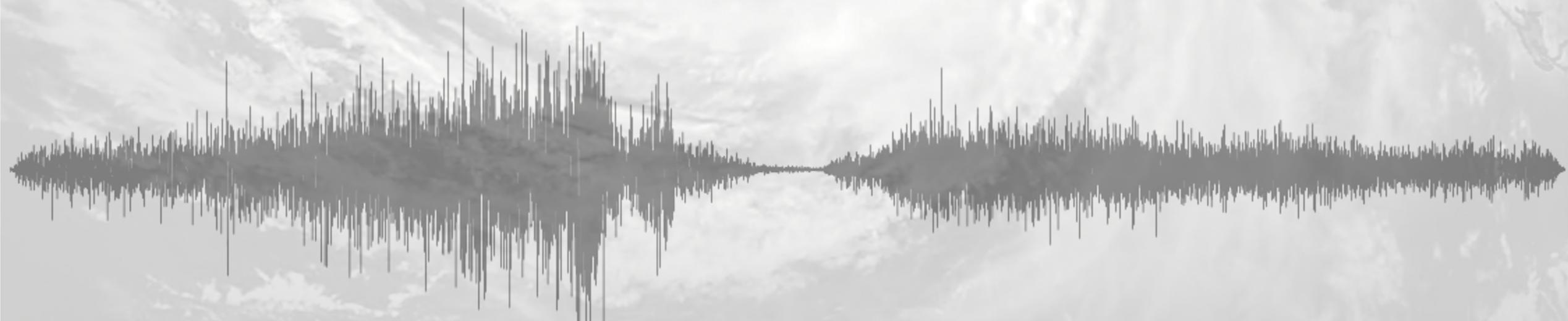


地震环境噪声中来自大气湍流的信号

——以飓风登陆事件为例

纪晴 斯坦福大学

2023/09/22



导师 & 合作者



Prof. Eric Dunham

Geophysics



Prof. Morgan O'Neill

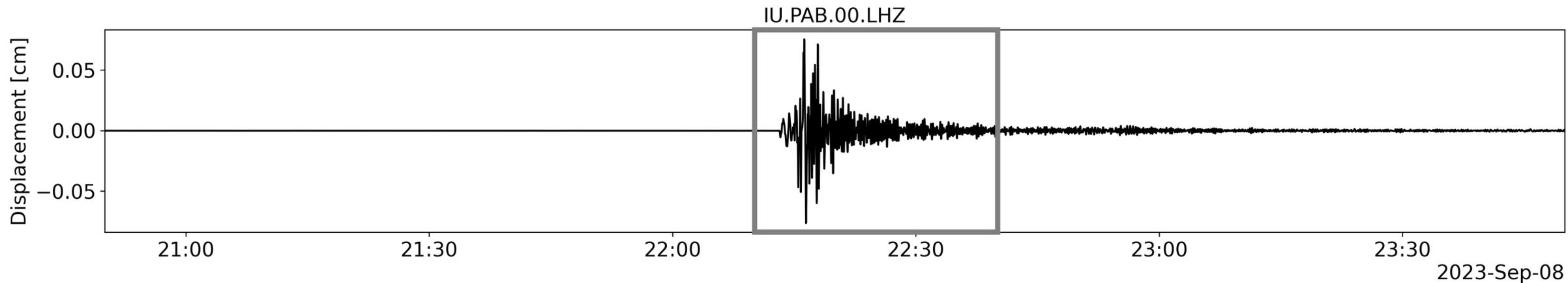
Earth System Science



Ipshita Dey

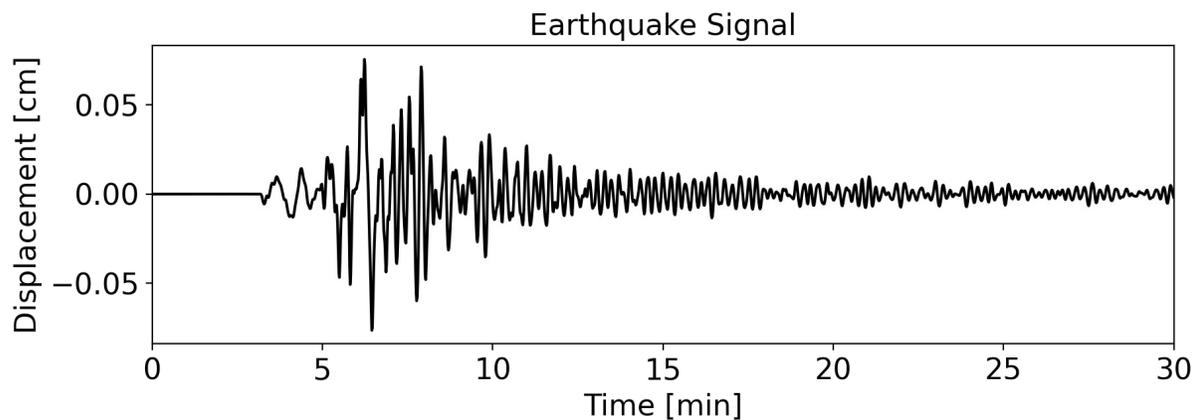
Earth System Science

地震信号 VS 环境噪声



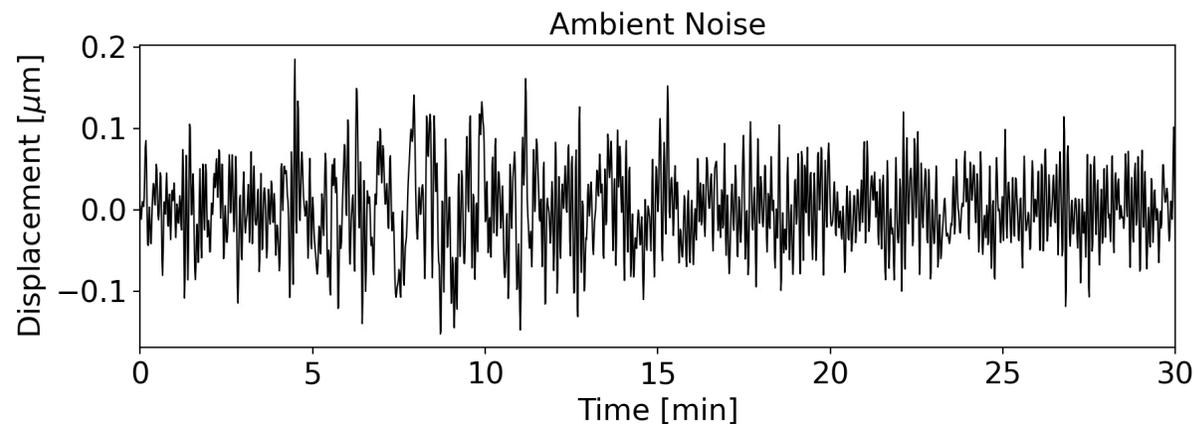
2023年9月8日摩洛哥 6.8 级地震, 位于西班牙的台站 ($\sim 9^\circ$).

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

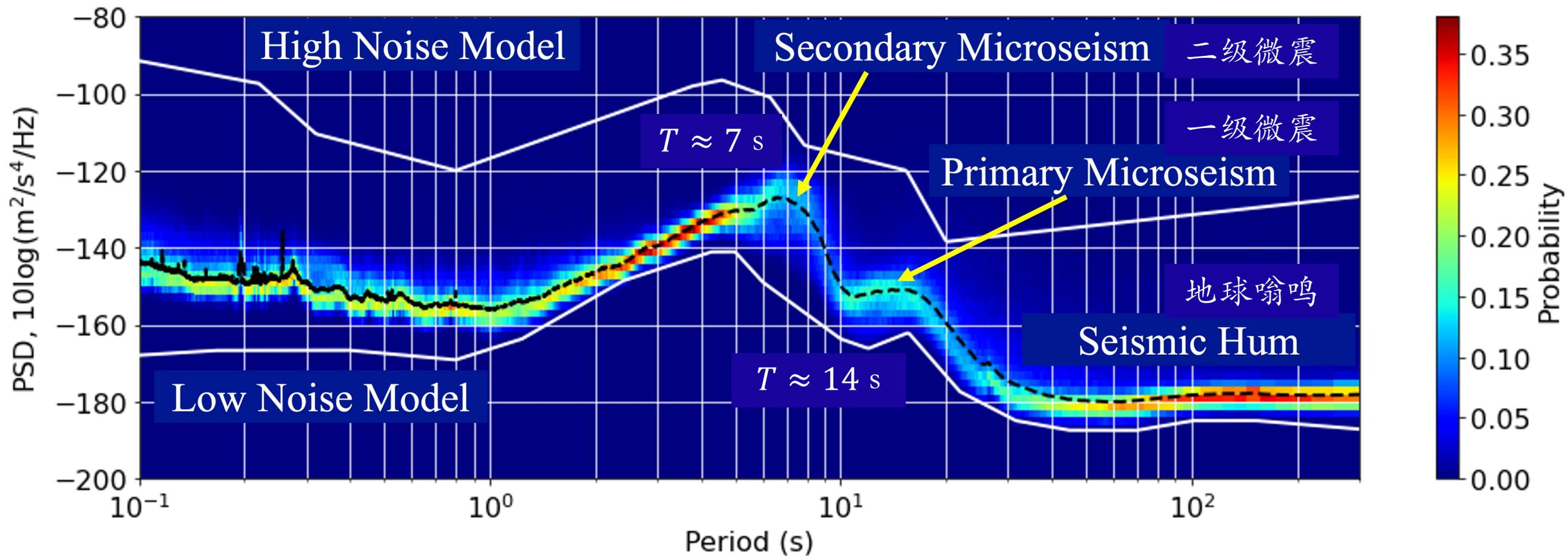


准随机信号

随机过程的统计分析

地震环境噪声的基本特征

IU.TUC.BHZ 分析一年噪声数据



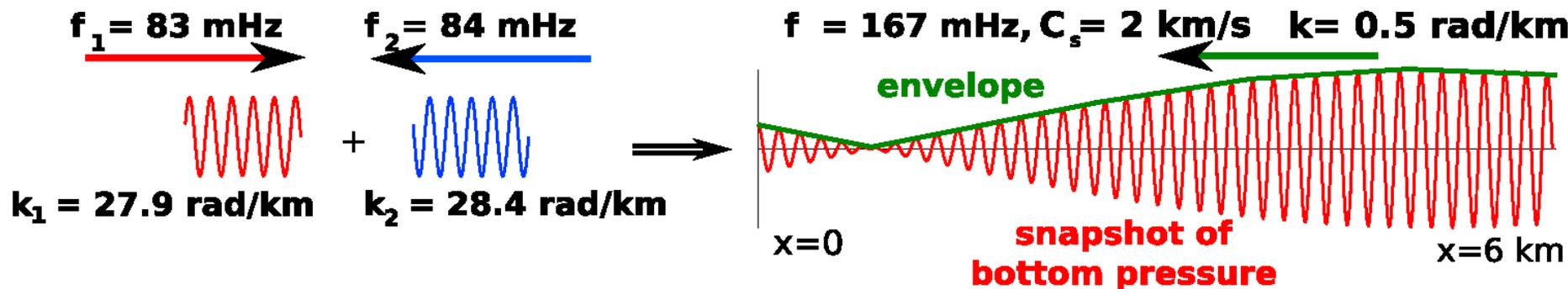
人类活动噪声

海洋噪声

大气噪声

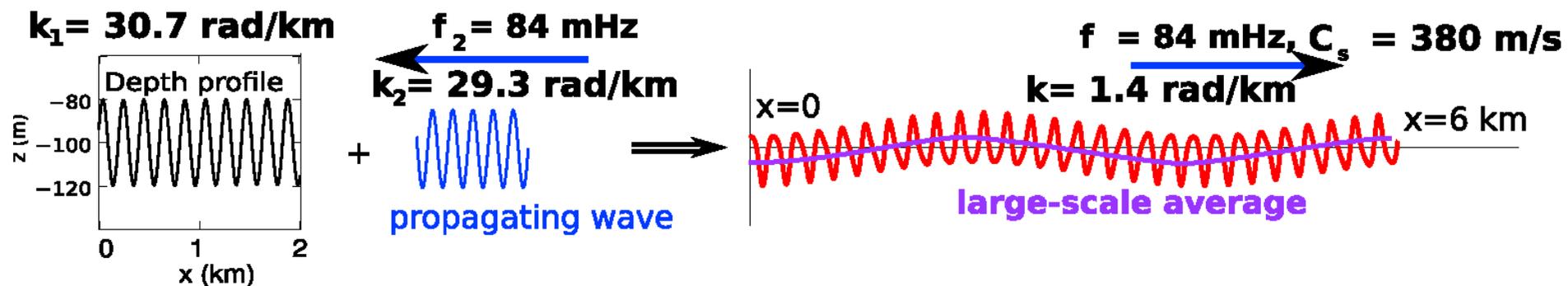
海浪作为噪声源

二级微震
(Secondary Microseism)



频率关系: $f_{seis} \approx 2f_{sgw} \approx 7 \text{ s}$

一级微震
(Primary Microseism)



频率关系: $f_{seis} \approx f_{sgw} \approx 14 \text{ s}$

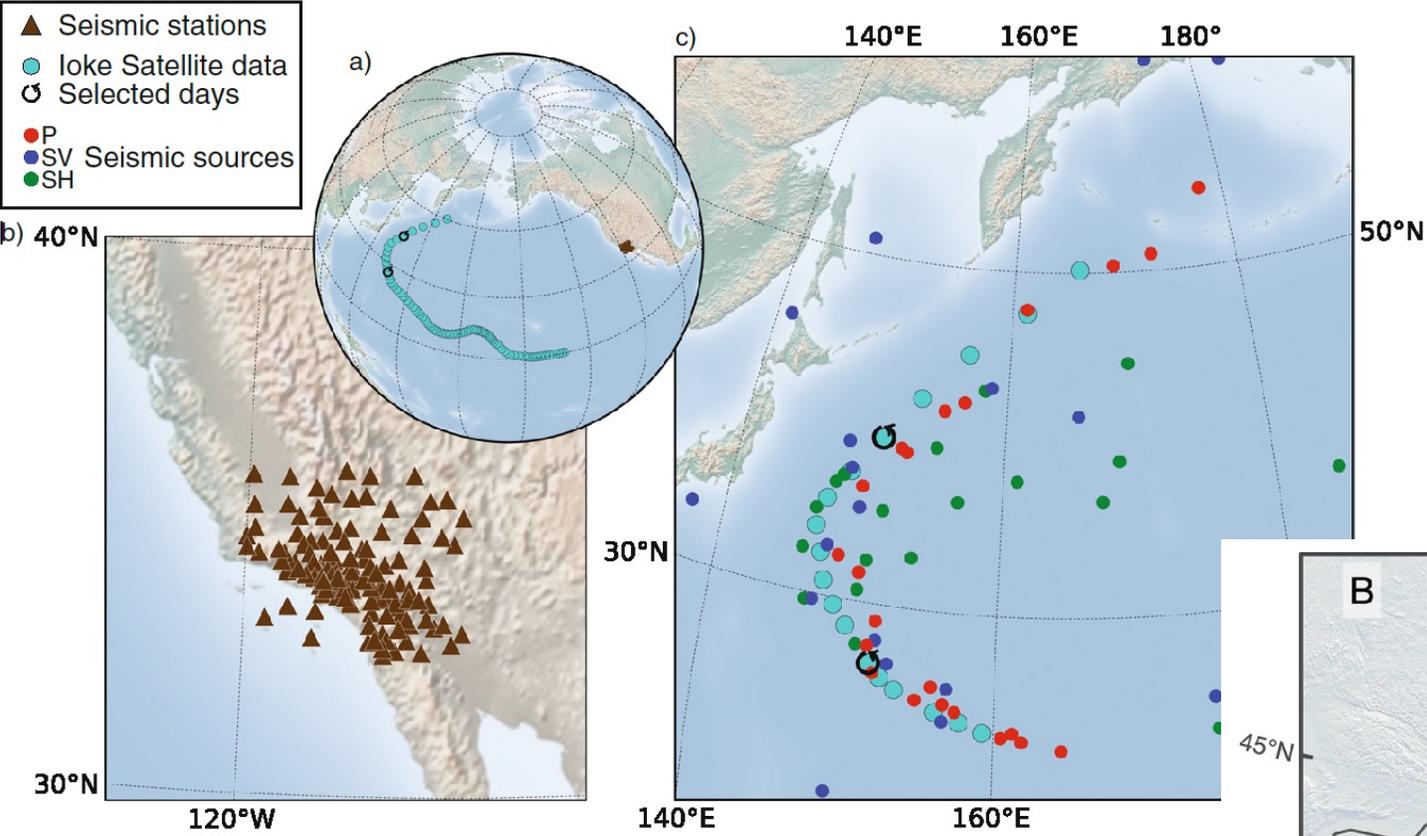
示意图取自 Arduin et al. (2015, GRL)

理论可参考 Longuet-Higgins (1950, Philos. Trans.), Hasselmann (1963, Rev. Geophys.)

