

大科学装置与大模型交叉学科研讨会

# 华南陆块岩石圈地震波Q值模型 及其对古老陆核和俯冲残留的揭示意义

沈琳<sup>1</sup>, **赵连锋**<sup>1</sup>, 谢小碧<sup>2</sup>, 常旭<sup>3</sup>, 姚振兴<sup>1</sup>

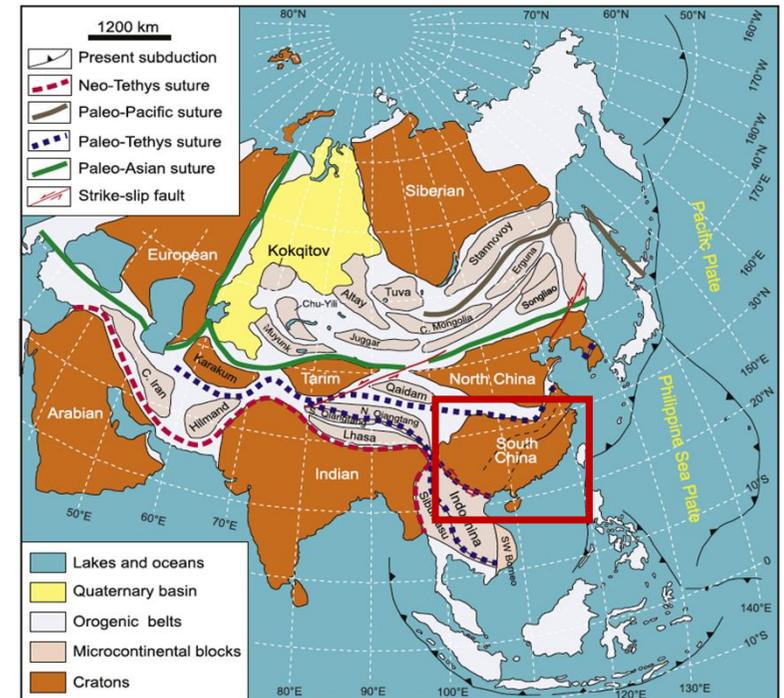
1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 地球与行星物理院重点实验室, 北京
2. 美国加州大学圣克鲁兹分校, 地球物理与行星物理研究所, 圣克鲁兹
3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 油气资源研究院重点实验室, 北京

