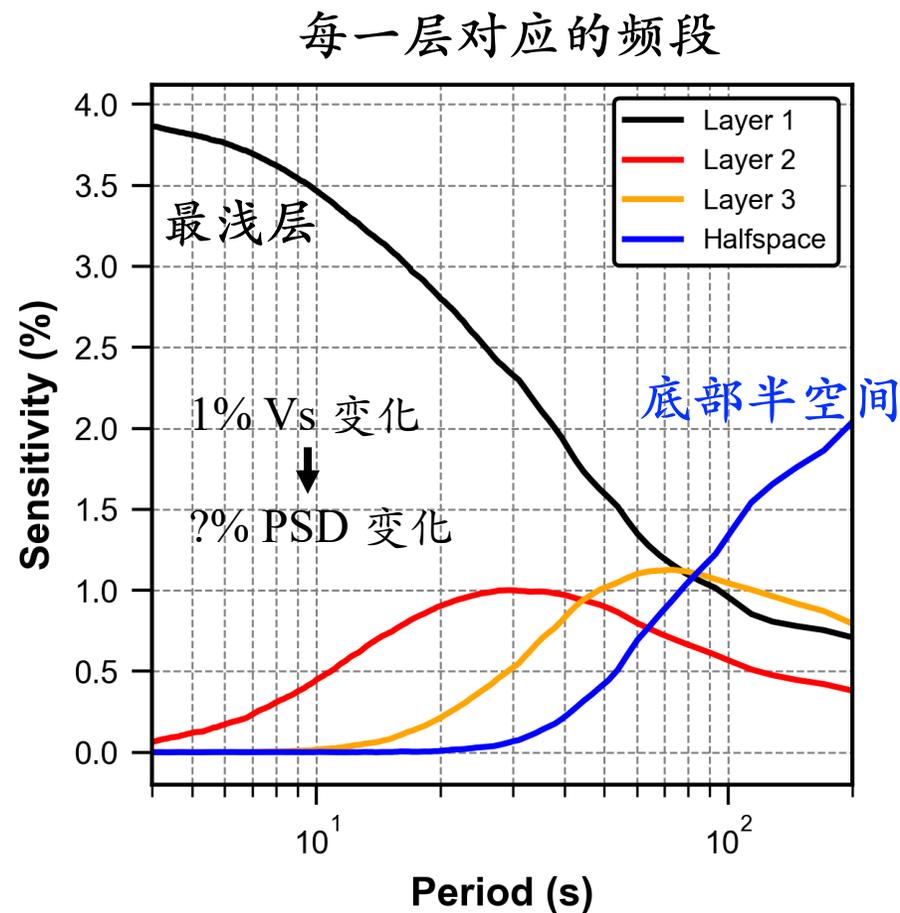
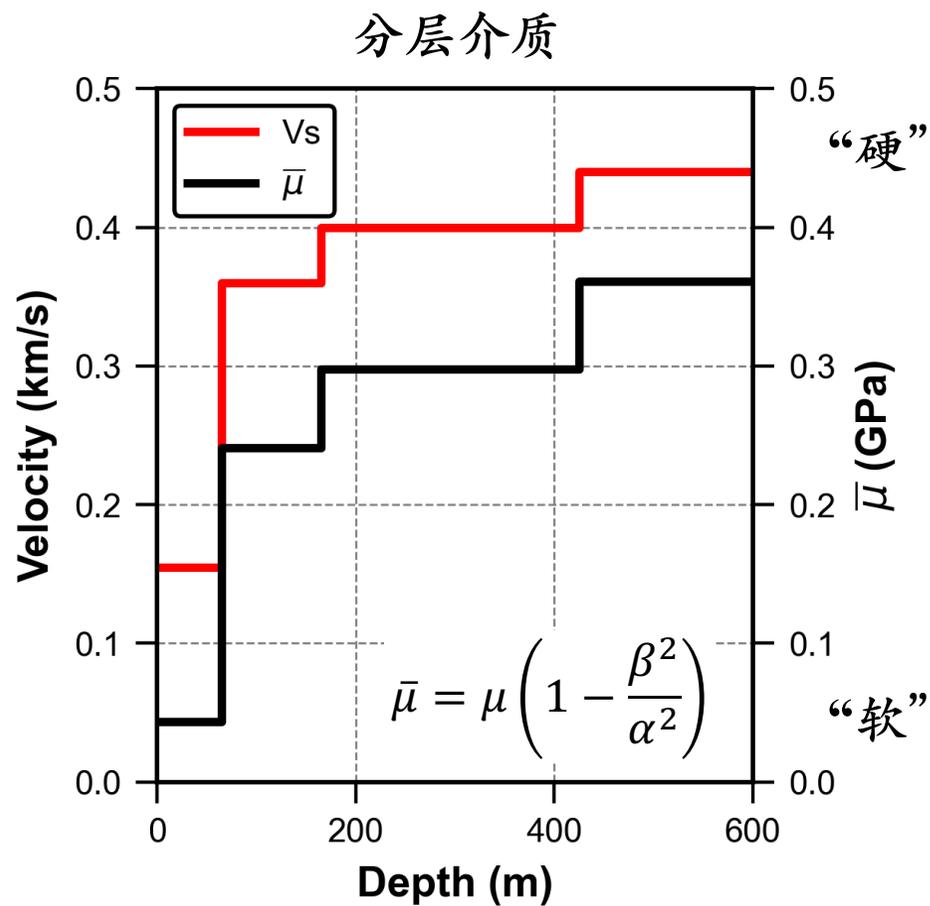


