

# Deciphering the Lithosphere

## 揭秘岩石圈

Brian L.N. Kennett

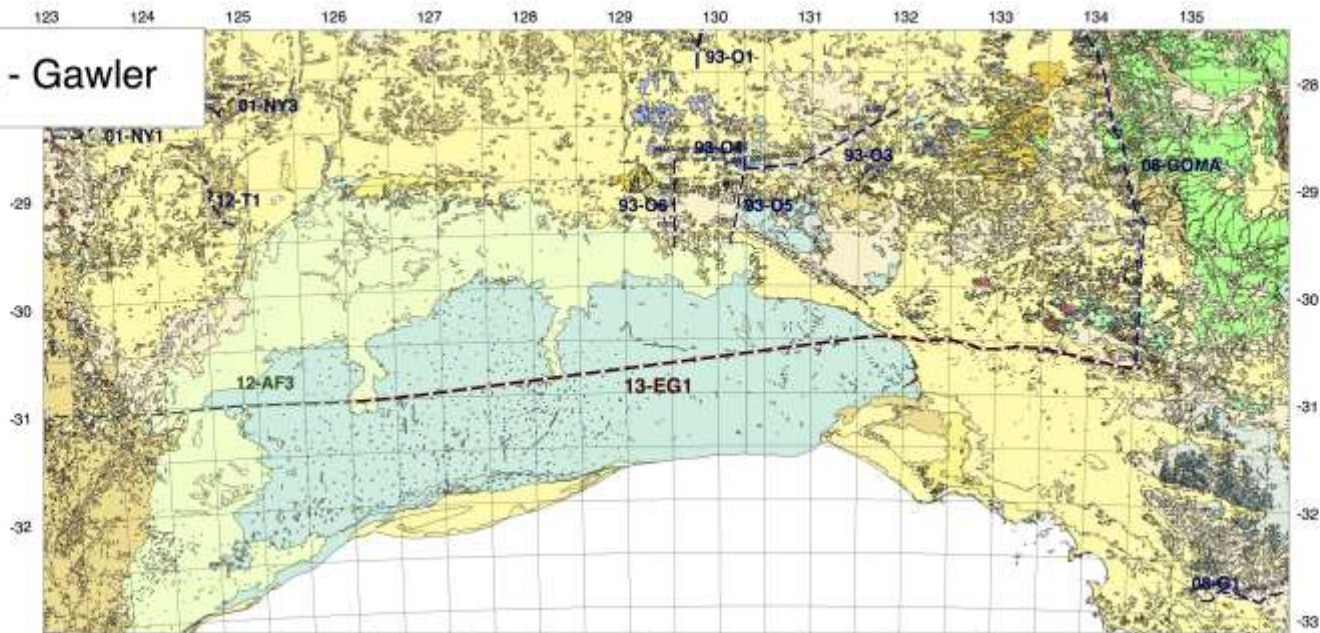
Research School of Earth Sciences, 地球科学研究学院

The Australian National University, 澳大利亚国立大学

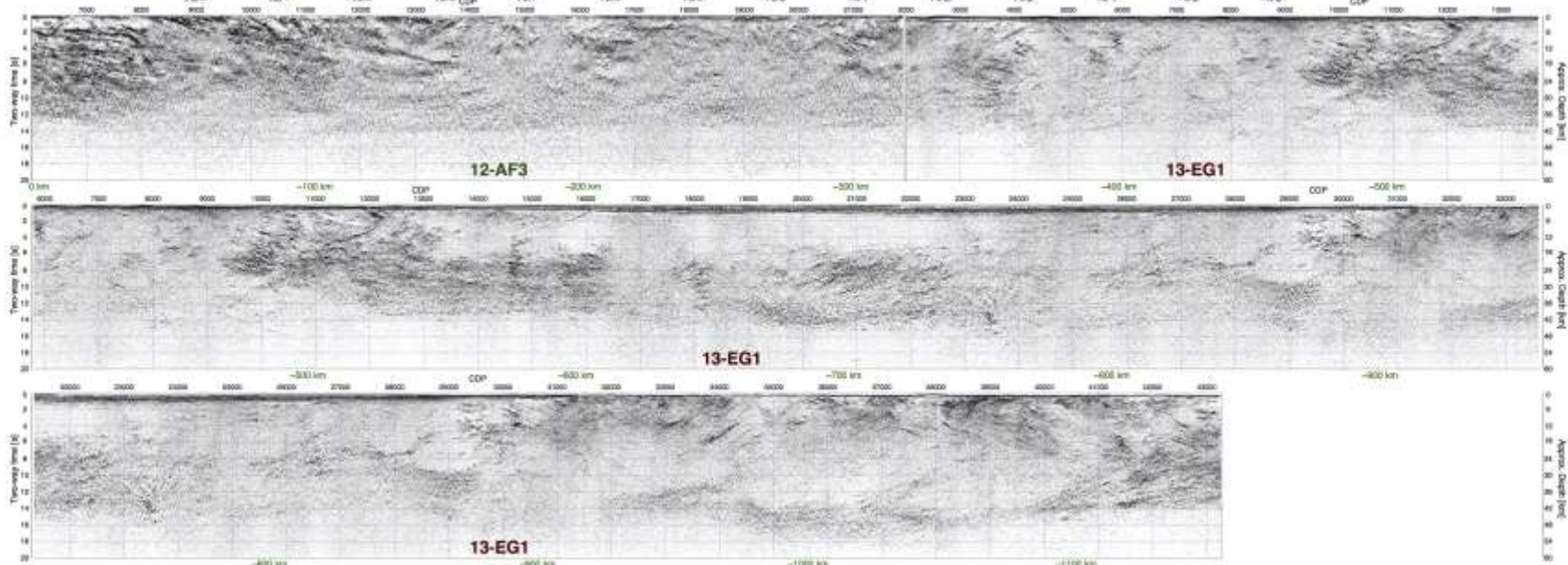
- 岩石圈是地球圈层结构中可以随板块构造运动的外壳部分
- 大洋岩石圈随板块运动不断循环，而大陆岩石圈可以历经较长的地质时间尺度被保存下来
- 大陆岩石圈记录了与其演化密切相关的一系列复杂的地球动力学过程
- 基于地震深反射剖面的结果，我们可以在地壳中看到古老的构造运动痕迹
- 岩石圈地幔中也保留类似的结构特征，但一般是比较大尺度的结构，利用传统的反射地震学方法很难获得有效地约束

200

# Eucla - Gawler

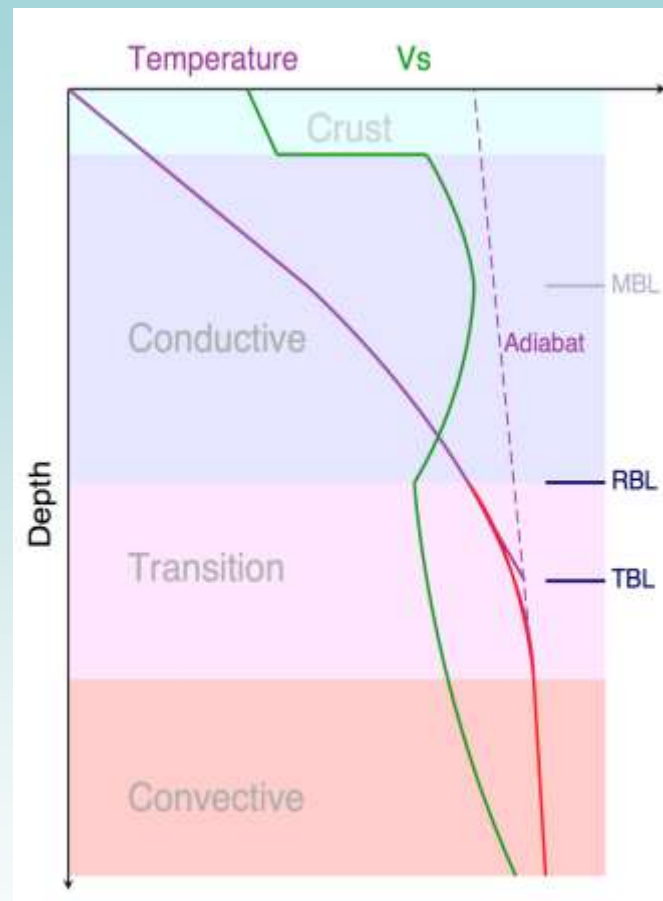


在有数据覆盖的地区，由反射地震学方法获得的复杂的岩石圈地壳结构



# Base of Lithosphere?

- 基于地球介质不同的物理性质，岩石圈底界面有很多不同的定义，例如：
  - 力学岩石圈( ~ 900 K)
  - 地震学岩石圈
  - 热传导和热对流过渡带
  - 岩石学岩石圈( ~ 1500 K)
    - 地幔包体
    - 泊松比变化
- “底界面”不一定是尖锐的



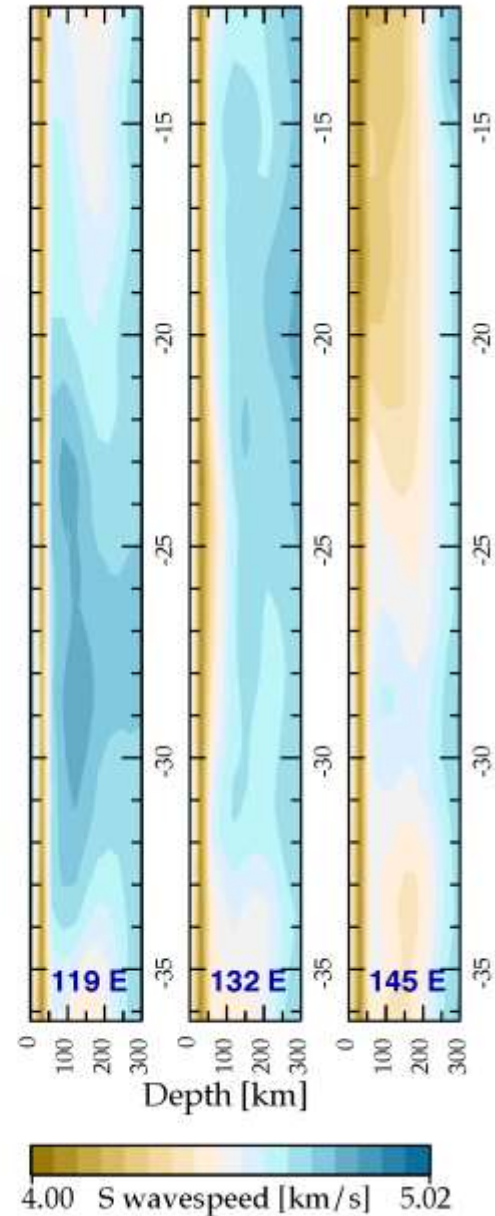
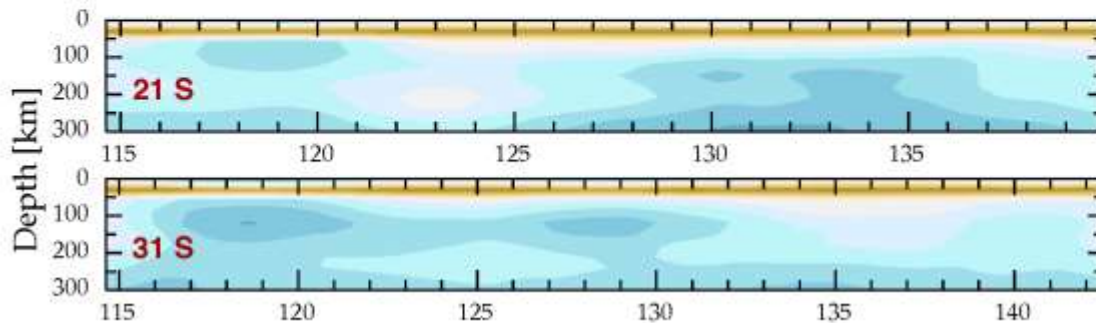
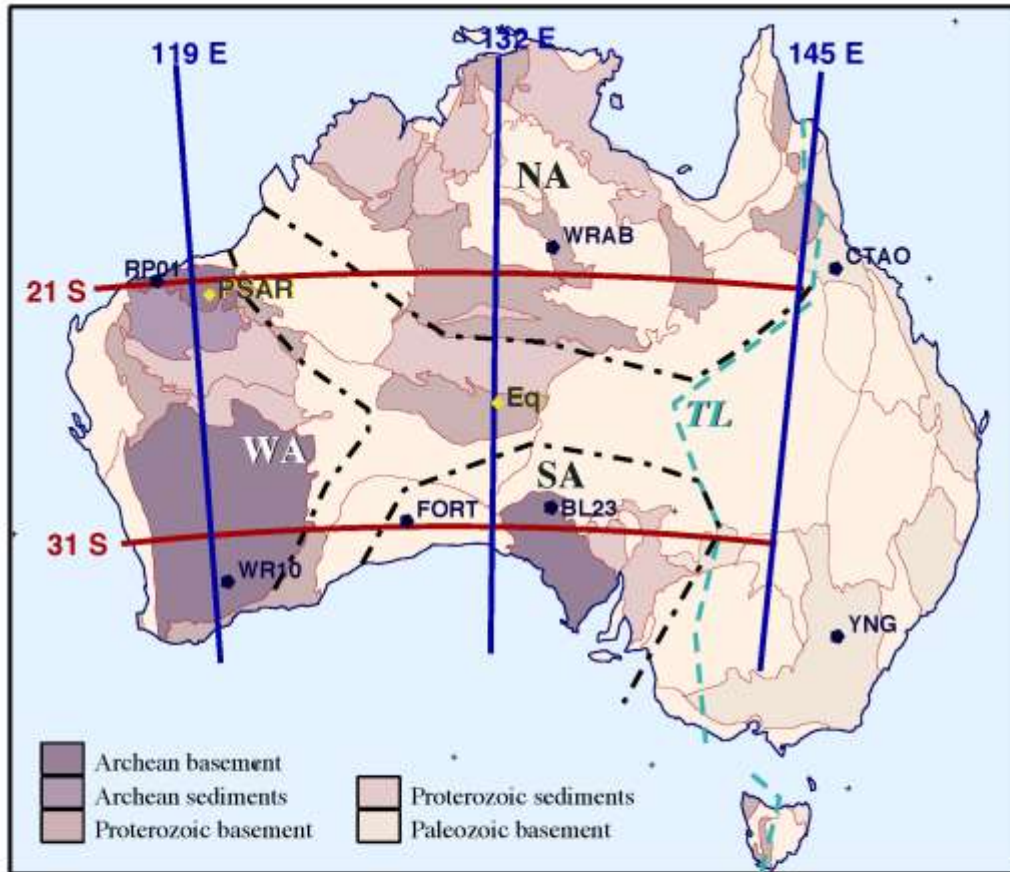


- 地震波衰减结构的变化
- 绝对或相对地震波速的变化
  - 基于面波层析成像
  - 基于体波层析成像（需要考虑垂向模糊性）
- 地震波速变化
  - 与温度等变化有关
- 各向异性结构的变化
- 接收函数
  - S波接收函数避免浅层间断面多次波的干扰
  - 对间断面结构敏感
- 基于台站叠加的自相关波形
  - 台站下方的P波反射信号