**2024年1月13日 广东省 江门市**

# 提 纲

1. 引言
2. 数据与方法
3. 地壳Lg波衰减模型约束壳内古老陆核残留
4. 岩石圈Lg波和Pn波衰减模型与岩石圈演化
5. 结论
6. 展望

亚洲地区主要构造格架图

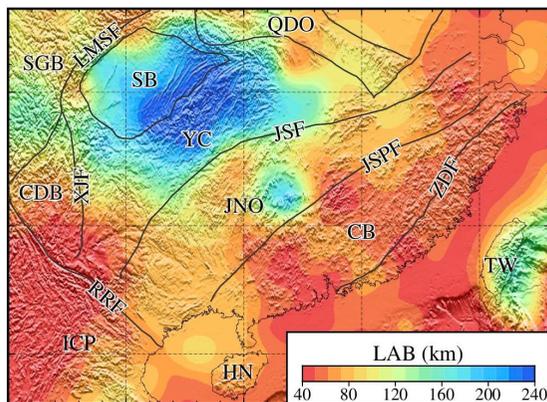


Li, 2006



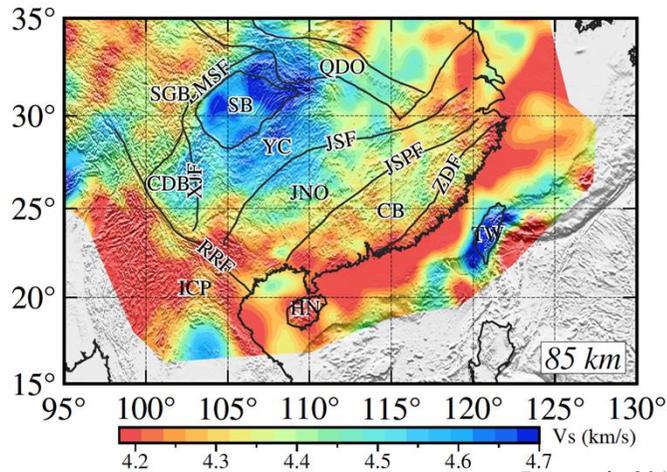
# 岩石圈构造演化机制模型

华南陆块LAB深度分布



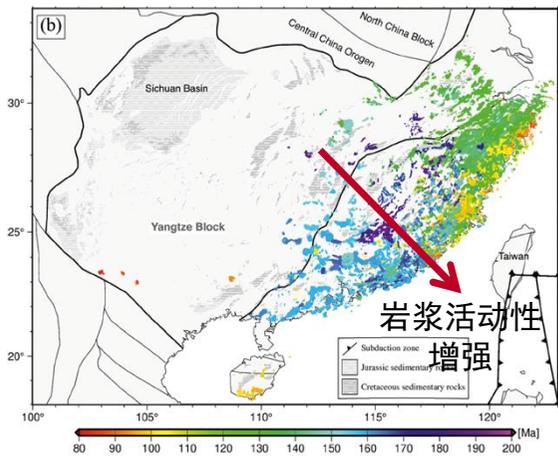
Pasyanos et al., 2014

华南陆块85km深度S波速度



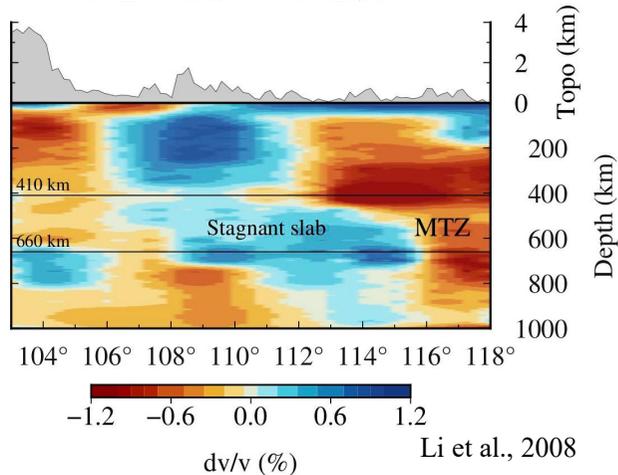
Bao et al., 2016

侏罗纪-白垩纪岩浆岩时空分布



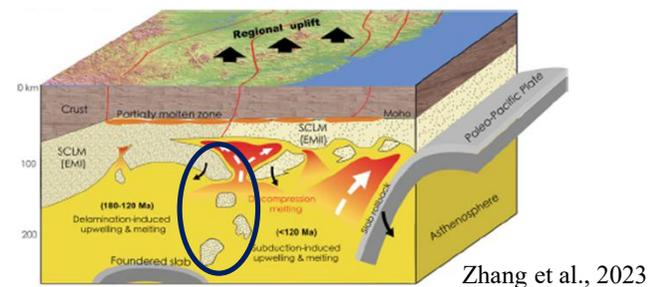
Cao et al., 2021

穿过华南板块P波速度剖面



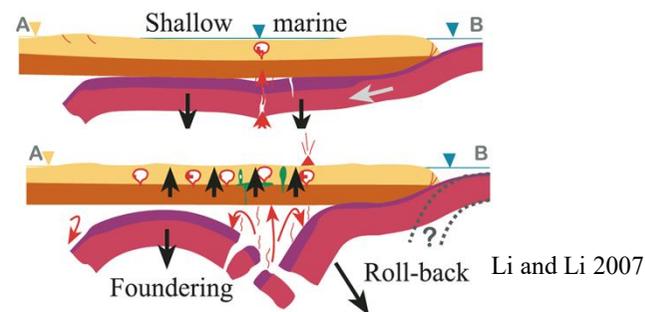
Li et al., 2008

岩石圈拆沉模型



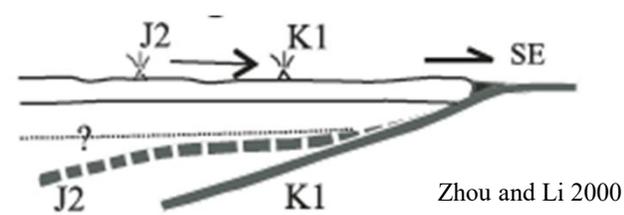
Zhang et al., 2023

平板俯冲断离后撤模型



Li and Li 2007

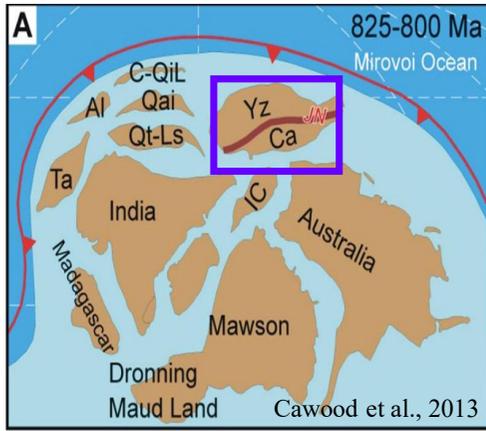
俯冲板片变陡模型



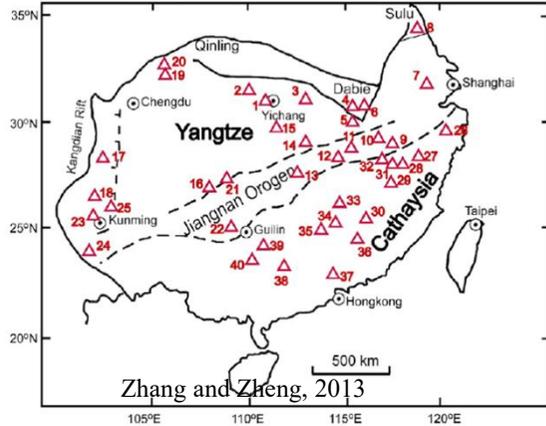
Zhou and Li 2000

# 新元古代华南陆块在哪里？华南陆块内是否存在古老陆核？

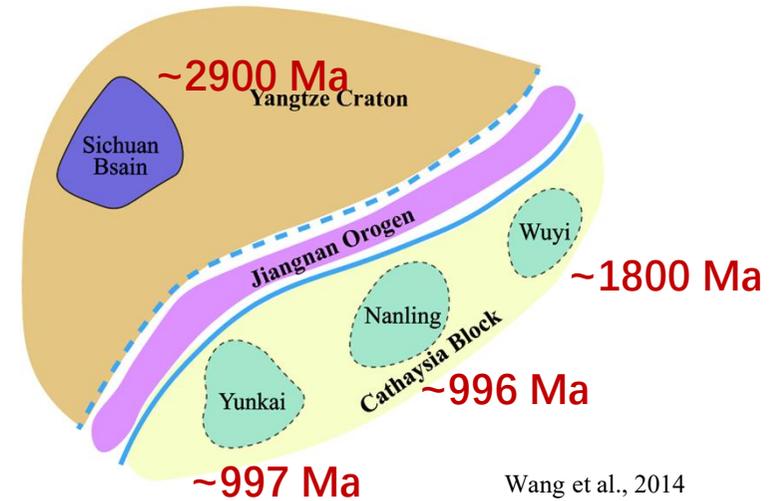
边缘模型



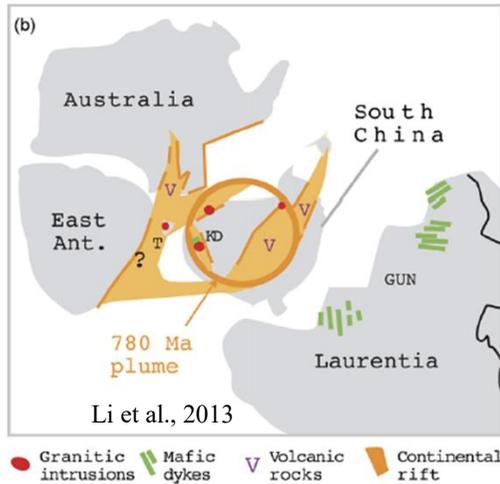
太古宙锆石信息分布图



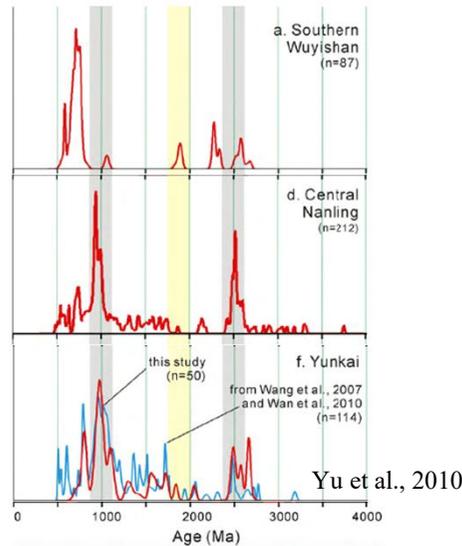
