

基于噪声干涉法的南极昆仑站浅层速度与衰减结构研究

彭宏睿¹, 潘雨迪¹, 李江涛¹, 张小红², 杨元德², 张煜¹, 李孟奎¹

1 武汉大学测绘学院, 武汉

2 武汉大学中国南极测绘研究中心, 武汉



1 Introduction

随着节点地震仪的性能增强与成本降低, 在极端环境下布设短周期密集台阵成为可能。2023年1月, 武汉大学测绘学院与武汉大学中国南极测绘研究中心合作, 于南极昆仑站附近分批布设了一组线性密集台阵。

通过地震背景噪声干涉技术, 我们从数天的噪声记录中较好地恢复了经验格林函数, 在3-20Hz频段内观测到了清晰的多模态地震面波信号, 并对于昆仑站区域地下200m内的浅层结构进行了反演。

昆仑站区域浅部冰雪结构横向均一, 但纵向变化剧烈; 由浅表至150m深度, 横波速度由400m/s增至2000m/s, 纵波速度由700m/s增至3750m/s, 衰减也表现出显著变化。基于密度经验公式, 估计该区域粒雪层厚度约为100m, 空气-积雪层厚度约为28.2m。

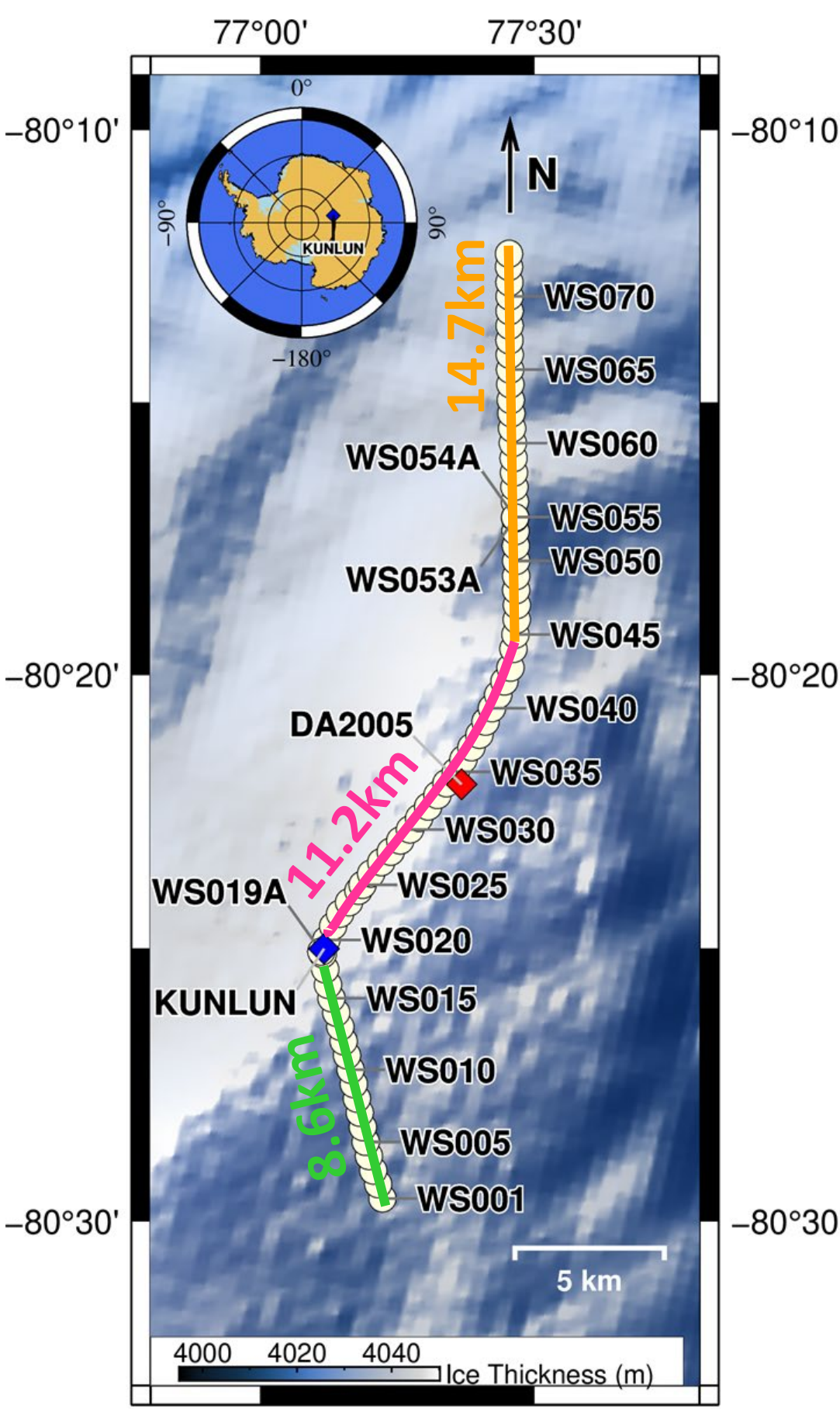


图1. 台站布设位置与冰面高程

2 Data and methods

数据特征:

- 仪器: Smartsolo-HR3C, 共71(17+25+29)台
- 时间: 1月5日-1月10日, 1月5日-1月7日, 12月30日-1月7日
- 采样率: 250Hz降采样至50Hz
- 布设间隔: 约500m

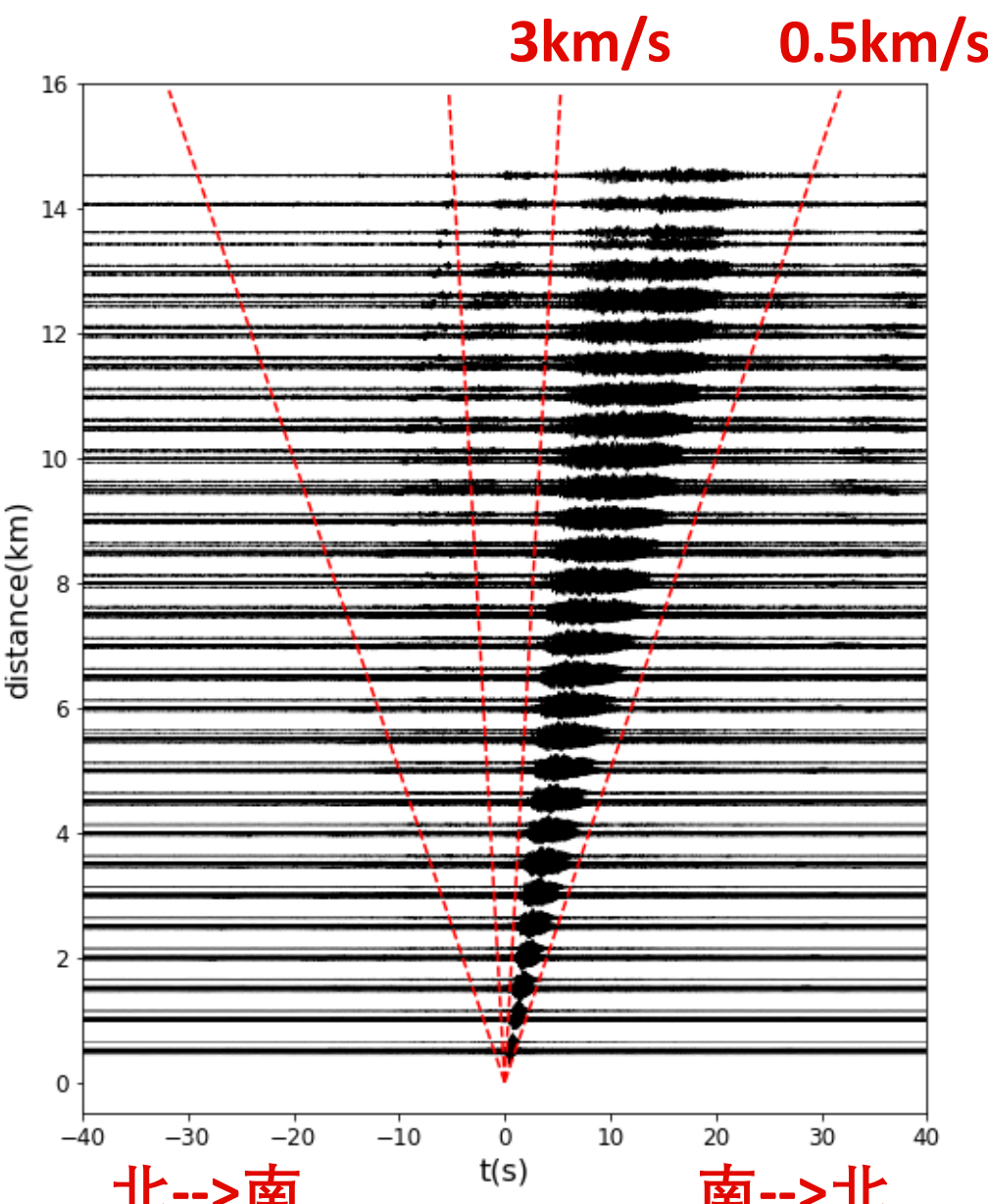


图2. 北-南经验格林函数 (滤波至4-20Hz)