垂向地表位移 (分层介质)



仅应用半空间模型忽视了不同周期成分对不同深度处弹性参数的敏感性

频谱对地下介质的敏感性



每一层的厚度取自 Nayak & Dreger (2018)
调整 V_s 使模拟结果的垂向位移谱与观测接近

敏感深度 $h \propto$ 波长 $\lambda = c_{wind} T$
但这里 c_{wind} 对应湍流的特征对流速度，远小于地震波速

3. 总结与展望

- ✓ 结合大气科学,对大气物理过程贡献的地震环境噪声源进一步了解
- ✓ 首次尝试综合地震台站观测,大气学科观测,以及跨学科的物理模拟

研究环境噪声源

环境噪声源: 海洋和大气中的相关物理过程引起的地表牵引力场

压强场 $p(x, y, t)$ 剪应力场 $\tau(x, y, t)$

基础问题: 传播速度为 c 的单向单频压力波作用于弹性半空间表面, 求解弹性动力学问题

$$p(x, y, t) = p_0 \exp[i\omega(x/c - t)]$$

来自海洋的地脉动 (**primary & secondary microseism, seismic hum**)

海浪相互作用引起的海底压强场, 其传播速度 c **接近**地震波波速 c_{seis}

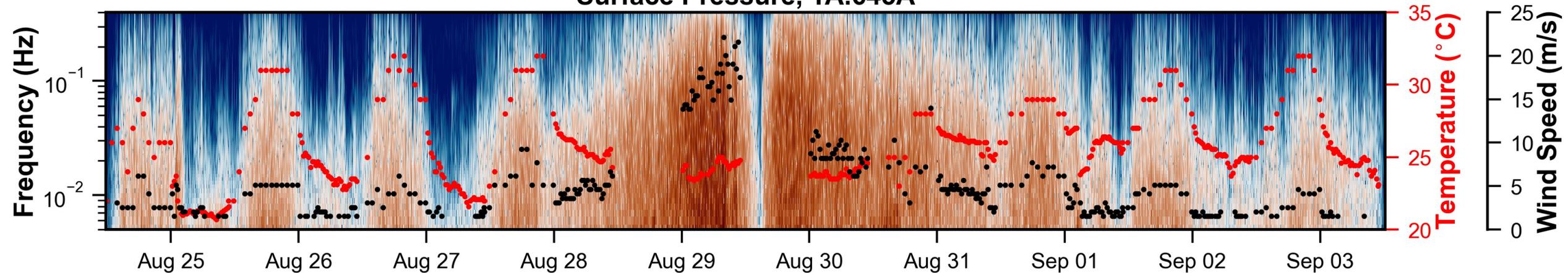
共振

风噪声 (**wind noise**), 海浪直接耦合的信号

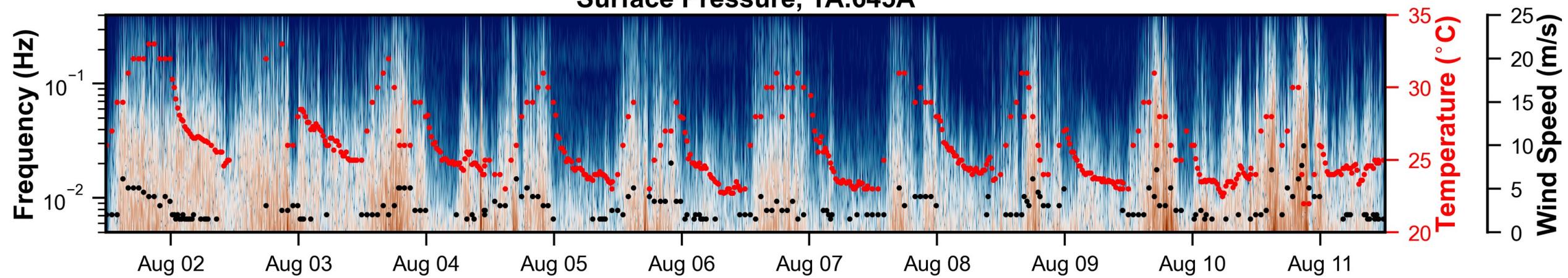
湍流压强场的特征对流速度 c **远小于**地震波波速 c_{seis}

准静态近似

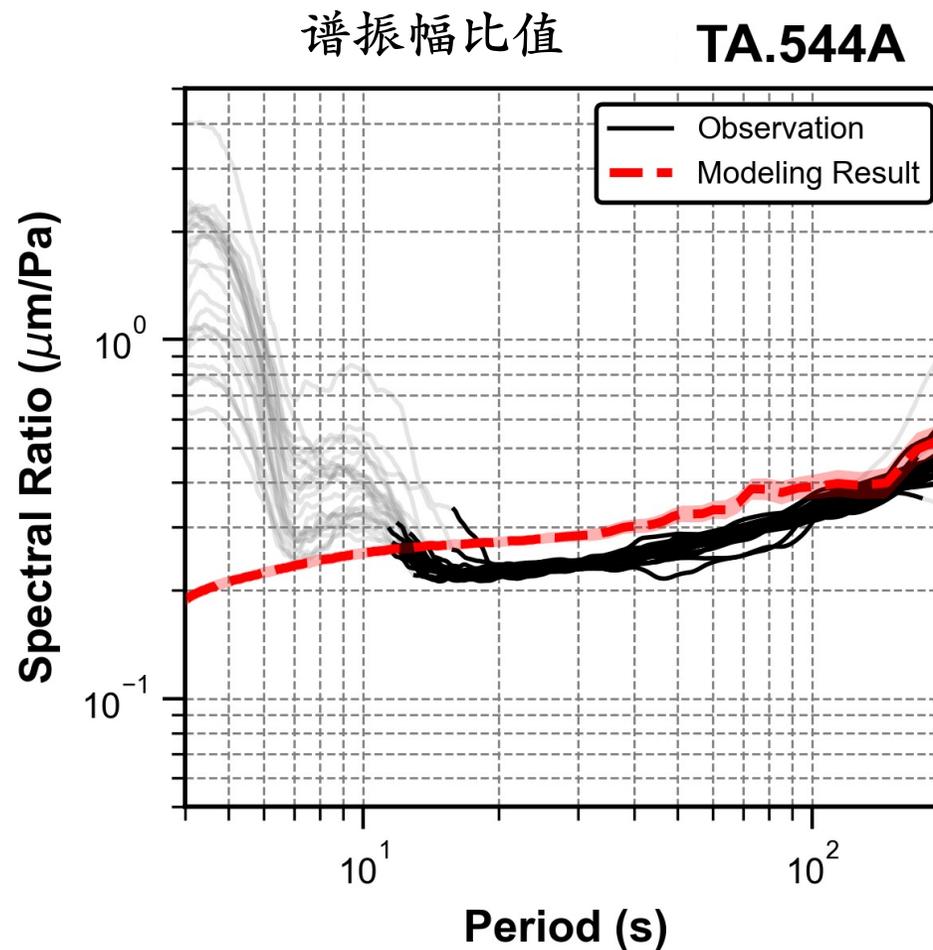
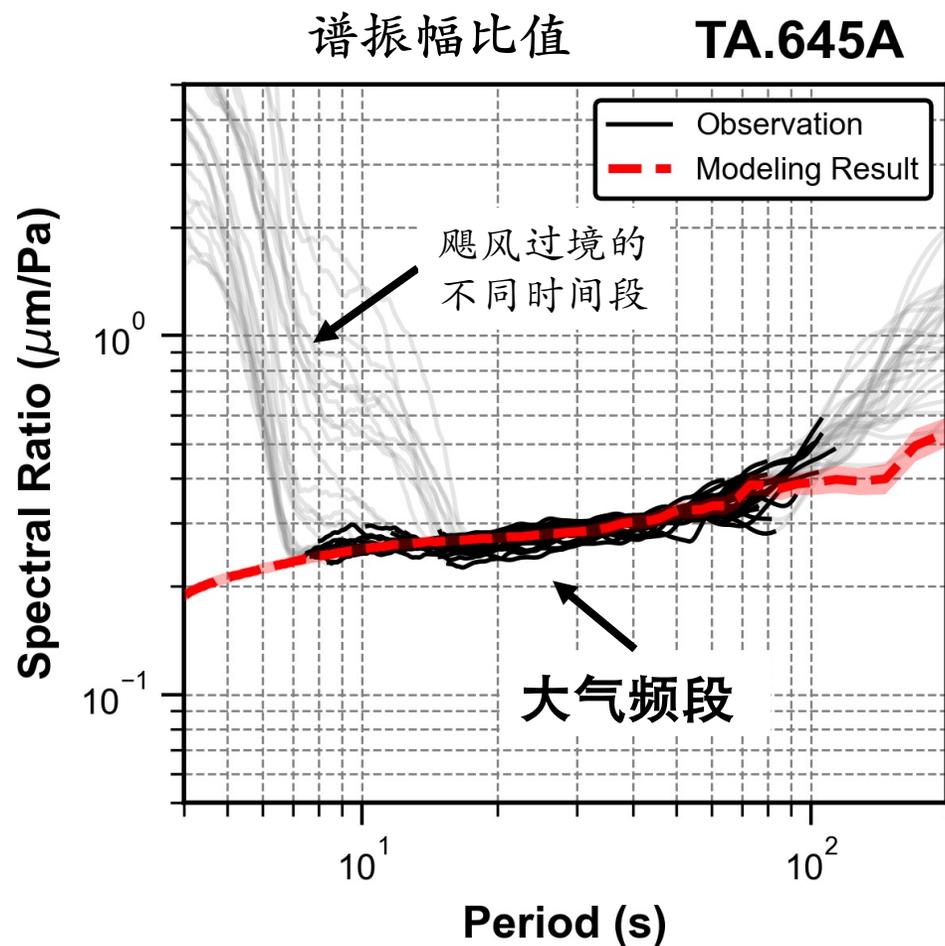
Surface Pressure, TA.645A