华南陆块构造卡通图



内部模型



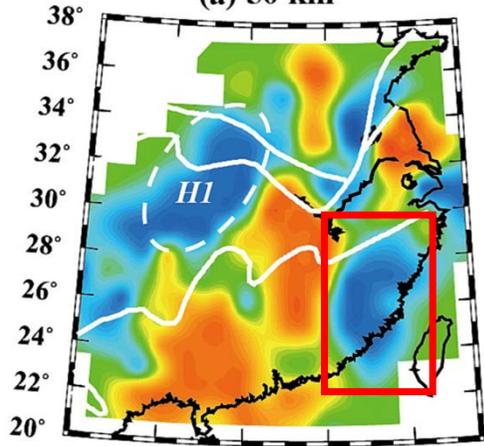
不同区域锆石年龄谱



扬子克拉通存在太古宙结晶基底  
 华夏板块由三个古老陆核新元古代拼贴？  
 仍需深部地球物理资料的约束

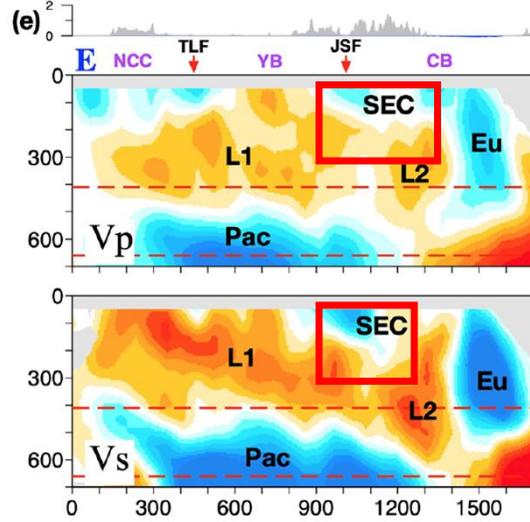
# 上地幔是否存在古老俯冲的残留？

远震P波速度成像结果  
(a) 50 km



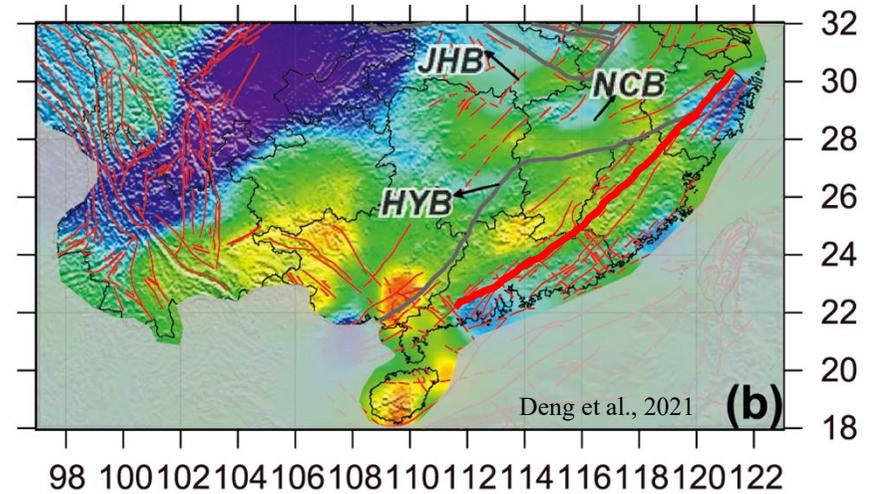
Li et al., 2023

P、S波速度剖面



Huang et al., 2021

华南陆块岩石圈-软流圈远震体波衰减



华南陆块沿海地区上地幔高速结构

残留的古太平洋板块俯冲

OR 火山喷发残留的铁镁质物质

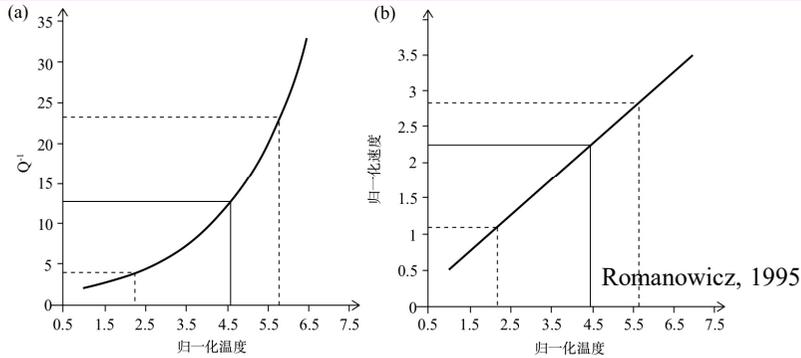
华南陆块沿海地区岩石圈-软流圈平均弱衰减结构

残留/拆沉的岩石圈？

这些高速/弱衰减区域是否为冷的古太平洋俯冲残留？

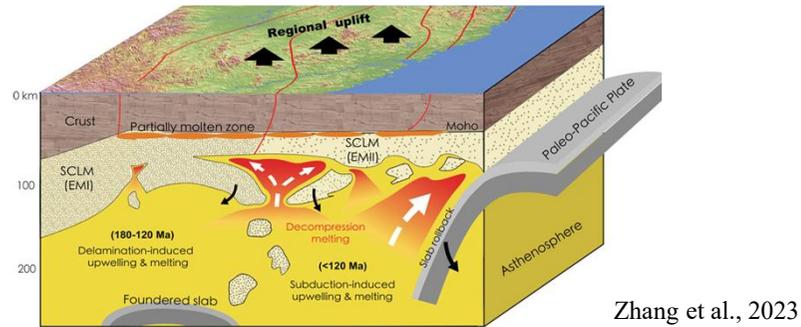
# 地震波衰减是探测古老陆核/俯冲带的高分辨率手段

## 地震波衰减对温度引起的流变学强度更敏感



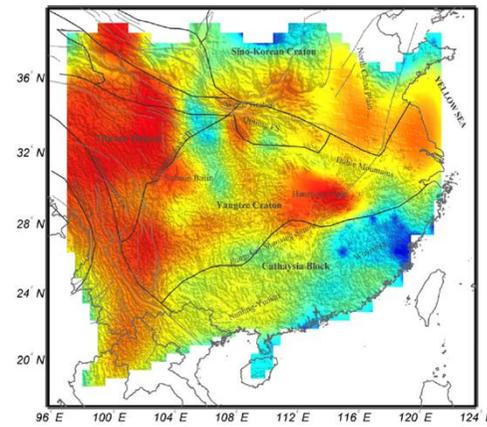
区分物质成分与温度的影响，减少解释非唯一性

## 华南陆块岩石圈拆沉模型



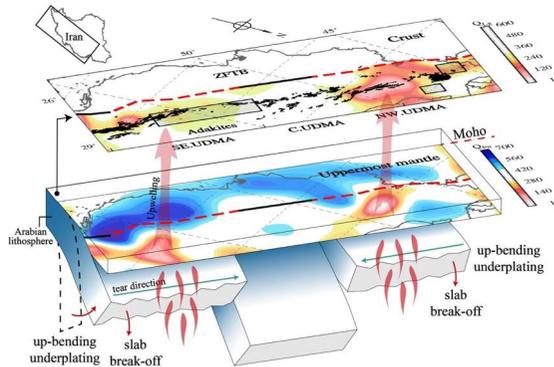
古老陆核留存于中上地壳  
古老俯冲残留位于华夏东缘岩石圈

## 振幅衰减可用来探测深部热结构和强度特征



地壳衰减  
约束四川盆地、武夷山  
潜在古老陆核

Chen and Xie, 2017



地壳+上地幔衰减  
约束阿拉伯俯冲前缘

Yang et al., 2023

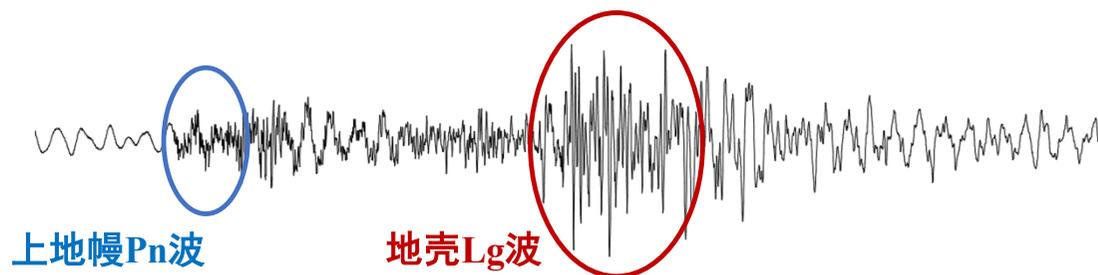
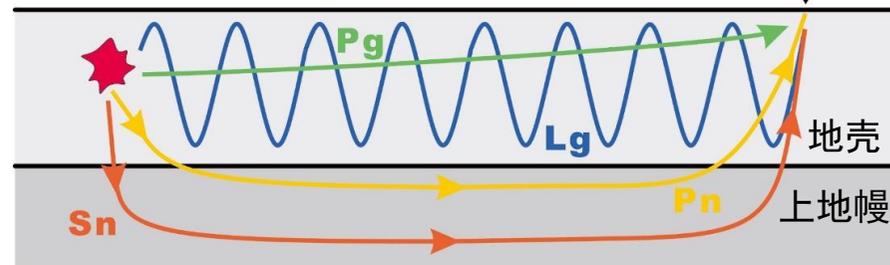
## 研究思路