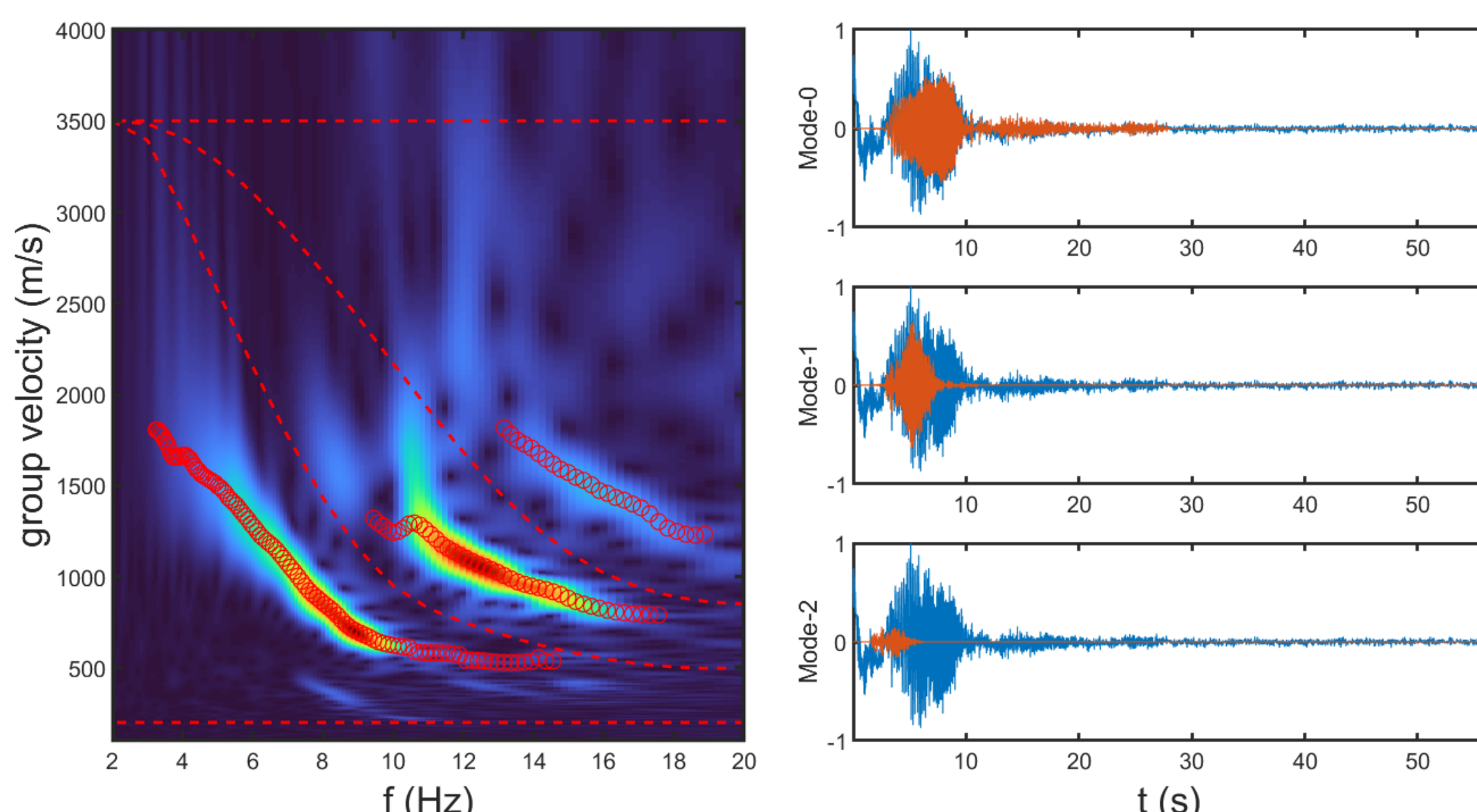


图3. (左)群速度频散谱(WS042-WS055台); (右)模式分割后的各模式波形(橙色), 与原始波形(蓝色)比较

直接从单道信号中的群速度频散谱中, 即可观察到显著的高阶面波信号

原因:

- 特殊结构: 冰雪浅部存在低速层及强速度梯度; Ref: (Ma et al., 2016)
- 特殊震源: 昆仑站高频噪声源;

处理流程:

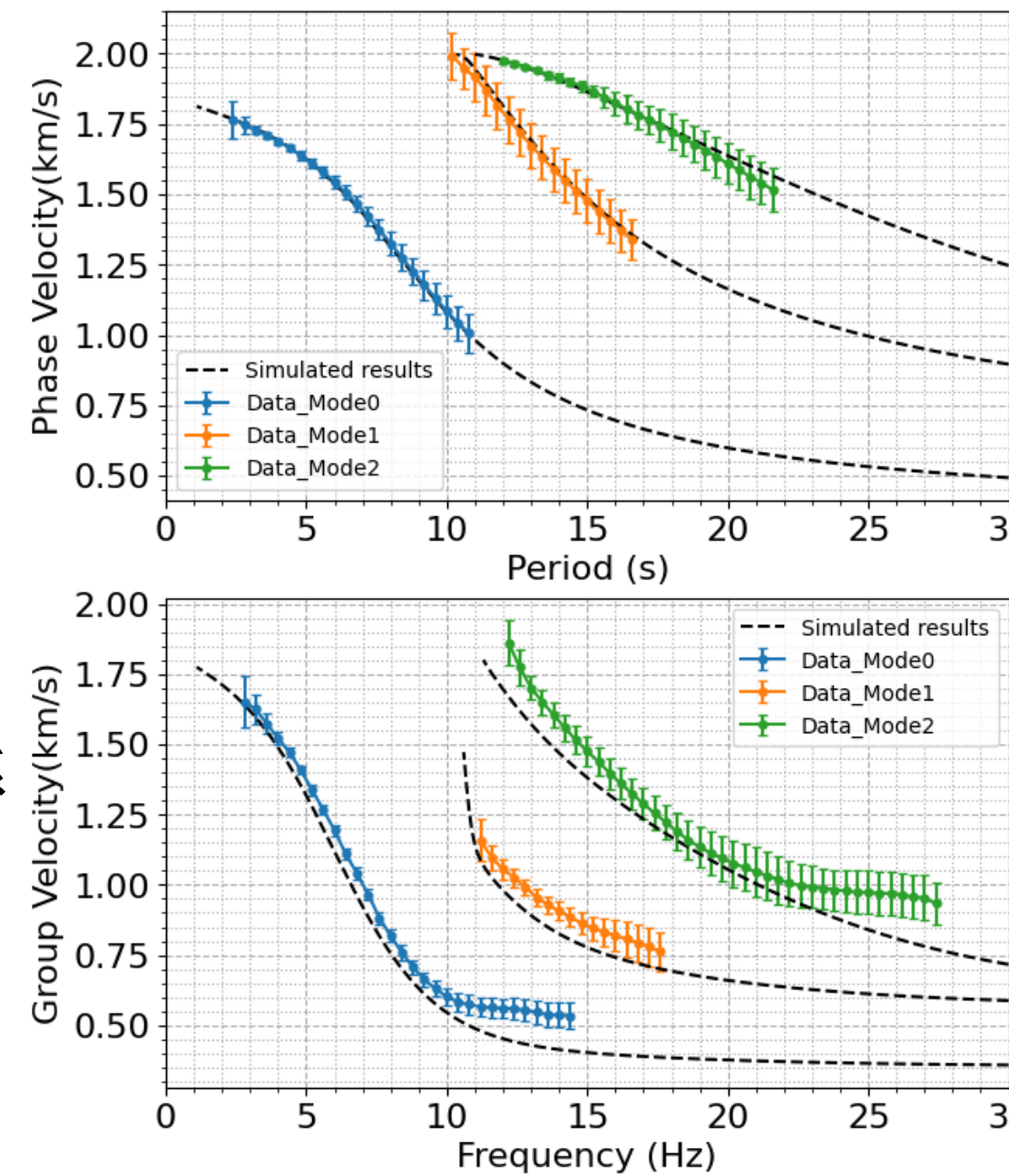