# Scales of structure in Australia

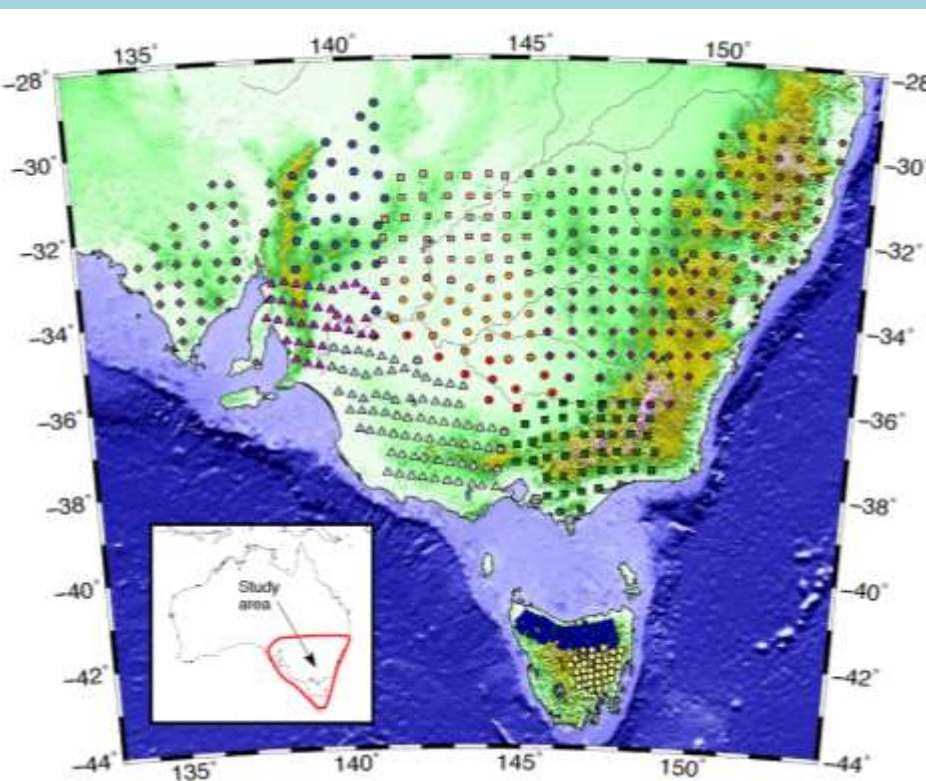
- 大尺度结构的主要研究方法是面波层析成像，横向分辨率大约为200km
- 中等尺度结构来自澳洲东南部密集台阵的走时层析成像，分辨率大约为50km
- 精细的小尺度结构由台站叠加自相关方法获得的台站下方P波反射信号约束。
- 更精细尺度的结构信息来自长距离横向传播的 $P_n$ ,  $S_n$ 波的研究
  
- 综合以上所有结果建立多尺度结构不均匀性模型

# Broad-scale structure across Australia

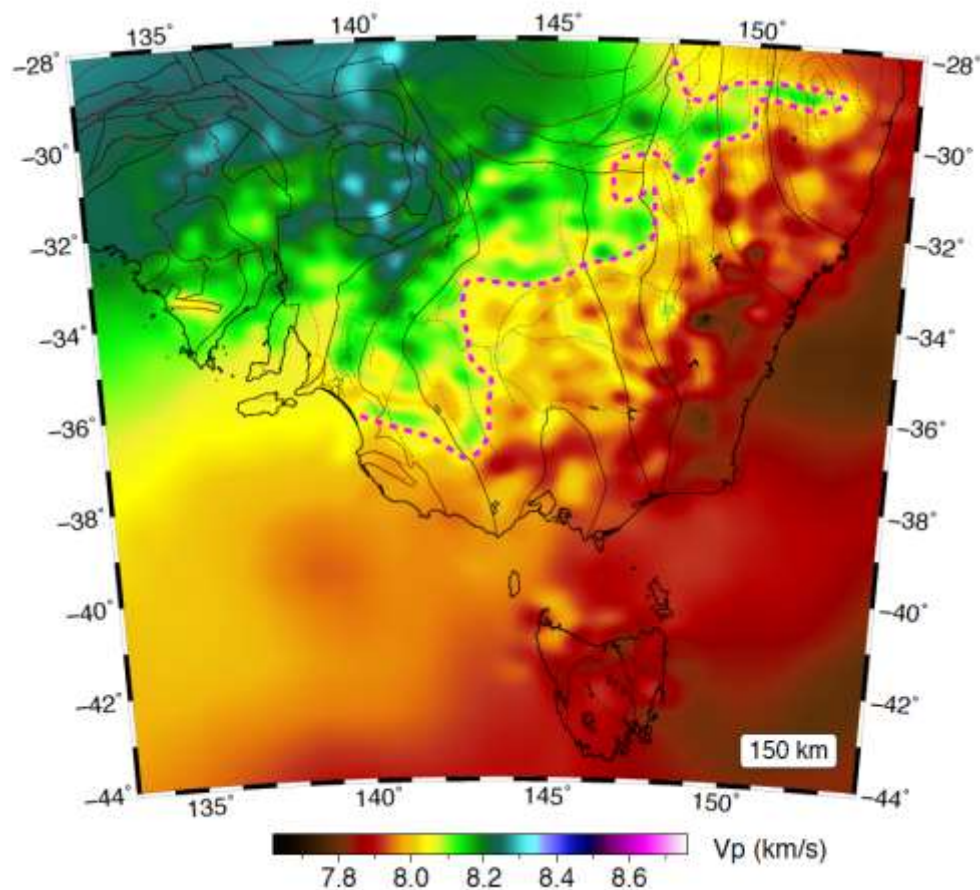


# Regional Behaviour – SE Australia

长波长的背景结构信息来自  
AuSREM模型



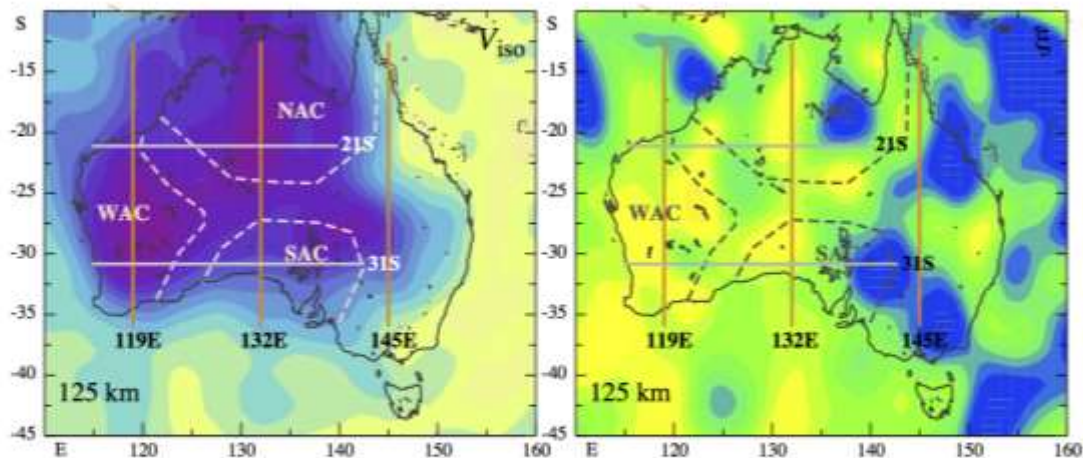
WOMBAT台阵的P波层析成像结果  
揭示了克拉通到年轻的造山带等所有  
地质构造单元的中等尺度结构



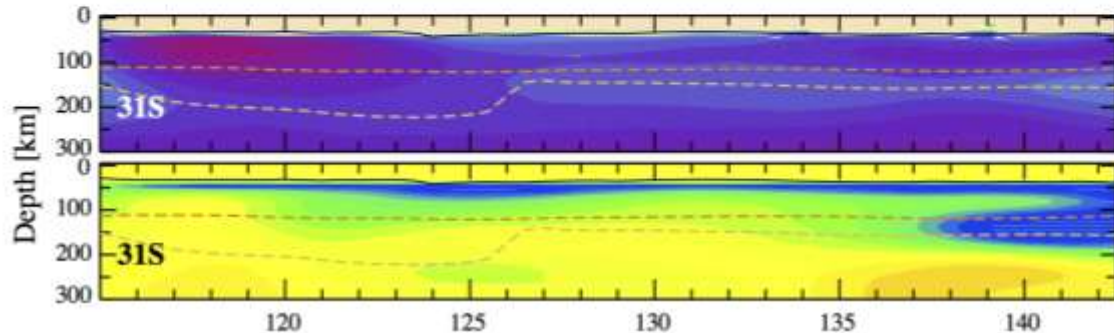
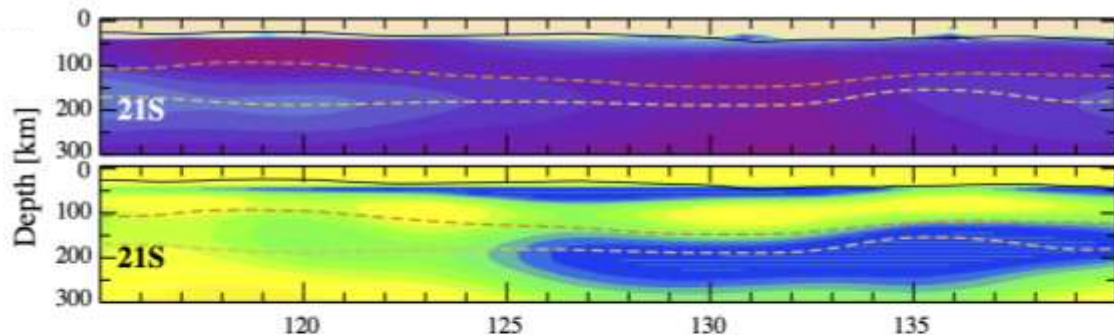


- 岩石圈底界面一般不是尖锐的，需要用其他观测近似表达，例如：热传导到热对流机制改变的梯度过渡带。
- 我们可以假设岩石圈与软流圈过渡带(LAT)的上下边界与垂向S波波速的变化梯度一致
  - 较浅的边界由最大负变化梯度定义
  - 较深的边界由最小的绝对S波波速定义
- 在岩石圈较薄的区域，岩石圈的底界面近似为较浅的边界
- 在岩石圈较厚的区域，一般使用较深的边界表示

# Character of LAT – surface waves



*E-W cross sections*

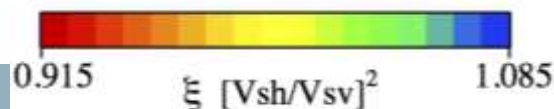
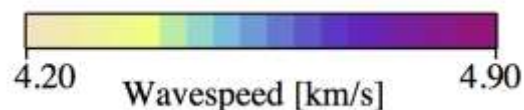


S波速度和  
径向各向异性

Yoshizawa & Kennett  
(2015) GRL

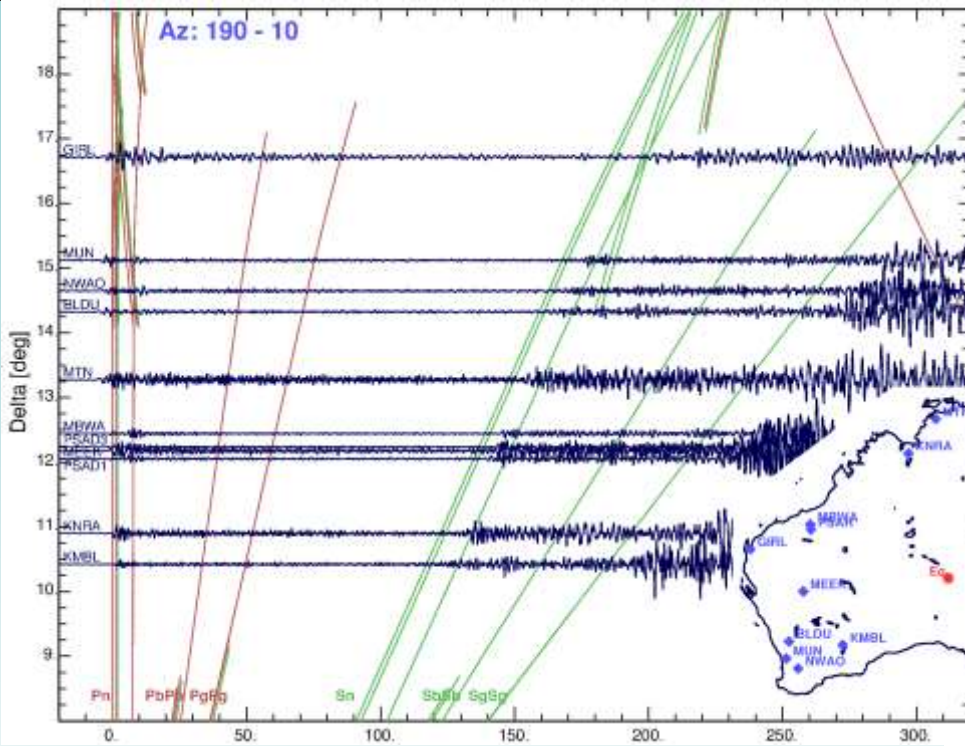
- 125km深度的水平剖面

- 穿越不同年龄构造单元的两条垂向剖面(21S和31S), 二者LAT的特征不同



- 欧亚板块俄罗斯地区的核爆事件(PNE)记录显示:P波可以以很高的频率传播到很远的距离
- 从印度尼西亚俯冲带传播到澳大利亚克拉通的地震波显示:P波与S波都有低频的起跳和后续很长的一段高频尾波
- 更精细的特点与俯冲带系统中震源的位置有关,但P波与S波一般都有几分钟的尾波信号
- 散射能量被聚集在这里,并可以传播很远的距离  
e.g., Kennett & Furumura (2008) GJI