建立宽频带、高分辨率  
地壳Lg波衰减模型  
上地幔Pn波衰减模型

地壳和上地幔衰减  
横向变化特征

综合多种地球物理资料  
约束华南陆块各板块衰减成因  
推测华南陆块岩石圈热结构

典型区域震项传播路径示意图



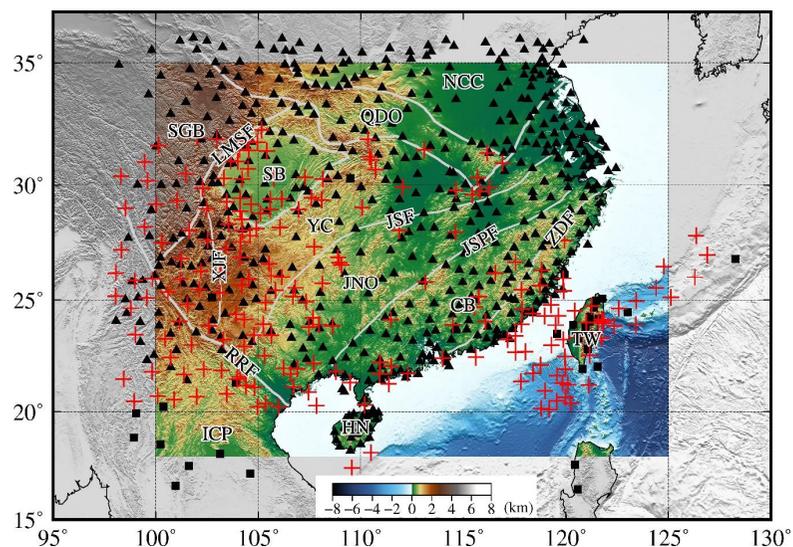
## 拟解决的问题

1. 华南陆块地壳古老陆核分布位置
2. 上地幔中是否存在古太平洋板块俯冲残留
3. 为古太平洋板块俯冲机制提供地震学约束

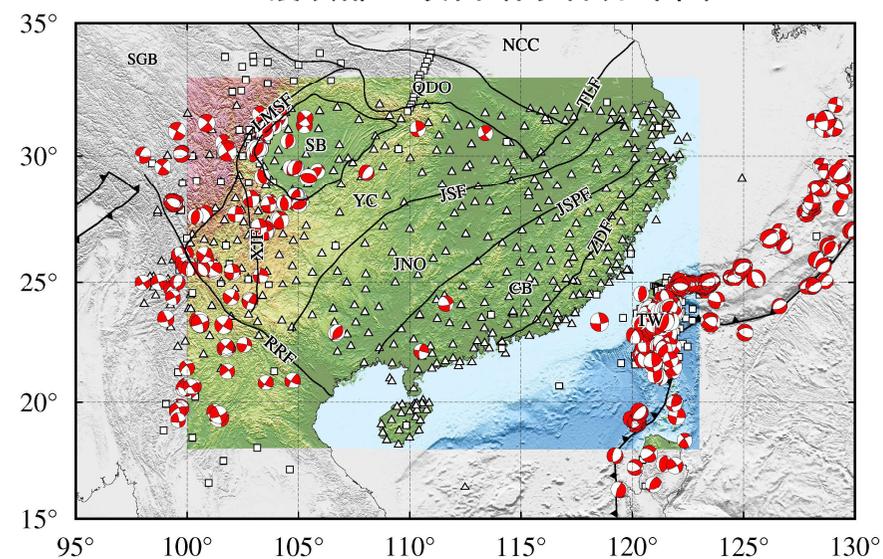
## 2. 数据与方法

### 区域地震资料收集

地壳Lg波台站事件分布图



上地幔顶部Pn波台站事件分布图

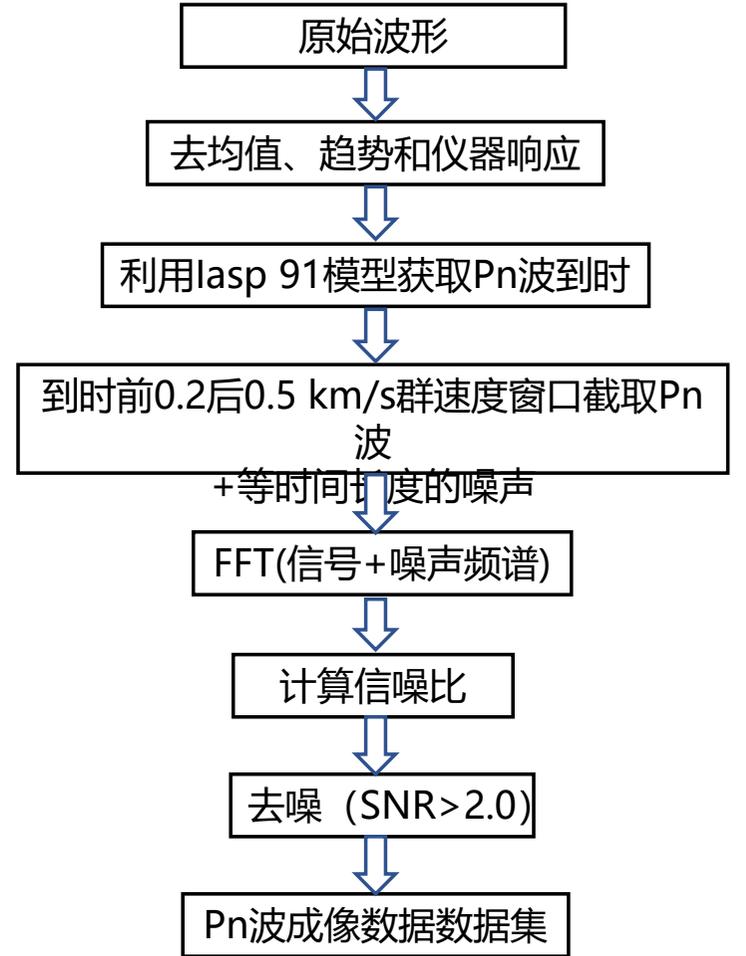
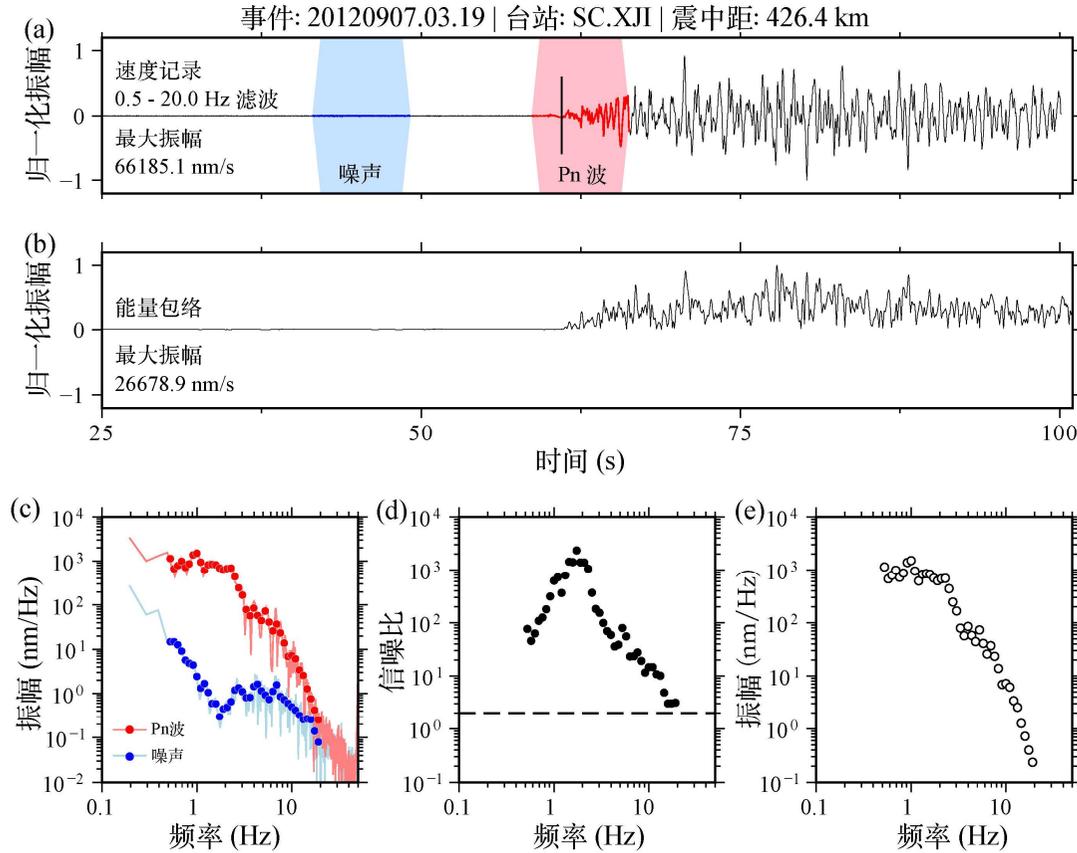


地壳内、震级3.5~6.0、震中距200~3000 km 地震  
2000年1月~2018年11月  
580个宽频带地震台站，218个地震事件  
共59,811条垂直分量

地壳内已知震源机制解地震  
2009年1月~2023年5月  
651个宽频带台站，462个地震事件  
共76,448条垂直分量

# 数据预处理过程

## Pn波振幅谱计算流程



数据预处理

Zhao et al., 2015; Yang et al., 2021

# Pn波衰减成像方法简介

## Pn波振幅谱

$$A(f) = S(f) \cdot G(\Delta, f) \cdot \Gamma(\Delta, f) \cdot P(f) \cdot r(f)$$

振幅 震源项 几何扩散 衰减项 台基 随机扰动

震源项

$$S(f) = \frac{M_0}{4\pi\rho v^3 [1 + (f/f_c)^n]}$$

几何扩散

$$G(\Delta, f) = 10^{\xi_3(f)} \Delta^{\xi_1(f)} \log_{10} \Delta - \xi_2(f)$$

衰减项

$$\Gamma(\Delta, f) = \exp\left[-\frac{\pi f}{V} B(\Delta, f)\right]$$

$$Q(f) = Q_0 f^\eta \quad B(\Delta, f) = \int_{ray} \frac{ds}{Q(f)}$$

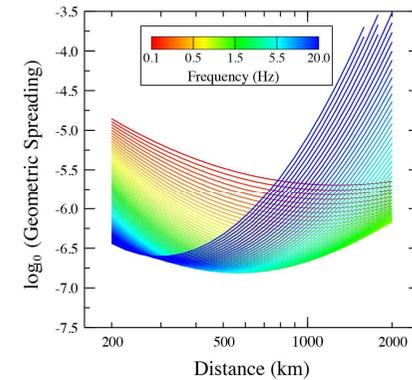
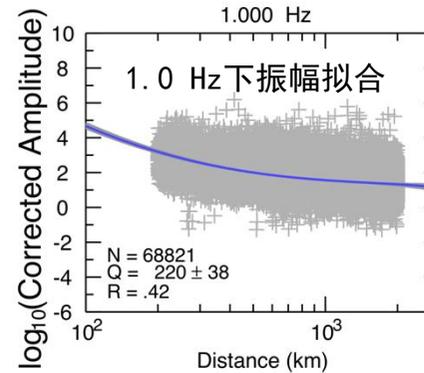
## Pn波几何扩散函数

$$\xi_n(f) = \xi_{n1} \log_{10}^2(f) + \xi_{n2} \log_{10}(f) + \xi_{n3}$$

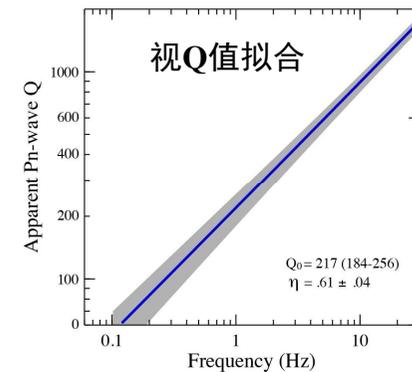
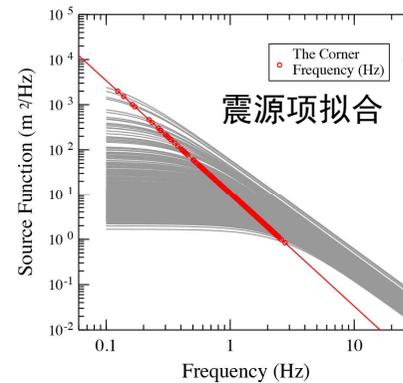
$$\xi = \begin{bmatrix} -0.217 & 1.79 & 3.16 \\ -1.94 & 8.43 & 18.6 \\ -3.39 & 9.94 & 20.7 \end{bmatrix}$$

±10%扰动  
适应不同研究区

Yang et al., 2007; Yang, 2011



几何扩散依赖  
频率+震中距

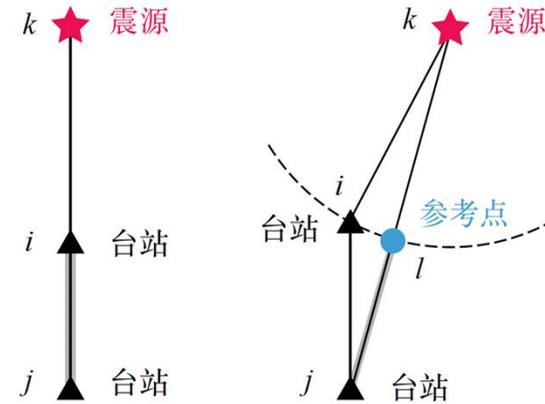


# 单双台数据联合反演

单台法



双台法



单台振幅数据: 地壳部分 地幔部分 地壳部分

$$B(\Delta, f) = \int_{AE} \frac{ds}{Q_s} + \int_{EF} \frac{ds}{Q(x, y, f)} + \int_{FB} \frac{ds}{Q_r}$$

$$\Gamma(\Delta, f) = \Gamma_s(AE, f) \cdot \Gamma(EF, f) \cdot \Gamma_s(FB, f)$$

$$= \exp\left(-\frac{\pi f}{\alpha_{1s}} \int_{AE} \frac{ds}{Q_s} - \frac{\pi f}{\alpha_2} \int_{EF} \frac{ds}{Q(x, y, f)} - \frac{\pi f}{\alpha_{1r}} \int_{EF} \frac{ds}{Q_r}\right)$$