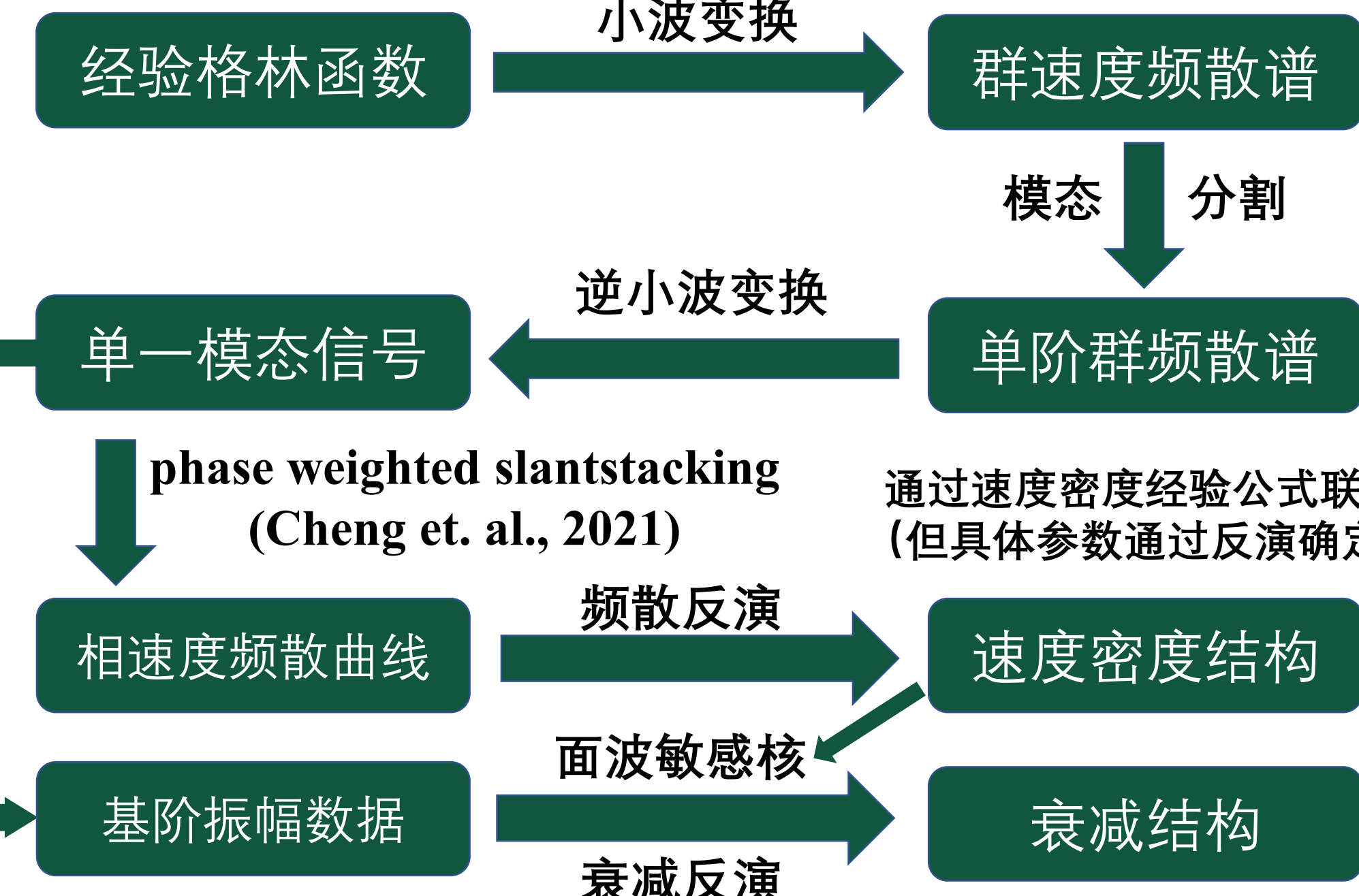