海上风暴的地震学印记

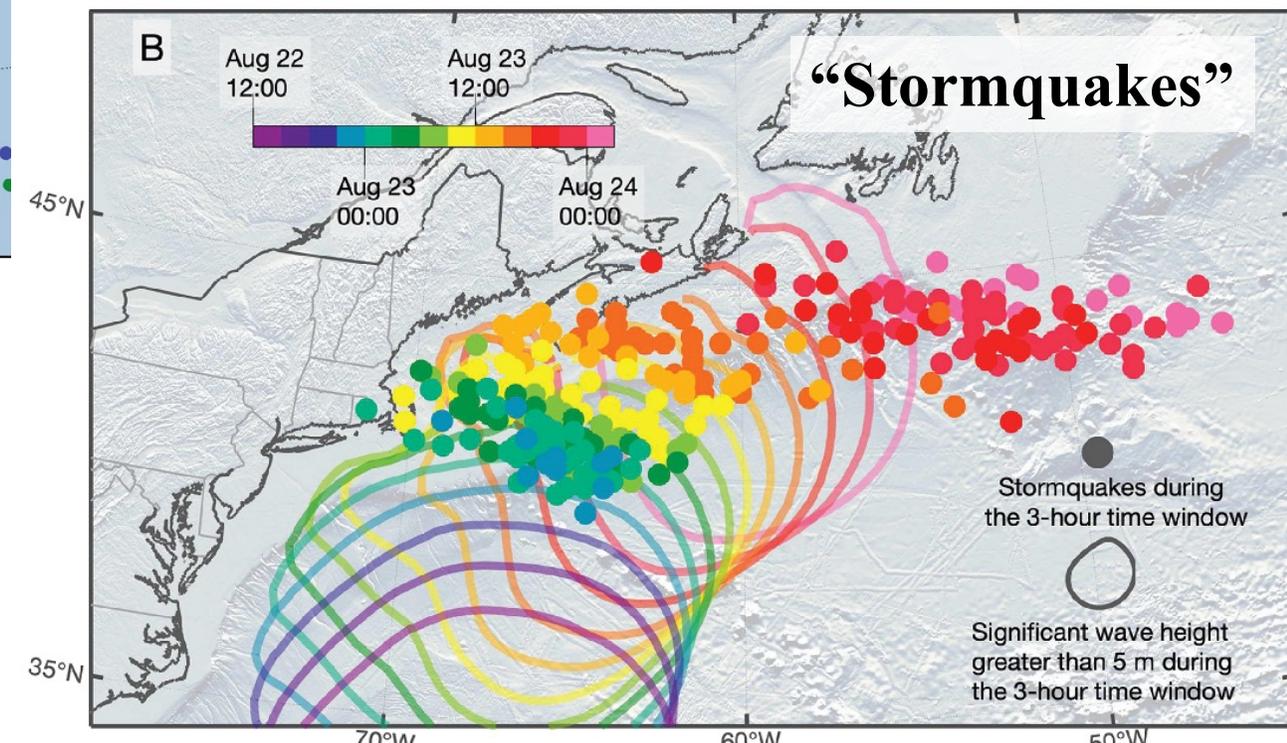
强台风 / 飓风可激发等效的地震震源 (最高可达~ M3)

Fan et al. (2019, GRL)



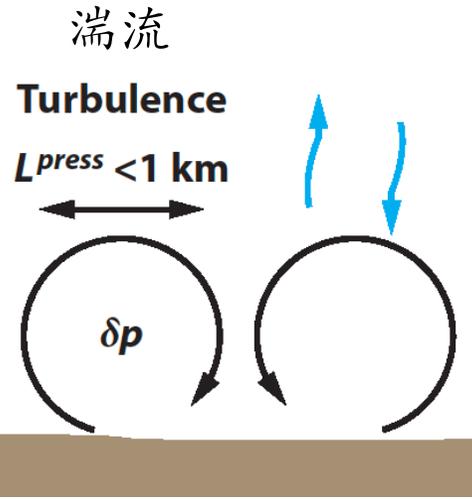
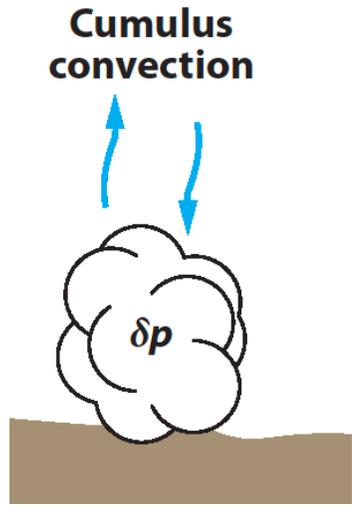
Retailleau & Gualtieri (2021, Nat. Commun.)

飓风和台风均为强热带气旋(风暴)
因地域差异而得名不同

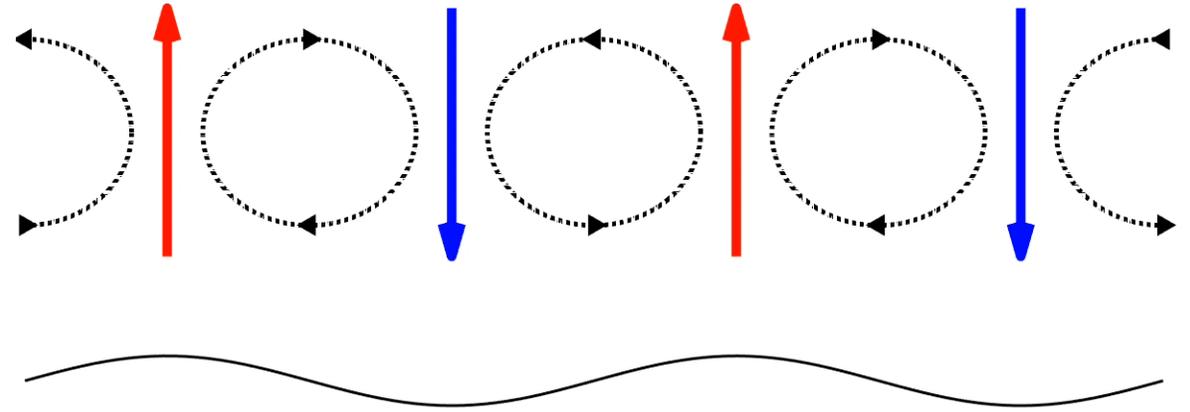


来自大气的噪声源

积云对流
(小尺度热对流)



风引起的压力波



示意图取自 Nishida (2013, Annu. Rev.)

仅用经验模型描述噪声谱
针对地球背景自由振荡 ($< 5 \text{ mHz}$) 而提出

简化模型 (Sorrells 1971, Geophys. J. R. astr. Soc.)
涉及周期 $\sim 20 - 100 \text{ s}$ 的大气噪声
与大气湍流之间的关联？

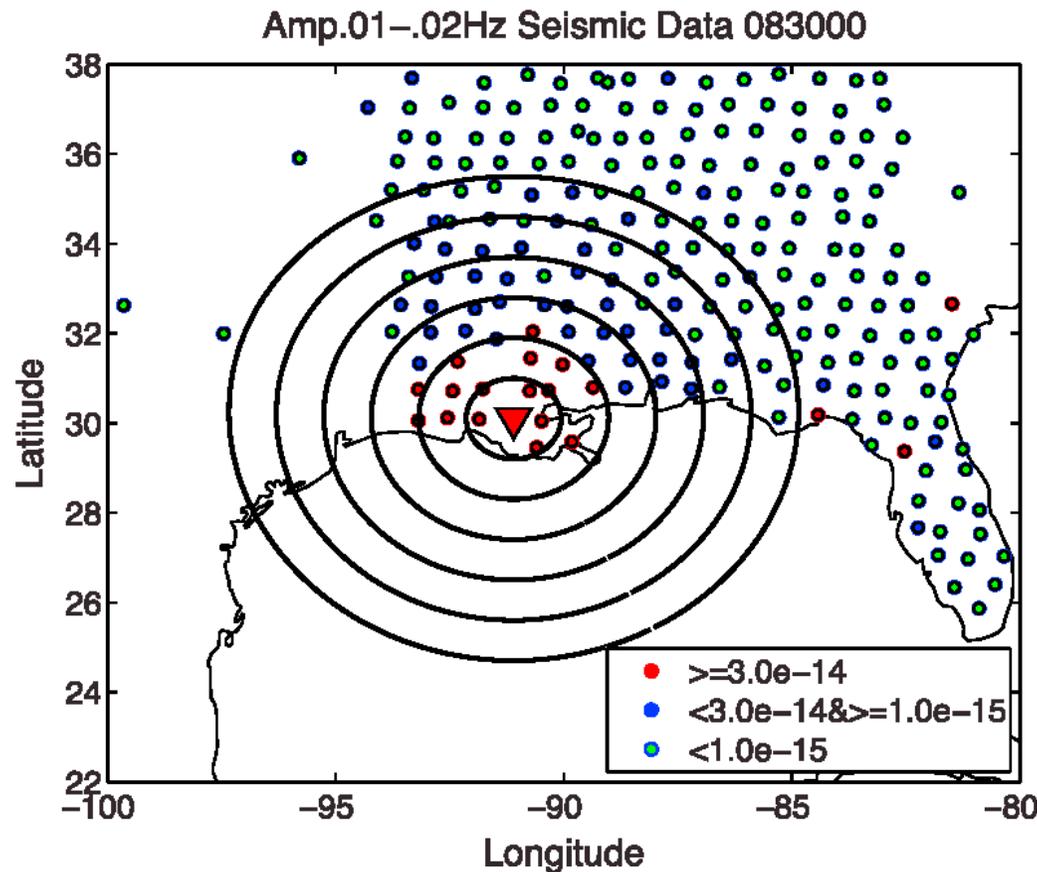
飓风登陆事件: 强大气+海洋噪声源

Tanimoto & Valovcin (2015, JGR) 选取飓风“艾萨克”事件为研究对象

但其提出的“飓风随机激发地震波”模型与观测数据的相干性分析结论不一致

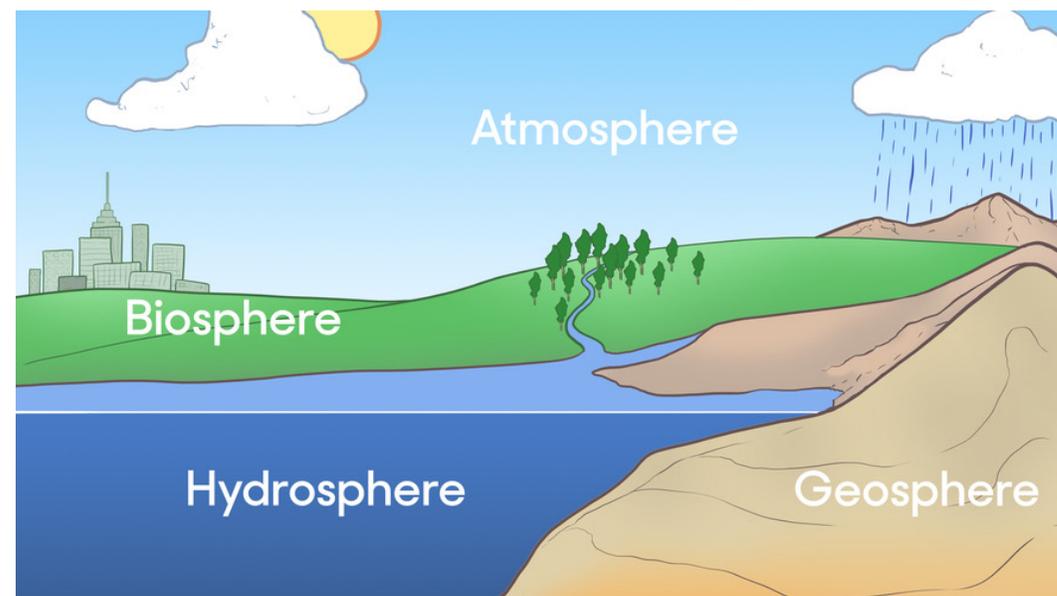
本报告工作

- 观测: 更高分辨率的噪声信号分析
- 建模: 更准确的物理模拟来论证噪声激发的机制
- 交叉学科: 与大气科学结合来描述大气噪声源



1. 飓风“艾萨克”登陆事件的地震学观测

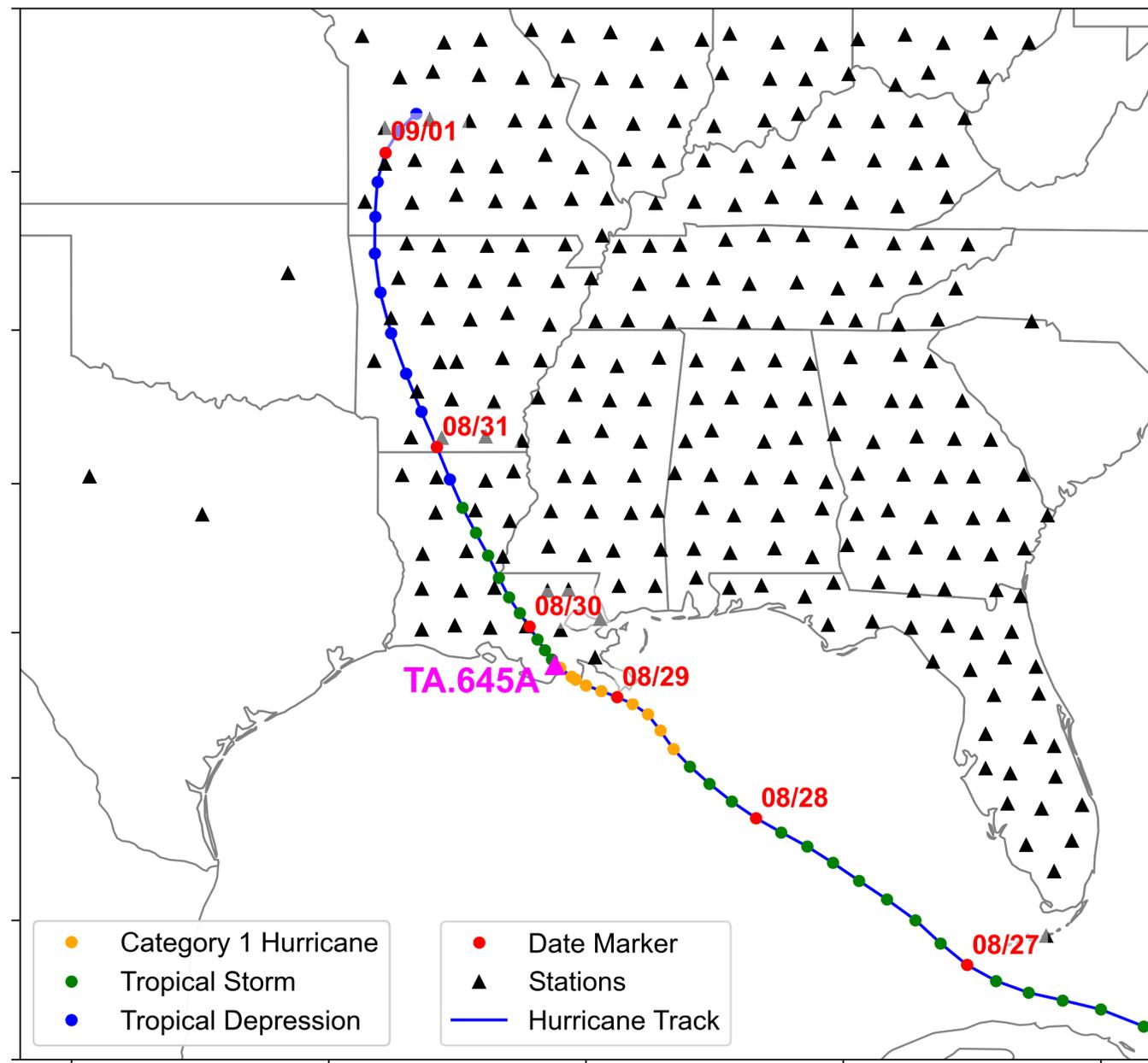
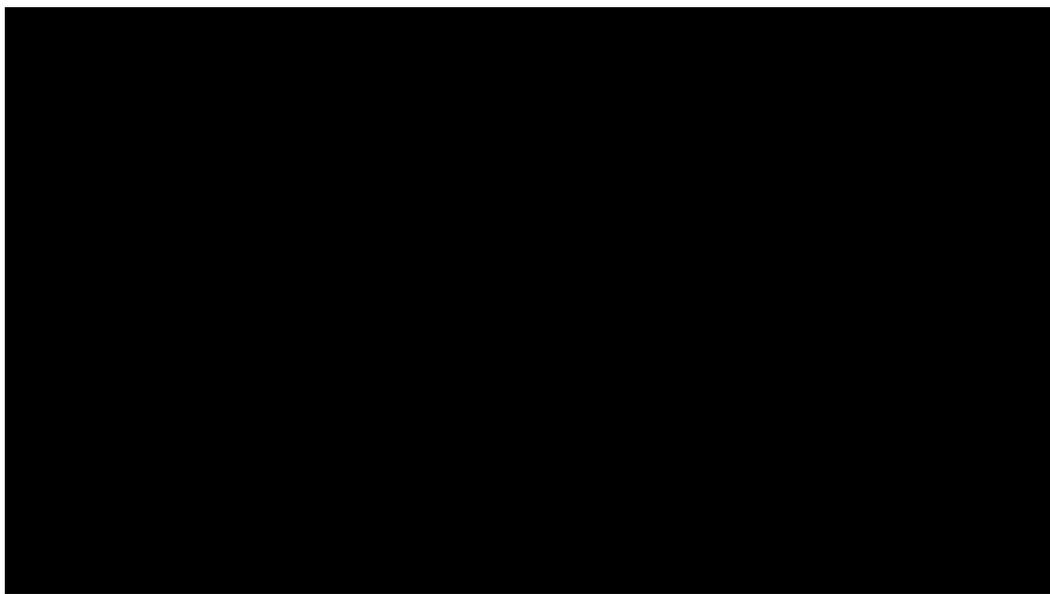
- 短时窗傅立叶分析 → 小波分析, 更高的时频分辨率
- 地震学视角的基本飓风结构
- 不同频段, 不同噪声源, 不同噪声产生机制



飓风路径 & 地震台站

飓风“艾萨克” (Isaac, 2012)