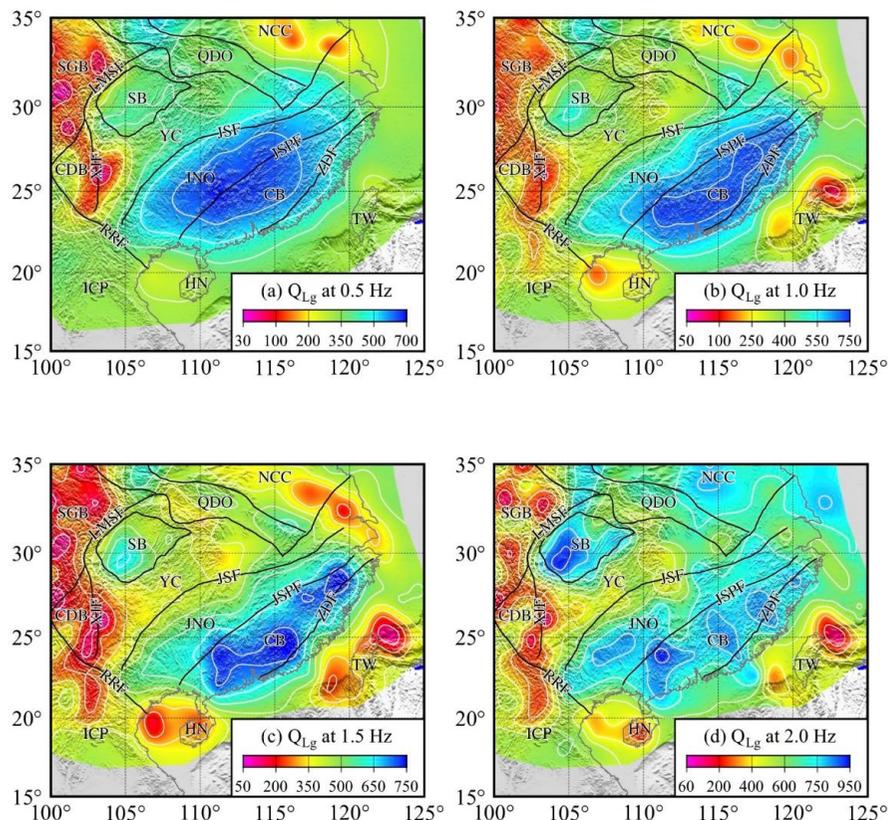
双台振幅比:

$$A_{ij} = \frac{A_j(f)}{A_i(f)} = \frac{G(\Delta_j, f) \Gamma_s(AE_j, f) \Gamma(EF_j, f) \Gamma_r(FB_j, f) P_j(f) \cdot r_j(f)}{G(\Delta_i, f) \Gamma_s(AE_i, f) \Gamma(EF_i, f) \Gamma_r(FB_i, f) P_i(f) \cdot r_i(f)}$$

$$A_{ij}(f) \frac{G(\Delta_i, f)}{G(\Delta_j, f)} = \exp\left[-\frac{\pi f}{\alpha_2} \int_{F_i}^{F_j} \frac{ds}{Q(x, y, f)}\right]$$

### 3. 地壳Lg波衰减模型及对古陆核残留约束

#### 地壳Lg波衰减成像结果



- 高Q值：  
稳定区域（四川盆地、扬子克拉通、江南造山带、华夏板块、秦岭-大别造山带）

- 低Q值：  
构造活跃区（如：松潘甘孜板块、川滇地区、海南岛、台湾岛）

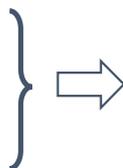
华南地区地壳Lg波Q值分布图  
(a~d)分别是0.5, 1.0, 1.5,和2.0Hz的Q值图像

Shen et al., 2023

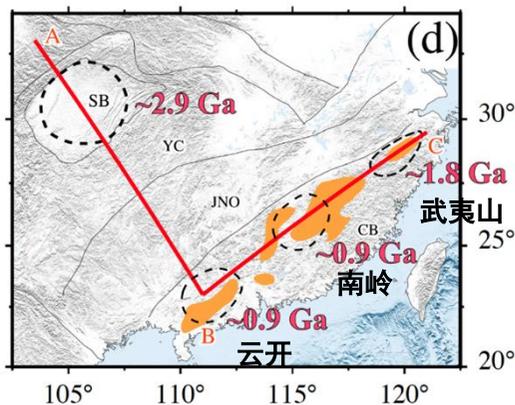
# Lg波约束华南陆块地壳内部古陆核残留

Lg波衰减模型  
(横向分辨率高)

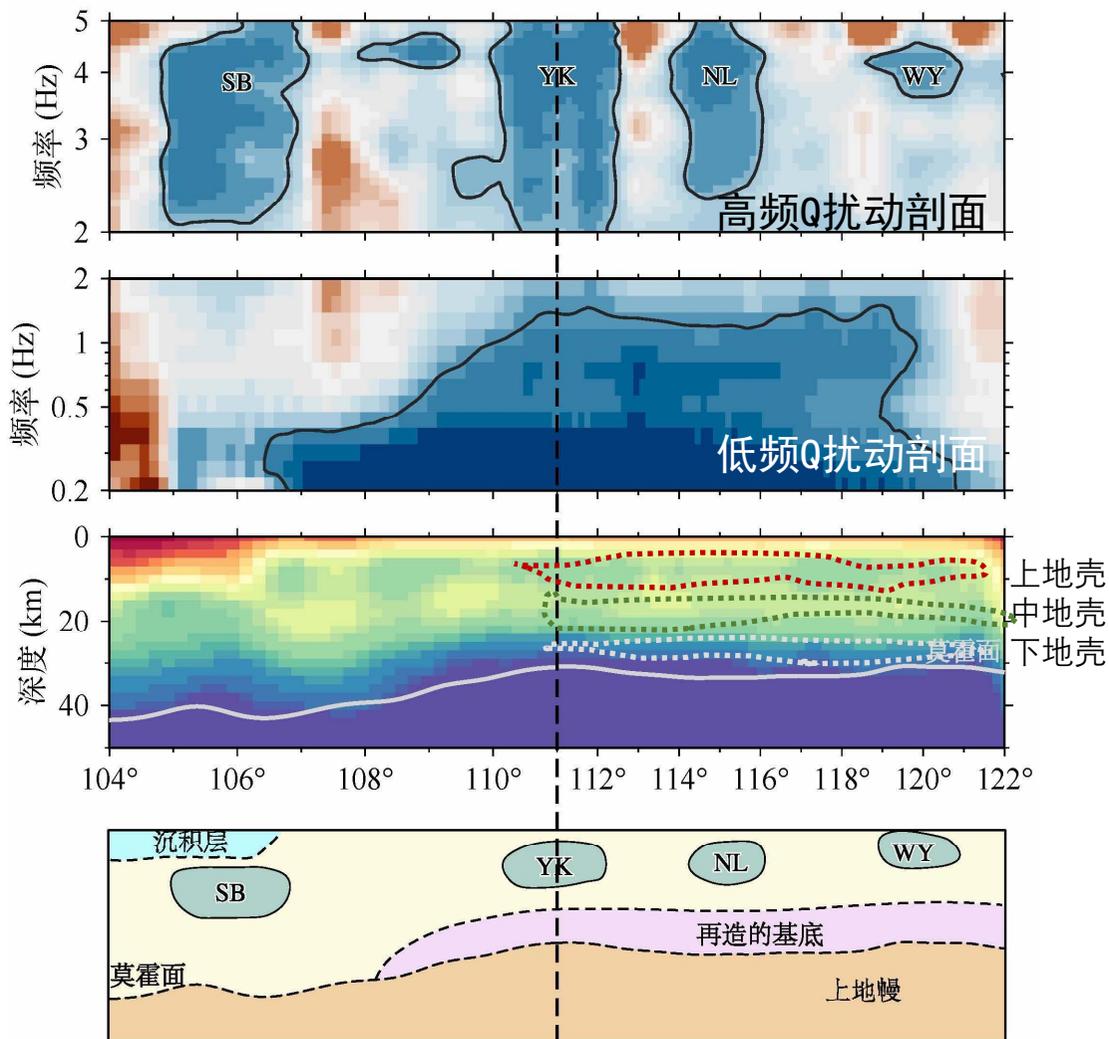
速度模型  
(垂向分辨率高)



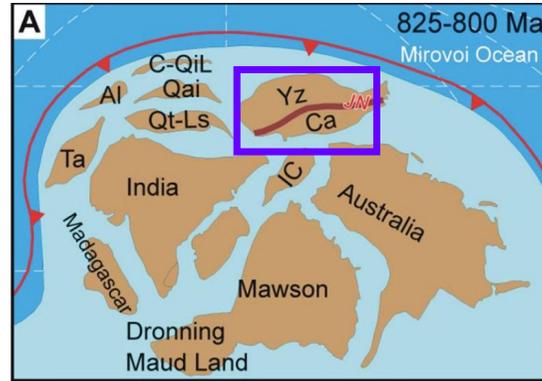
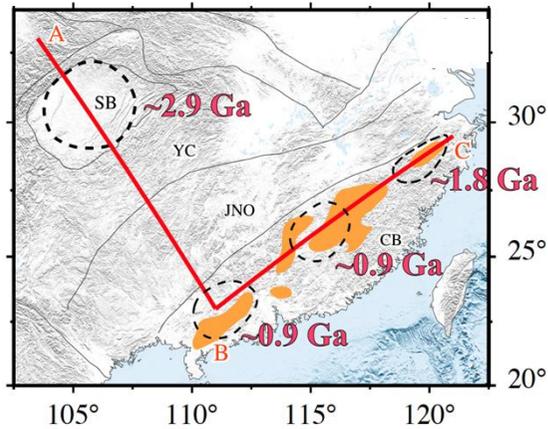
水平位置  
深度分布



这些古陆核可能存在于上地壳  
中下地壳可能已被后期构造活动所改造



# 对华南陆块早期构造演化的意义



边缘模型 (Cawood, P. A. et al., 2013)

## 华夏板块在新元古代时期

由武夷山古陆核向西扩张至南岭和云开地区形成

新元古代 (900~730 Ma) 处于俯冲增生环境

华南陆块可能位于Rodinia超大陆边缘位置



## Extremely weak Lg attenuation reveals ancient continental relicts in the South China block

Lin Shen<sup>a,b</sup>, Lian-Feng Zhao<sup>a,c,\*</sup>, Xiao-Bi Xie<sup>d</sup>, Geng Yang<sup>a,b</sup>, Zhen-Xing Yao<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Key Laboratory of Earth and Planetary Physics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China  
<sup>b</sup> College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, China  
<sup>c</sup> Heilongjiang Mohe Observatory of Geophysics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China  
<sup>d</sup> Institute of Geophysics and Planetary Physics, University of California at Santa Cruz, CA 95064, USA