Surface Pressure, TA.645A



风噪声具有一定的普遍性: 地表地震台站 + 松软地下介质



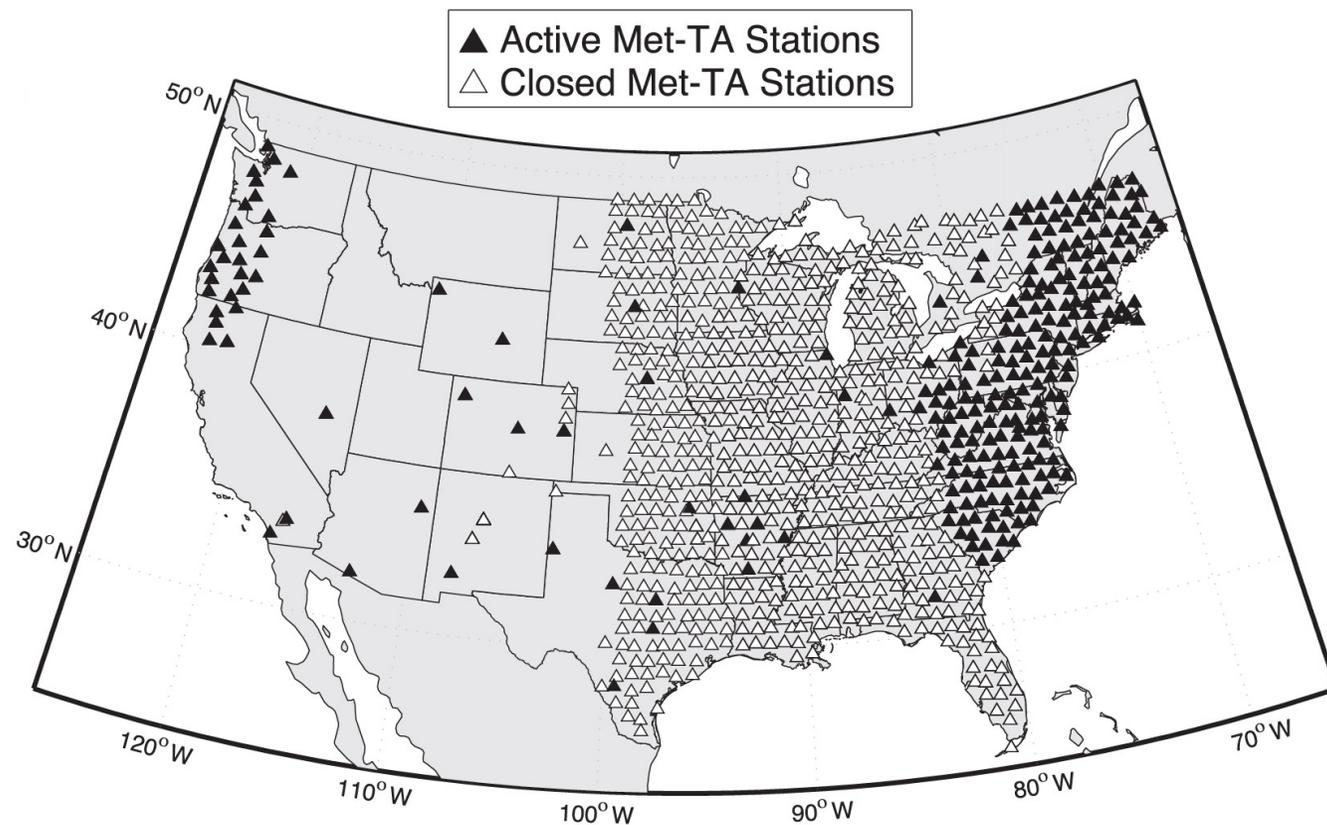
飓风过境的不同时间段, 大气频段中的准静态介质响应是稳定的
利用湍流模拟准确描述噪声源的时空相关性, 可提高反演的可靠性

初期 TA 台站 

地表震动, 次声波信号, 大气压强

Met-TA 台站 

地表震动, 次声波信号, 大气压强,
风速和风向, 温度, 湿度, 降水量



Tytell et al. (2016, *Bull. Am. Meteor. Soc.*)