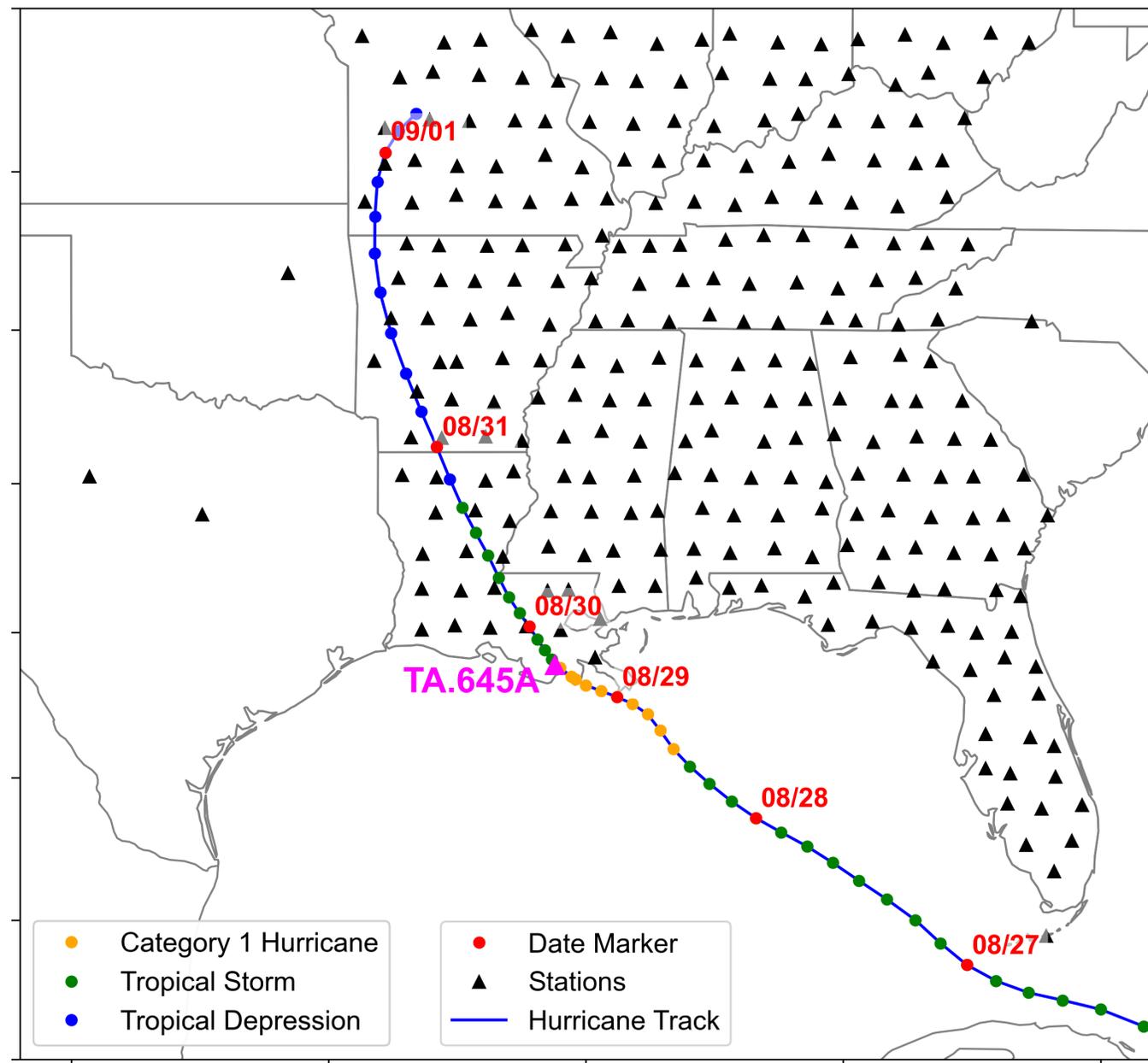
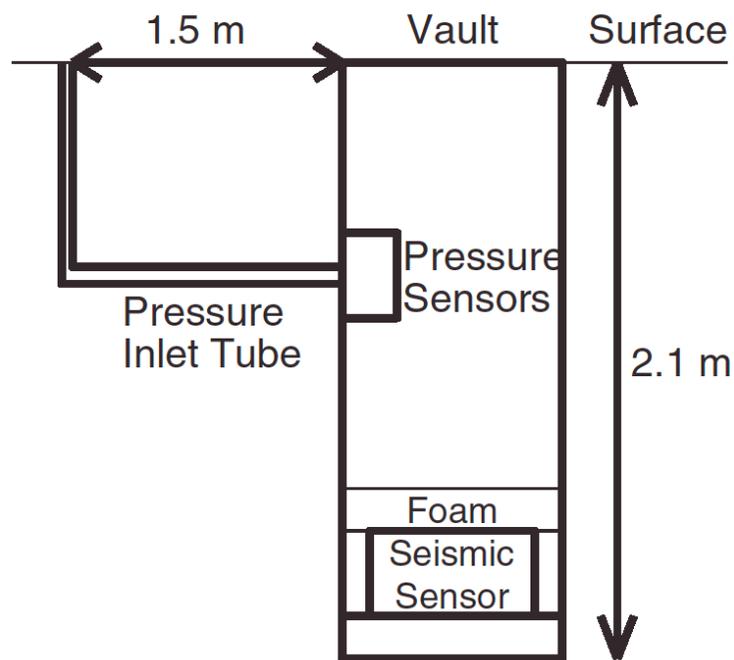
- 2012/08/29 00:00 登陆美国路易斯安那州
- 登陆时为一级飓风 (~台风等级)
- TA (Transportable Array) 地震台阵位于该飓风路径周边



飓风路径 & 地震台站

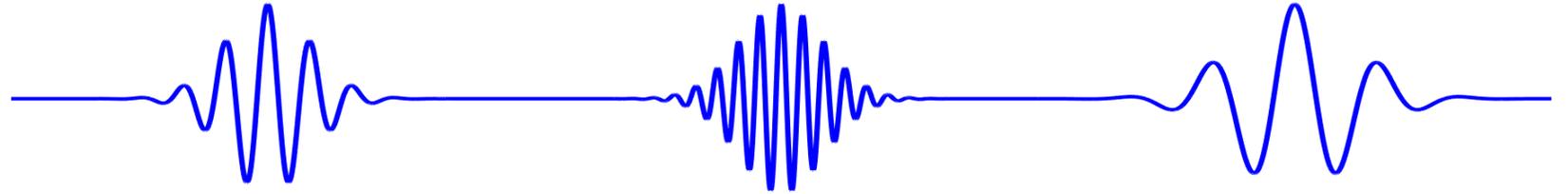
地震台站数据

- 三分量地震仪 + 次声波 (infrasound) 监测仪
- 长周期频道 (1 Hz 采样, LH[ZNE] + LDF)
- 每一台站均有上述两种数据

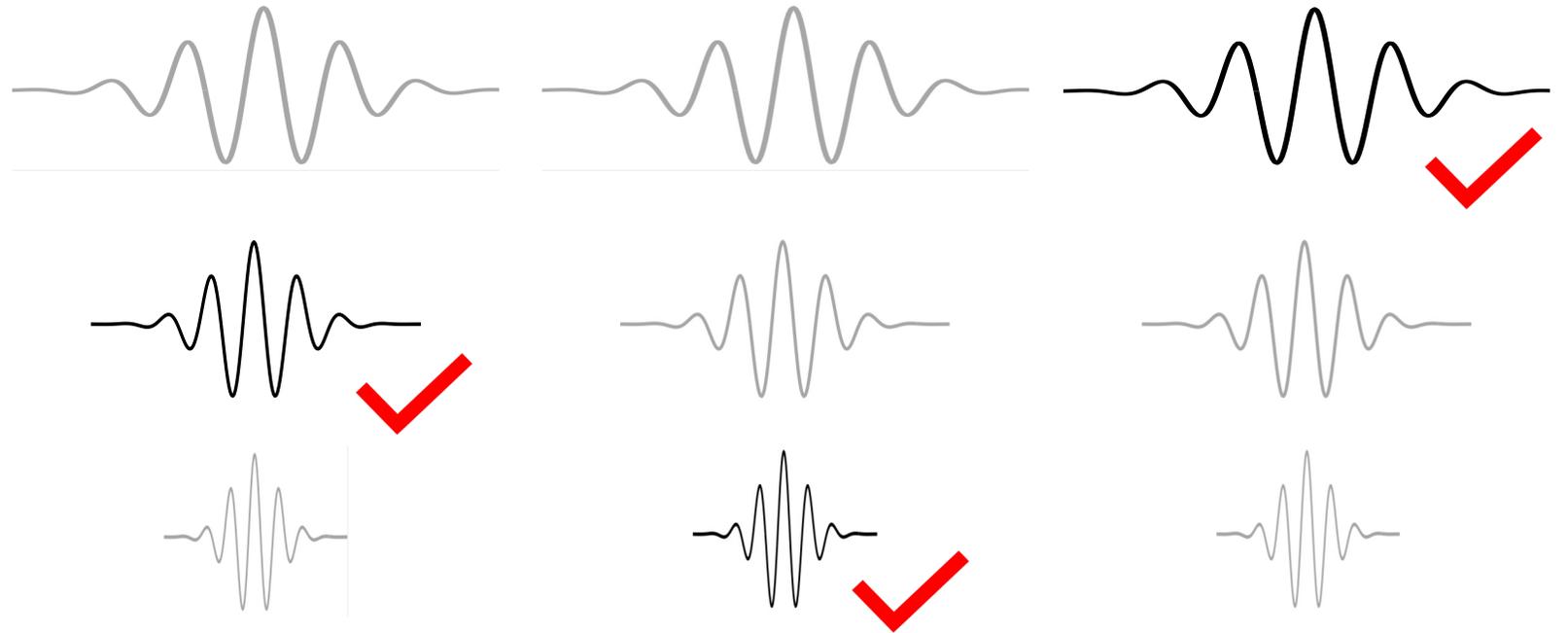


基于小波变换的时频分析

非平稳信号 $x(t)$



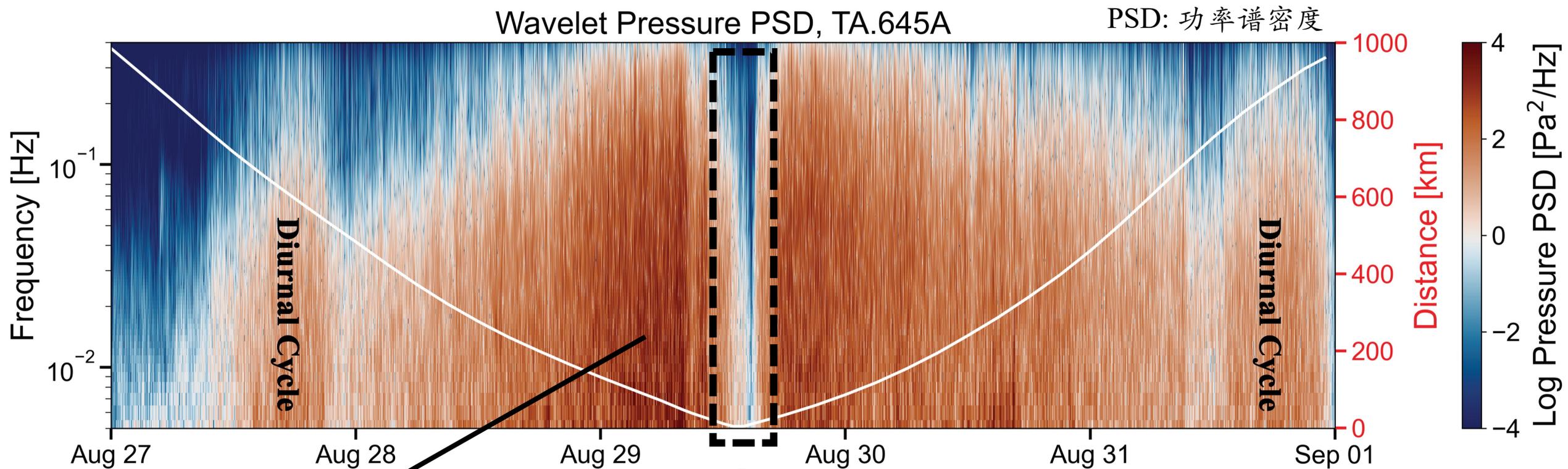
通过与 Morlet 小波的卷积,
计算频率成分 f 在时间 t 的
振幅和相位



$$x(t) \rightarrow W_x(f, t)$$

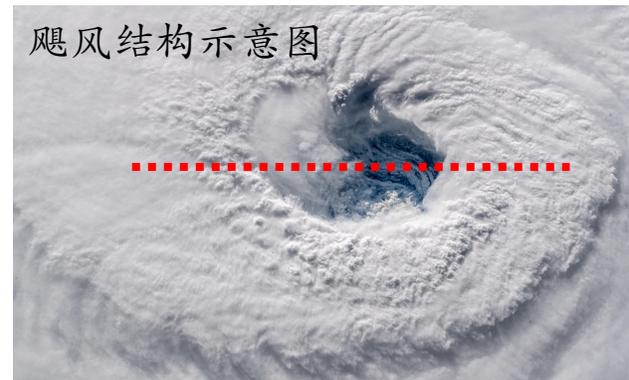
相比于时窗傅立叶分析的优势：可提取局域的时频特征，时窗长短与频率成分直接对应，分辨率更高

次声波信号的时频分析

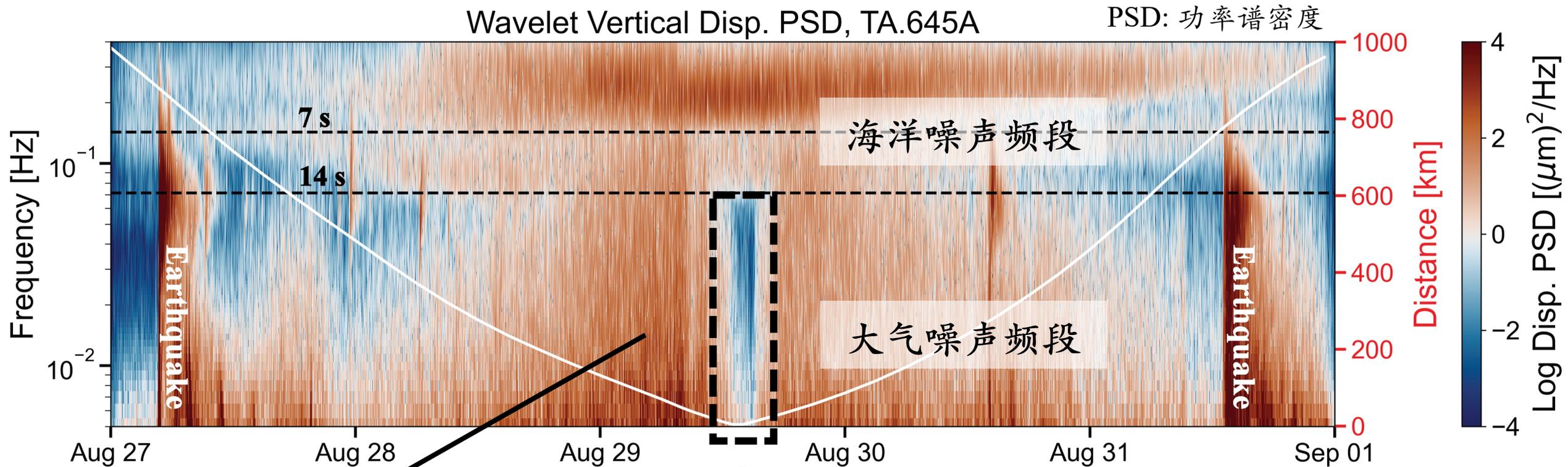


风眼墙 (eyewall)
风力最强的区域

飓风眼 (eye)
气旋中心的“平静”区域



地震信号的时频分析



风眼墙 (eyewall)

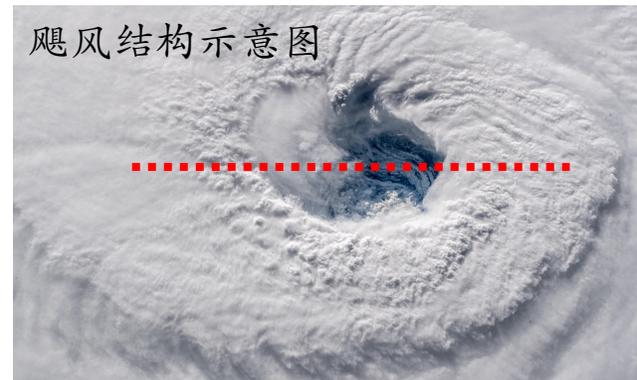
风力最强的区域

台风眼

气旋中心的“平静”区域

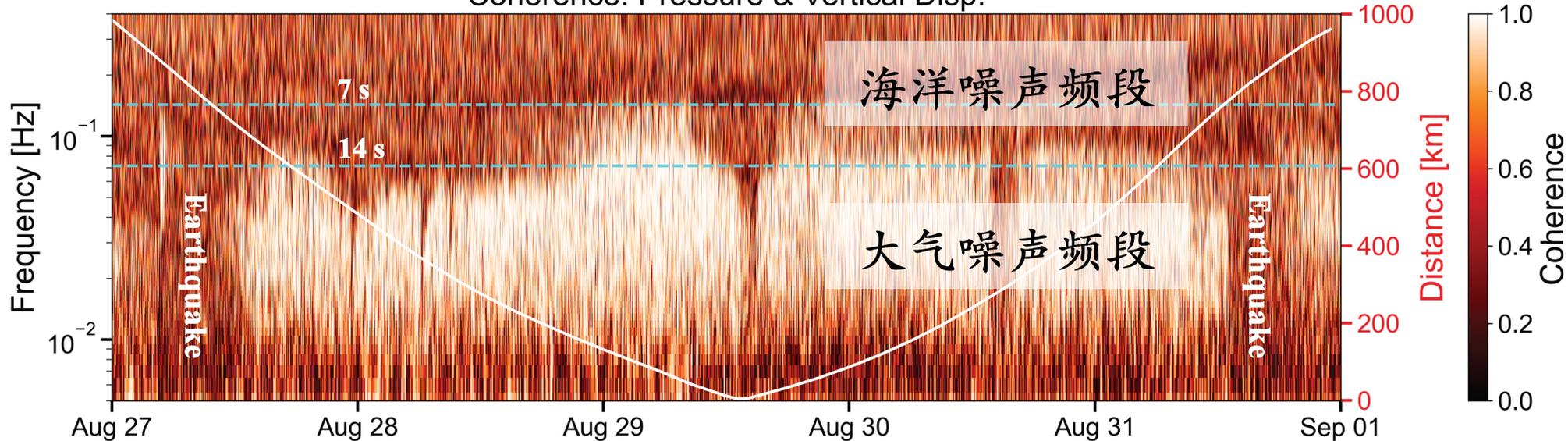
地震学视角： ~ 40 km

台风结构示意图

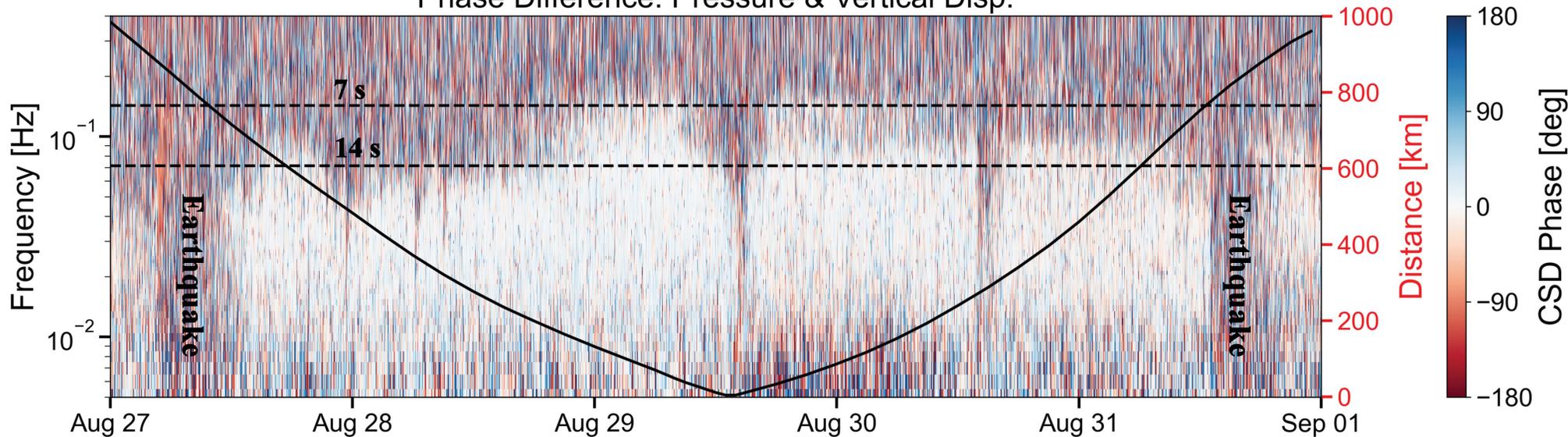


相干性分析 (Coherence)

Coherence: Pressure & Vertical Disp.