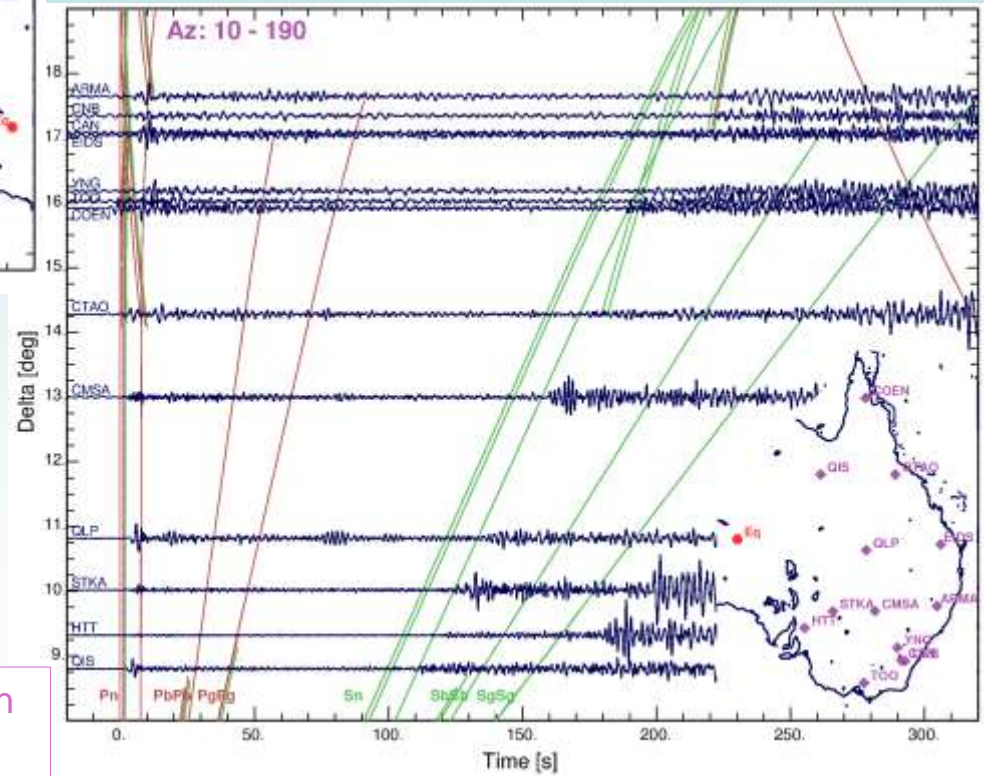
# Ernabella Earthquake - NT



Cratonic paths to western Australia

Non-cratonic paths to eastern Australia

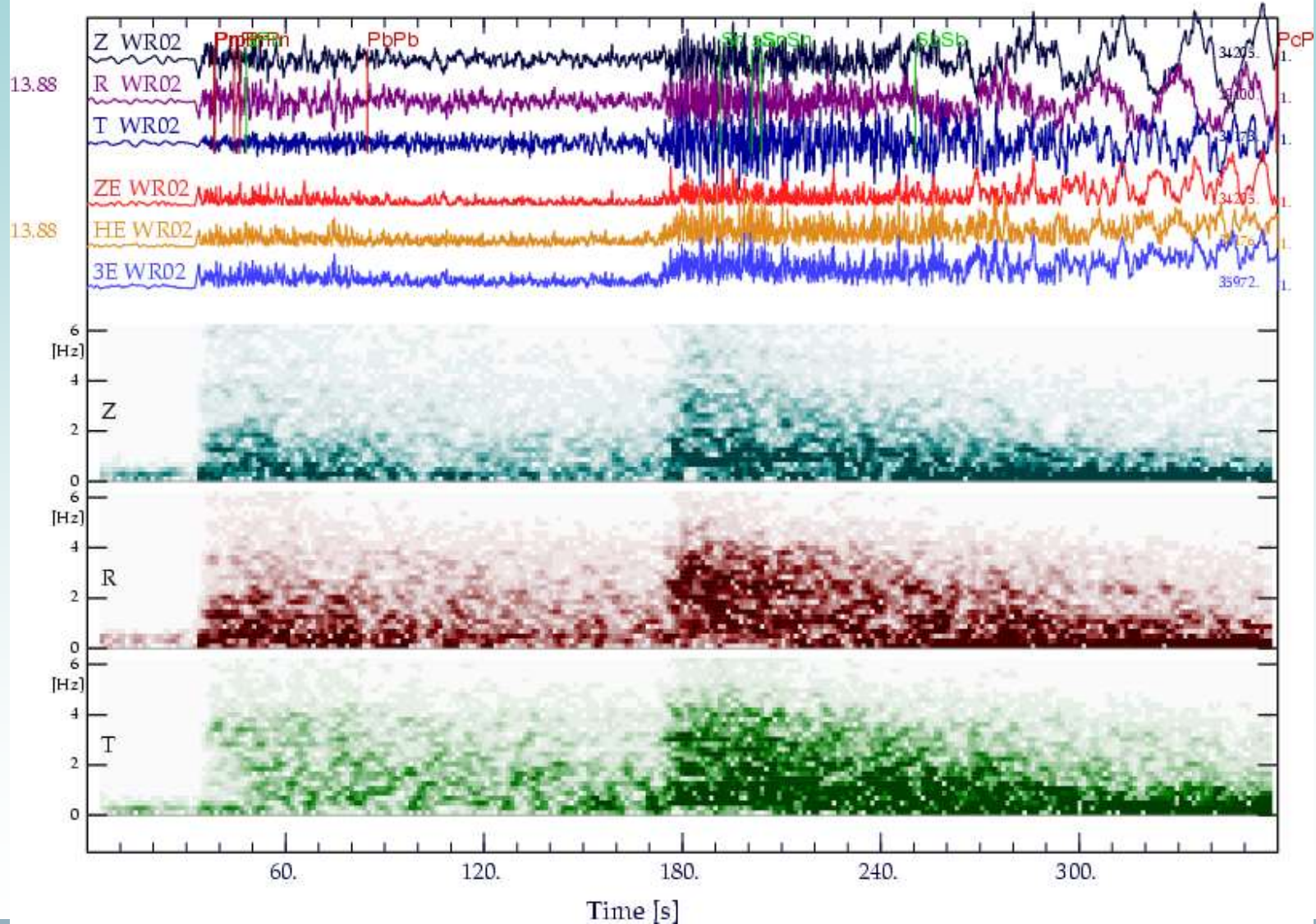
澳洲中部2012年Ernabella地震的记录显示:克拉通和非克拉通地区的地震波传播特点显著不同,暗示二者的结构不均匀性不同。



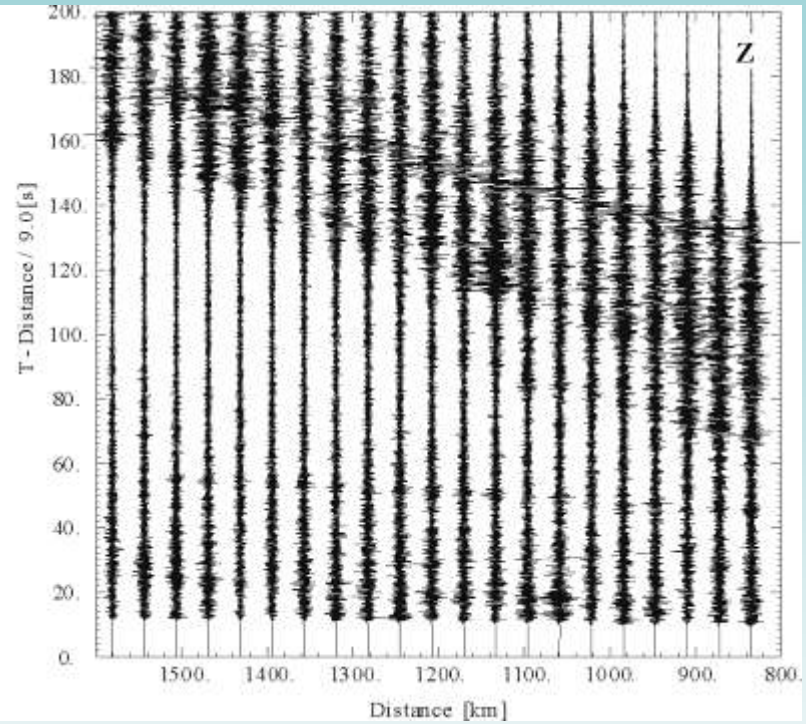
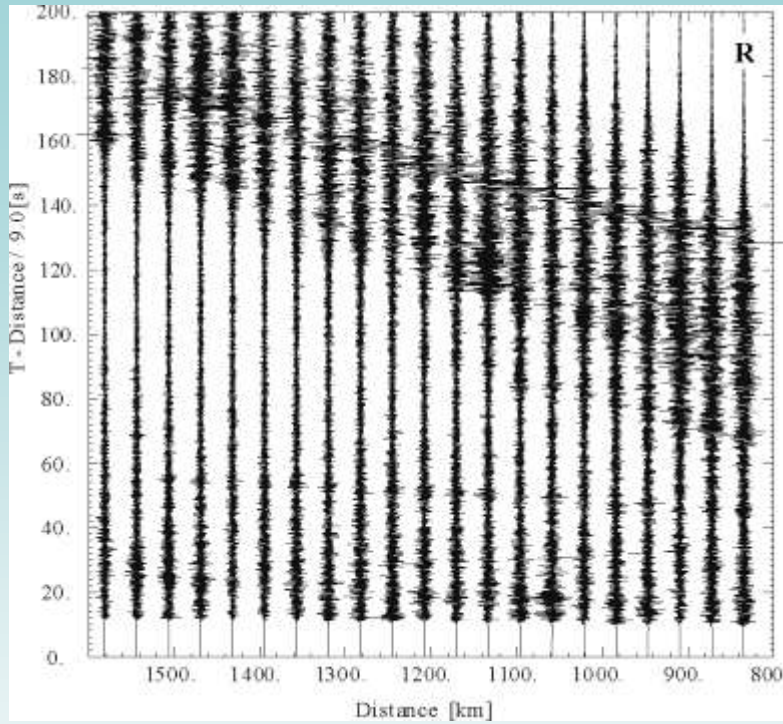


# Sustained high-frequency arrivals

ZDF: WACR 2000 281 11

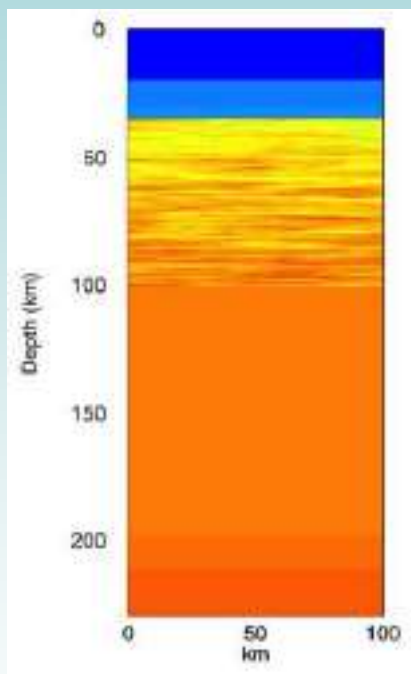


# 2D FDM Simulation with stochastic random heterogeneities



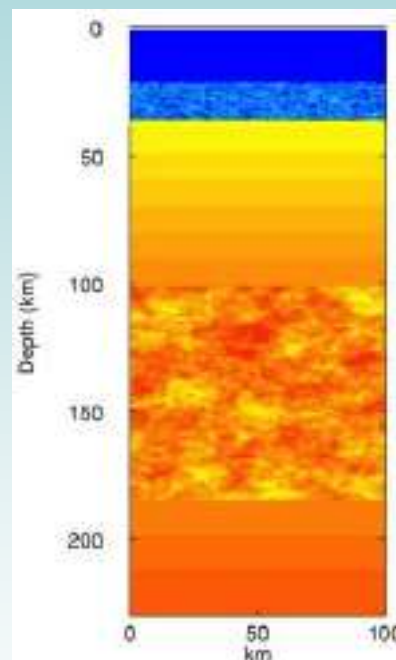
# Distribution of Heterogeneity?

- 对欧亚板块核爆事件(PNE)产生的P波信号的大量研究表明: 结构不均匀性有不同的类型



Fuchs,  
Wenzel

Strong  
quasi-  
laminar  
het. in  
upper  
mantle



Nielsen &  
Thybo

Strong  
lower  
crustal  
het. +  
Complex  
lvz

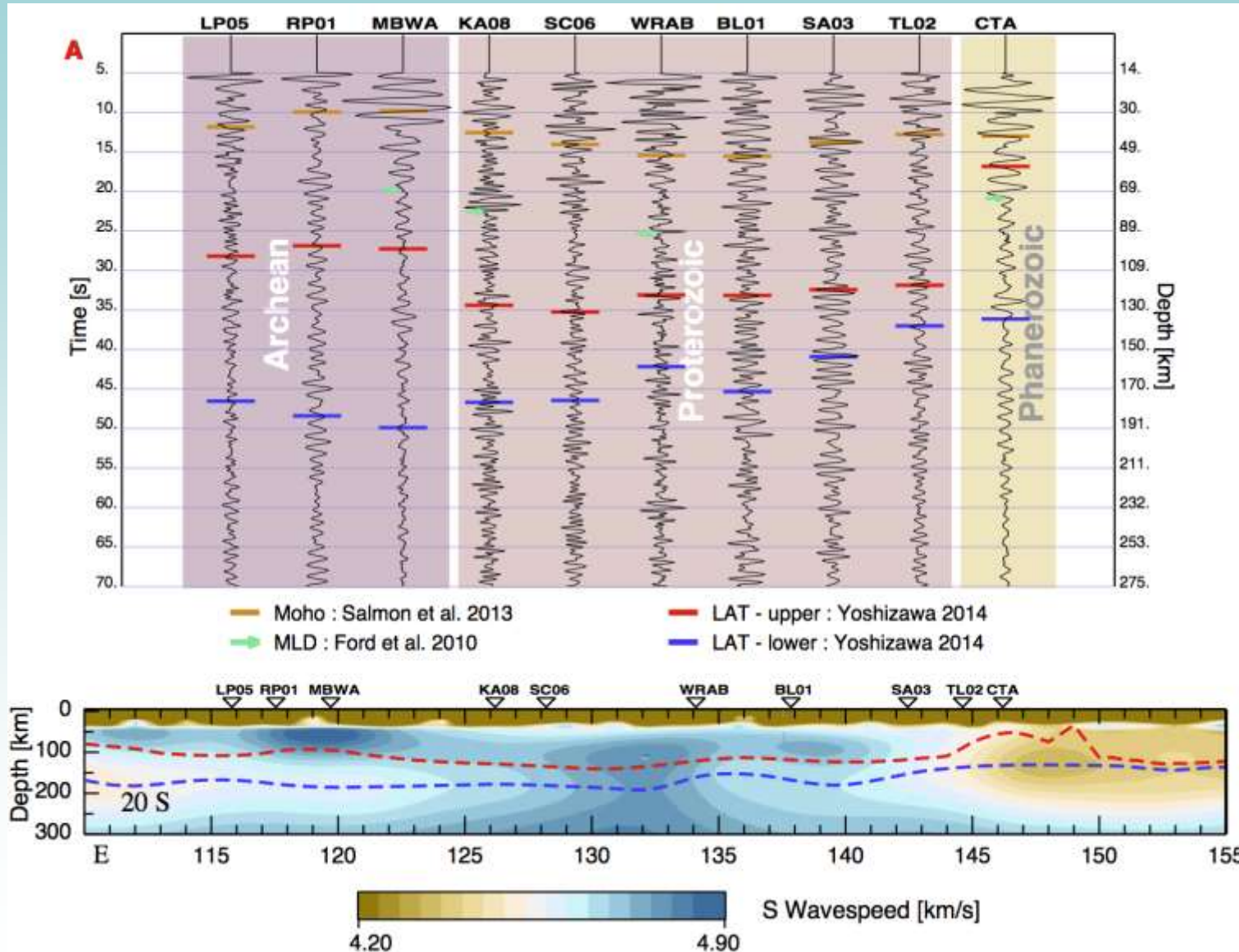
- 澳洲地区的P波和S波研究结果说明: 至少100km深度以上, 可能存在结构不均匀性的改变
- MLD可能对应着结构不均匀性的改变

- 台站叠加自相关波形中提取的P波反射信号可以实现岩石圈软流圈过渡带的近垂直采样
- 可以利用连续的波形或基于地震的波形信息
- 与接收函数不同，采样不依赖于转换波分布
- 反射信号的采样集中在台站下方较窄的椎体区域