### ARTICLE INFO

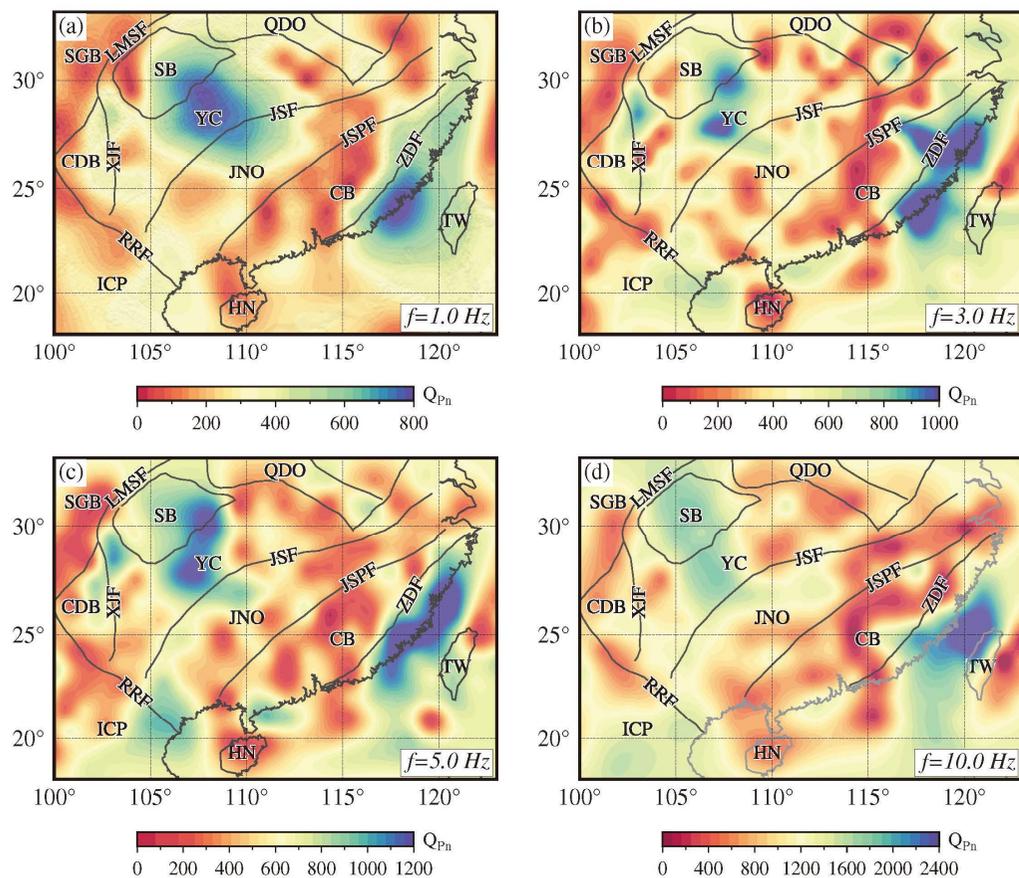
**Article history:**  
 Received 21 September 2022  
 Received in revised form 19 March 2023  
 Accepted 23 March 2023  
 Available online xxx  
 Editor: H. Thybo  
 Dataset link: <https://data.earthquake.cn/yhsj/info/2016/5596.html>  
 Dataset link: [https://ds.iris.edu/wilber3/find\\_event](https://ds.iris.edu/wilber3/find_event)  
 Dataset link: <https://doi.org/10.12197/2022GA026>  
 Dataset link: <https://doi.org/10.12197/2022GA022>  
 Dataset link: <https://www.generic-mapping-tools.org/>

### ABSTRACT

Whether the South China block (SCB) occupied an external or internal position in the Rodinia supercontinent remains controversial. The external model favors an accretion orogenic amalgamation setting, whereas the internal model assumes postcollisional extensional rifting in the Neoproterozoic. Recent geochronological data suggested that the SCB was assembled from several ancient nuclei or microcontinental fragments with various origins and geological histories during the early Neoproterozoic, and supported the external position model for the SCB in Rodinia. However, whether these ancient continental nuclei are hidden in the crust requires direct constraints such as those from seismic tomography. In general, these early ancient continental relicts preserved in the present-day crust tend to be characterized by high strength, high velocity, and weak attenuation. Compared with velocity, seismic attenuation tends to be more sensitive to ancient rigid continental fragments. Here, we constructed a high-resolution broadband crustal Lg attenuation model for the SCB and explored the existence and scale of the ancient continental fragments potentially hidden in the deep crust. Four extremely weak attenuation anomalies in the SCB indicate potential locations of these ancient continental relicts in the crust; one is in the Sichuan basin and the other three are beneath the Cathaysia block. The three ancient continental relicts in the Cathaysia block, which are closely corresponding to early surface lithological records, provide seismic evidence supporting an external position for the SCB in the Rodinia supercontinent.

# 4. 上地幔Pn波衰减模型及对中生代俯冲机制约束

## 上地幔Pn波衰减成像结果



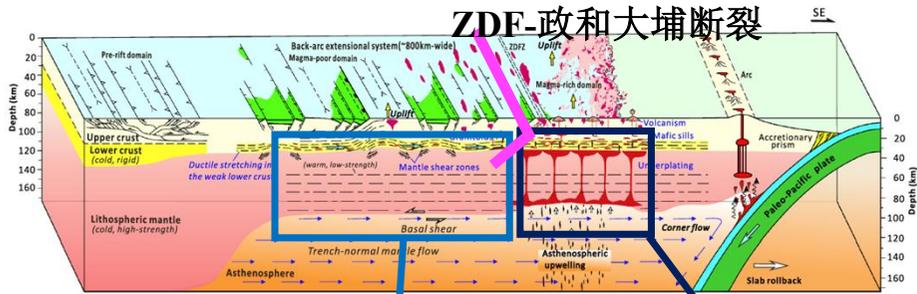
华南地区地壳Pn波Q值分布图  
(a~d)分别是1.0, 3.0, 5.0, 和10.0 Hz的Q值图像