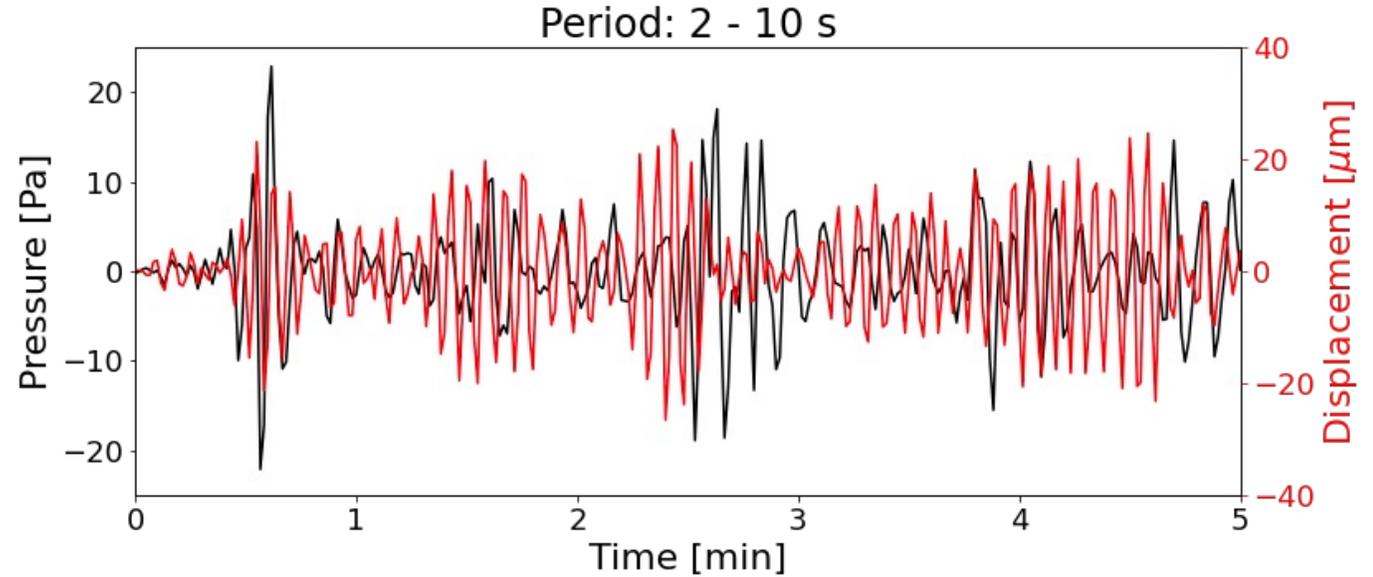
Phase Difference: Pressure & Vertical Disp.



飓风激发的海洋噪声 VS 大气噪声

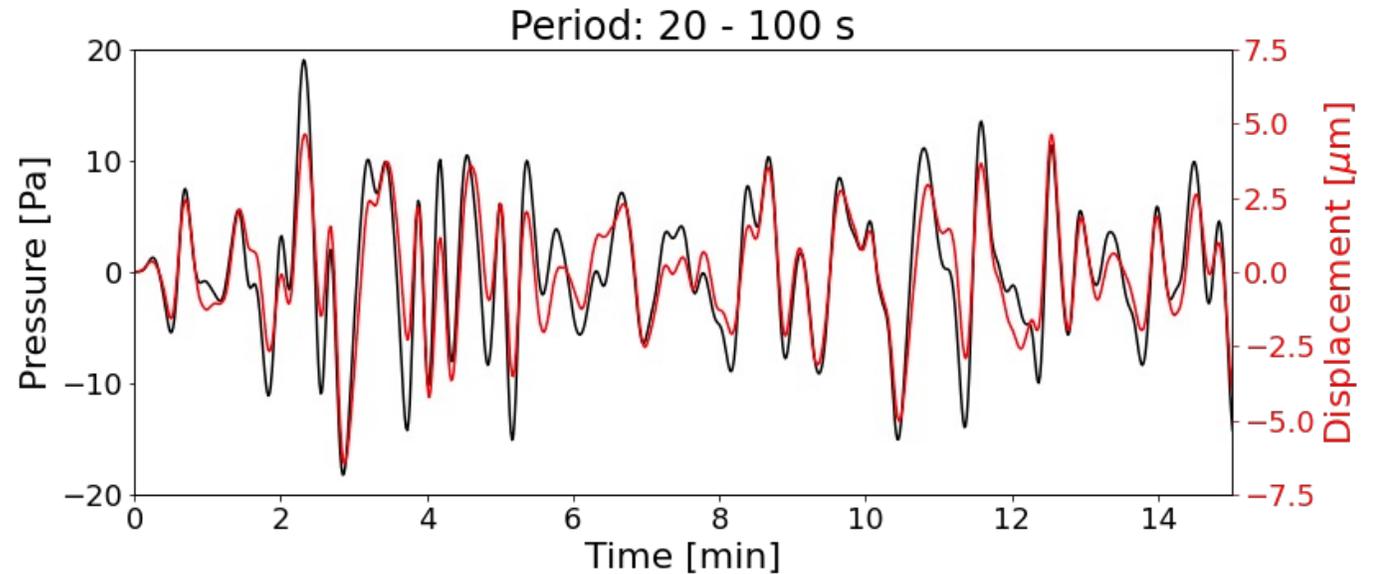
海洋噪声频段 (~ 3 - 20 s)

- 噪声源于飓风激发的海浪
- 海浪间相互作用激发地震波 (microseism)
- 地表垂直位移与压强不关联



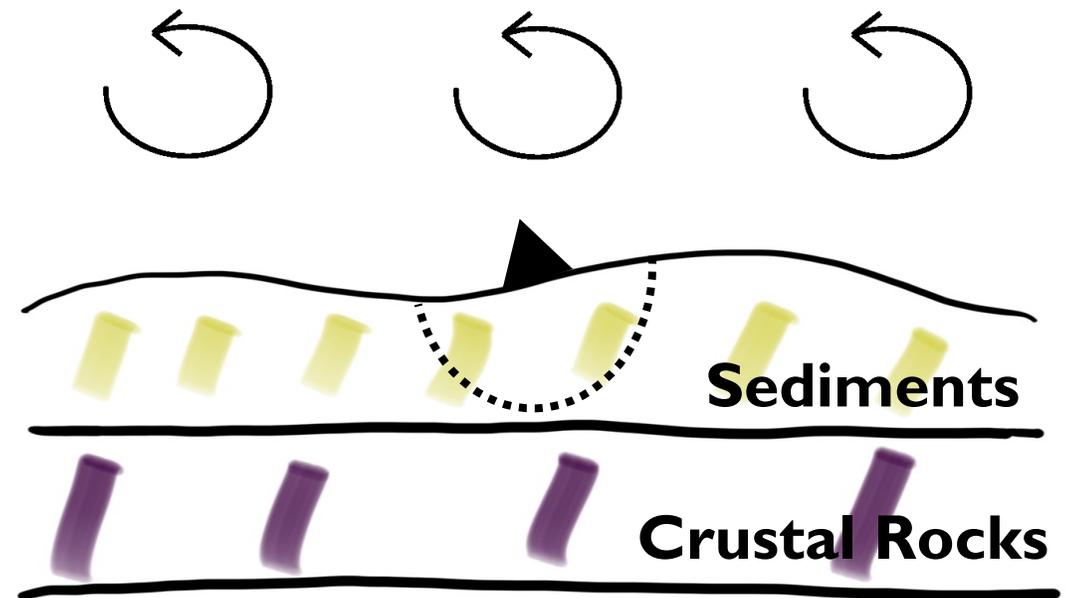
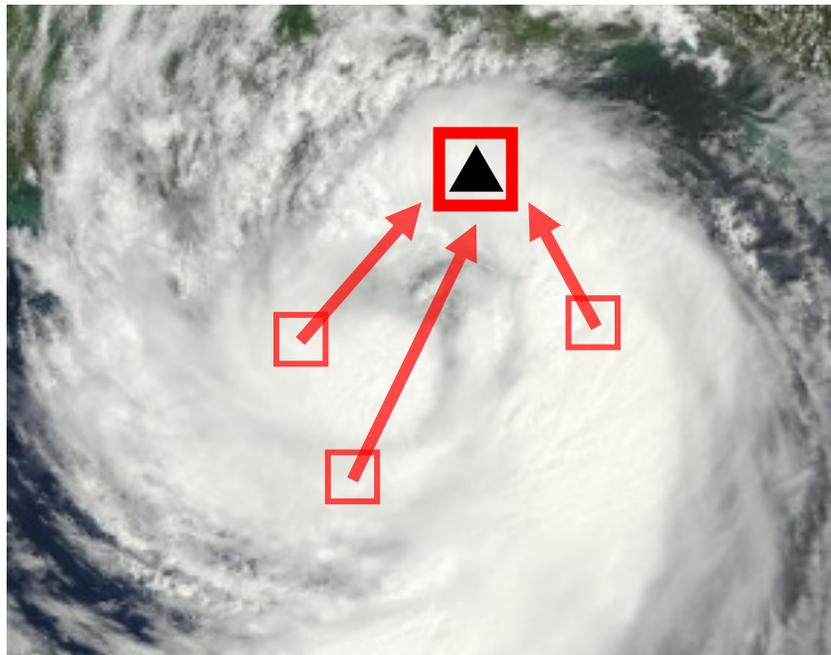
大气噪声频段 (~ 20 - 100 s)

- 噪声源于飓风内部的湍流
 - 地表垂直位移与压强呈现高相干性
 - 产生机制应为大气与固体地球之间的局域准静态耦合 (**local quasi-static**).
- 这与过往研究提出的模型相悖.



2. 飓风尺度的物理建模：环境噪声的数值模拟

- 结合大气科学数据与湍流研究的结论描述噪声源
- 更准确的跨尺度的格林函数的计算
- 局域准静态 (local quasi-static) 耦合占主导地位



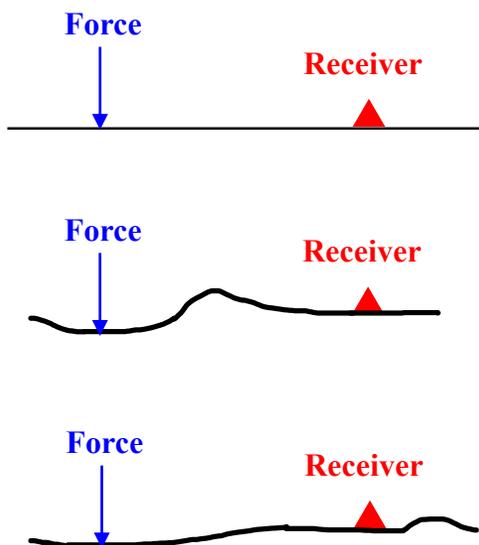
前述模型

基本框架 (Tanimoto & Valovcin, 2015, JGR):

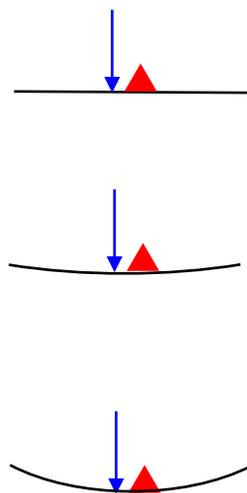
- 将飓风网格化为若干互不相关的垂直点力源
- 对于某一台站, 把所有点力源贡献的功率谱密度 (PSD) 进行叠加

