

基于台阵数据联合反演的地震学速度模型构建

一一以川滇地区公共速度模型的构建为例

姚华建

合作者: 张萍, 方洪健, 张海江

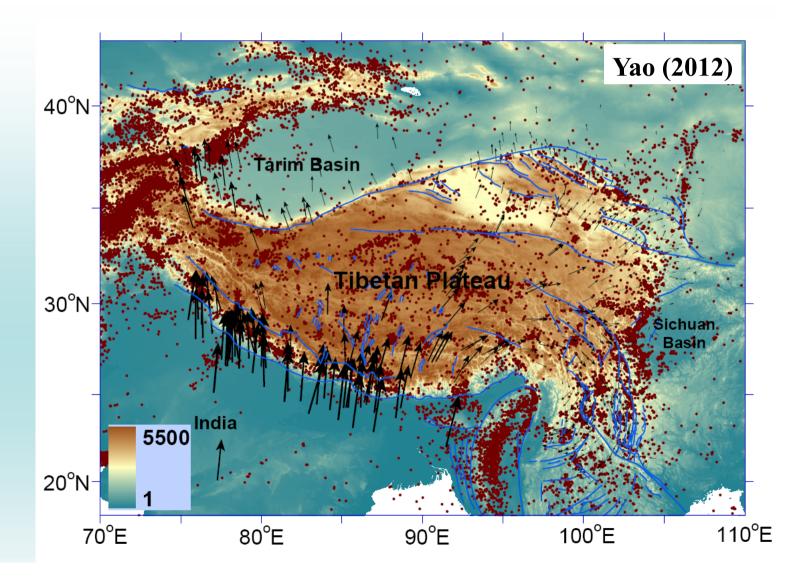
中国科学技术大学 地球和空间科学学院

报告提纲

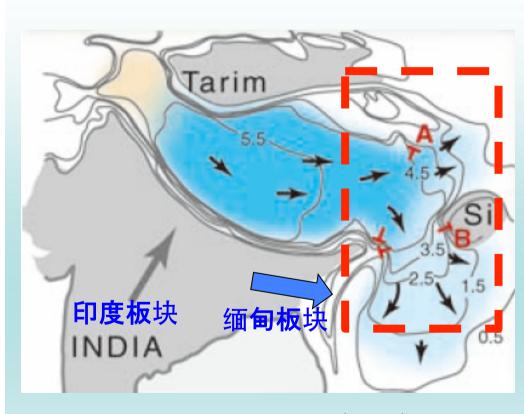
- 1. 川滇地区构造背景及地震活动性
- 2. 川滇地区速度结构模型现状
- 3. 基于台阵数据的地震学联合成像方法进展
- 4. 川滇地区公共速度模型构建的一些建议与思考