- 高Q值：  
四川盆地东部、华夏板块东部、川滇块体核部  
稳定、高强度区域

- 低Q值：  
松潘甘孜板块、海南岛、华夏板块西部、台湾  
岛周边区域  
构造活跃、热上涌区域

# 东西华夏上地幔顶部Q值差异成因

板块后撤、地幔流动和岩石圈伸展之间的耦合模型



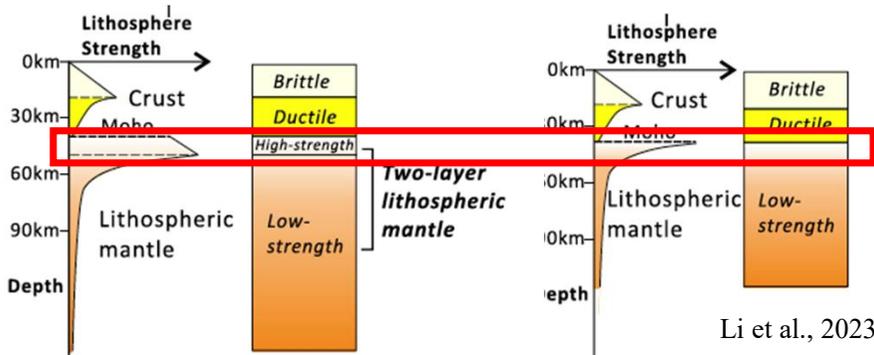
ZDF-政和大埔断裂

Li et al., 2023

地幔流剪切作用

软流圈物质上涌

内陆 → 沿海岩浆作用增强 → 破坏上地幔顶部高强度盖层



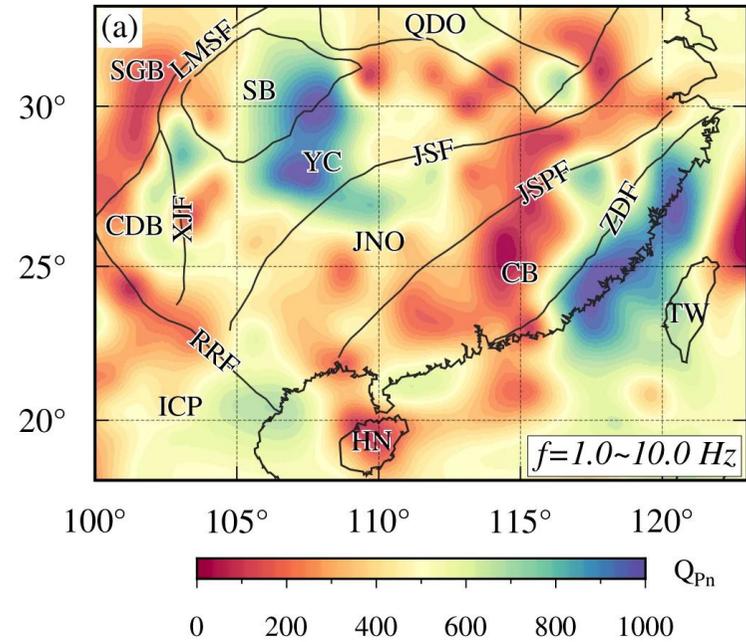
Li et al., 2023

西华夏（内陆）> 东华夏（沿海）强度

2001

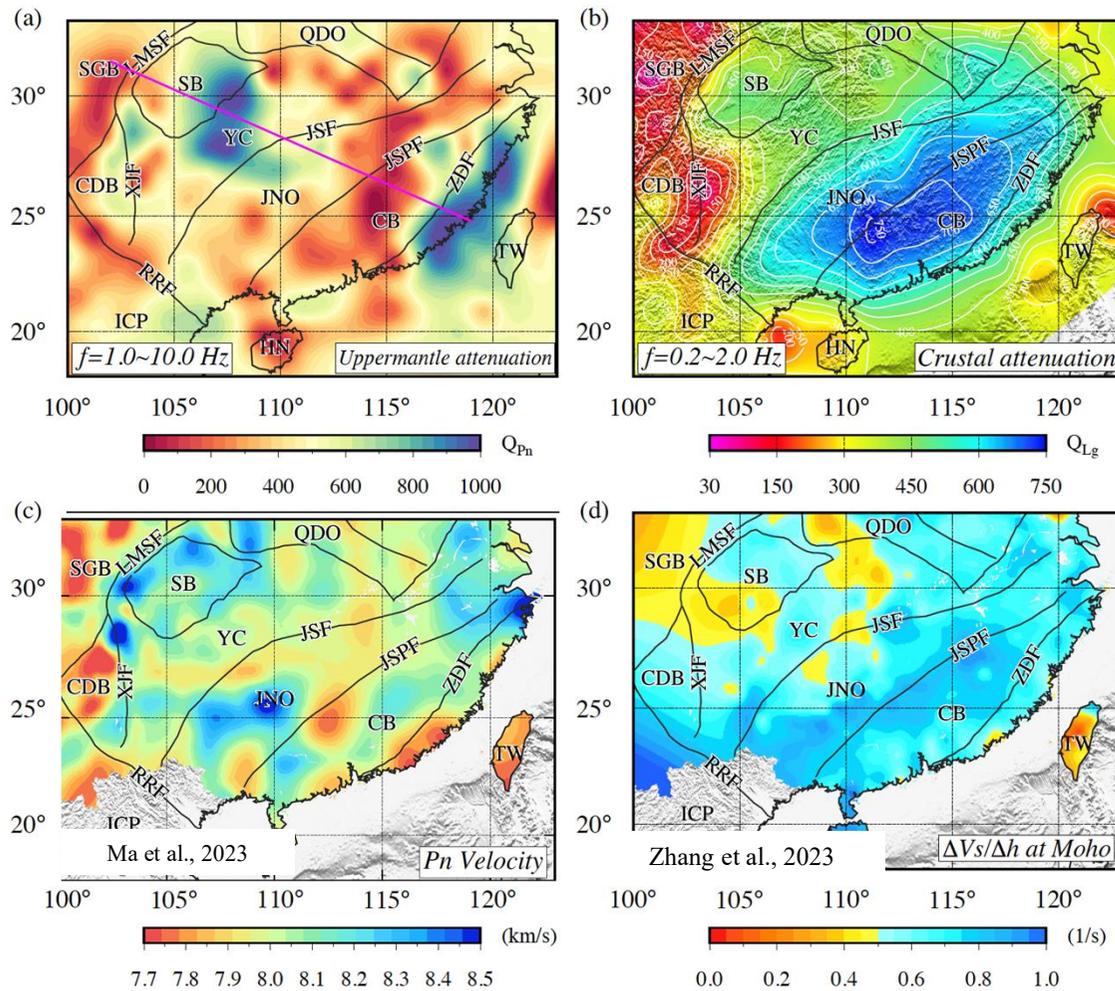
Magma-poor rifted domain

Magma-rich rifted domain



衰减直接约束东西华夏上地幔强度差异  
 华夏板块东部高Q值暗示为冷的高强度物质

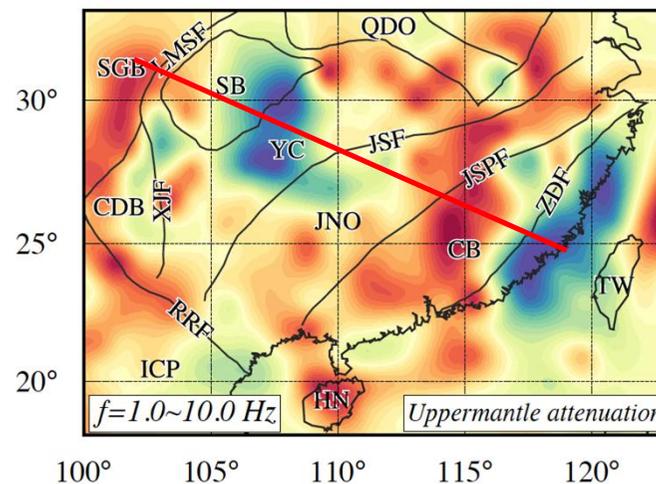
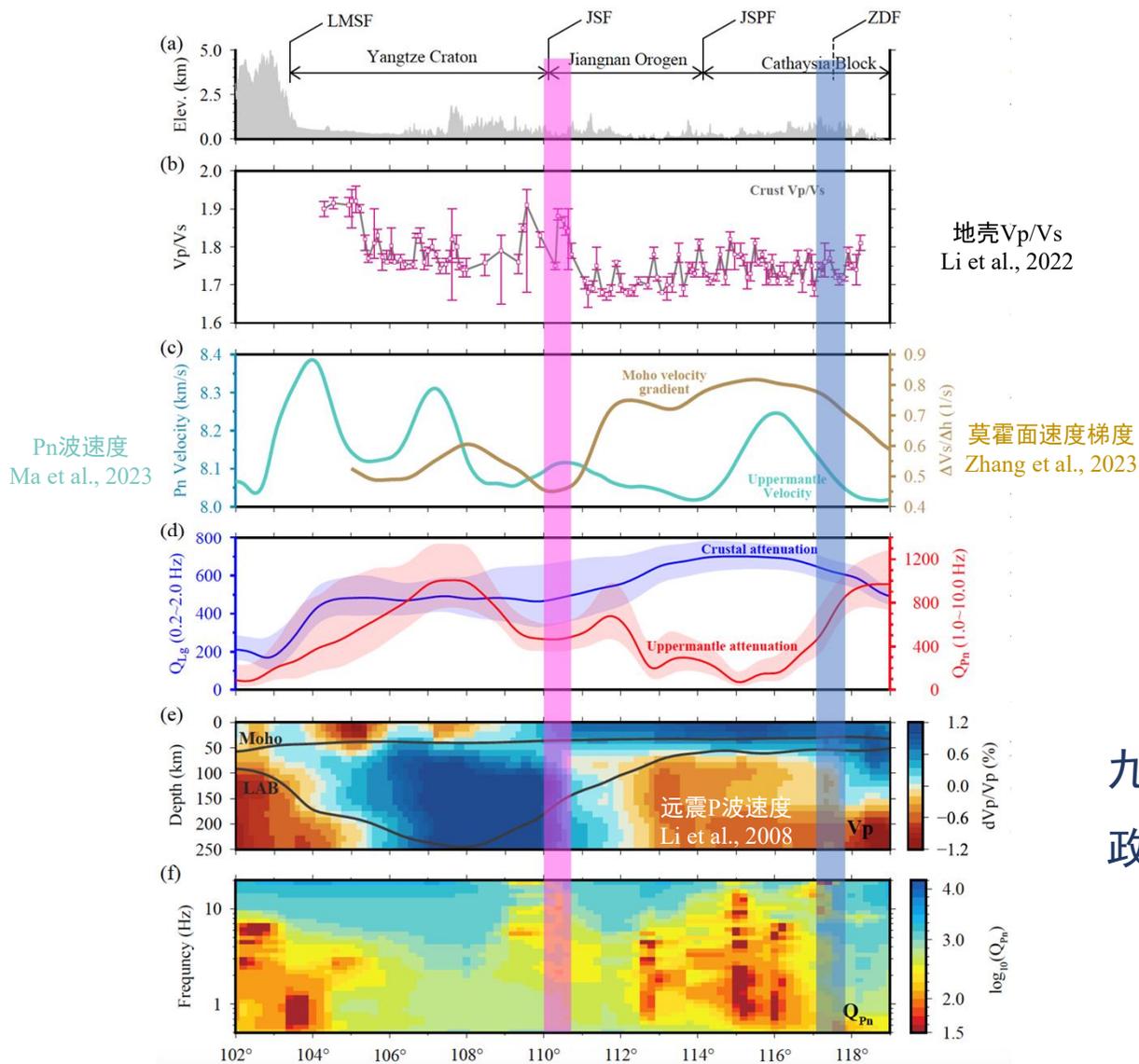
# 地壳+上地幔衰减速度成像结果约束的岩石圈热结构