基于连续记录的台站叠加自相关方法获得的复杂走时信息

由S波接收函数数获得的MLD与反射信号的变化一致

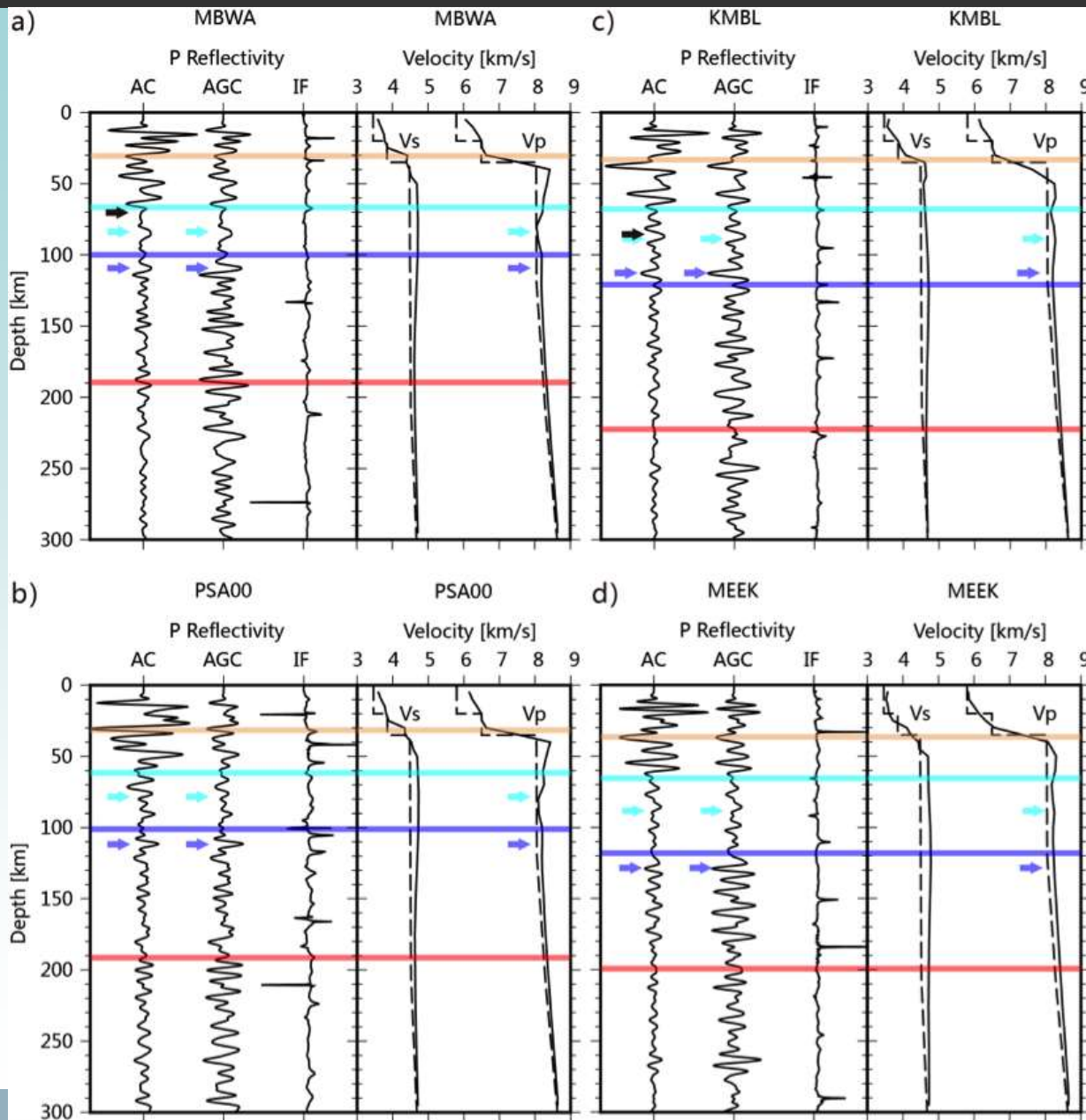




# P reflectivity in Western Australia

由远震记录获得的台站叠加自相关波形

反射信号的变化由自动增益控制方法 (Automatic gain control, AGC) 标出



Sun et al (2018)  
JGR

- MLD仍然是未知的, 而且不直接对应P波反射信号的变化
- 有效的模型既包括岩石圈地幔顶部的局部分层式 (quasi-laminar) 的结构不均匀性也包括下地壳强烈的结构不均匀性
- LAT部分的结构不均匀性的变化与观测结果一致
- LAT部分的S波速度随深度降低, 但在澳洲大陆, 也有较低的衰减结构

- 全面的地震学岩石圈模型需要包含所有尺度的结构不均匀性
- 大尺度 (>200 km) - deterministic  
例如: AuSREM参考模型
- 中等尺度 (50-200 km)
- 小尺度 (<50 km)
- 小尺度结构需要使用随机性表示 (Stochastic representations), 具体由水平或垂向的相关长度决定

## Base structure from surface wave tomography

- Horizontal scale length > 200 km

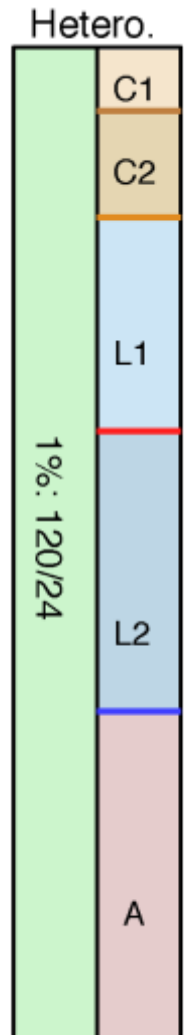
## Heterogeneity regimes used in multi-scale model: amplitudes and correlation lengths.

### *Medium-scale*

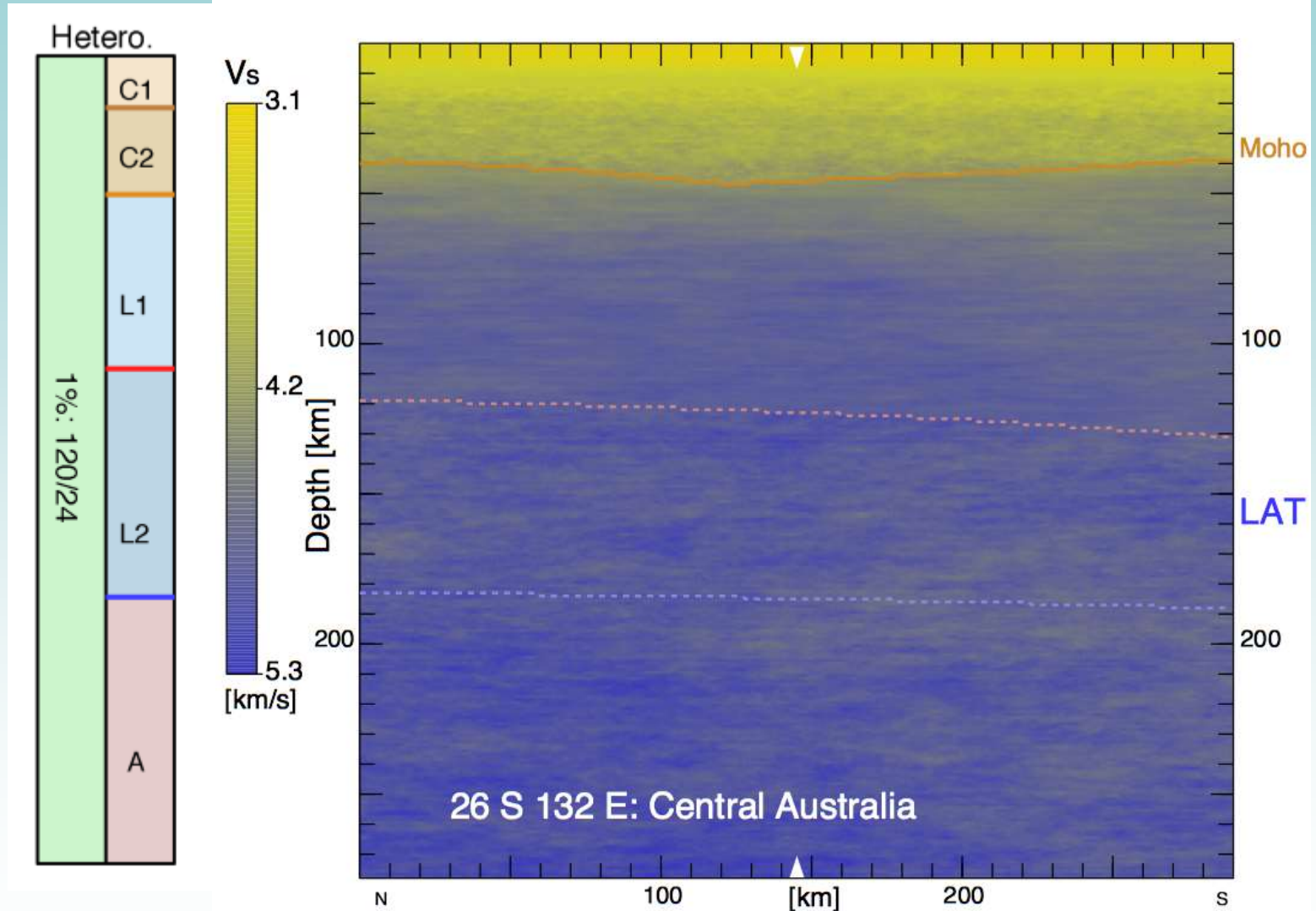
Depth range	rms het	horiz correl.[km]	vert. correl. [km]
0-300 km	1%	100	24

### *Fine-scale*

Depth range	Label	rms het	horiz correl. [km]	vert. correl. [km]
0-15 km	C1	0.5%	2.6	0.4
15-M km	C2	1.5%	2.6	0.4
to top LAT	L1	0.5%	10.0	0.5
LAT	L2	1.0%	5.0	1.0
AST	A	1.0%	5.0	1.0

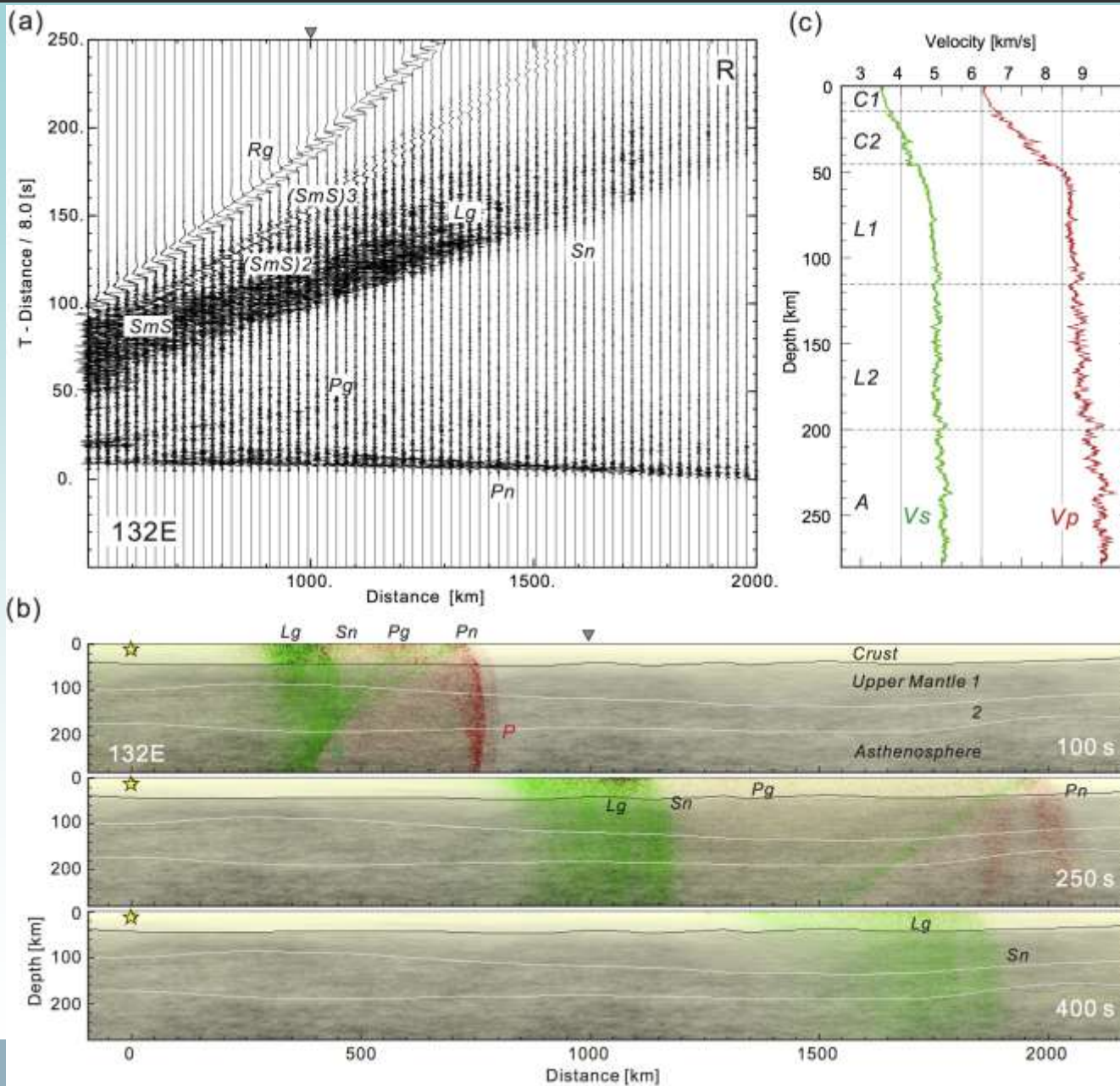


# Multi-scale heterogeneity III

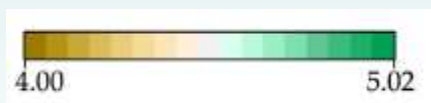
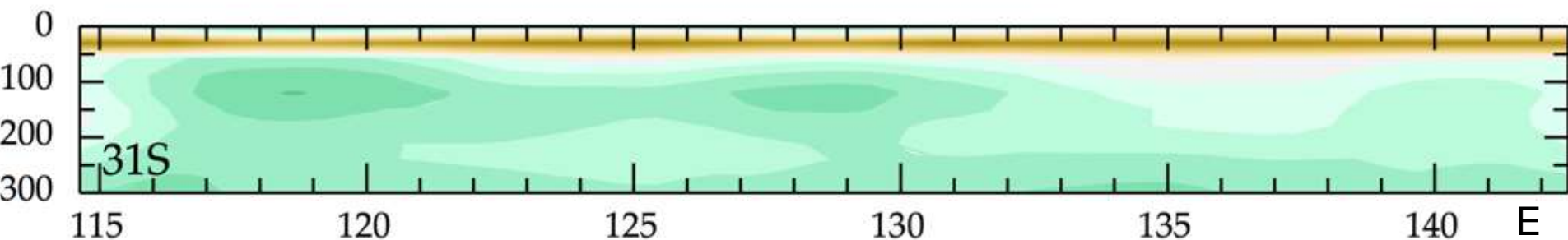
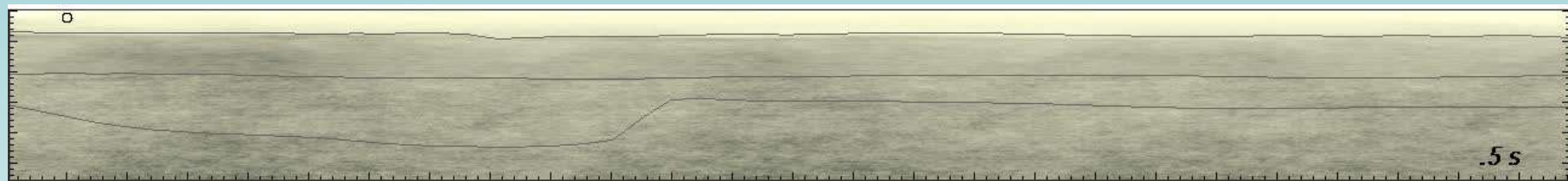