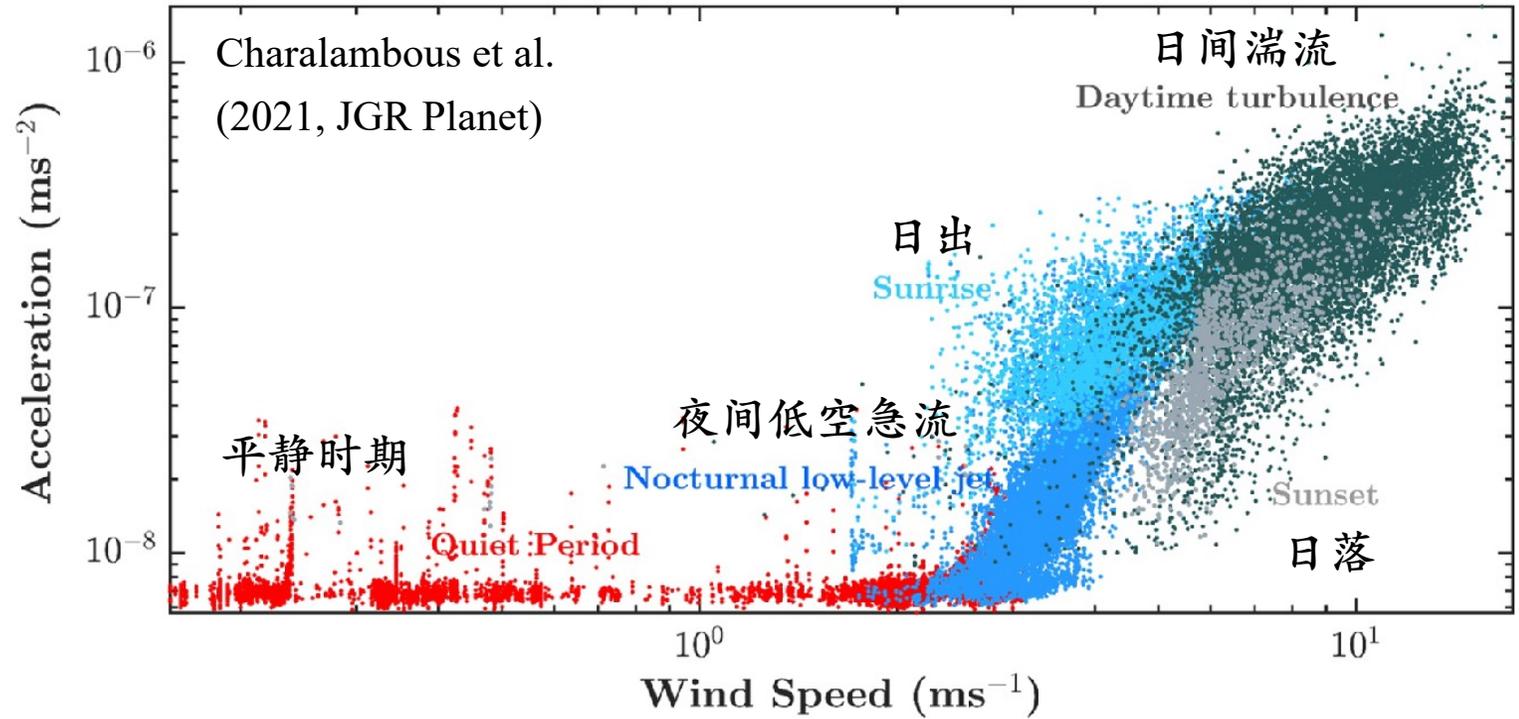
行星探测

Reproduction of an original drawing
by artist Manchu



Spiga et al. (2018, Space Sci. Rev.)