结论: 噪声产生机制为飓风随机激发的地震波

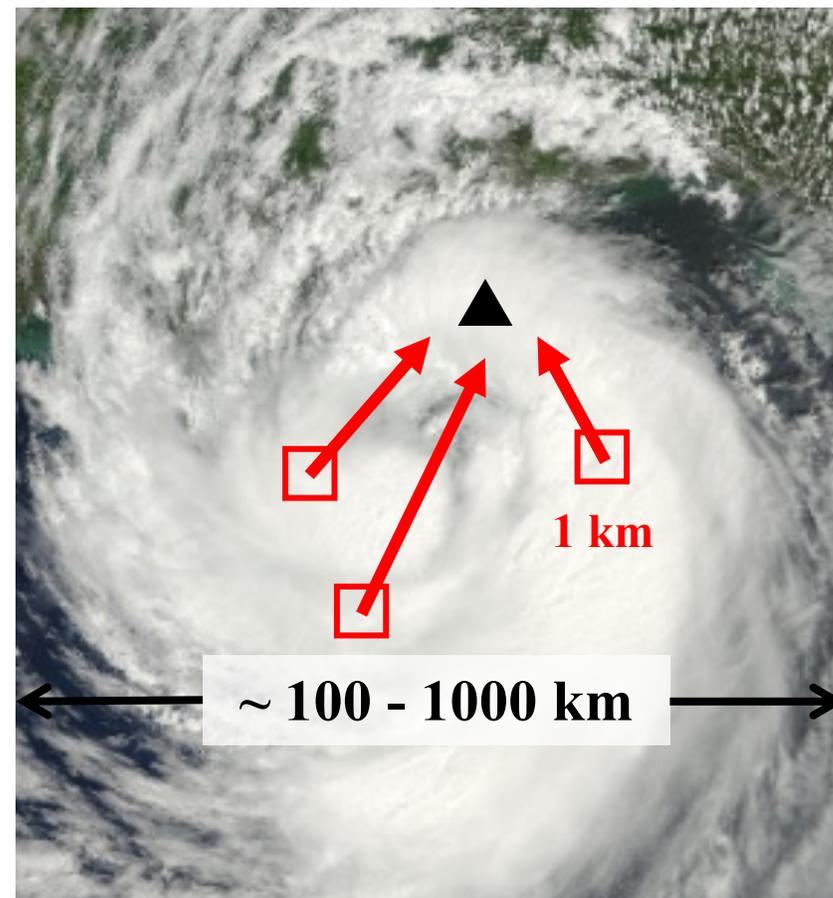
远场, 动态响应



近场, 准静态响应



观测的相干性分析
对应于此



三个空间尺度

r : 力源与台站距离

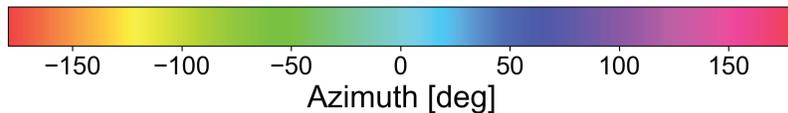
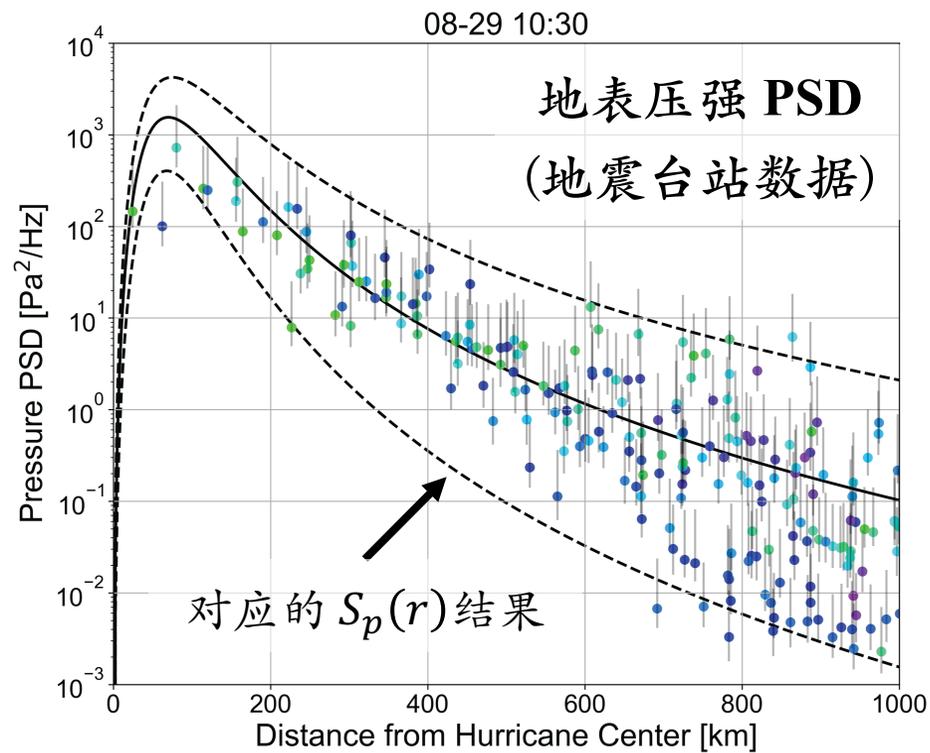
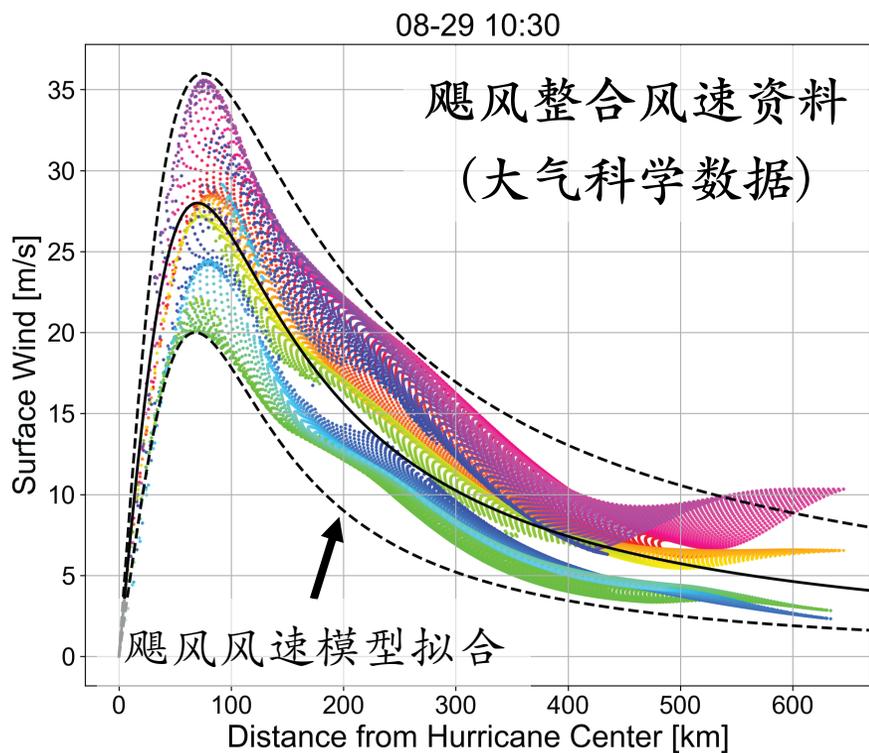
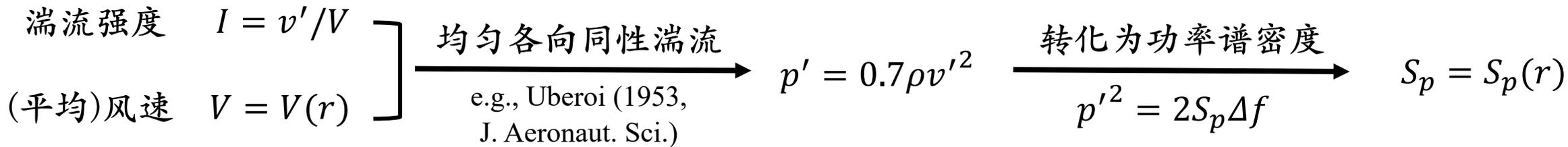
λ : 地震波的波长

L : 湍流的相关尺度

近场 / 远场

离散网格间距

噪声源 PSD 的物理描述



大气噪声的数值模拟 (垂直分量)

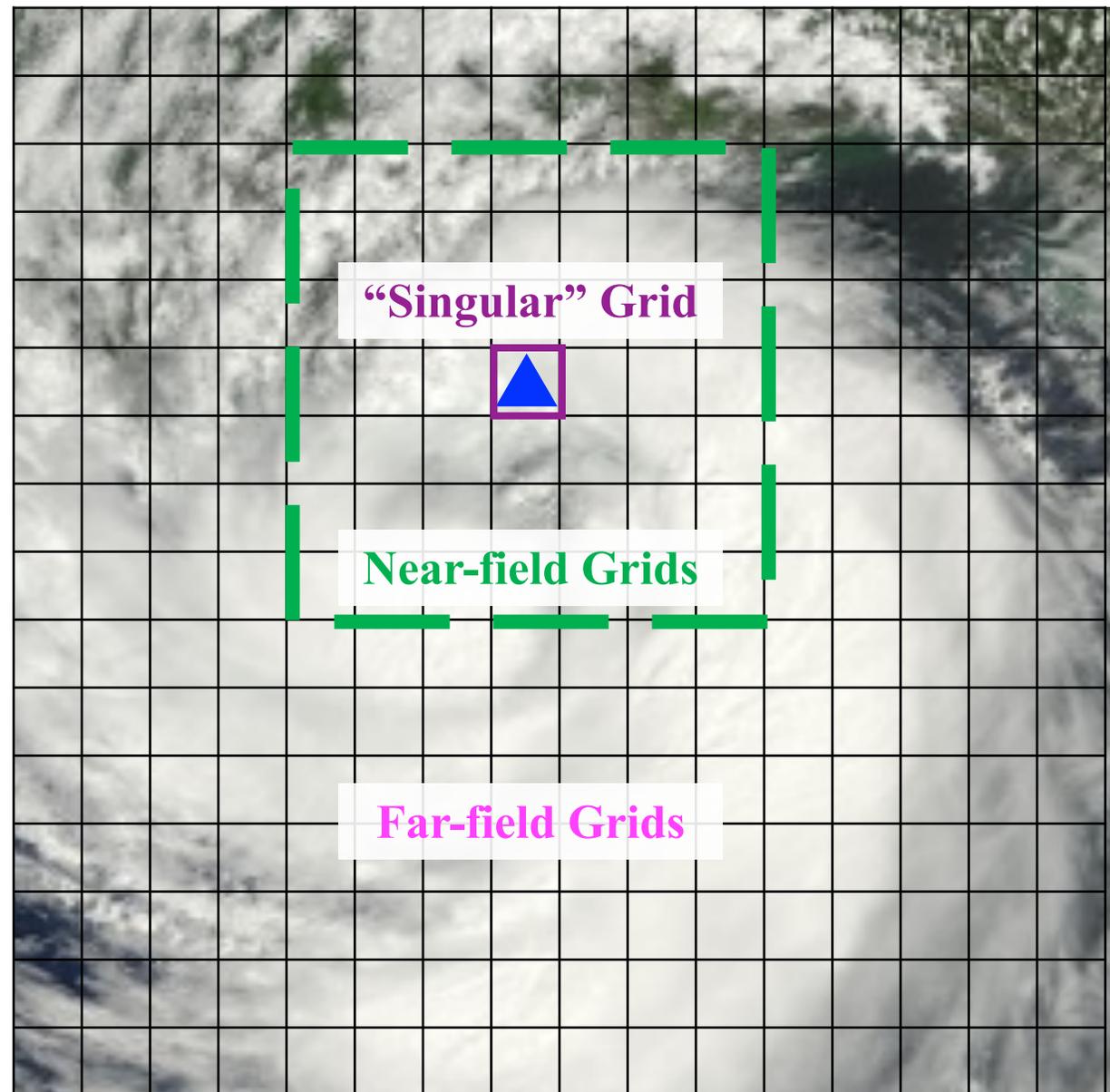
$$S_z(\mathbf{x}_R, f) = \sum_{i=1}^{N(L)} |\tilde{G}(\mathbf{x}_R, f; \mathbf{x}_i)|^2 S_p(\mathbf{x}_i, f) L^4$$

难点

- 跨尺度: 震中距 $0 \lesssim r < 10^3$ km
- 单一数值方法难以兼顾精度与计算效率
- 简正模叠加 (normal mode summation): 近场振幅依赖于所叠加简正模的数量
- 谱元法等 (spectral element): 低速沉积层 (~ 1 km 小网格) VS 大尺度震中距 ($\sim 10^3$ km)

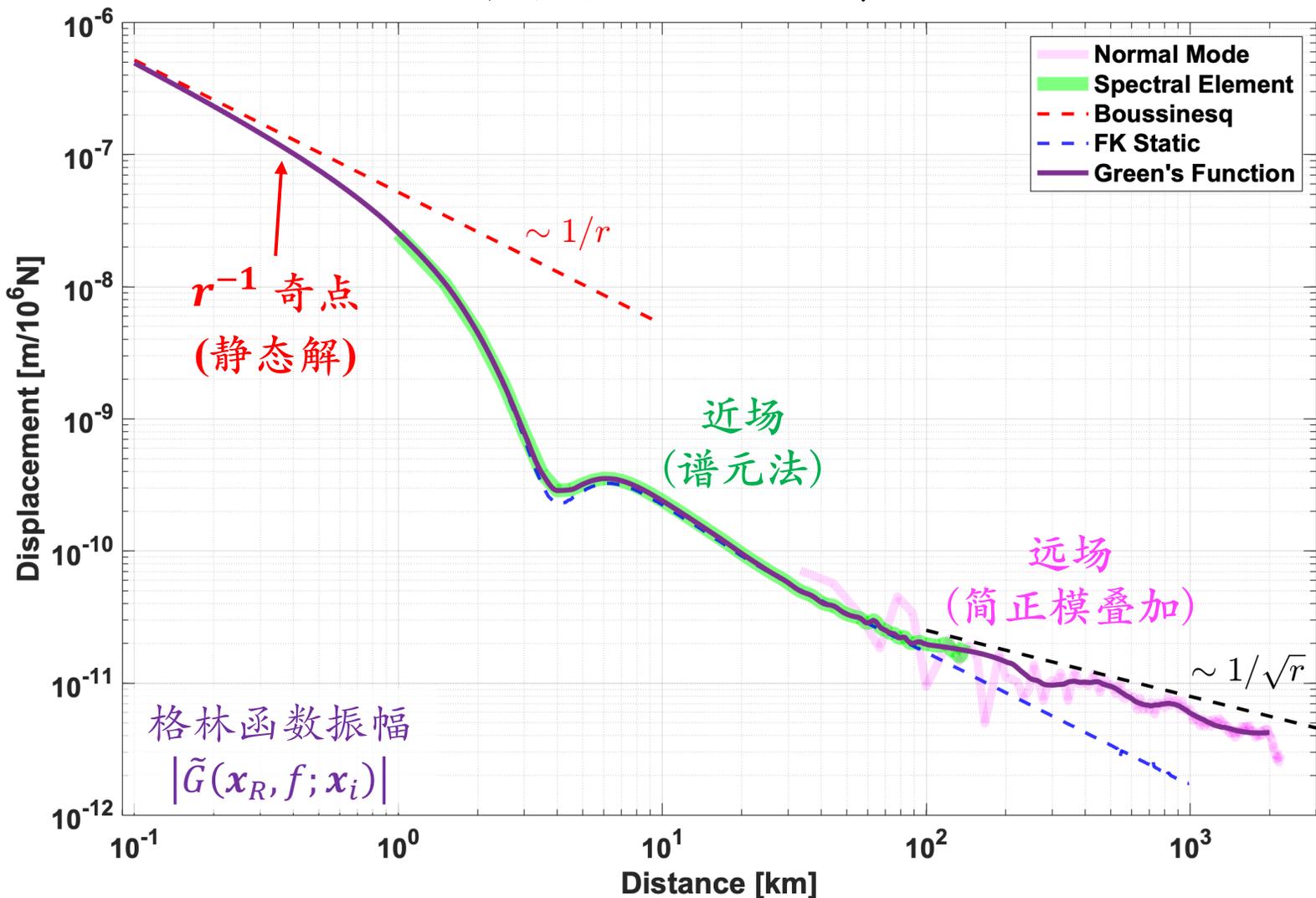
解决方案

- 利用不同数值方法在不同尺度的优势, 综合各方法的结果



频率域格林函数的振幅随震中距变化

1D层状模型: PREM + 表层沉积层



1D层状模型: 2层沉积层+PREM

沉积层性质根据当地勘探及成像

结果选取合适参数

将不同方法计算的结果平滑差值,

得到混合方法的格林函数用于模拟

不同方法的结果在过渡区域呈现

一致性

格林函数振幅
 $|\tilde{G}(x_R, f; x_i)|$

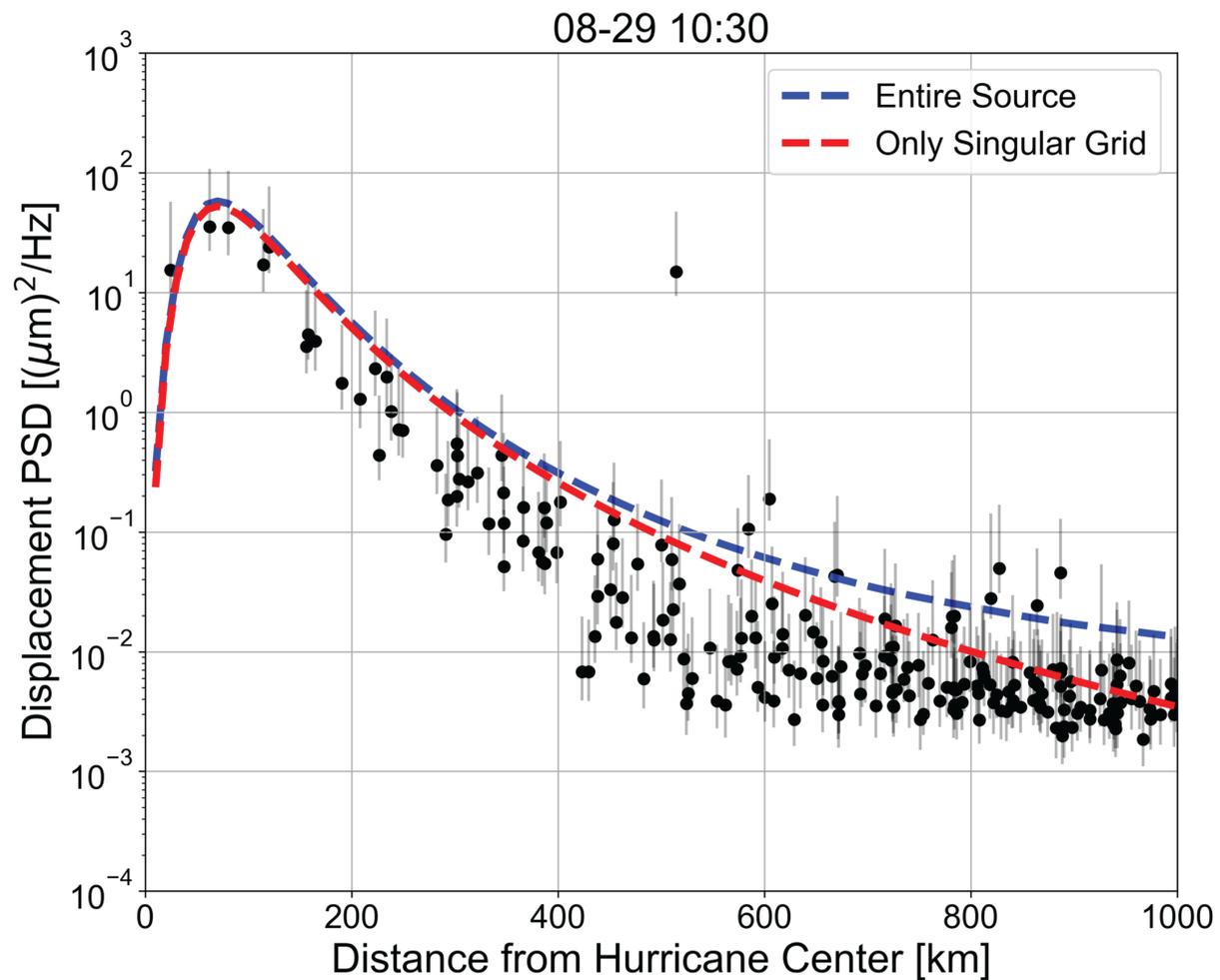
r^{-1} 奇点
(静态解)

近场
(谱元法)

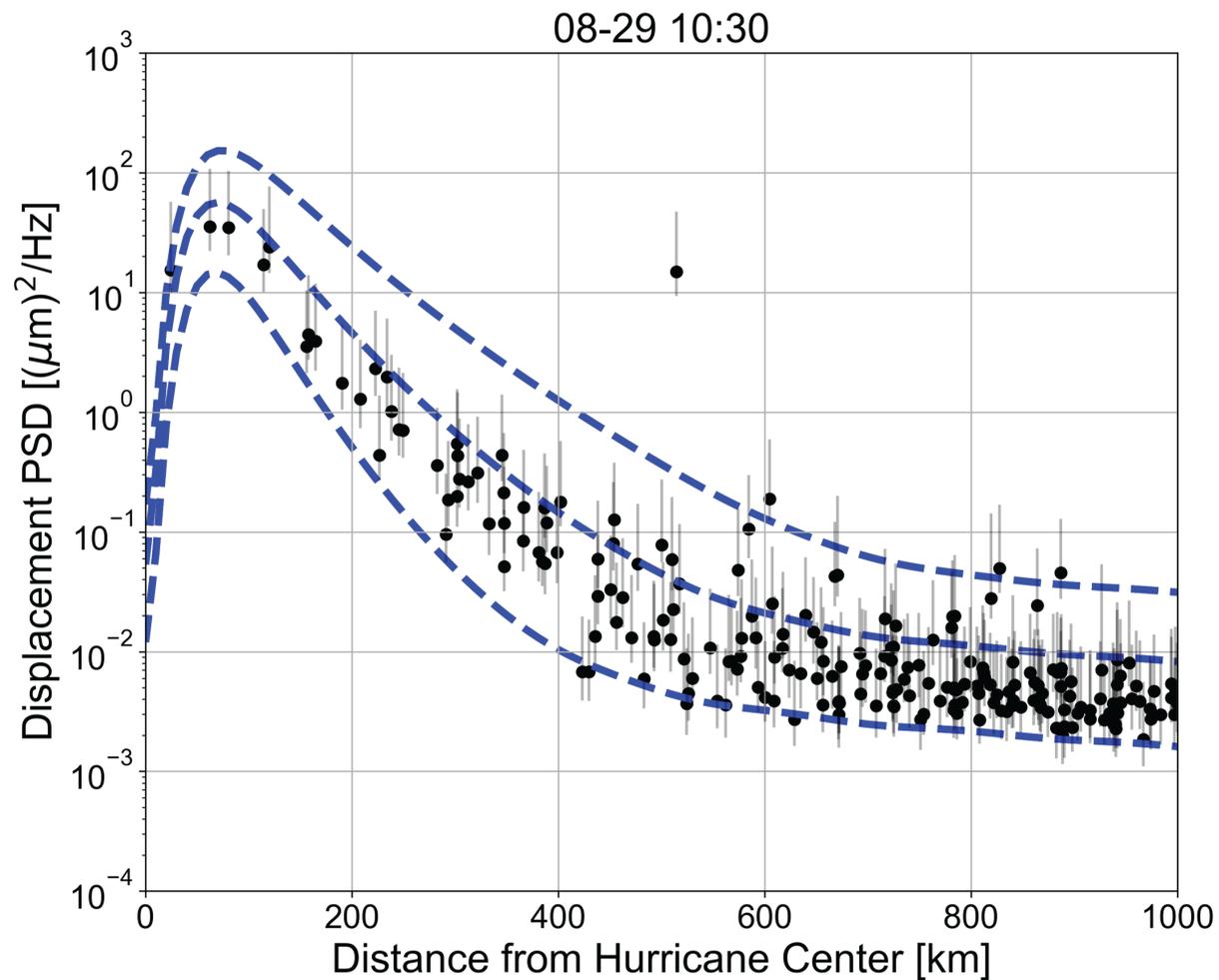
远场
(简正模叠加)