## 多尺度模型的 二维数值模拟 (132E)

震源深度10km



31S二维剖面的数值模拟结果(震源深度是10km)



AuSREM Model 2012

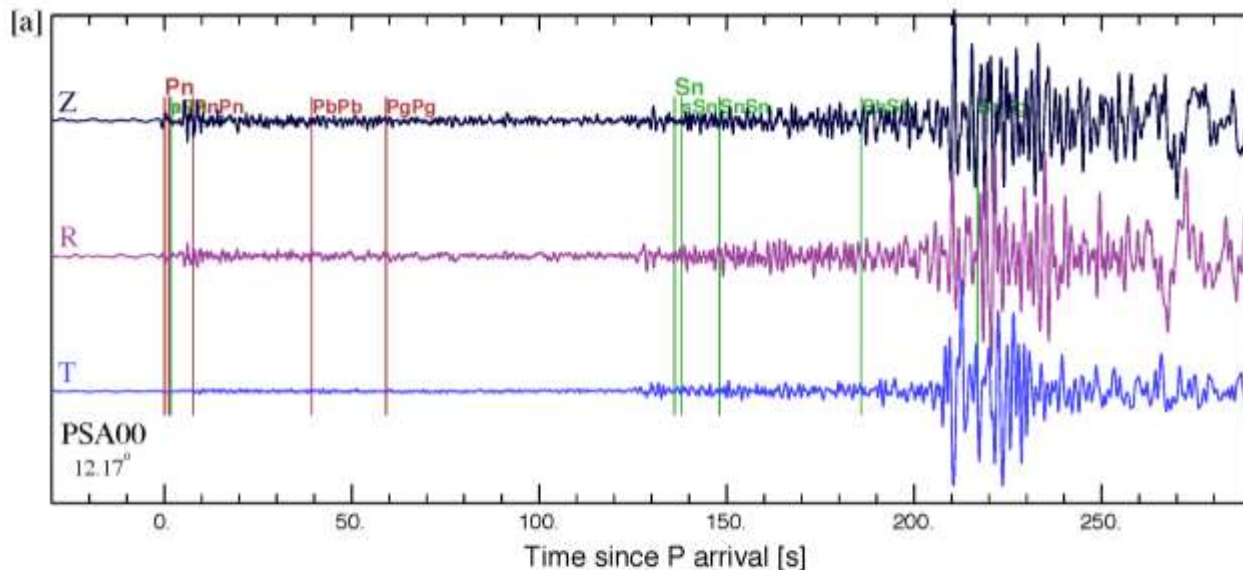
综合从大到小所有不同尺度的结构信息非常重要



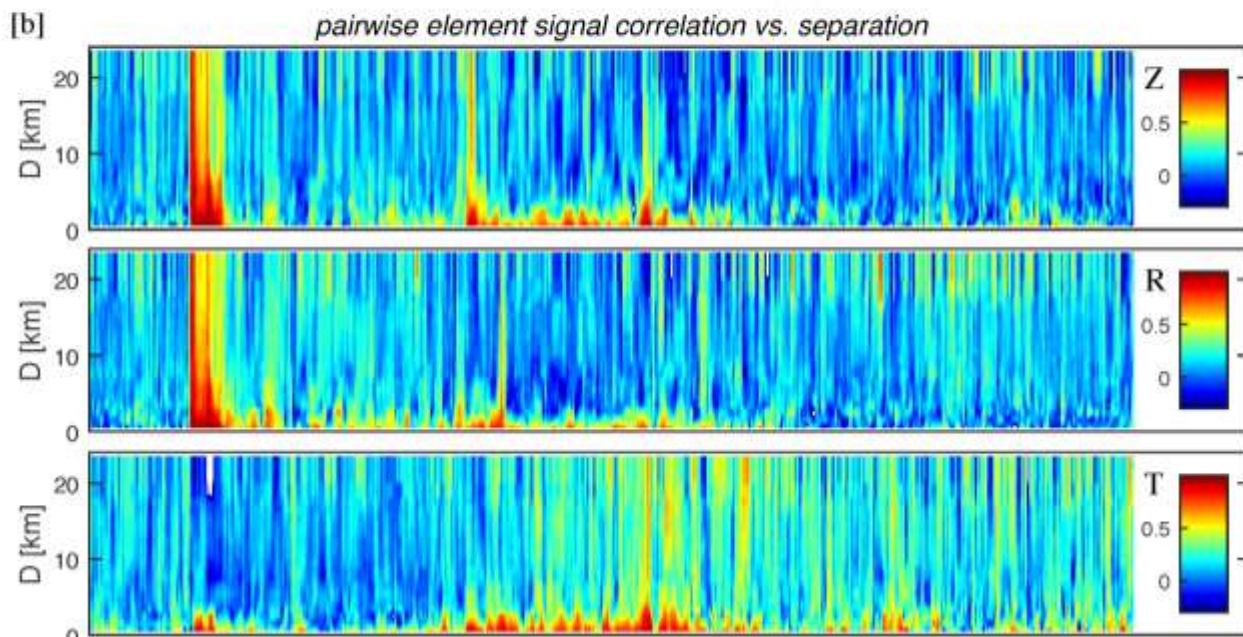
# Ernabella Eq – Pilbara Array

沿澳洲克拉通传播的复杂地震波形举例

从澳洲中部传播到西北部的PSAR台阵 (12.17 deg – 1350 km)



整个台阵P波和S波的高频复杂尾波信号

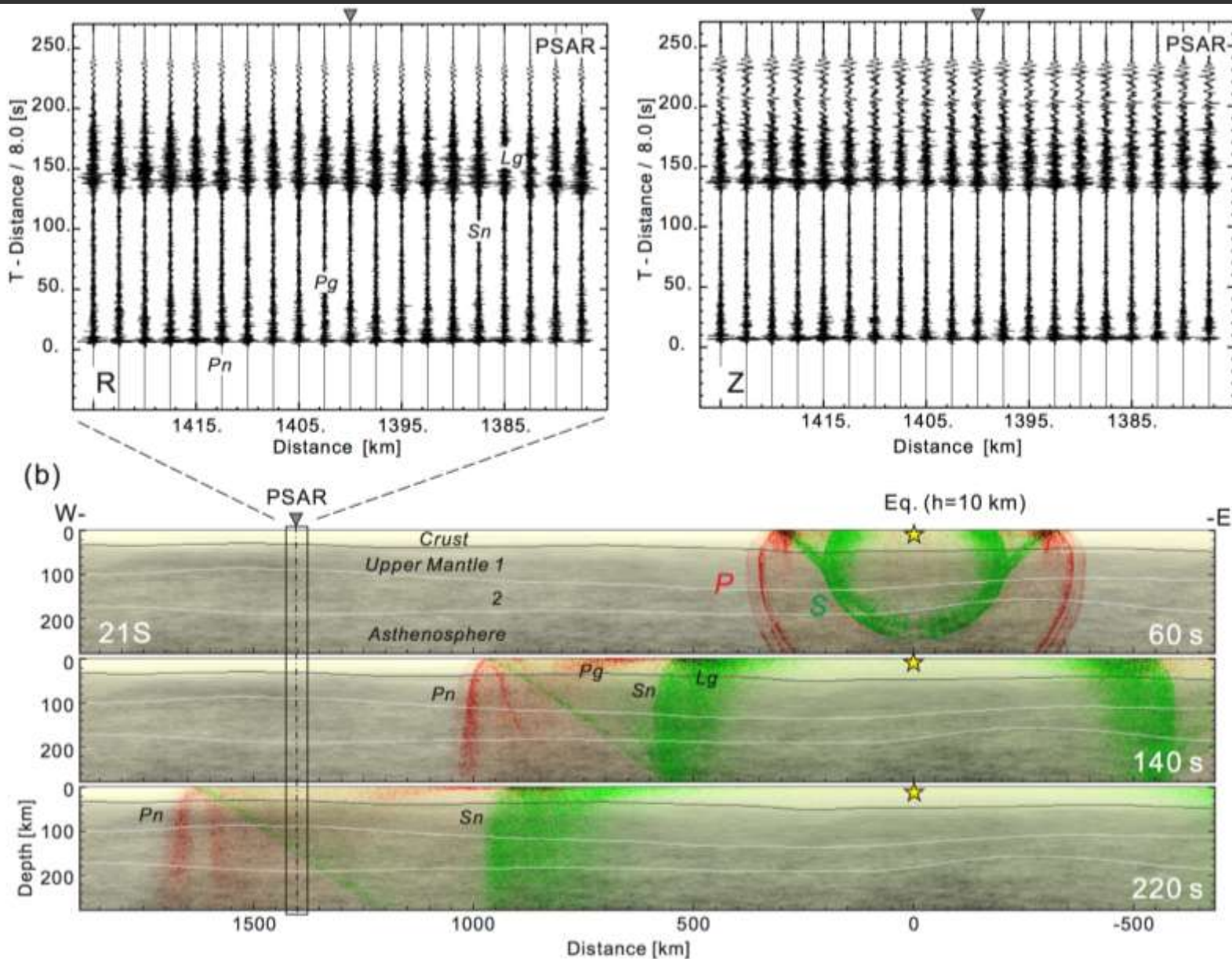


台阵的信号一致性:

P波一致性较强;  
S波一致性较弱

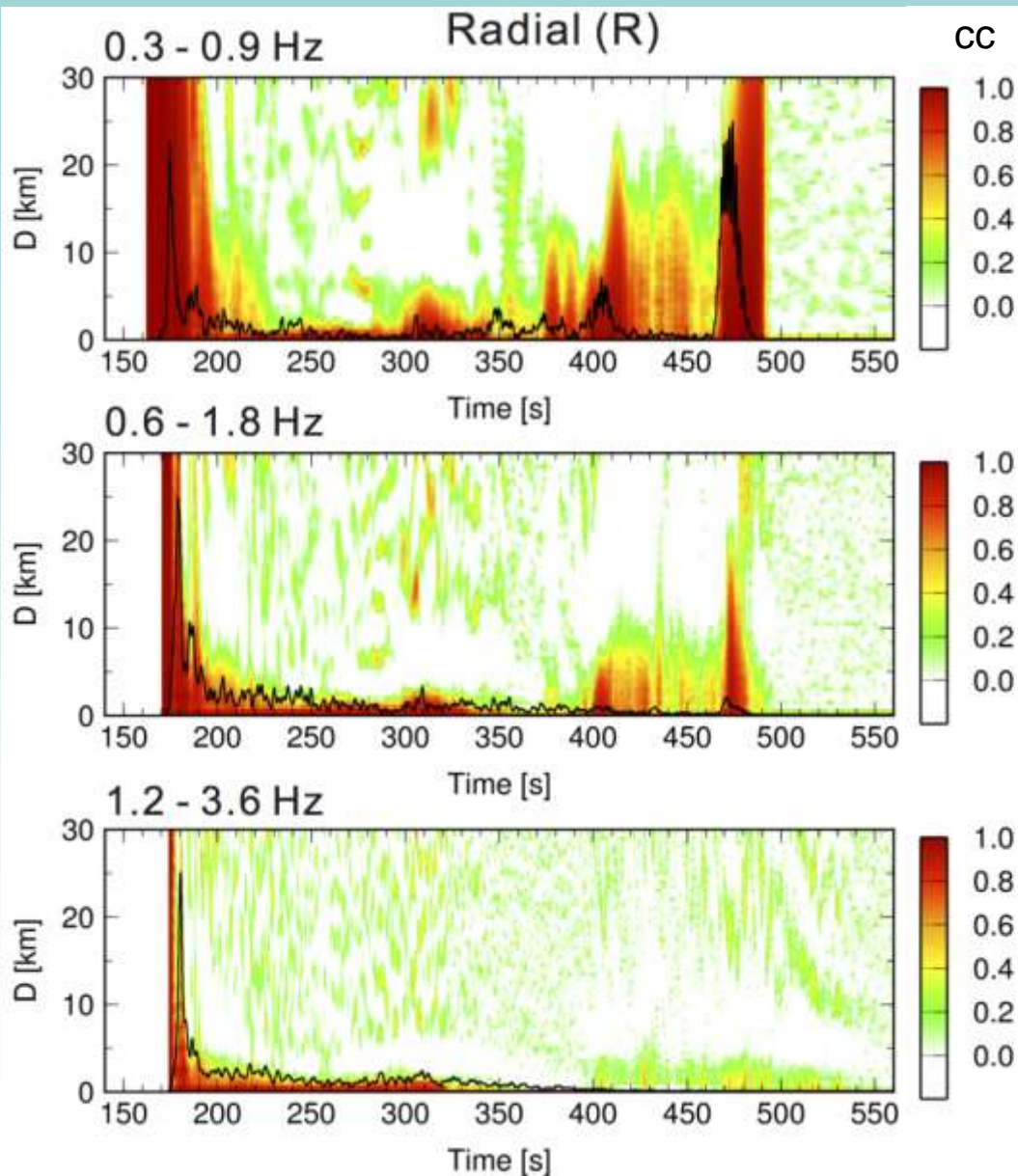
# Ernabella Eq – Pilbara: multi-scale simulation I

模拟的复杂波形与观测一致



多尺度模型模拟  
的台站间一致性  
与观测相似

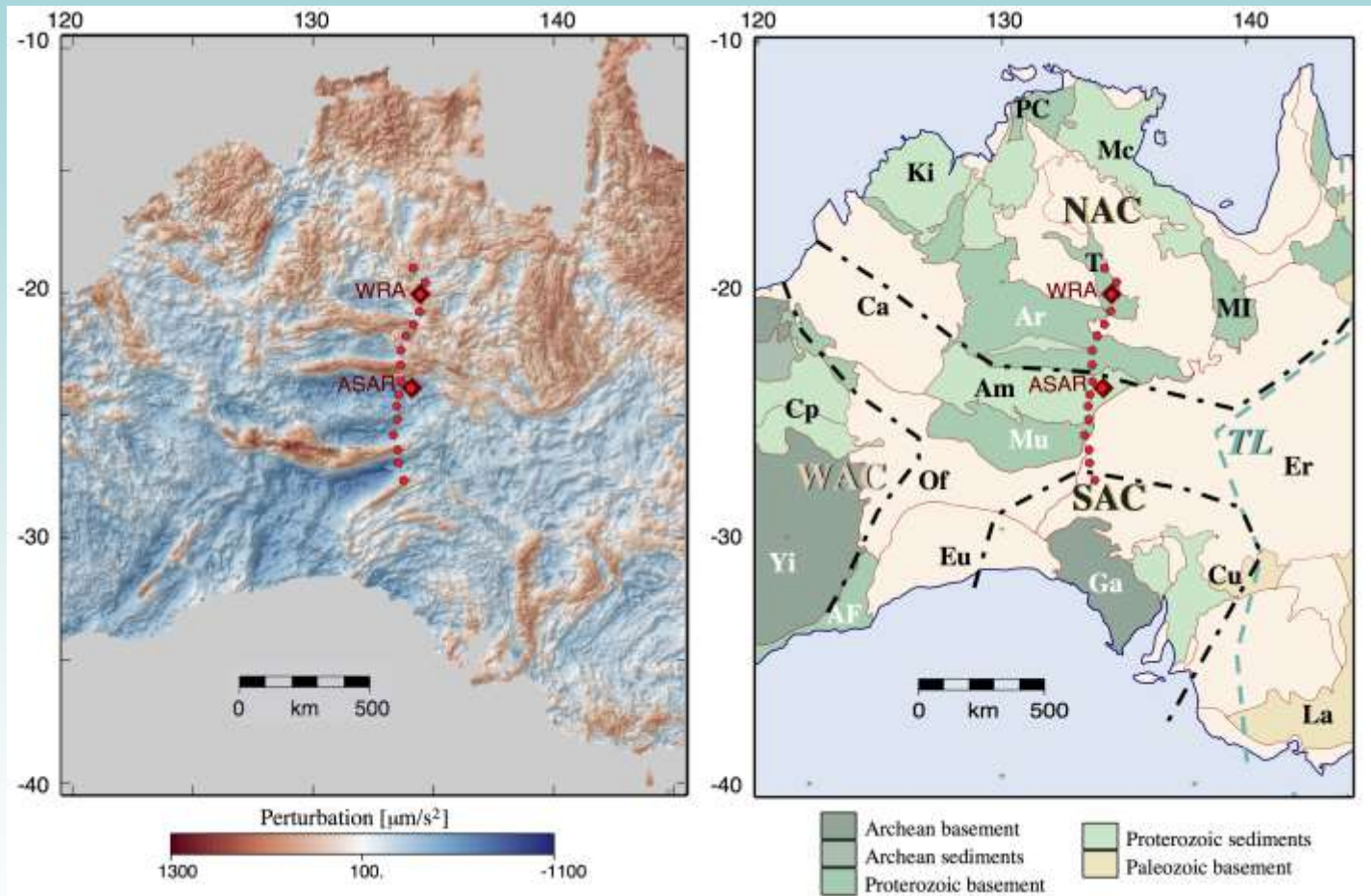
整个台阵的P波信号  
一致性较强，但S波  
信号，尤其是高频成  
分，一致性较弱