图4. 各阶速度频散曲线及其标准差 (仅相速度频散被最终用于反演)

3 Results

表1. 使用不同阶数频散反演结果的误差均方根

反演阶数	基阶	基阶+1	基阶+1+2
平均误差			
基阶	4.46	9.17	6.34
一阶	69.99	15.40	19.62
二阶	101.46	39.82	20.00
总误差	101.46	26.73	16.56

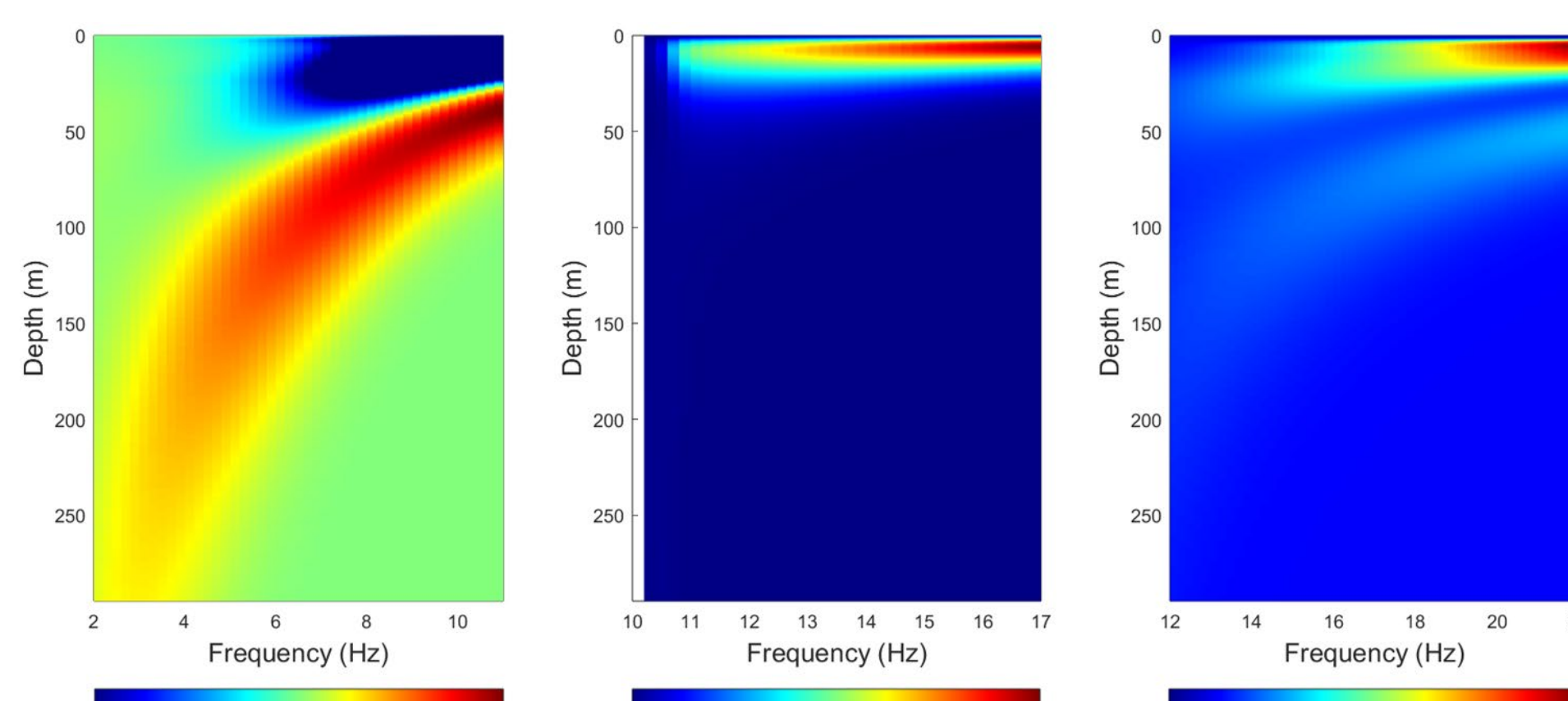


图6. 各阶面波的敏感核 (相速度对S波速度)