1. 川滇地区构造背景及地震活动性

青藏高原及 其周缘: 地表运动, 活动断层, 地震活动性



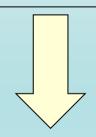
青藏高原东部地区:物质运移的主要通道口复杂的构造边界条件



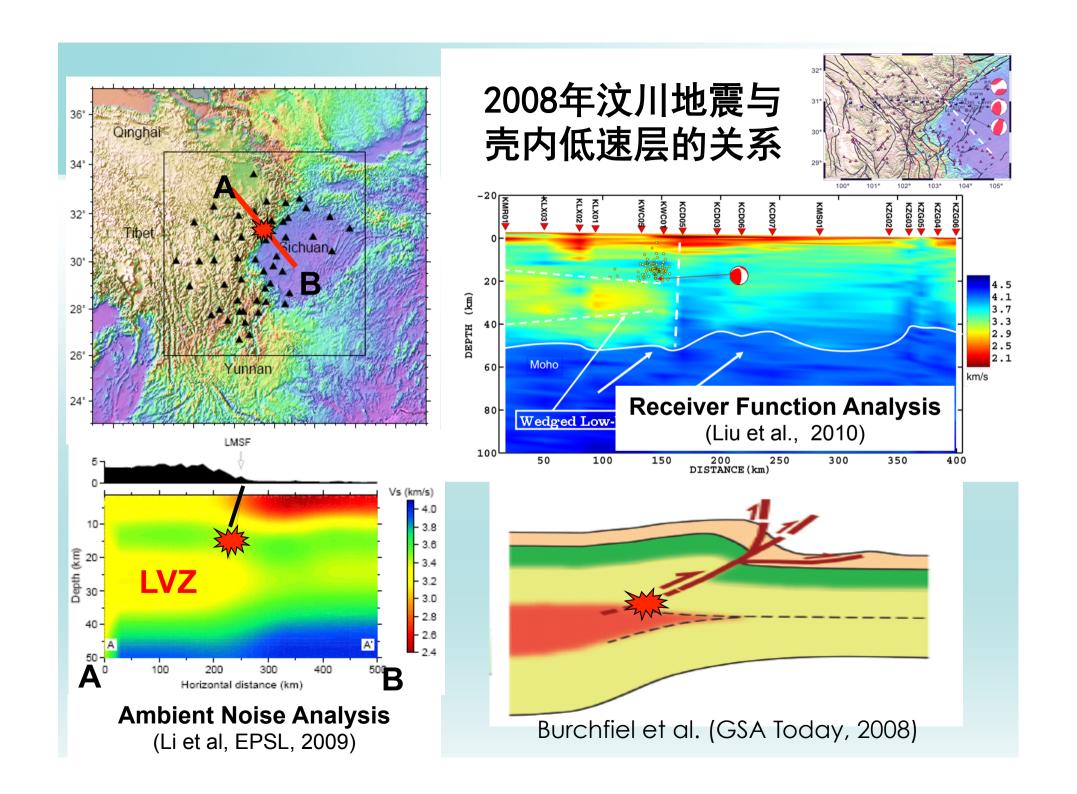
Royden et al (2008)

该区域岩石圈的 结构与强度

売内低粘性物质三维分布? 地壳上地幔动力学耦合特征? 大型断裂带与结构及变形的关系?