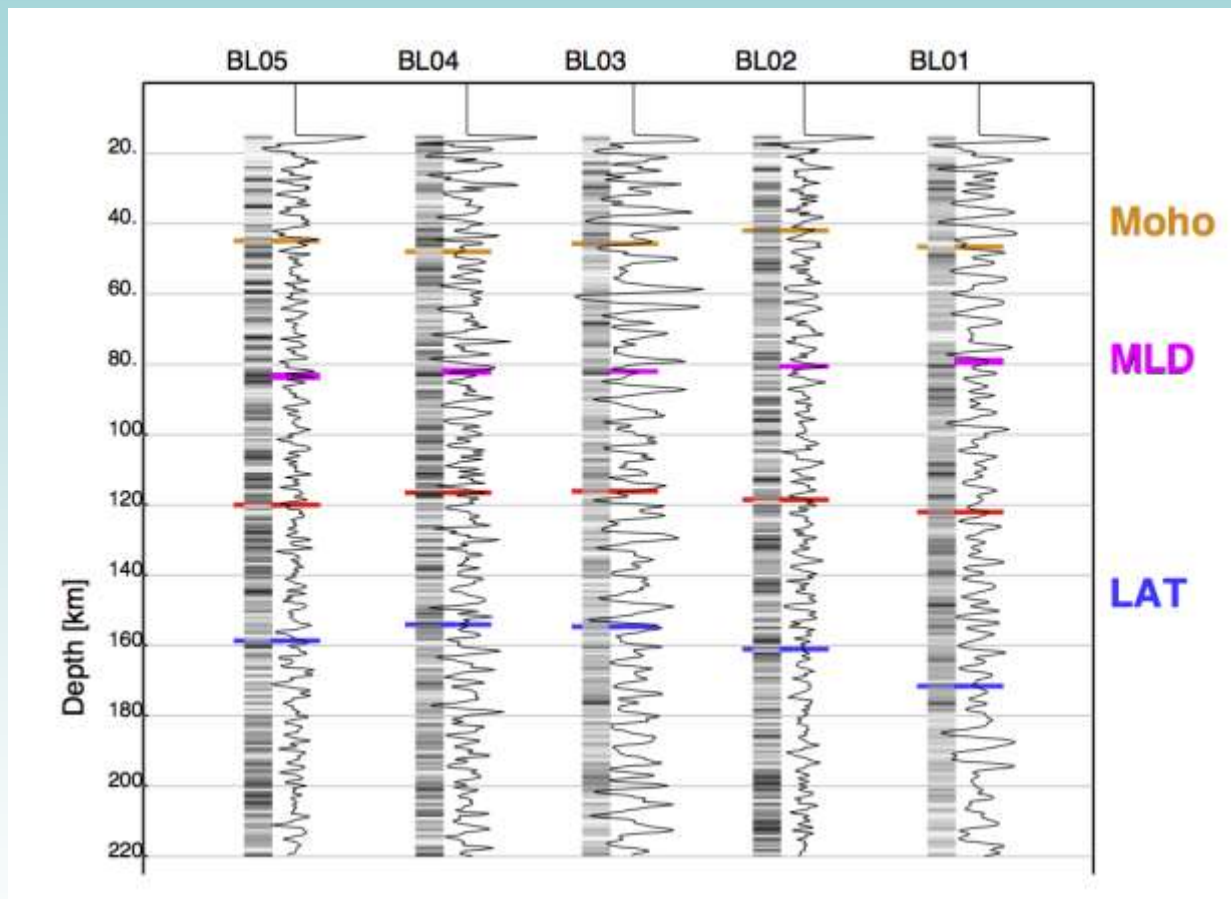
# Central Australia

穿越澳洲中部连接  
WRA和ASAR台阵  
的BILBY密集测线

台站叠加的自相关  
获得的P波反射信号  
与接收函数的CCP  
叠加

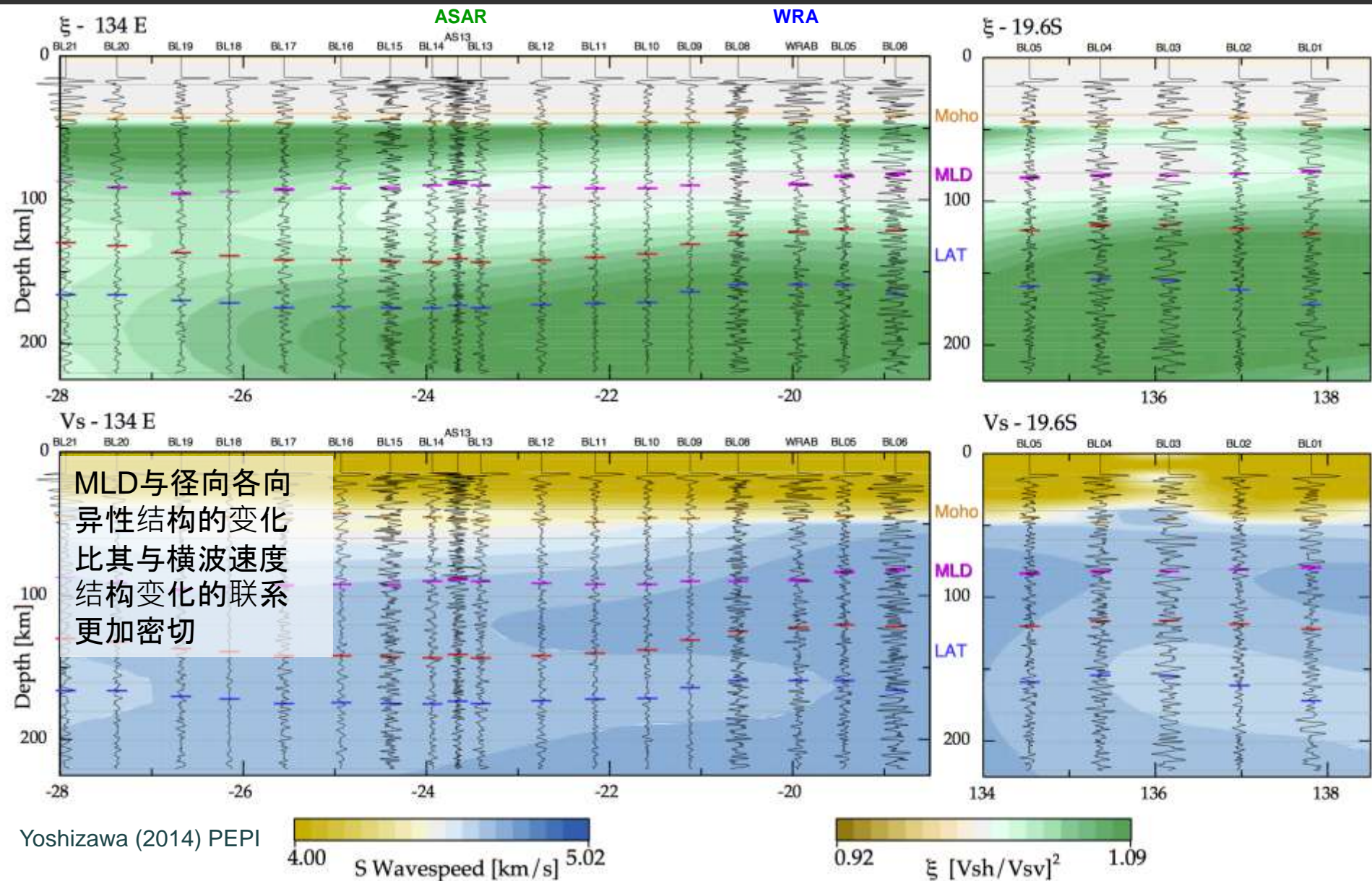


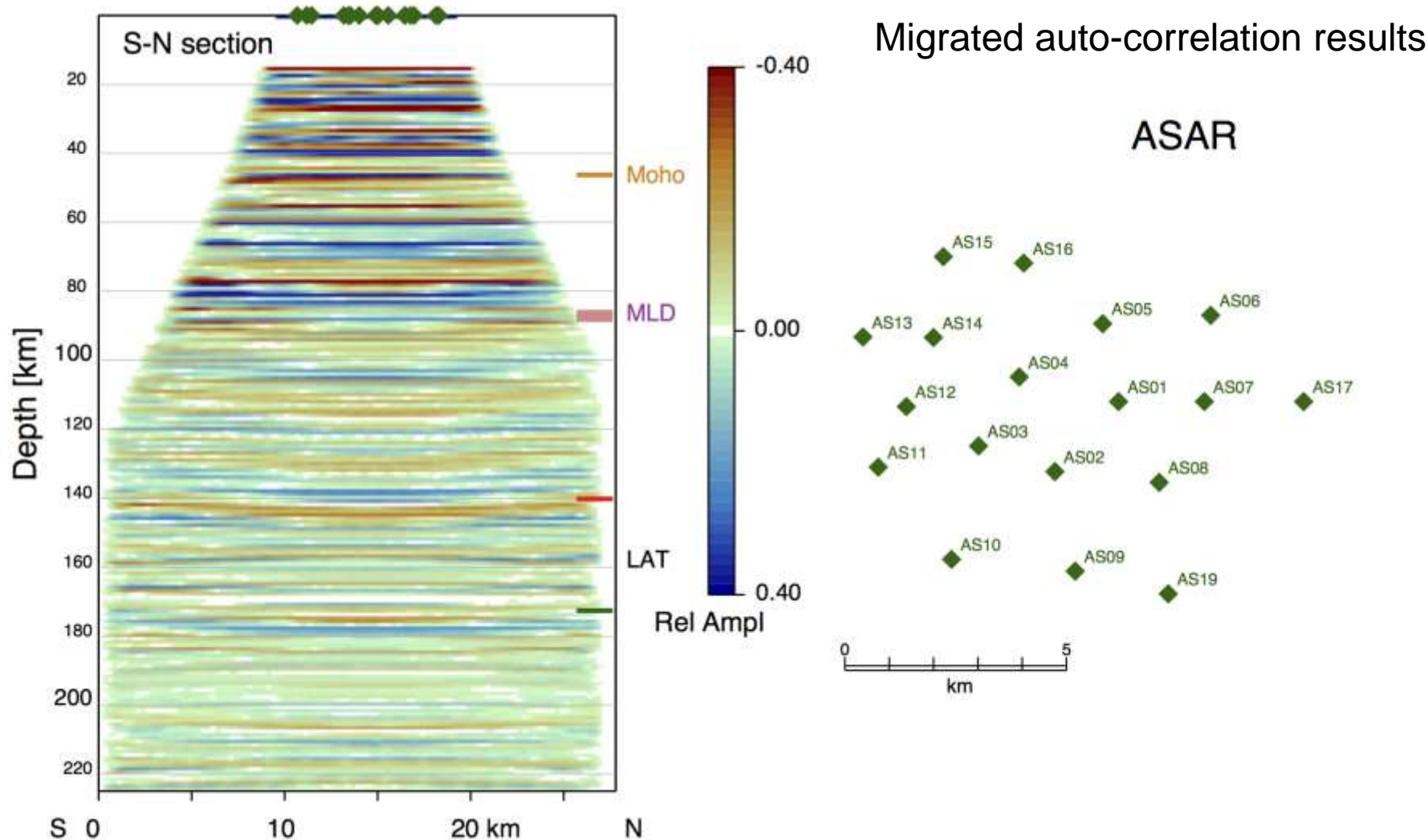
- Moho来自 AuSREM模型
- LAT 来自 Yoshizawa (2014) PEPI
- MLD利用P波反射信号的瞬时频率变化识别





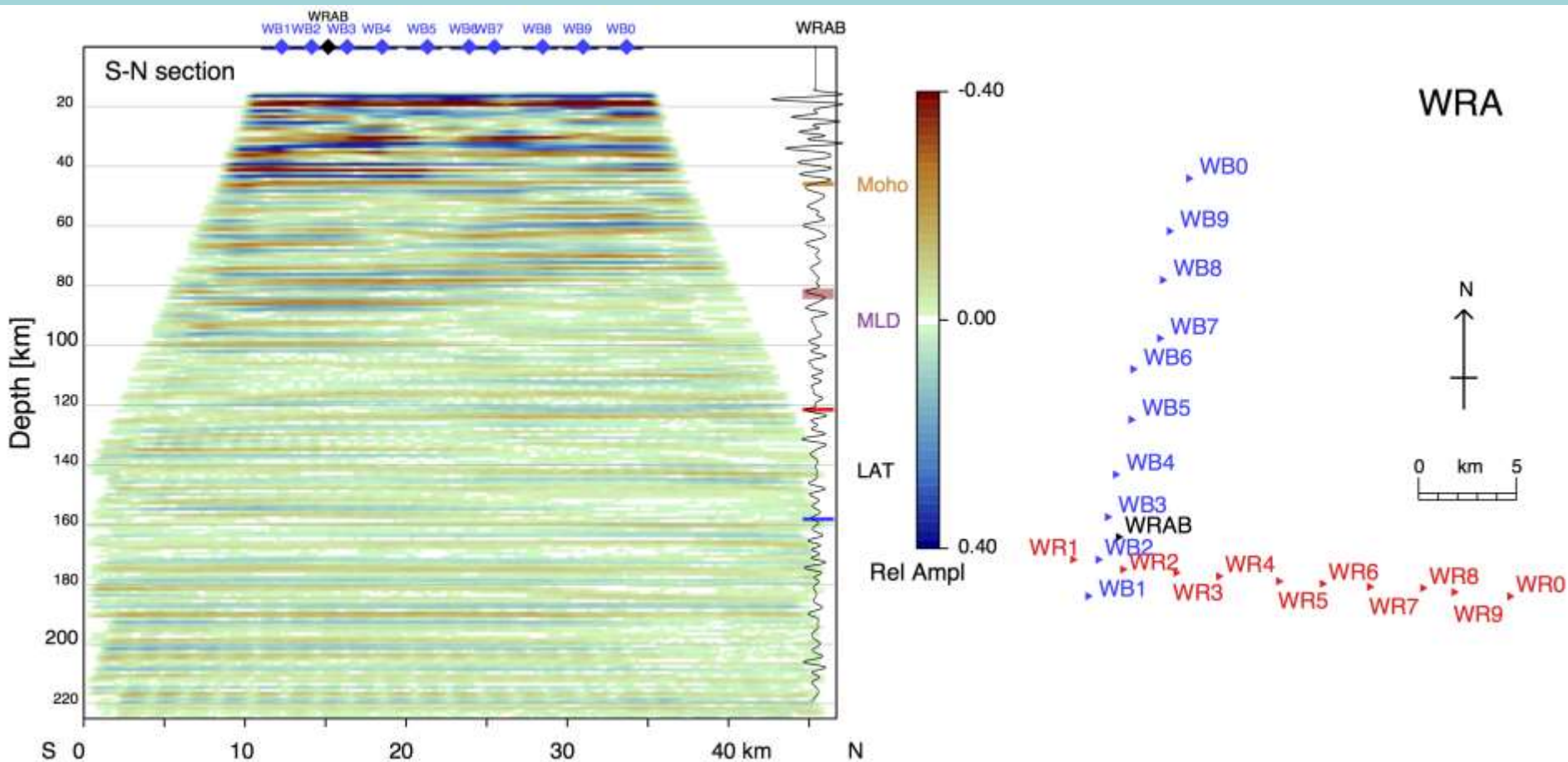
# Central Australia – lithospheric discontinuities