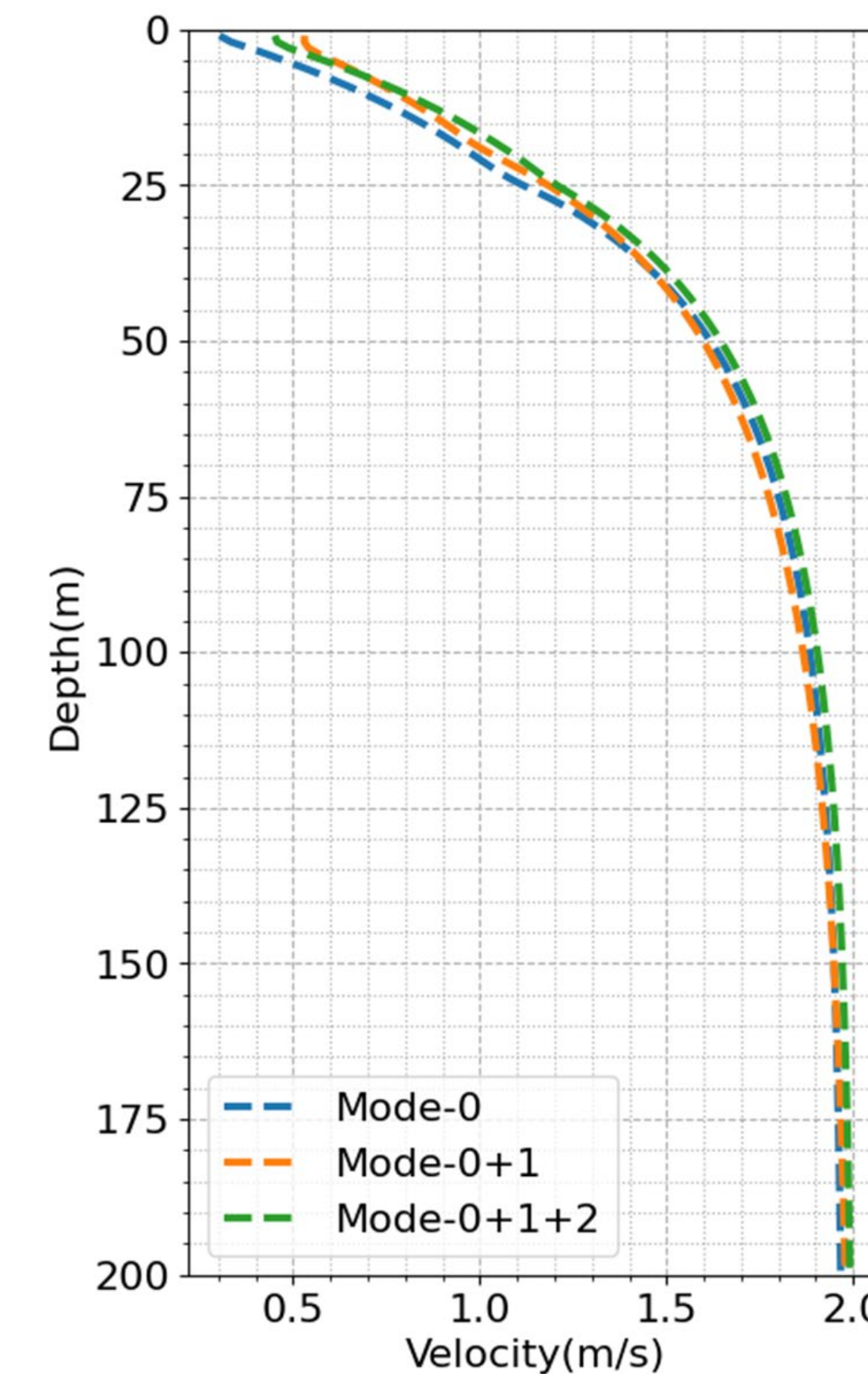


图5. 使用均值频散曲线反演得到的S波速度结构

反演得到的S波速度结构整体稳定, 但最浅部的细微差异仍对高阶面波相速度有显著影响

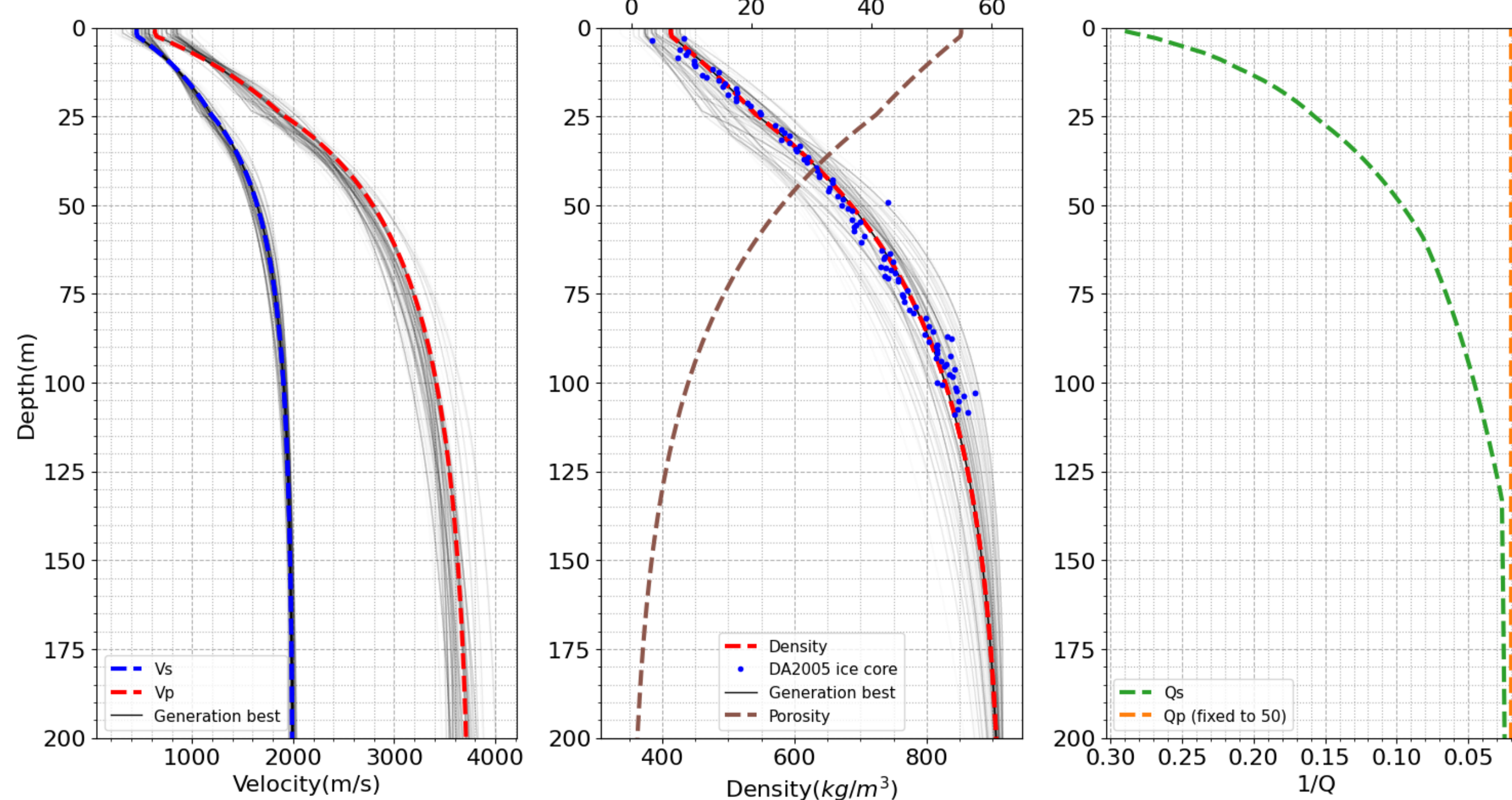


图7. 昆仑站速度、密度、衰减的反演结果(阵列平均)

借助冰雪速度密度经验公式, 同时对P波S波速度和密度进行反演
密度结果同冰芯数据良好吻合 (冰芯密度数据并未参与反演)

对于雪层厚度的估计: Ref: (Zhang et al., 2022)

- 速度密度经验公式 $\rho(z) = \frac{\rho_{ice}}{1 + \left\{ \left(V_{x,ice} - V_x(z) \right) / a_x \right\}^{b_x}}$ ρ_{ice} (冰密度)= 915 kg/m³
- 雪层厚度(i_{thick})估计: $\rho(i_{thick}) = 830 \text{ kg/m}^3$
- 空气-积雪层厚度(f_{thick})估计: $f_{thick} = \sum_{z=0}^{i_{thick}} \left[1 - \frac{\rho(z)}{\rho_{ice}} \right]$

$$i_{thick} = depth(\rho_{830}) \approx 101.1m, f_{thick} \approx 28.2m;$$
$$V_{S,ice} \approx 1998m/s, V_{P,ice} \approx 3754m/s;$$
$$a_S \approx 1238 \text{ m/s}, a_P \approx 2614 \text{ m/s}, b_S \approx 0.873, b_P \approx 1.100$$

4 Conclusions

- 在较短的观测时长内, 从昆仑站附近背景噪声场中, 可以恢复较好的Rayleigh波经验格林函数; 基于(逆)小波变换进行模式分割, 可有效从噪声数据中提取多阶面波信号。
- 通过多阶面波联合反演, 我们反演速度密度经验公式的参数, 以及昆仑站下方的速度和密度结构, 密度结构同DA2005冰芯钻孔结果能对应良好。