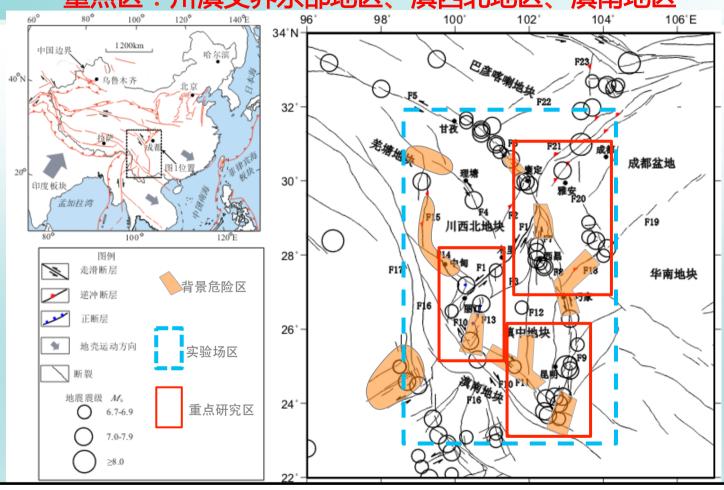


青藏高原物质的 运移和变形机制,地震 分布,地震孕育



川滇地区的重点地震危险区

重点区:川滇交界东部地区、滇西北地区、滇南地区



川滇地区精细三维速度结构模型是认识区域构造、 地震活动性、地震灾害等问题的基础

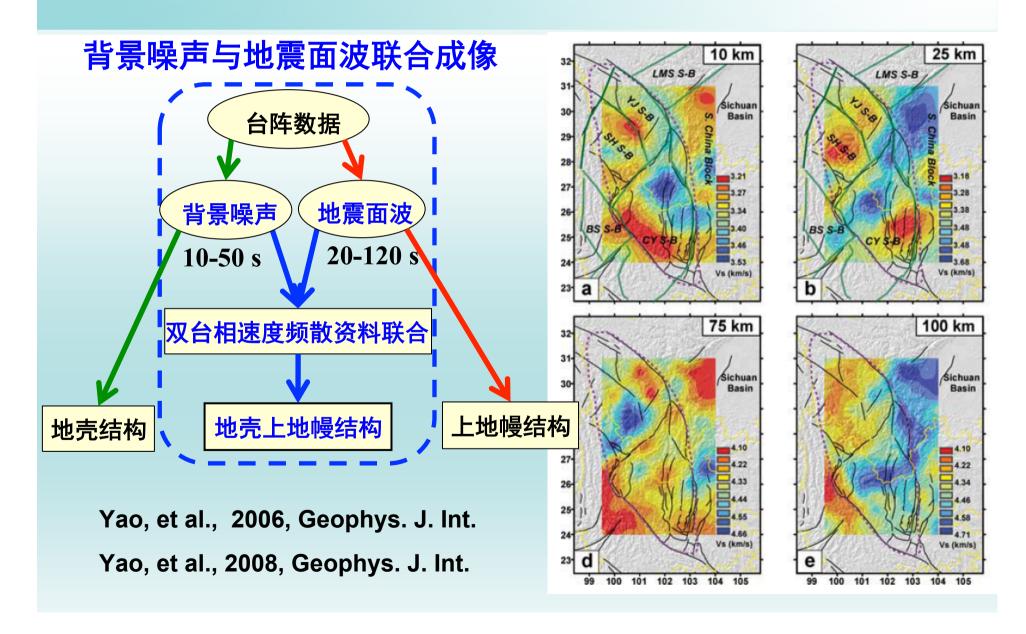
报告提纲

- 1. 川滇地区构造背景及地震活动性
- 2. 川滇地区已速度结构模型现状
- 3. 基于台阵数据的地震学联合成像方法进展
- 4. 川滇地区公共速度模型构建的一些建议与思考

川滇地区速度结构模型的多样性

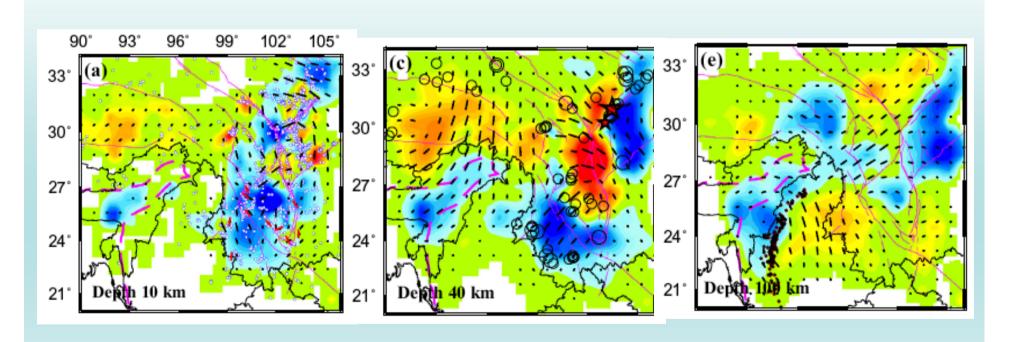
- 1. 数据来源:深地震测深剖面,区域地震体波走时,远震体波走时,背景噪声获得的中短周期面波,远震面波,接收函数,浅层勘探,测井等
- 2. **反演方法**: 单一数据反演 v. s. 数据联合(近震+远震体波走时,背景噪声+地震面波)v. s. 联合反演(接收函数+面波频散,体波走时+面波频散); 走时反演 v. s. 波形反演
- 3. 反演区域:整个川滇(或青藏高原东缘),川西,云南,龙门山地区,芦山震区,盆地地区(油气资源勘探)等
- 4. 模型种类: [地壳,岩石圈,上地幔,地壳上地幔,上地幔顶部] + [Vp, Vs, Vp & Vs, Pn, Sn,方位各向异性,径向各向异性]

几个川滇模型的例子



几个川滇模型的例子

区域P波十远震P波走时联合成像 →方位各向异性的P波地壳上地幔速度模型

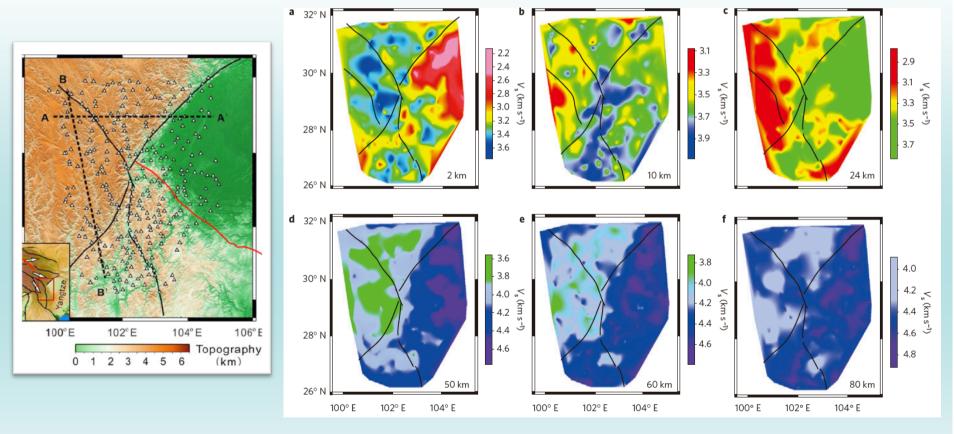


Wei et al. (2013, PEPI)