从南到北，沿着整个10 x10 km 的ASAR台阵，P波反射信号在大约90km深度处有一致的变化

# WRA – lithospheric discontinuities

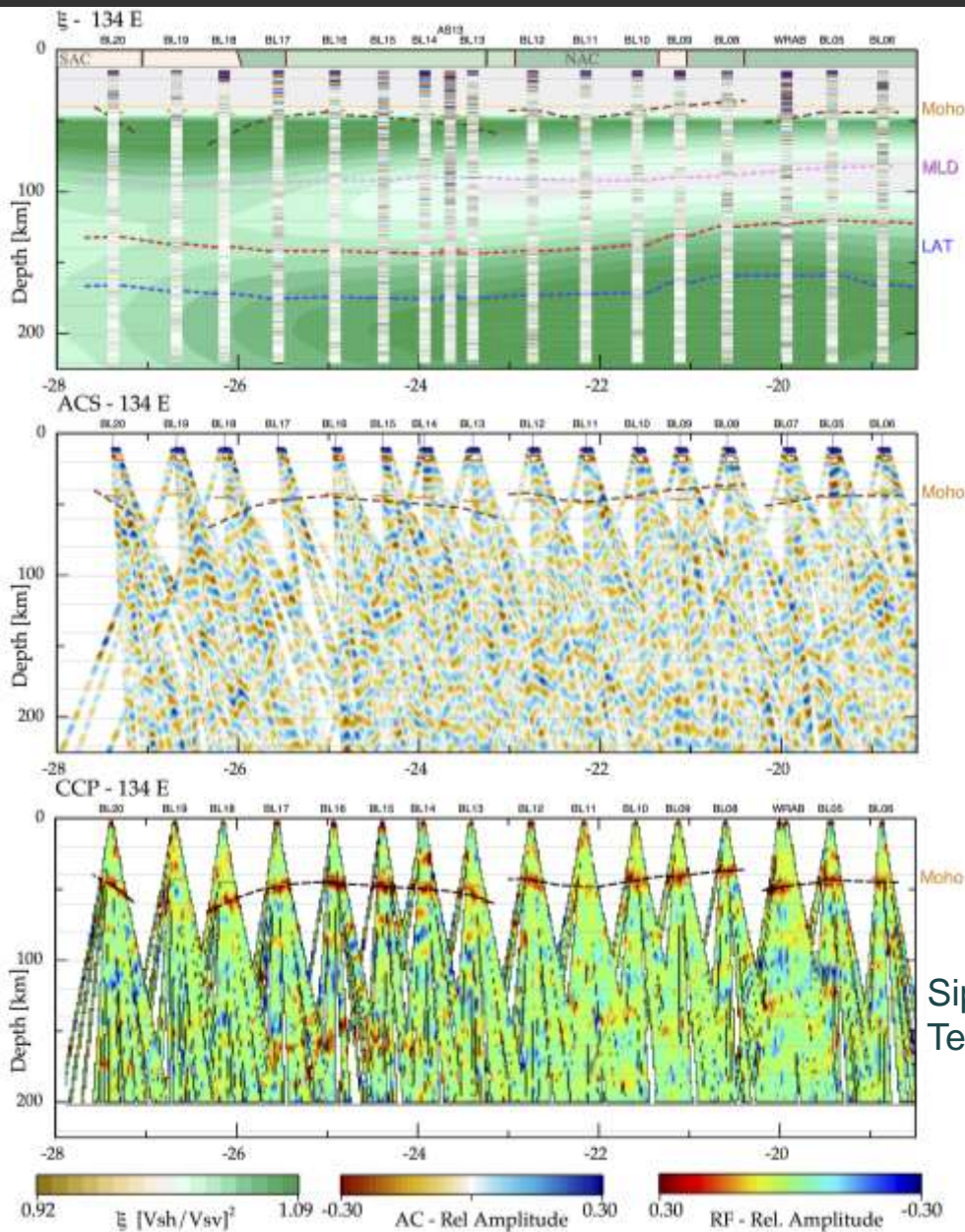


大约90km深度处P波反射信号的变化与Ford et al. (2010)利用WRA台阵的S波接收函数研究获得的MLD较为一致。

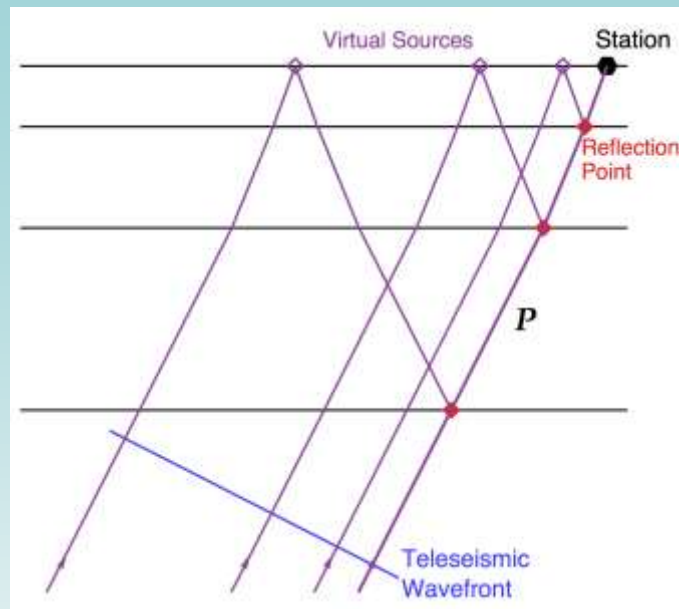




# Central Australia – receiver based studies I



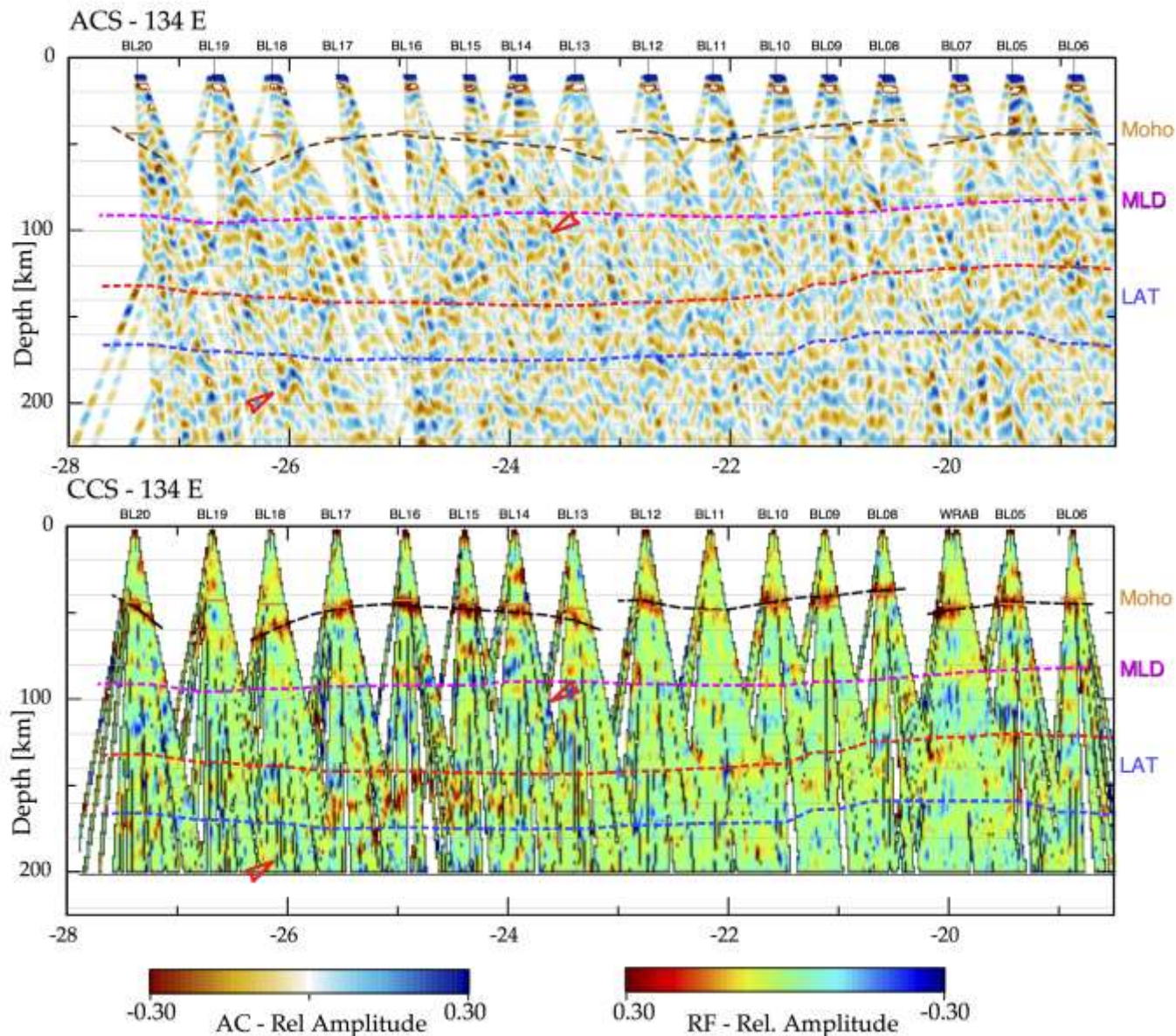
Sippl (2016)  
Tectonophysics



单台叠加自相关获得的P波反射信号

自相关波形获得的P波反射信号共反射点叠加

接收函数CCP叠加

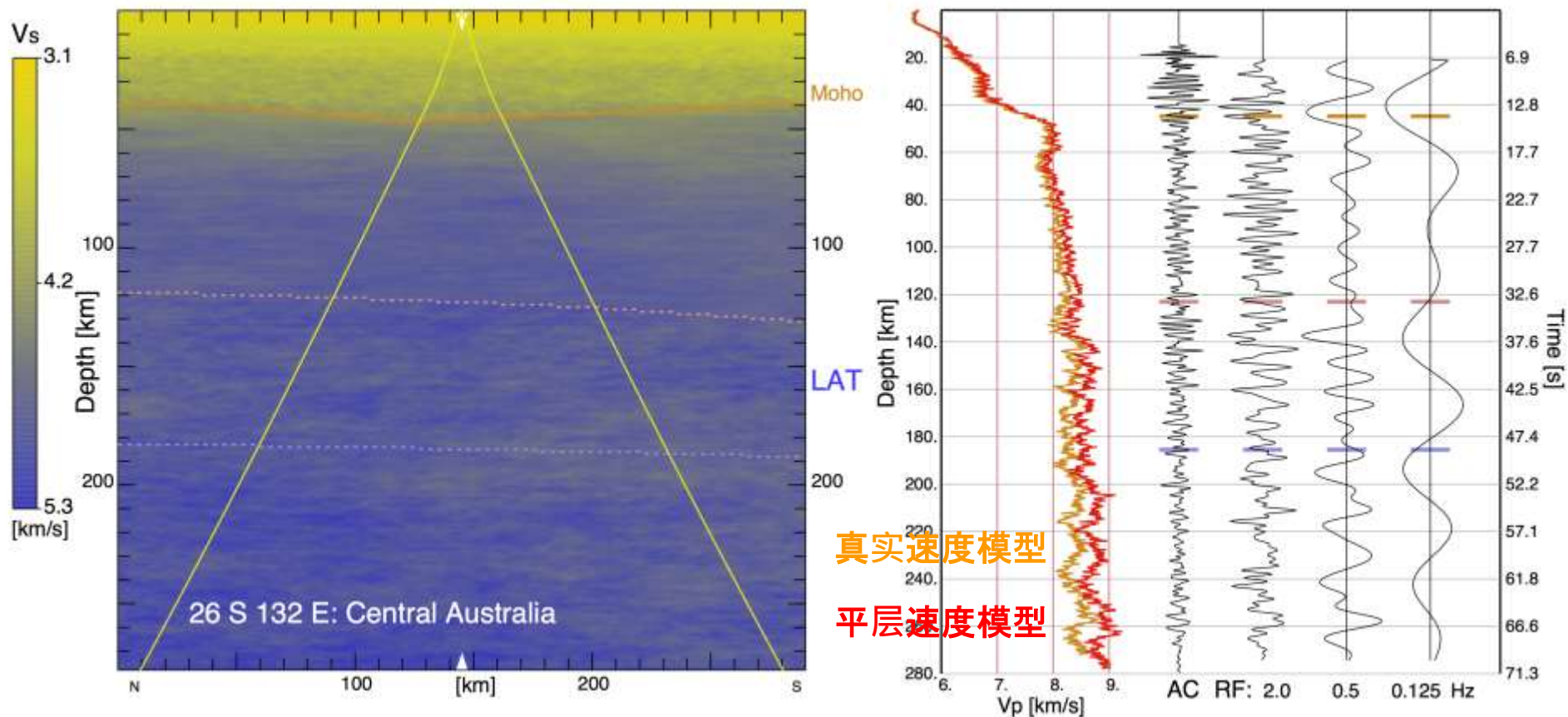


自相关叠加和接收函数CCP叠加

二者均利用了来自远震的走时信息并揭示相似的结构

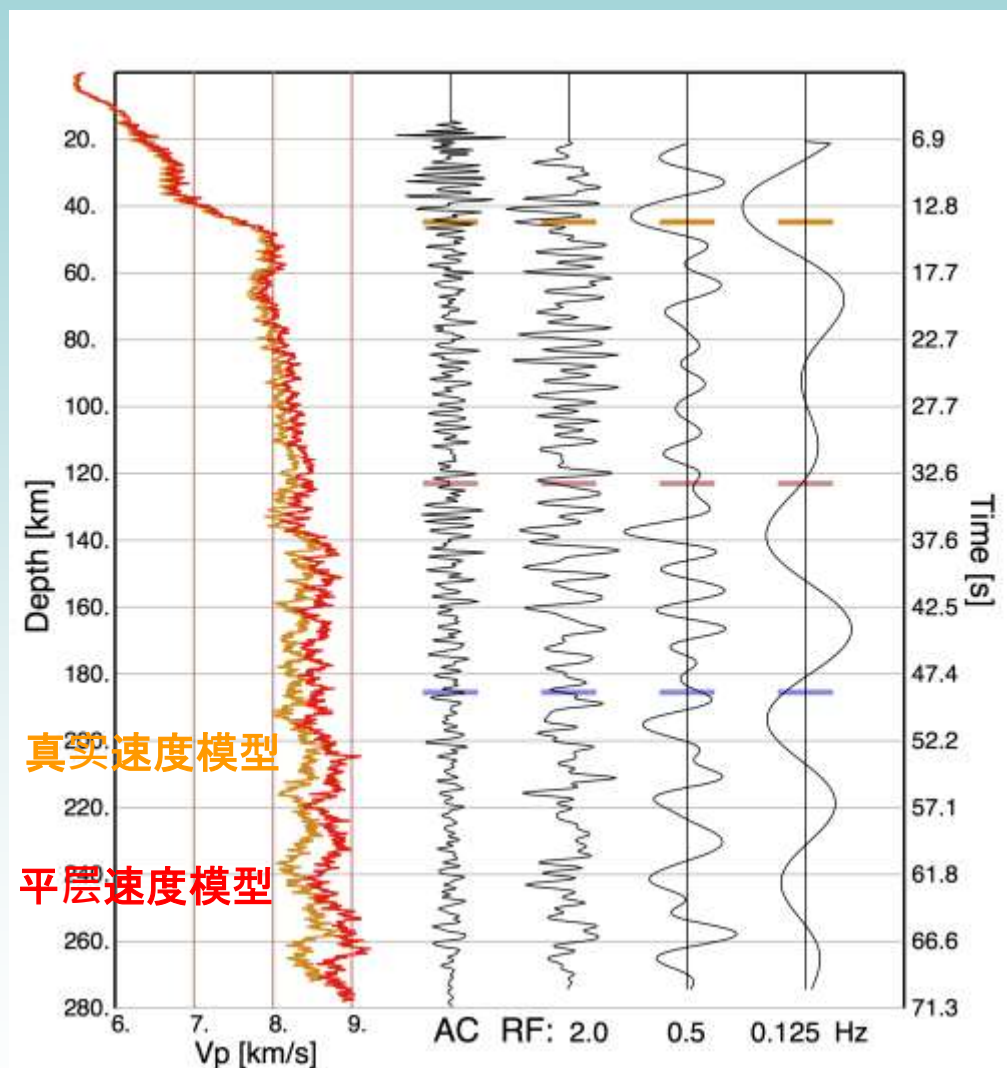
Kennett & Sippl (2018) Tectonophysics

# Simulations from multi-scale heterogeneity

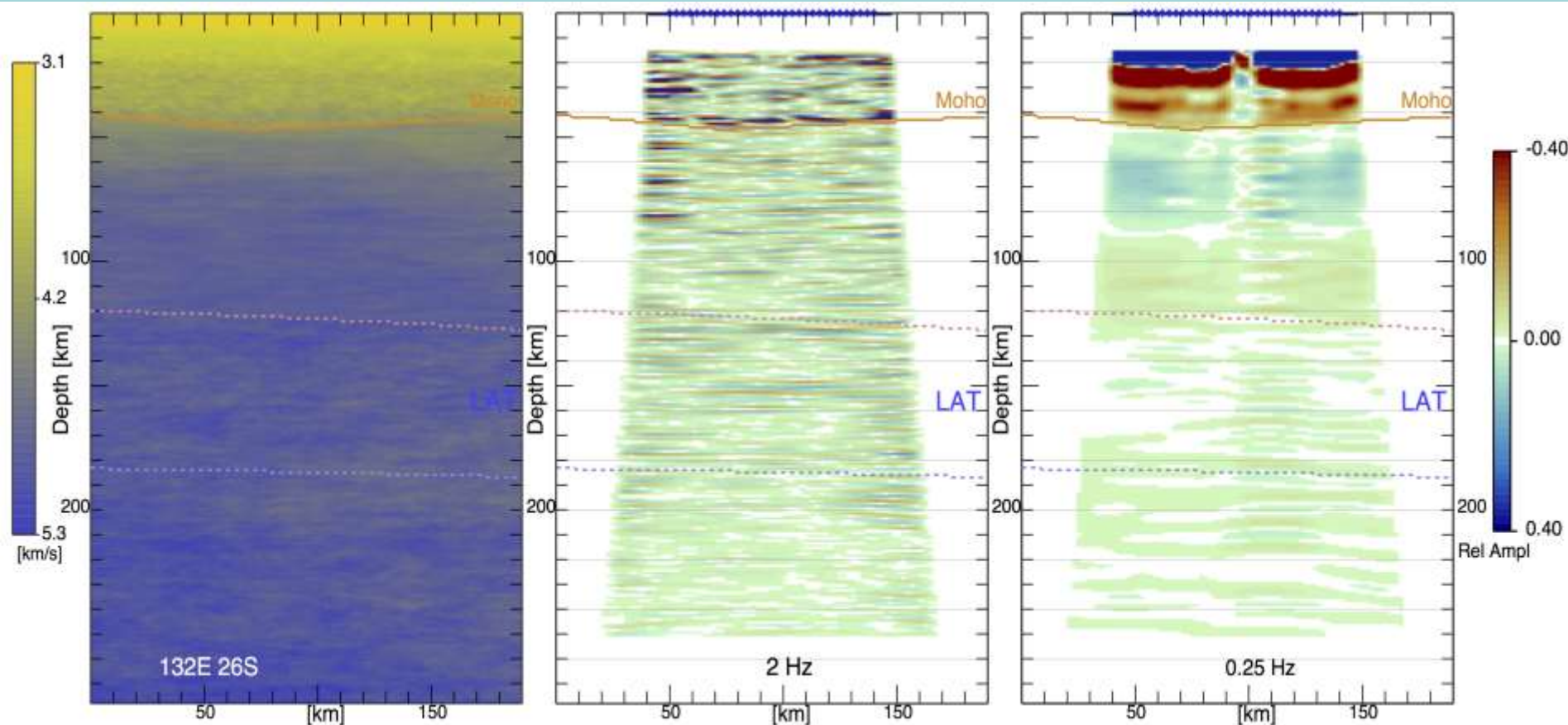


结构不均匀性的采样主要集中在台站下方很窄的锥体区域。结构模型在浅部可以近似成一维剖面，但随深度增加小尺度精细的结构会被模糊。

- 简化的结构可能由真实精细小尺度结构中波的多次干涉产生
- 低频的S波接收函数信号用来解释S波速度的下降
- 相比真实模型, 这可能是很强的假设
- 注: 小尺度精细的结构也对应有效的径向各向异性结构变化

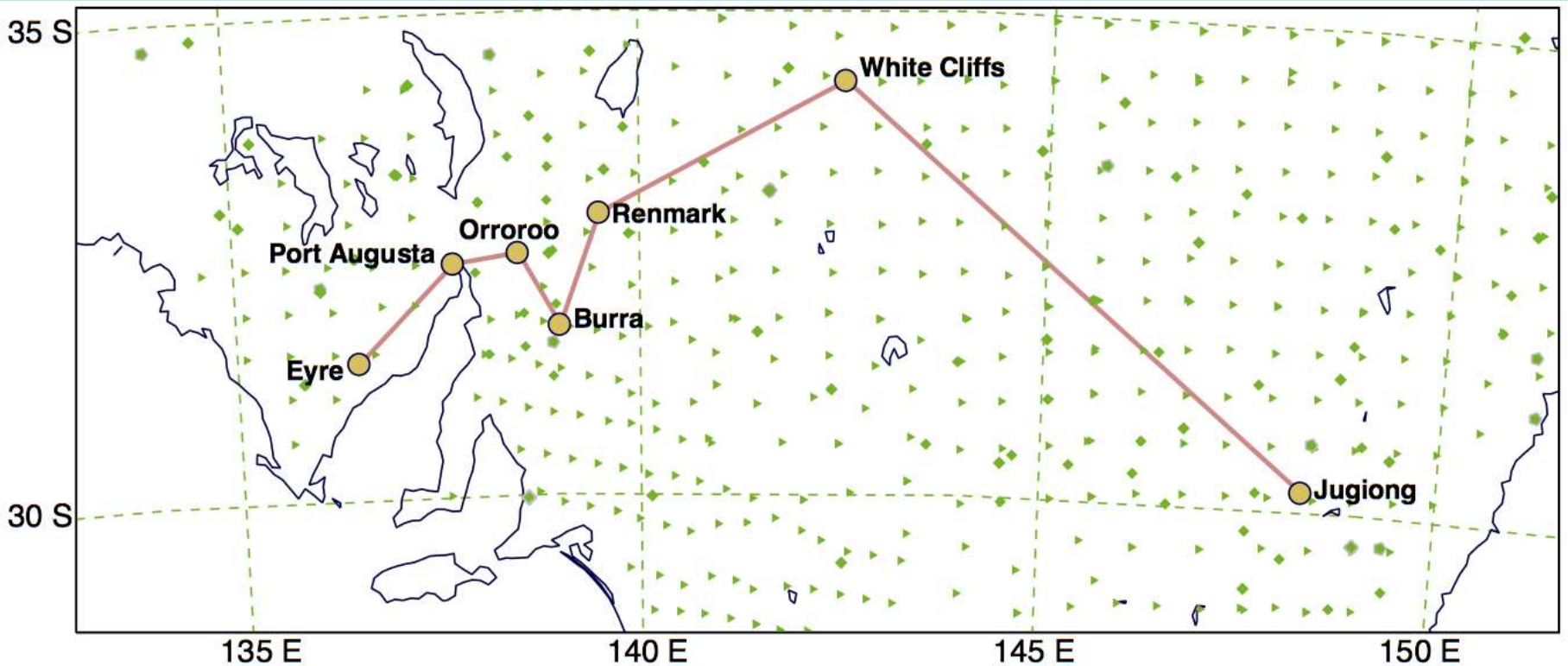


# Imaging finer-scale structure

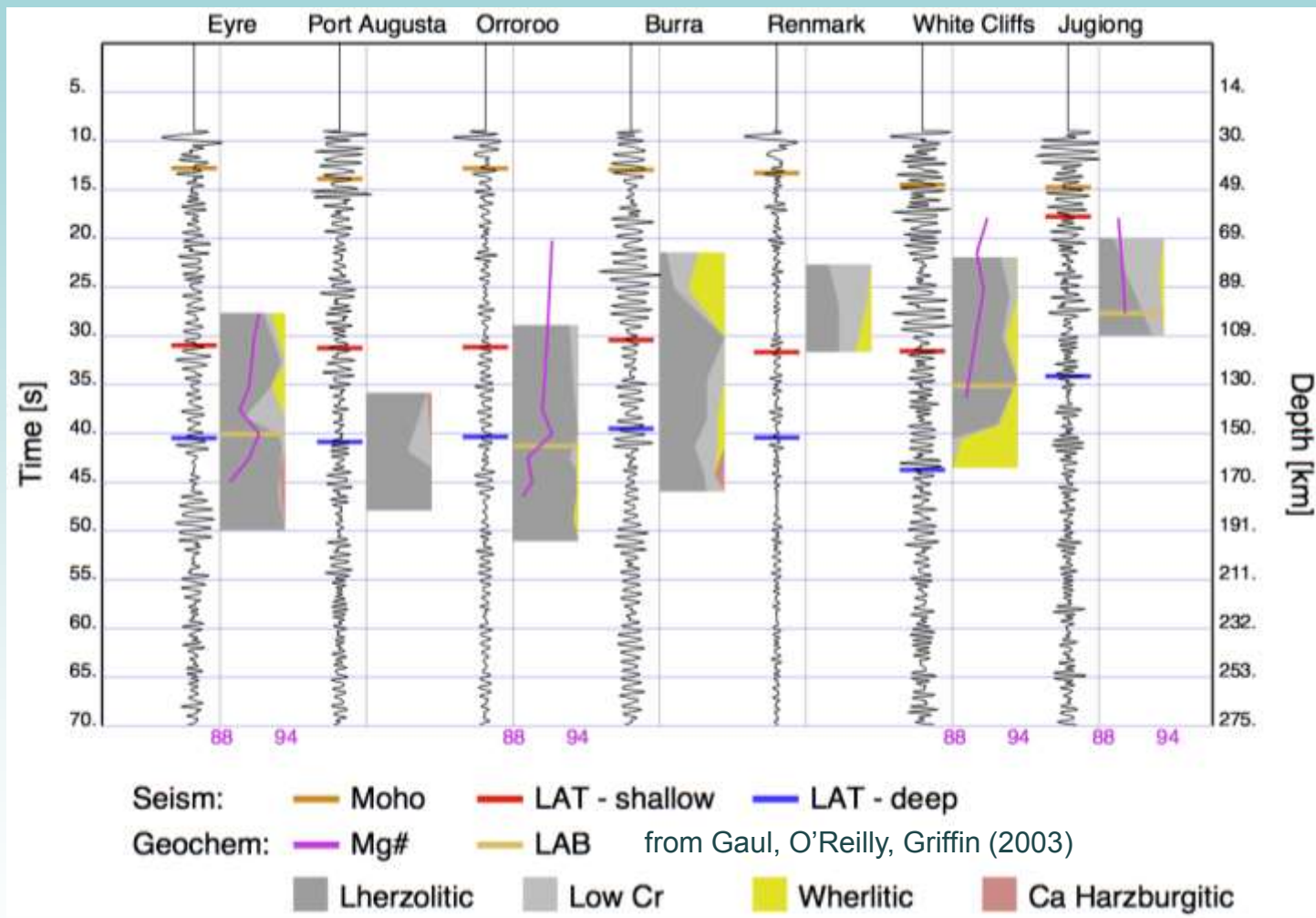


- 多尺度模型数值模拟的自相关波形结果说明：
- 1) 波形自相关方法可以约束小尺度精细结构；
  - 2) 应用低通滤波可以获得简化的结构信息

穿越澳洲南部的地幔包体资料提供了组分分层的证据 (Gaul et al., 2003)。在该地区，我们可以将台站叠加自相关获得的 P 波反射信号与精细结构直接做比较。



尽管两种研究结果在时间-深度转换过程中都有一定误差存在，但二者获得的岩石圈结构不均匀性有很好的 consistency。