$\sim 1/\sqrt{r}$

在风眼墙内, 台站附近 ~1 km 区域
对噪声水平的贡献可达 90%



湍流相关尺度 L 随距离减小, 可更好
符合观测数据的趋势



上述工作整理于如下文章, 投稿至 EPSL:

**Ambient noise from the atmosphere within seismic hum
period band: A case study of hurricane landfall**

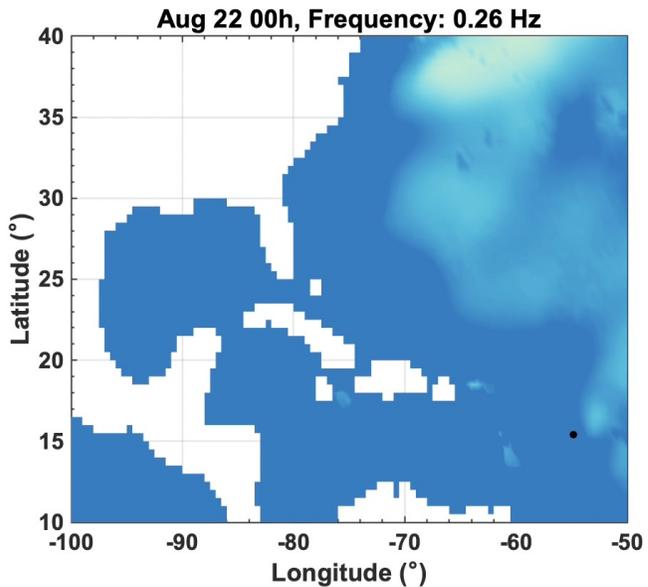
Qing Ji^{*1} and Eric M. Dunham¹

¹Department of Geophysics, Stanford University, Stanford, California, United States

^{*}Corresponding author: qingji@stanford.edu

3. 结合大气湍流的进一步环境噪声模拟

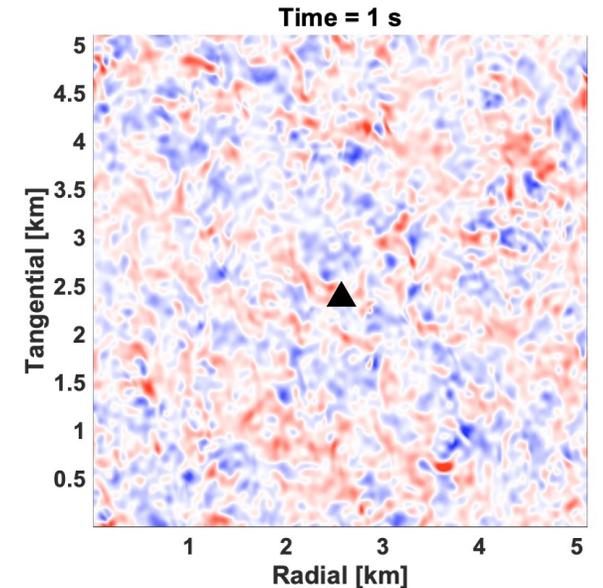
局域准静态 \longrightarrow 仅需重点关注台站附近的噪声源
~~(整个飓风)~~



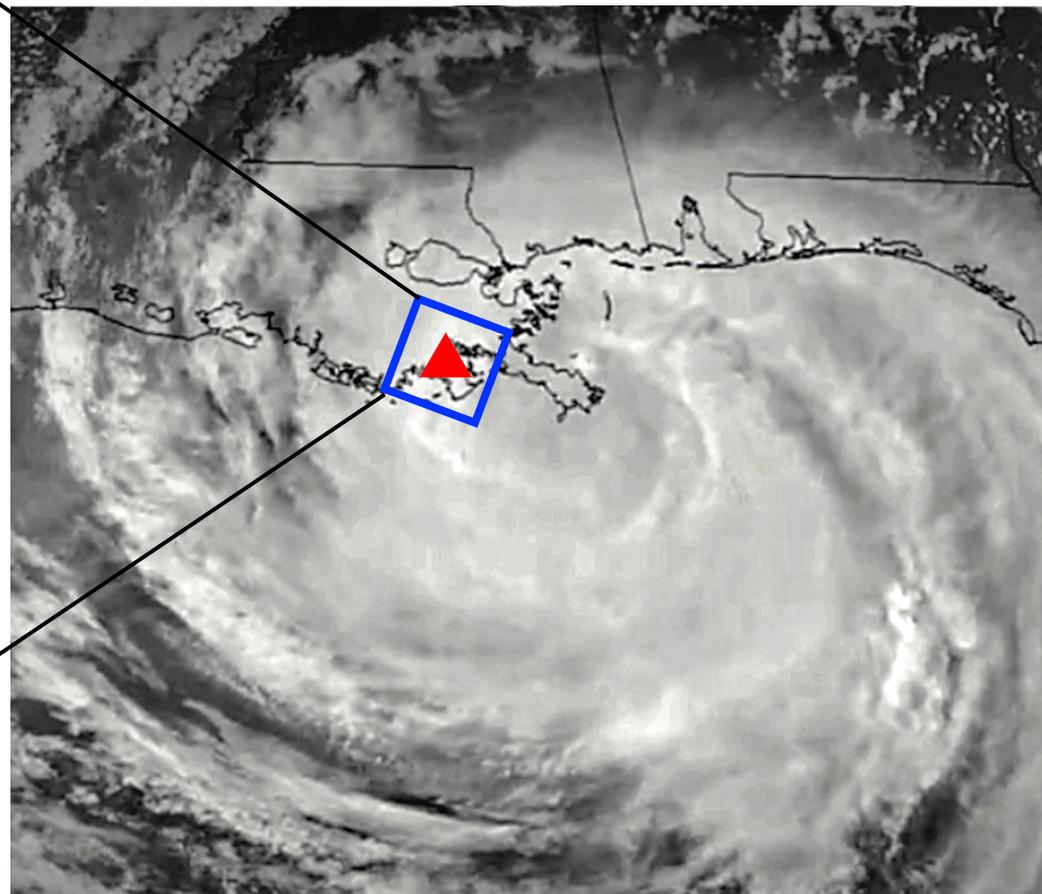
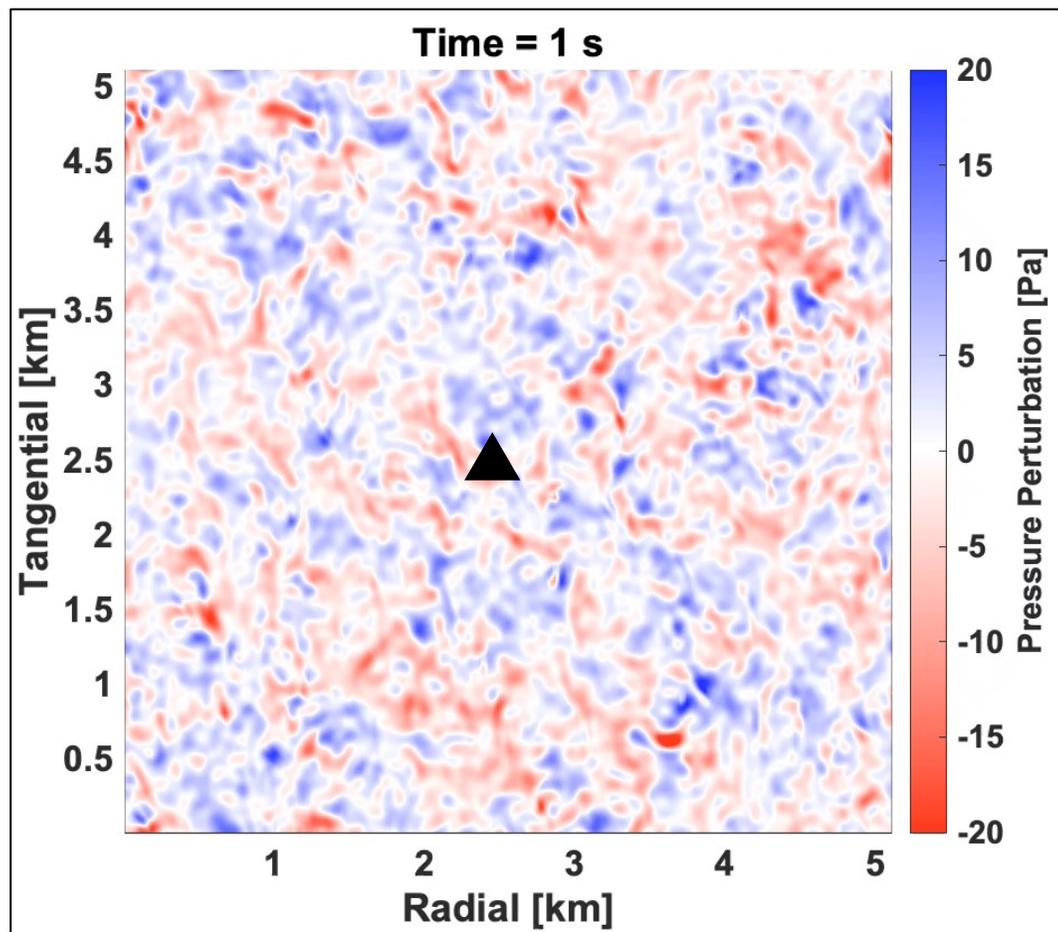
海浪模拟
海洋噪声源



大气湍流模拟
大气噪声源



飓风内部湍流的大涡模拟 (Large Eddy Simulation)



▲ 地震台站

□ 建模区域 (5 km × 5 km)

大气湍流模拟 (Cloud Model 1, CM1)

网格设置

$$L_x = L_y = 5 \text{ km}, L_z \approx 3 \text{ km}$$

$$\Delta x = \Delta y = 20 \text{ m} \quad \Delta z = \Delta x/2 \quad (\text{高度 } 2 \text{ km 以下})$$

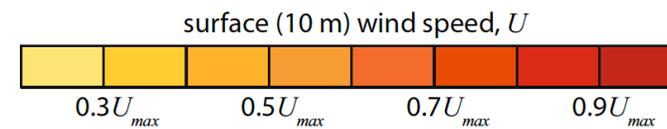
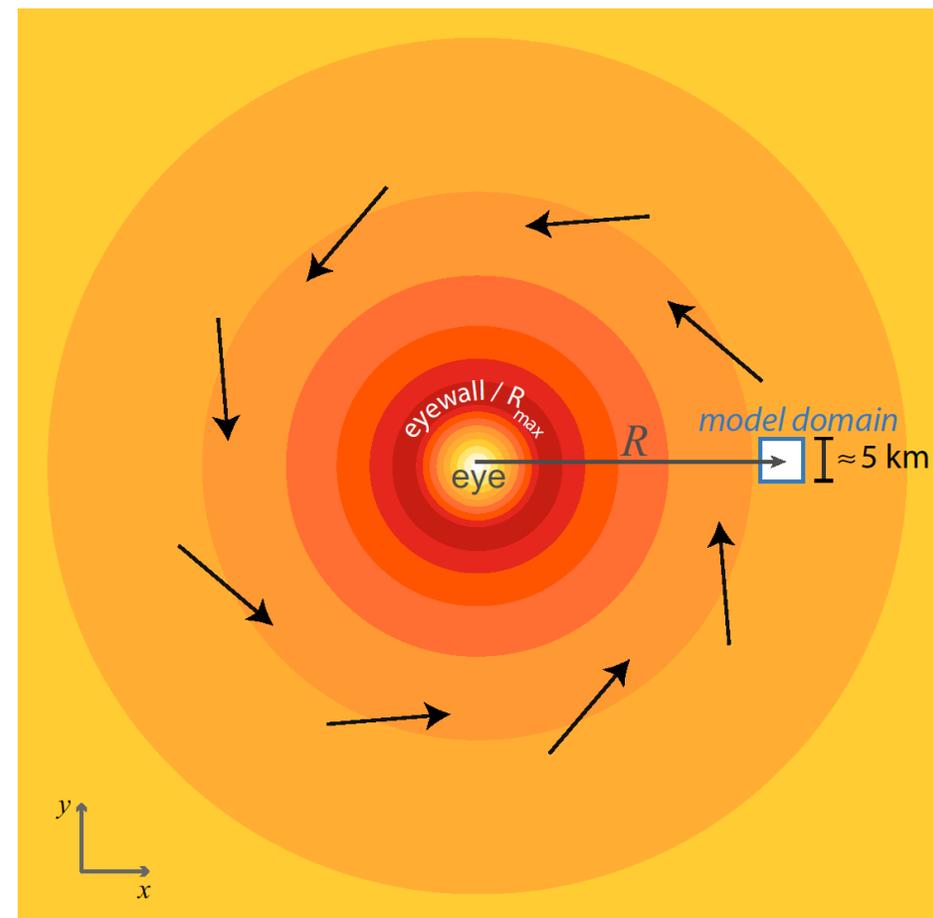
飓风内部的建模小区域

$$R = 40 \text{ km} \quad V = 40 \text{ m/s} \quad n = 0.8$$

$$\text{环向风速: } u_\phi = V \left(\frac{r}{R} \right)^{-n}$$

数值模拟过程

- 演化 6 小时使其稳定, 存储快照
- 从某一快照重新开始, 密集输出地表压强 (1 Hz 采样)
- 获取 30 分钟的湍流压强模拟结果



参考 Bryan *et al.* (2017, Bound.-Layer Meteorol.)

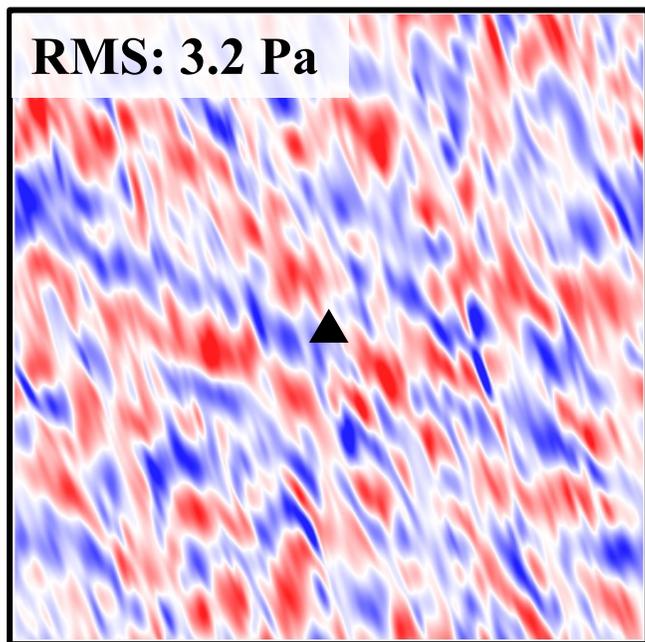
Chen *et al.* (2021, J. Atmos. Sci.)