几个川滇模型的例子

背景噪声+接收函数联合反演

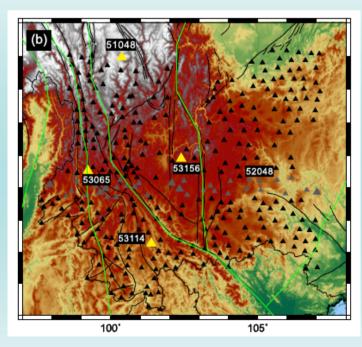
→ 川西地壳上地幔顶部高分辨率Vs速度结构模型



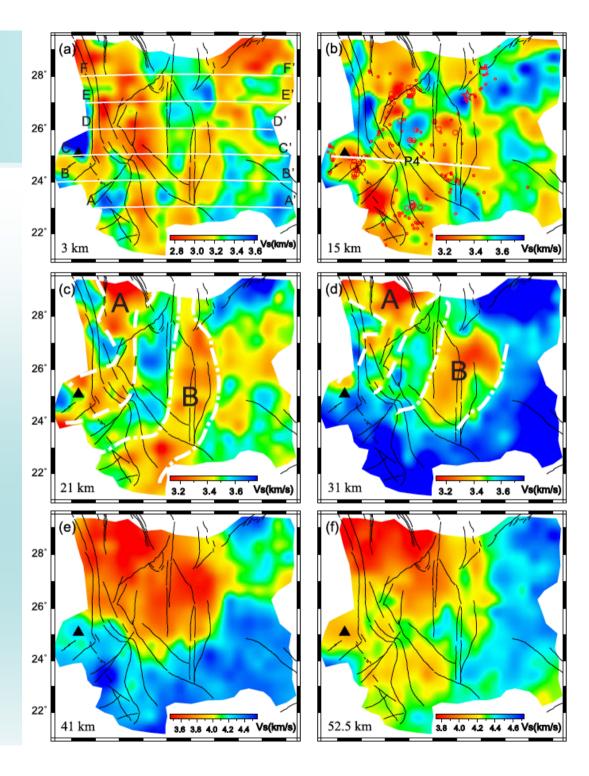
Liu et al 2014 (Nature Geosci)