- 南极昆仑站附近浅层速度结构横向变化不大, 在积雪层内速度随深度快速增加, 基于密度结果, 可以估计粒雪层和空气-积雪层厚度。

参考文献:

- Cheng, F., Xia, J., Zhang, K., Zhou, C. & Ajo-Franklin, J.B., 2021. Phase-weighted slant stacking for surface wave dispersion measurement. *GJI*, **226**, 256–269.
- Fichtner, A., Hofstede, C., N. Kennett, B.L., Nymand, N.F., Lauritzen, M.L., Zigone, D. & Eisen, O., 2023. Fiber-Optic Airplane Seismology on the Northeast Greenland Ice Stream. *The Seismic Record*, **3**, 125–133.
- Ma, Y., Clayton, R.W. & Li, D., 2016. Higher-mode ambient-noise Rayleigh waves in sedimentary basins. *GJI*, **206**, 1634–1644.
- Yang, Y., Zhan, Z., Karrenbach, M., Reid-McLaughlin, A., Biondi, E., Wiens, D.A. & Aster, R.C., 2024. Characterizing South Pole Firn Structure With Fiber Optic Sensing. *GRL*, **51**, e2024GL109183.
- Zhang, Z., Nakata, N., Karplus, M., Kaip, G. & Yi, J., 2022. Shallow Ice-Sheet Composite Structure Revealed by Seismic Imaging Near the West Antarctic Ice Sheet (WAIS) Divide Camp. *JGR Earth Surface*, **127**.

致谢: 感谢中国第39届南极科考
为本研究提供原始数据。

(CGU2024@厦门)