上地幔顶部Pn波速度呈现低速  
 热物质存在于地幔尺度上  
 随时间推移地壳已冷却固结  
 地壳呈现高速弱衰减

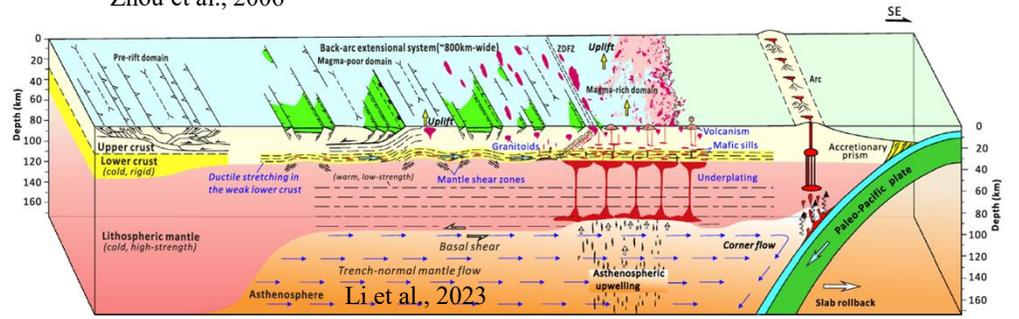
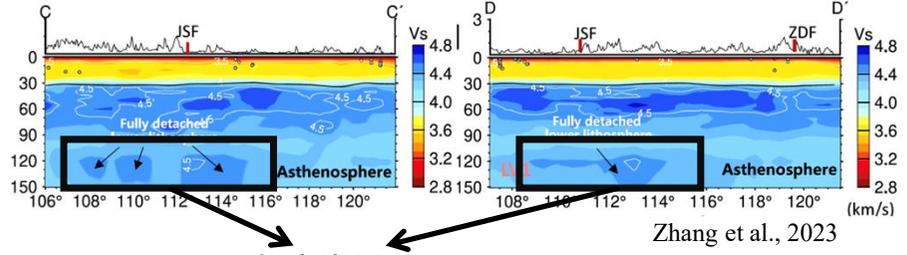
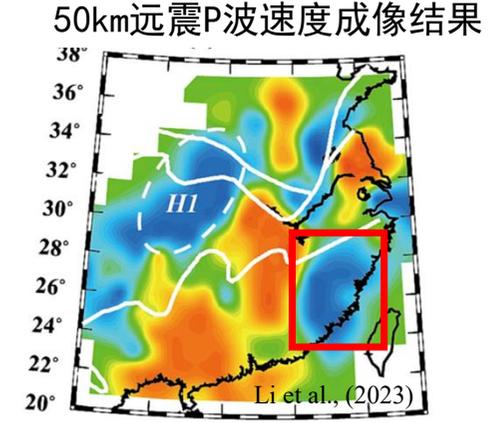
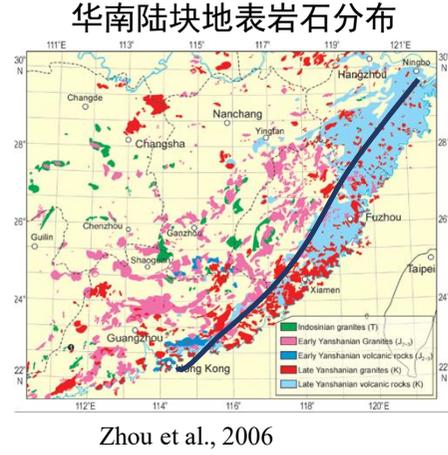
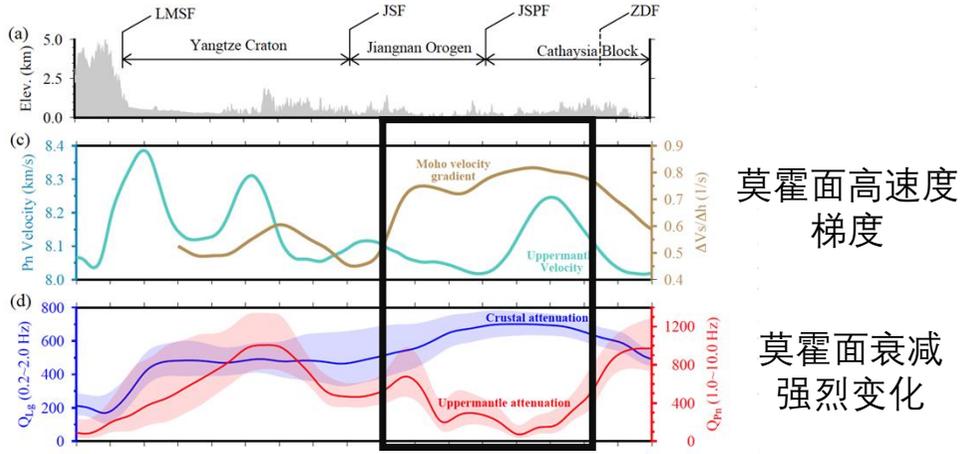
地壳与上地幔顶部衰减突变  
 与速度存在一致性  
 华夏板块西部壳幔结构发生突变

# 穿过华南陆块地壳波速比、Lg波衰减、P波速度和Pn波衰减剖面



九江-石台隐伏断裂东南受古太平洋俯冲影响  
政和-大埔断裂东西两侧受控于不同俯冲机制

# 对古太平洋板块俯冲机制的约束



华夏板块东部以喷发的玄武岩为主，岛弧型岩浆岩更靠近俯冲板块

华夏板块西部以岩石圈拆沉作用为主  
低Q值对应拆沉后的热上涌

高Q值高速结构可能对应冷的残留俯冲板片  
在后撤过程中残留于地幔中

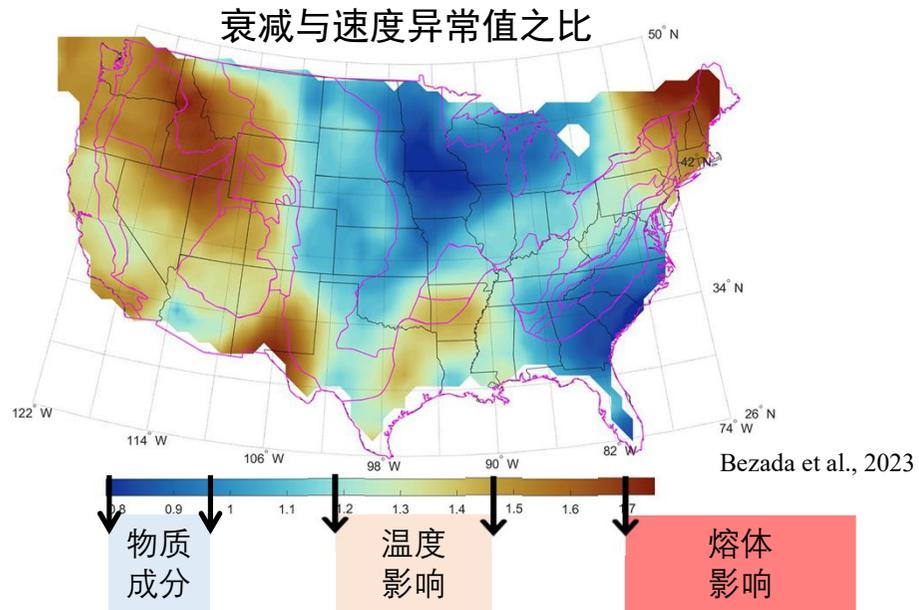
## 5. 结论

通过收集华南陆块地壳内的地震事件，利用丰富的区域地震波形资料，建立宽频带、高分辨率的地壳Lg波（0.05~10.0 Hz）和上地幔Pn波（0.5~20.0 Hz）衰减模型：

1. 华南陆块地壳内古陆核残留位于四川盆地，华夏板块内的云开、南岭和武夷山地体下方；
2. 华夏板块古陆核残留位于中上地壳，下地壳被强烈构造运动所改造，这些古陆核早期来自不同构造域指示华南陆块位于Rodinia超大陆边缘位置；
3. 华夏板块上地幔整体温度较高，西华夏受控于岩石圈拆沉作用后的热物质上涌，而东华夏板块的高Q值与可能与残留的俯冲板片有关。

## 6. 展望

利用同一批数据反演Pn波衰减、速度和各向异性  
消除不同观测系统反演过程带来的误差



约束深部物质成分、温度和部分熔融状态

**沈琳** 博士后



中国科学院地质与地球物理研究所

### 教育经历:

2012年9月-2016年7月, 中国地质大学(北京), 勘查技术与工程, 工学学士学位;  
2016年9月-2023年6月, 本所, 固体地球物理学, 理学博士学位。

### 研究成果:

**Shen L.**, Lian-Feng Zhao, Xiao-Bi Xie, Geng Yang, and Zhen-Xing Yao, 2023. Extremely weak Lg attenuation reveals ancient continental relicts in the South China block, *Earth and Planetary Science Letters*, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2023.118144>.

**Shen L.**, Lian-Feng Zhao, Xiao-Bi Xie, Xi He, Wei-Min Wang, and Zhen-Xing Yao, 2023. Stress drop variations of the 2019 M<sub>L</sub> 6.0 Changning earthquake and its aftershock sequence in the southern Sichuan Basin, China. *Tectonophysics*. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2023.230139>.

**沈琳**, 赵连锋, 谢小碧, 何熹, 姚振兴. 2023. 2021年5月21日青海玛多Mw7.4地震及余震序列应力降时空分布于孕震环境. *地球物理学报*. 66(10): 4111-4131 <https://doi.org/10.6038/cjg2023Q0914>.

**沈琳**, 赵连锋, 谢小碧, 何熹, 王卫民, 姚振兴. 2023. 利用Lg波方法计算地震应力降的方法及其在青藏高原东缘典型震例中的应用. *地球与行星物理论评(中英文)*, 54 (5), 512-531. <https://doi.org/10.19975/j.dqyxx.2022-038>.

# 致谢

地震波形资料从中国地震学科数据中心国家测震台网数据备份中心(NEDC)和美国地震联合会(IRIS)数据管理中心收集。研究成果受国家自然科学基金重点和面上项目(41974054, U2139206, 41974061, 42104055)以及中国地震科学试验场项目(2016 CESE 0203, 2019 CSES 0103)联合资助。

谢谢!

敬请批评指正