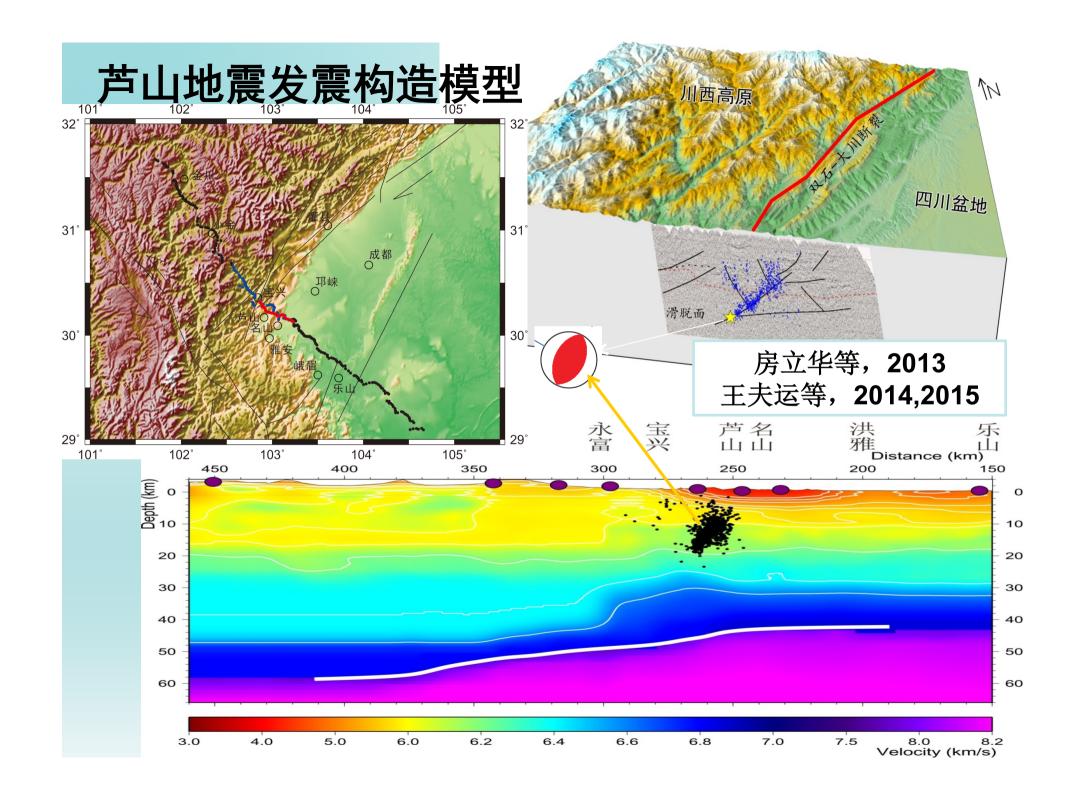
背景噪声+接收函 数联合反演

→ 云南地壳上地 幔顶部高分辨率Vs 速度结构模型

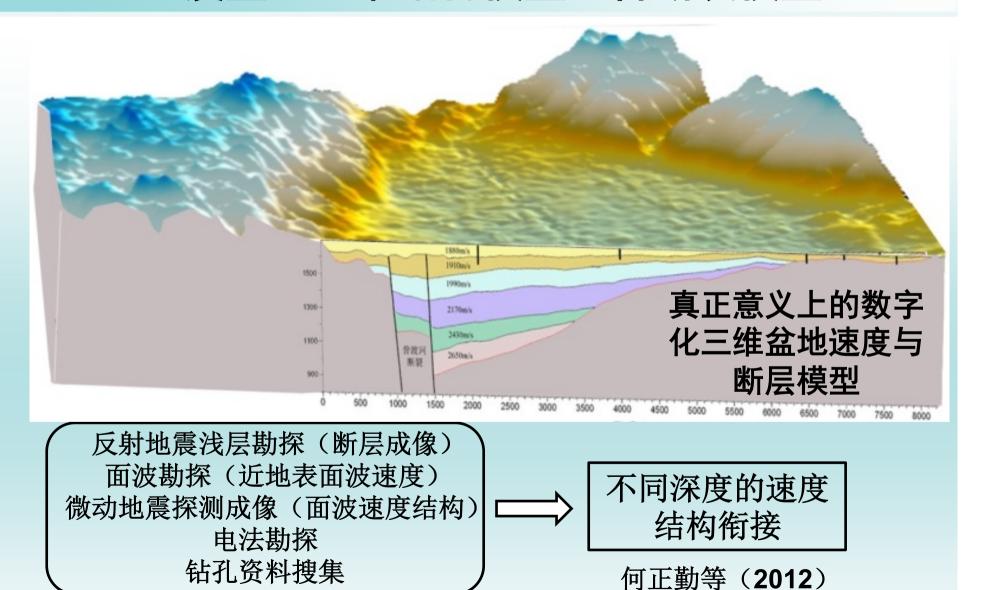


Bao et al 2015 (EPSL)





玉溪盆地三维结构模型(含断裂模型)



川滇速度模型存在的问题

- (1) 几乎没有工作对模型进行细致对比和验证, 模型的可靠性还缺乏评估!
- (2)模型构建方法仍比较传统,需要从方法技术上提升(数据综合+联合反演→波形反演)。
- (3) 各种模型的分辨尺度存在很大差异,需要研究如何将不同尺度的模型融合。
 - (4) 没有公认的或公共的速度模型!

不同种类的地震波数据联合反演 > Vp & Vs公共速度结构模型

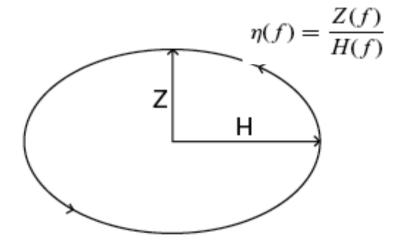
报告提纲

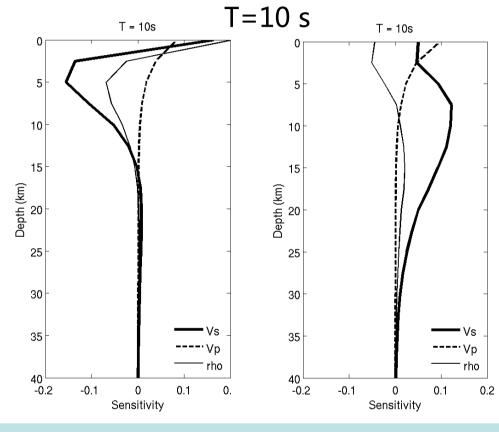
- 1. 川滇地区构造背景及地震活动性
- 2. 川滇地区已速度结构模型现状
- 3. 基于台阵数据的地震学联合成像方法进展
- 4. 川滇地区公共速度模型构建的一些建议与思考