湍流网格 20 m

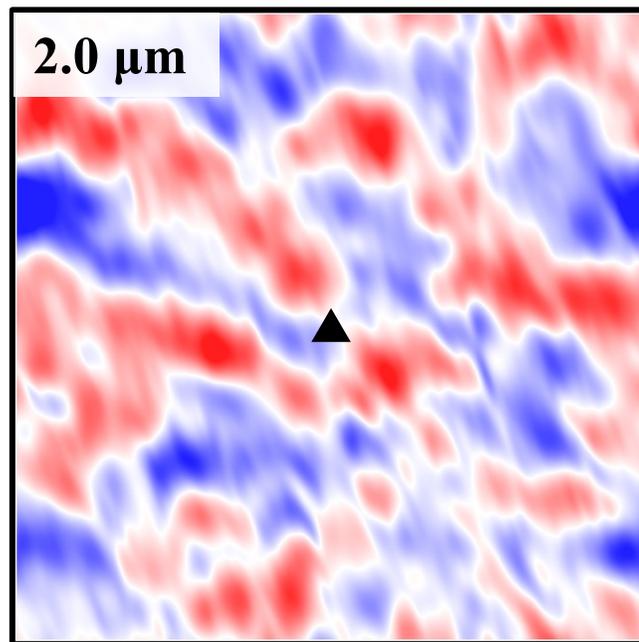
基于大气湍流的噪声信号模拟

滤波周期 20 - 100 s

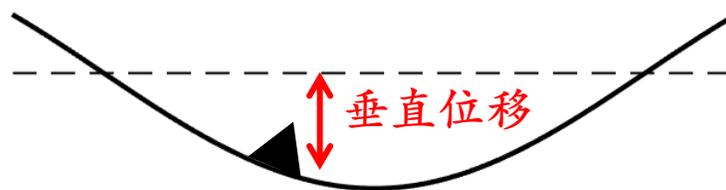
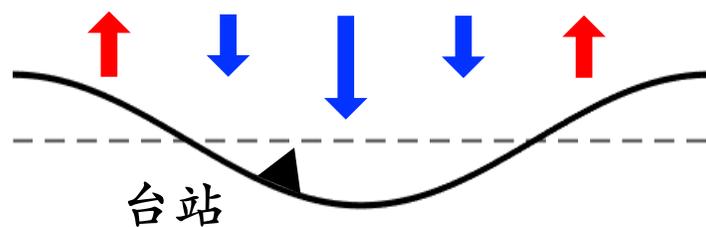
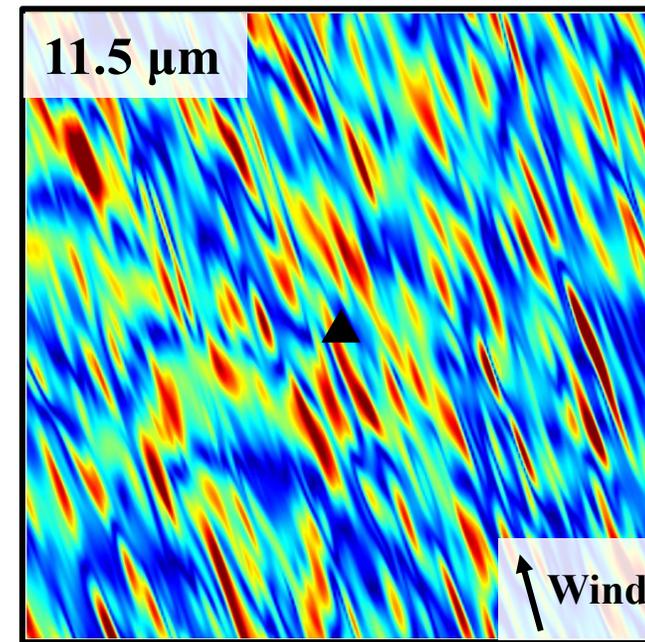
地表压强



垂直位移

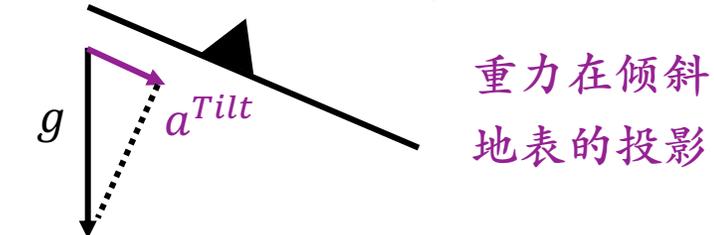


水平方向倾斜效应



$$\hat{u}_z(\mathbf{k}, \omega) = \frac{1}{4\pi\bar{\mu}} \cdot \frac{\hat{p}(\mathbf{k}, \omega)\Delta S}{|\mathbf{k}|}$$

参考 Rodgers (1968, BSSA)

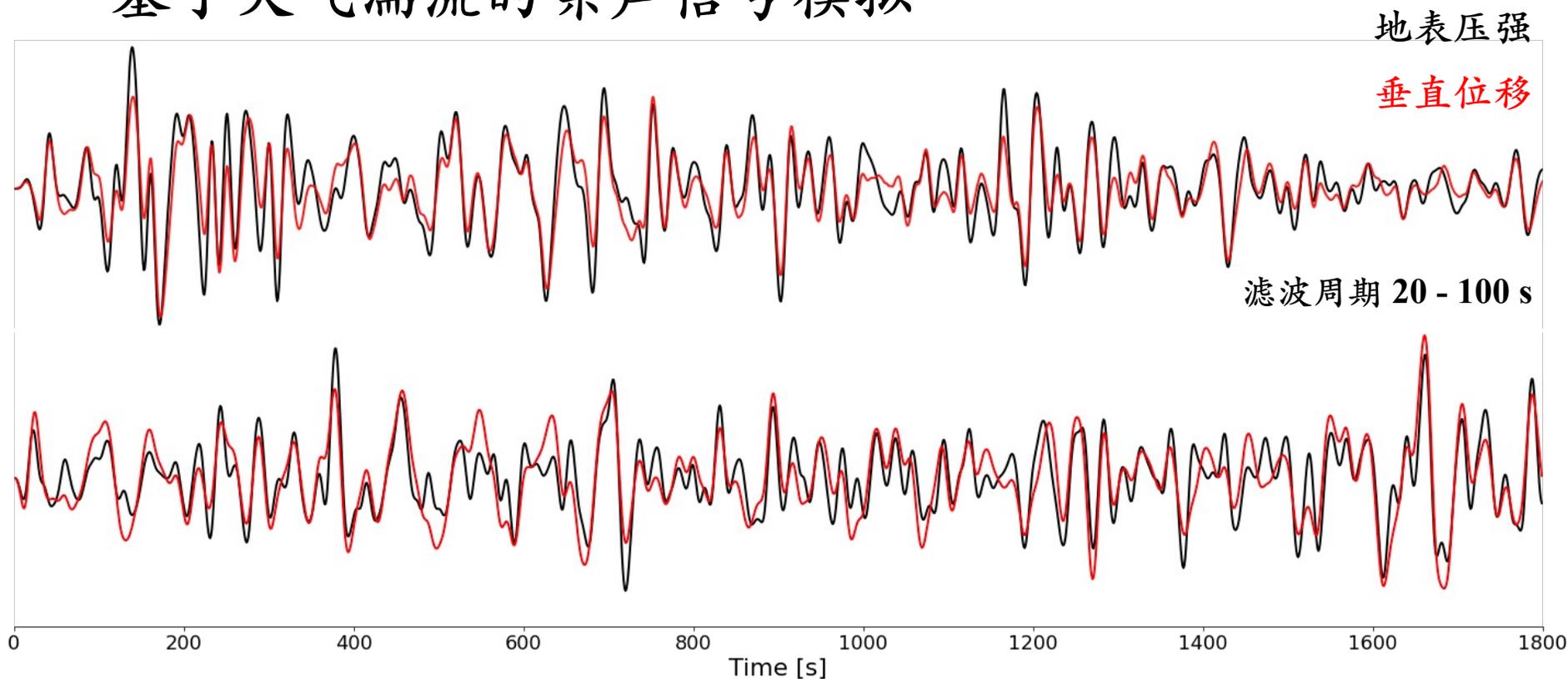


$$\hat{u}^{Tilt}(\mathbf{k}, \omega) = \frac{g}{\omega^2} \cdot ik\hat{u}_z(\mathbf{k}, \omega)$$

基于大气湍流的噪声信号模拟

观测数据

模拟结果



RMS

倾斜效应: 12 vs 60 μm

垂直位移: 1.5 - 2 μm

地表压强: 3 - 5 Pa

- 压强与垂直位移的高相干性
- 两者振幅与观测数据吻合较好
- 倾斜效应与湍流的相关尺度？



观测

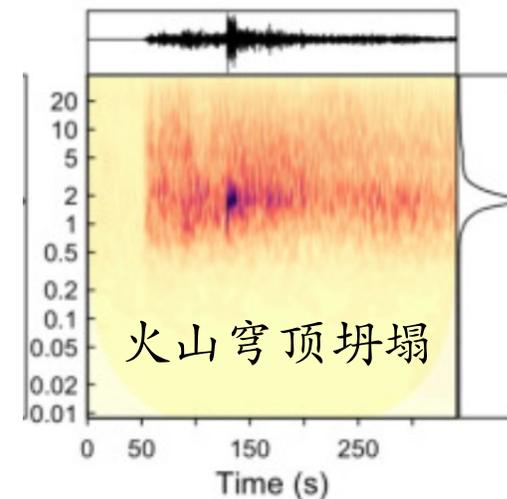
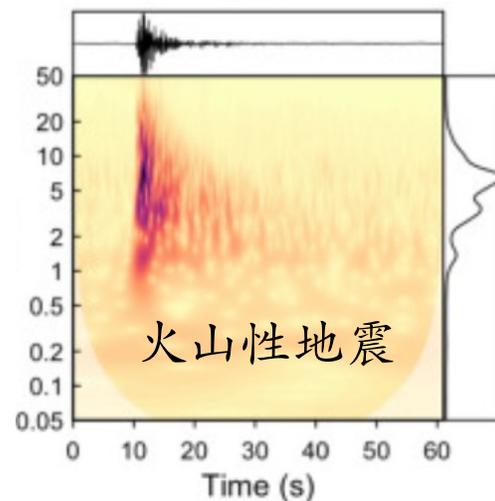
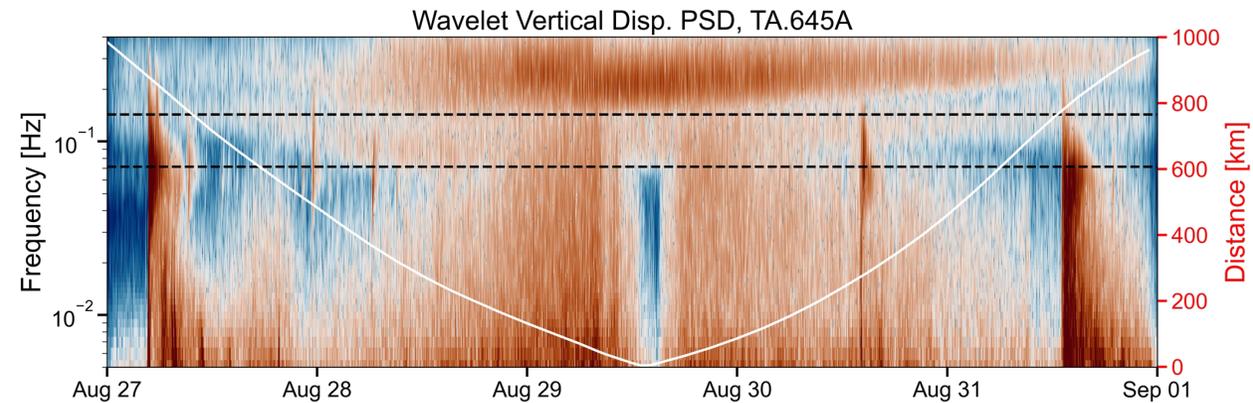
模拟



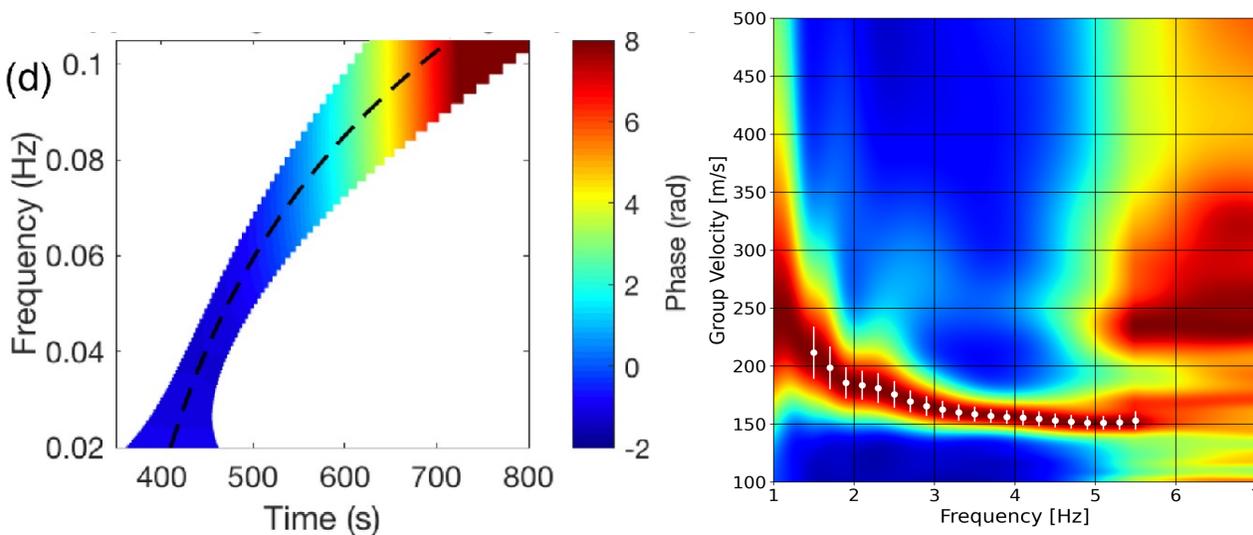
4. 总结与展望

高分辨率的时频分析

Lapins et al. (2020, J. Volcanol.)



环境噪声的观测

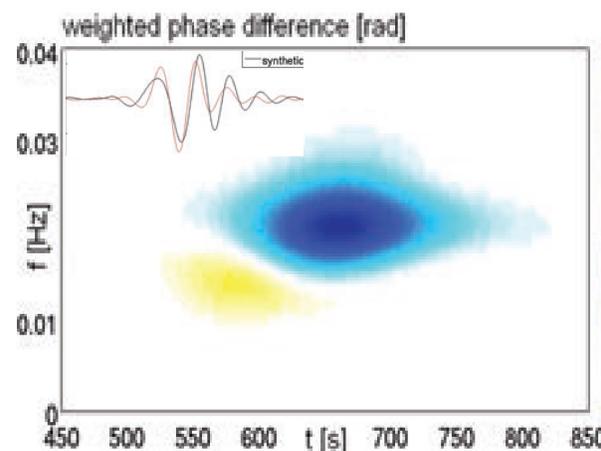


Mao et al. (2020, GJI)

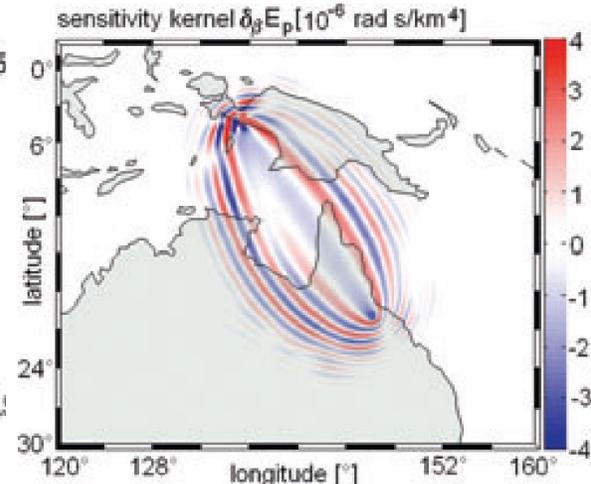
Ji et al. (2023, SRL, under review)

测量到时差 / 面波频散

火山地震的特征提取



Fichtner et al. (2008, GJI)

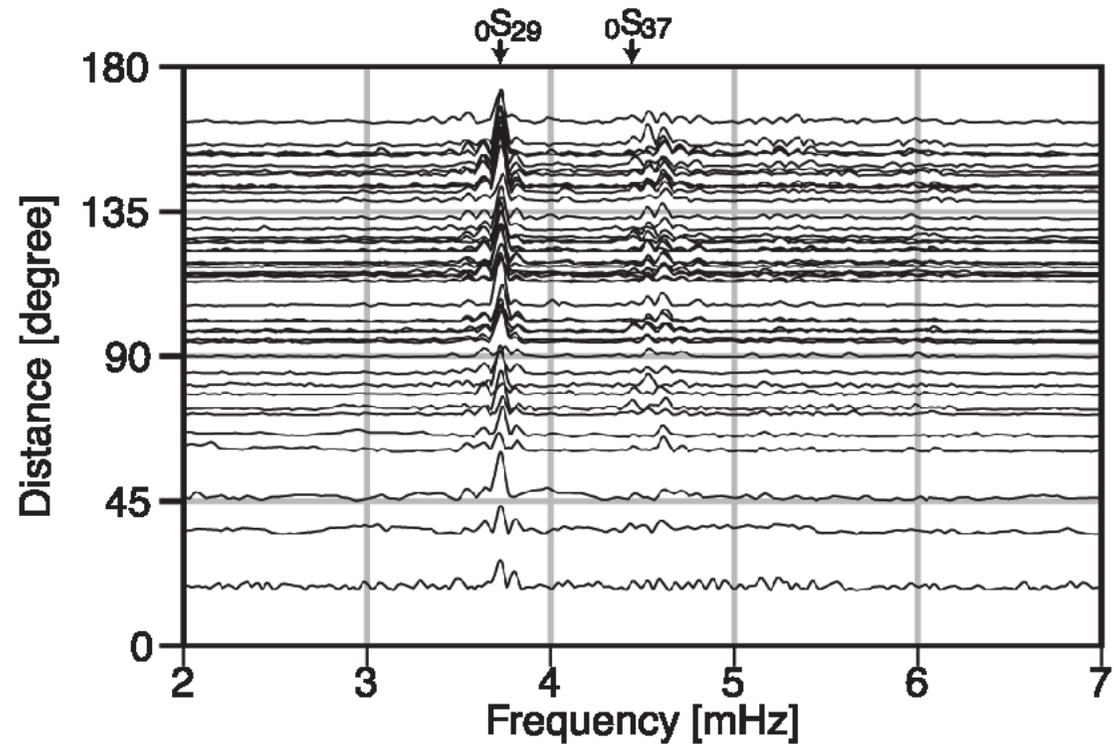
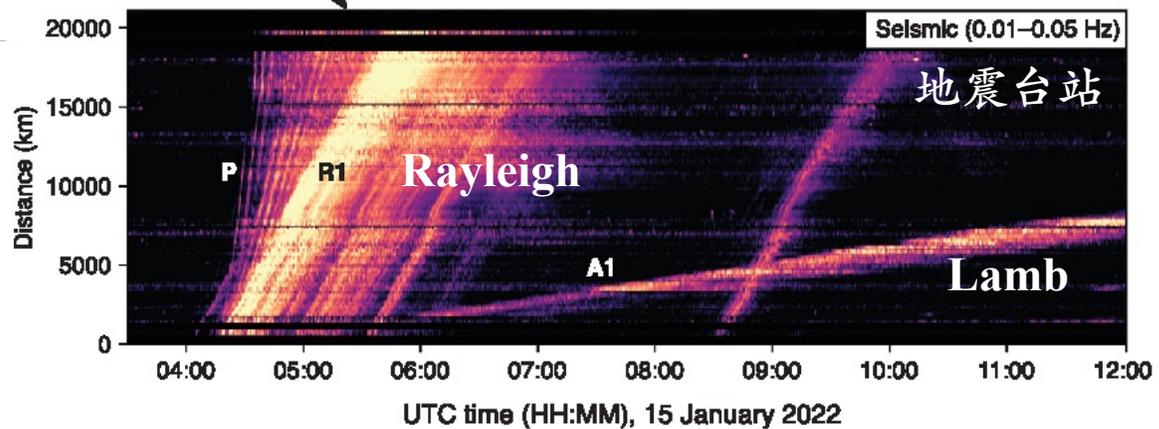
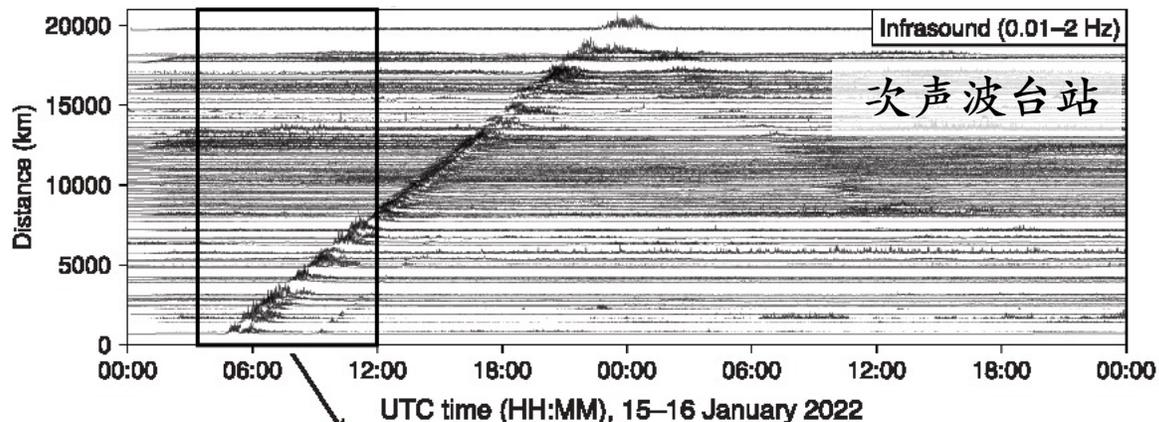