- 我们开始揭秘岩石圈地幔复杂的地震学特征。
- 认识所有尺度结构不均匀性是非常重要的，浅显的简化是有问题的。
- 小尺度的精细结构可能与地球动力学和地球化学过程紧密相关。
- 非常小尺度的结构成像可能很难实现，但我们可以获得重要的间接证据。
- 结构不均匀性特征的改变可能暗示着MLD的存在。



# Conclusions

- We have begun to decipher the complex seismic nature of the mantle Lithosphere
- It is important to recognise the full range of heterogeneity scales : apparent simplicity can be deceptive
- Fine-scale structure can be expected to link most closely to geodynamic and geochemical processes
- Direct imaging is not feasible at the smaller scales, but important indirect results can be achieved
- Changes in the style of heterogeneity may be an important contributor to the presence of mid-lithospheric discontinuities.

# Acknowledgements

- Erdinc Saygin for his work on calculating stacked station autocorrelograms for Australian stations
- Kazunori Yoshizawa for the radially anisotropic model for the Australian region
- Takashi Furumura for collaboration on the development of the multi-scale heterogeneity model and numeric simulations
- Weijia Sun for discussions on lithospheric discontinuities and their detection
- Christian Sippl for the BILBY receiver function results
- Ping Zhang for help with rendering in Chinese