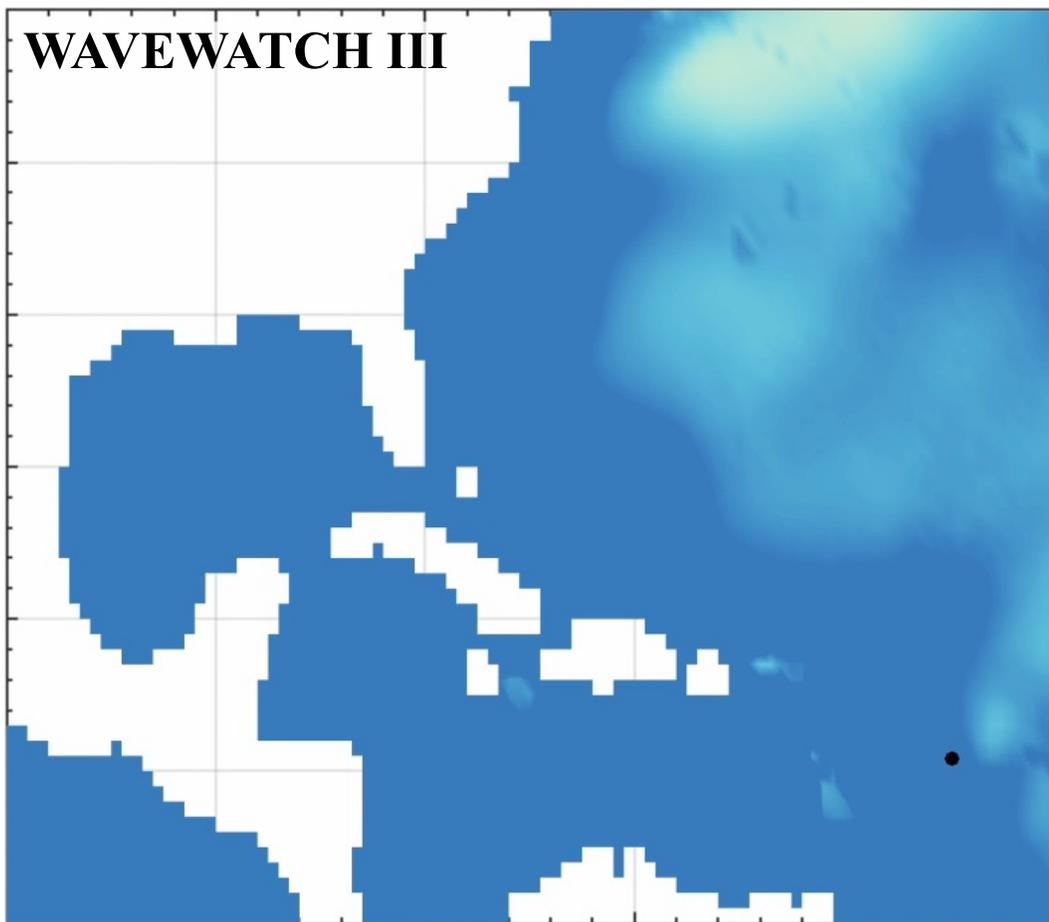
火星的地震环境噪声



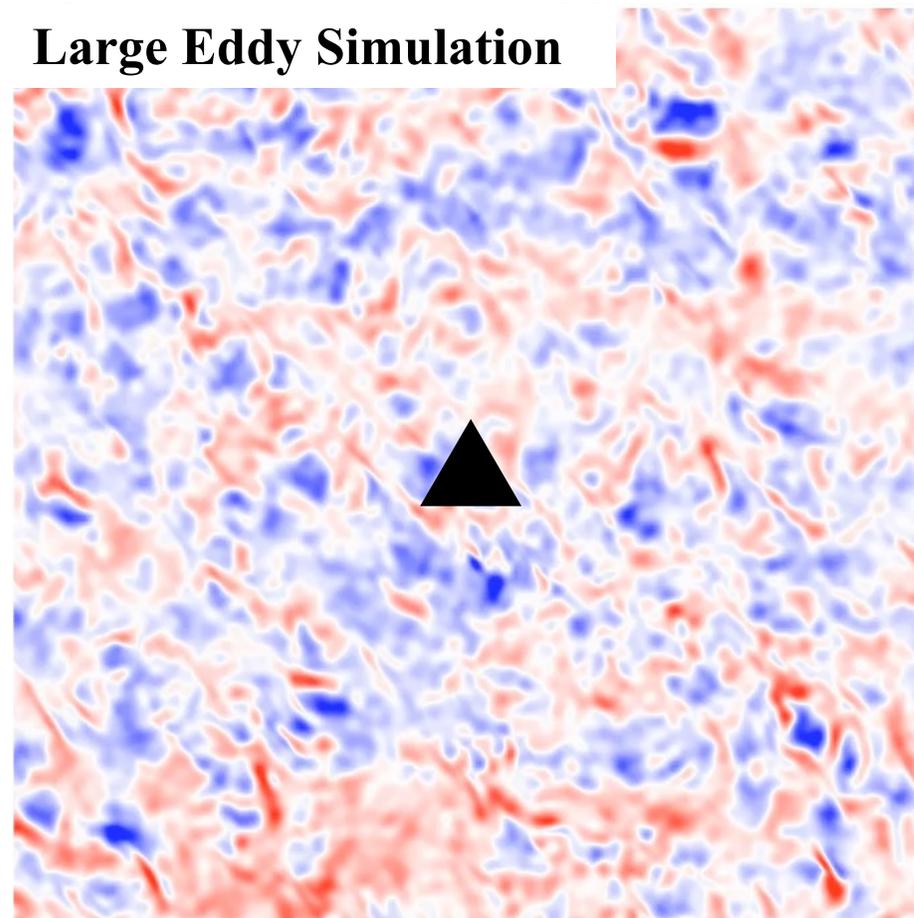
- 火星的环境噪声由大气与固体地球耦合主导
- 尘卷风 (dust devil) 事件
- 约束表层岩石的硬度 (e.g., Kenda et al., 2017, Space Sci. Rev.)

地震环境噪声的研究受益于学科交叉的视野

海浪



大气湍流



感谢大家参加报告会, 请批评指正!

纪晴 斯坦福大学

2024/09/26

Email: qingji@stanford.edu

个人主页: nickji98.github.io