可应用于反演的时频波形残差

大气与固体地球的耦合

2022年1月汤加火山爆发后, 地震台站记录到:

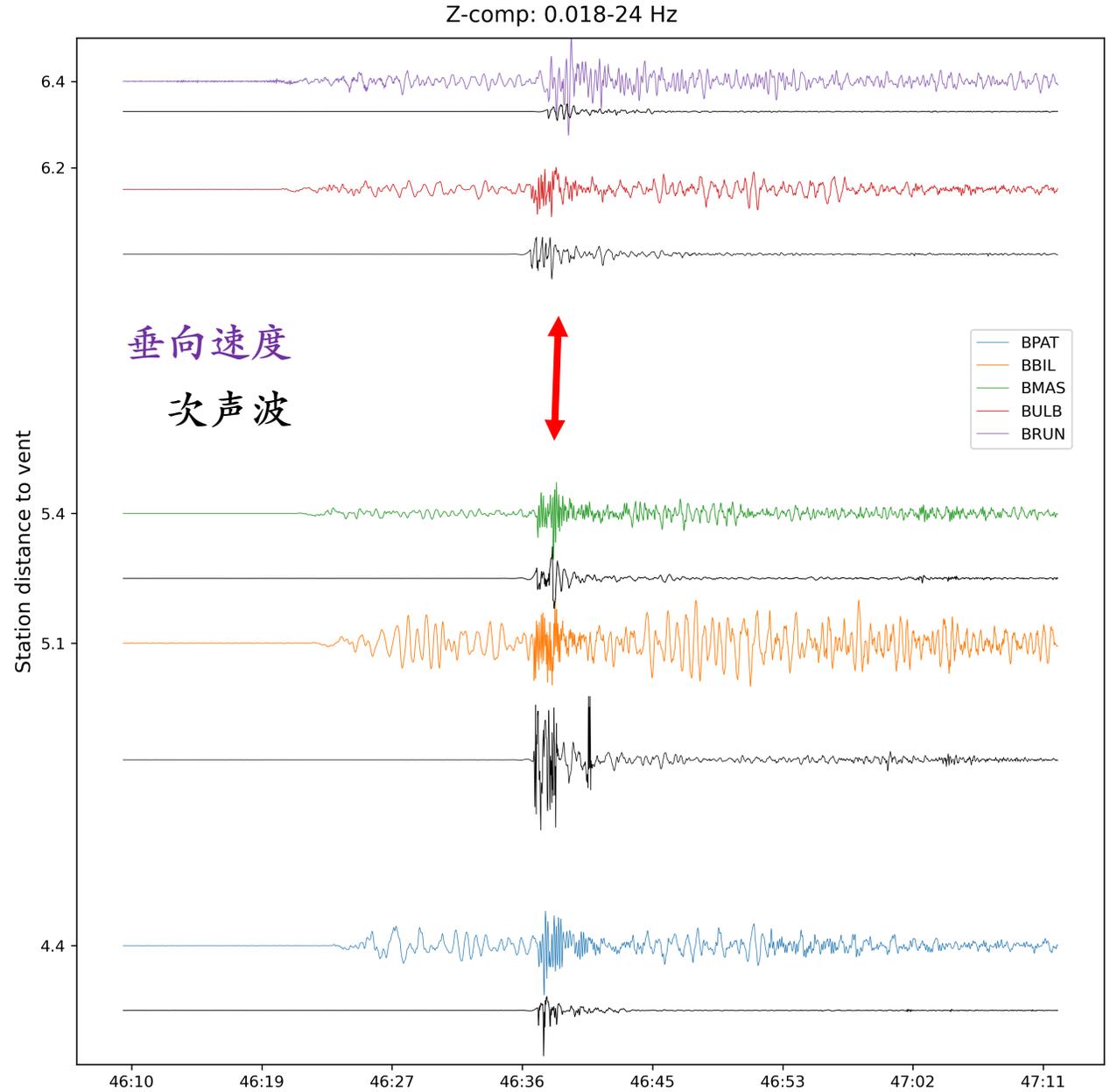
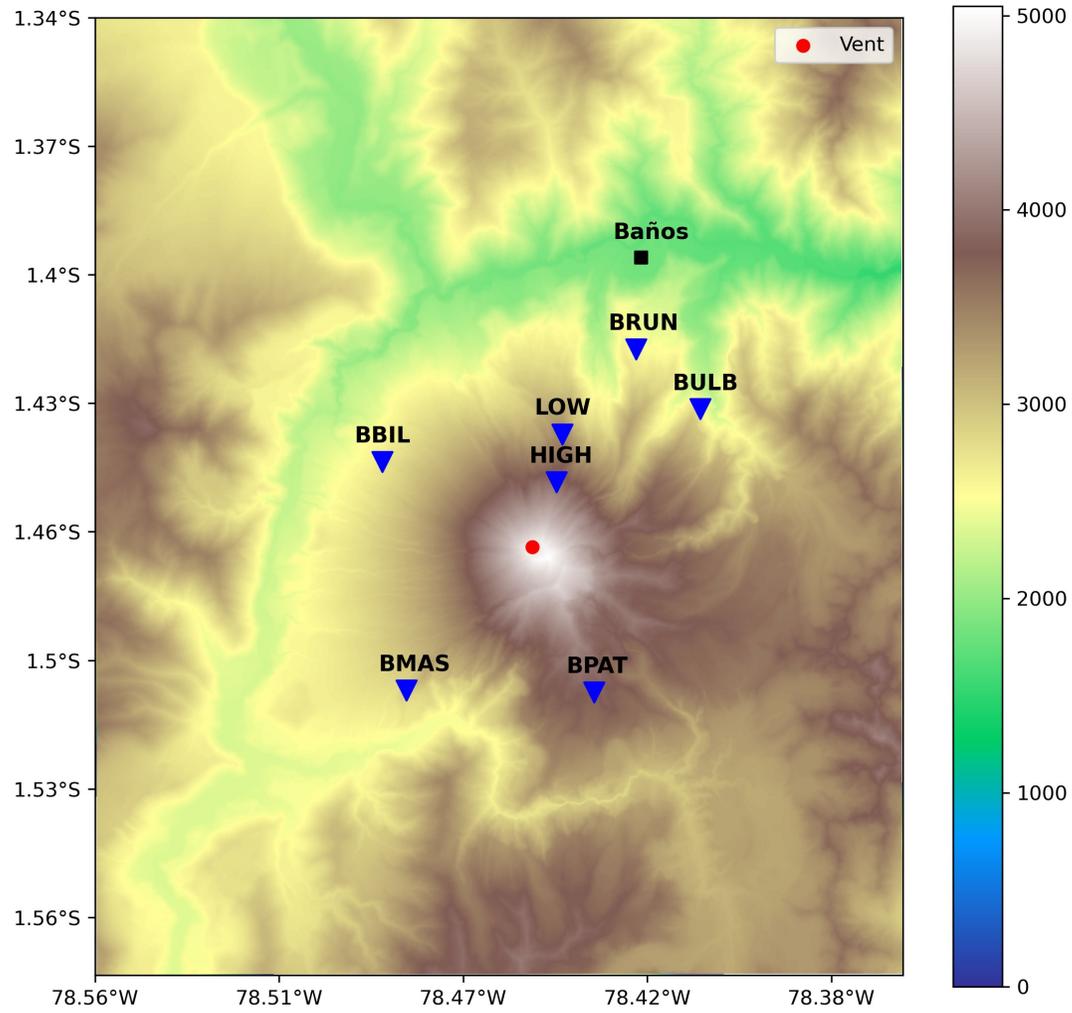
Matoza et al. (2022, Science)



大气 Lamb 波耦合至地表的信号 (准静态)

简正振动模式的耦合 (动态, Rayleigh)

大气与固体地球的耦合



Figures courtesy of Mario Z. Ruiz

大气与固体地球的耦合: 水平倾斜信号与压力波近似?

The formula for tilt in the Sorrell's method (1971) is inconsistent with data.

Tilt is much more complex than the second term in

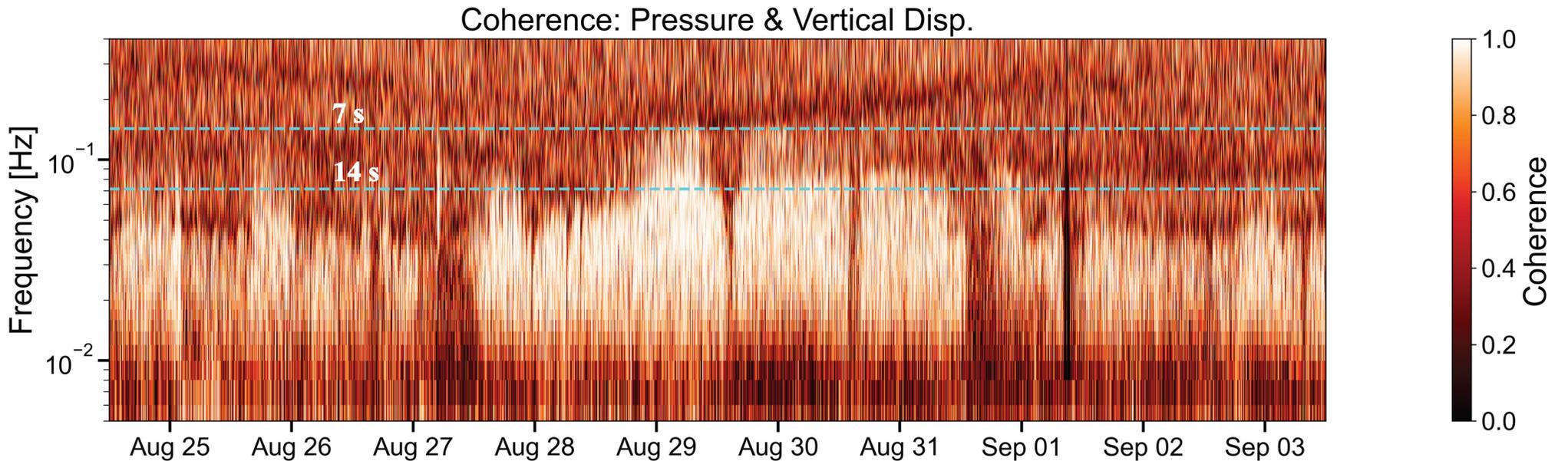
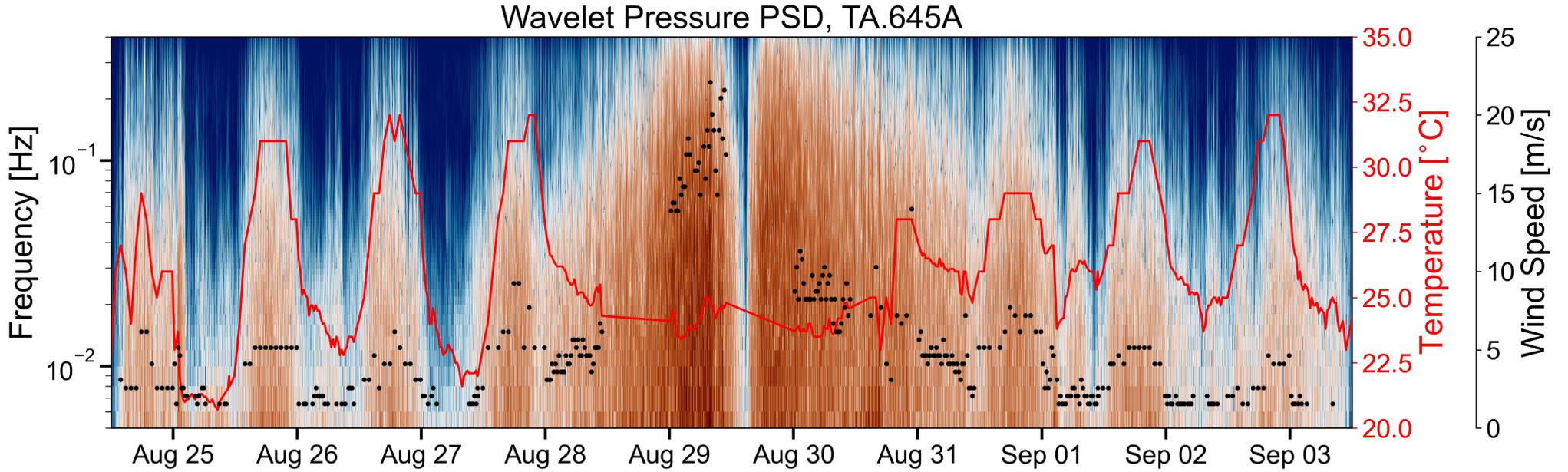
$$U_H(x, H, \omega) = U_x(x, H, \omega) - \frac{g\theta}{\omega^2} = U_x + \frac{g}{\omega^2} \frac{\partial U_z}{\partial x} = U_x - i \frac{g}{\omega c} U_z$$

It means that we cannot determine the pressure-wave speed c from

$$S_H(\omega) = \left(\frac{g}{\omega c}\right)^2 S_z(\omega). \quad \mathbf{X}$$

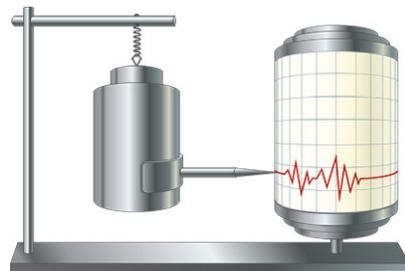
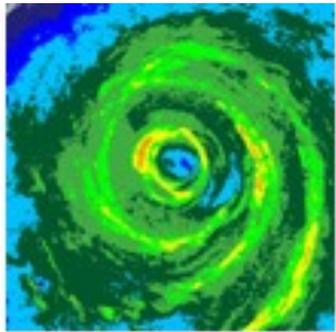
Slide courtesy of Prof. Toshiro Tanimoto, 2022 AGU, S15-A08

大气边界层的昼夜循环



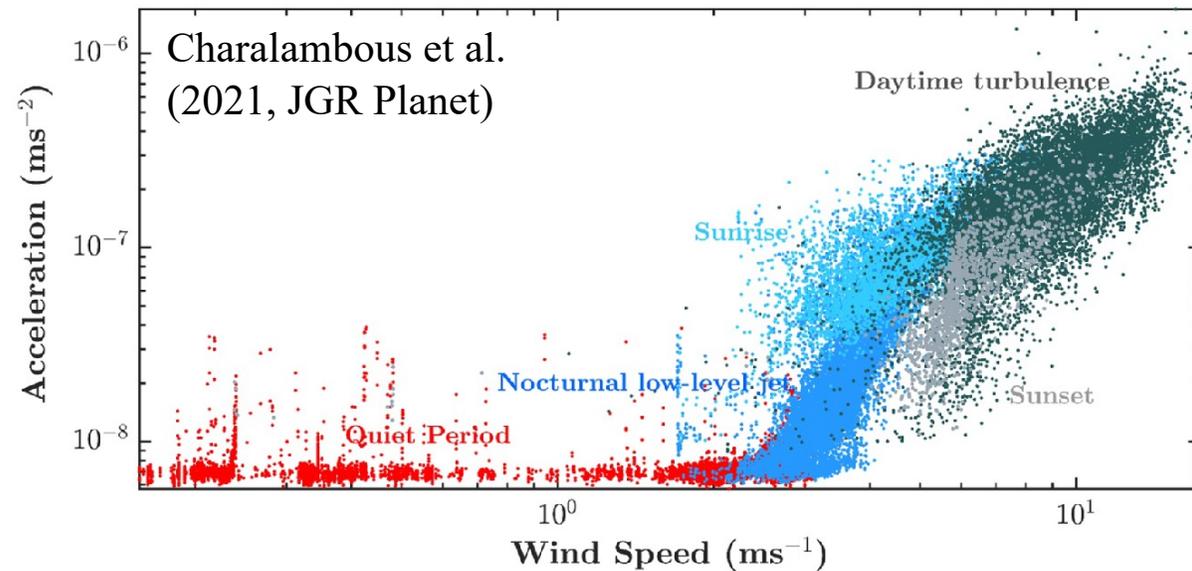
多学科的数据集

- 飓风研究利用侦察机, 飞入飓风以获取大气层中的数据
- 地震台站可以提供飓风内部的地表观测记录
- 全球台网在大气噪声频段持续记录来自湍流的响应 (地表台站)



火星的环境噪声

- 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
- 可应用大气与固体地球的耦合机制来约束表层岩石的硬度 (e.g., Kenda et al., 2017, Space Sci. Rev.; Tanimoto & Wang, 2019, JGR)



结语

观测

地球物理
↕
大气与海洋

物理建模

时频分析噪声特征
大气 VS 海洋噪声

噪声源的物理描述
介质的响应特点