(1) 面波频散曲线、ZH振幅比、接收函数 联合反演一维地壳结构(Vs & Vp)

$$\frac{u_z(\omega)}{u_r(\omega)} = \frac{|r_2(\omega, z)|}{|r_1(\omega, z)|}$$

Direction of Propagation



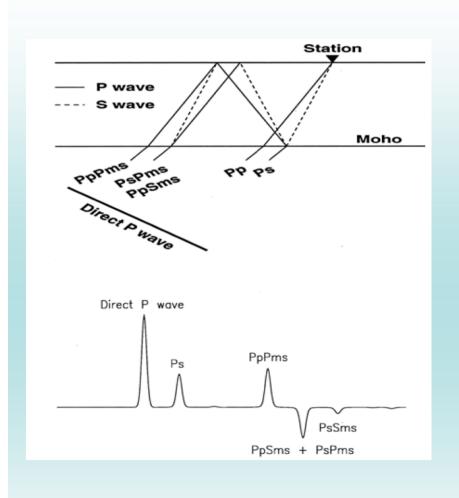


ZH比敏感核

相速度敏感核

Rayleigh波ZH振幅比:对地壳浅部速度结构有更好的分辨率

P波接收函数



- P波接收函数:更好的约束间断面信息及地壳平均Vp/Vs比值,但对绝对速度约束差,反演依赖于初始模型选取
- 面波频散 / ZH振幅比:可以获得平滑变化的绝对速度结构,但难以约束间断面
- 面波频散 / ZH振幅比 + 接收函数 联合反演:更好地获得地壳的精 细速度结构

频散(SW) + 振幅比(ZH) + 接收函数(RF): 地壳Vs 结构

目标函数: $\phi(\mathbf{m}_s) = \|\mathbf{F}(\mathbf{m}_s) - \mathbf{d}\|_2^2 + \eta^2 \|\mathbf{L}\Delta\mathbf{m}_s\|_2^2$

$$\mathbf{m}_s^{(n+1)} = \mathbf{m}_s^{(n)} + \Delta \mathbf{m}_s^{(n)}$$

 $\mathbf{m}_s^{(n+1)} = \mathbf{m}_s^{(n)} + \Delta \mathbf{m}_s^{(n)}$ Vp, 密度更新: 采用经验公式 (Brocher et al 2005)

第一步:

SW(0.5) + ZH(0.5)

获得可靠的平滑速度模型

第二步:

RF(0.8) + SW(0.1) + ZH(0.1)

以第一步获得的平滑模型为基础,进一步反演得 到地壳精细模型 + 间断面信息

Zhang & Yao (submitted to GJI)

联合反演 (Vs & Vp): 三步反演法

目标函数:
$$\phi(\mathbf{m}_{s,p}) = \|\mathbf{F}(\mathbf{m}_{s,p}) - \mathbf{d}\|_{2}^{2} + \eta^{2} \|\mathbf{L}_{1}\Delta\mathbf{m}_{s,p}\|_{2}^{2} + \sigma^{2} \|\Delta\mathbf{m}_{s}\|_{2}^{2}$$

$$\mathbf{m}_{s,p}^{(n+1)} = \mathbf{m}_{s,p}^{(n)} + \Delta \mathbf{m}_{s,p}^{(n)}$$

 $\mathbf{m}_{s,p}^{(n+1)} = \mathbf{m}_{s,p}^{(n)} + \Delta \mathbf{m}_{s,p}^{(n)}$ 密度更新:采用密度 $-\mathsf{Vp}$ 经验公式 (Brocher et al 2005)

线性迭代最小二乘解

Stage 1:

SF+ZH \Longrightarrow Vs

(获得平均的横波速度结构, 作为初始模型)

Stage 2:

RF (main) +SF (constrains) +ZH (constrains) VS

(在平滑的速度结构上进一步增加间断面信息)



Stage 3:

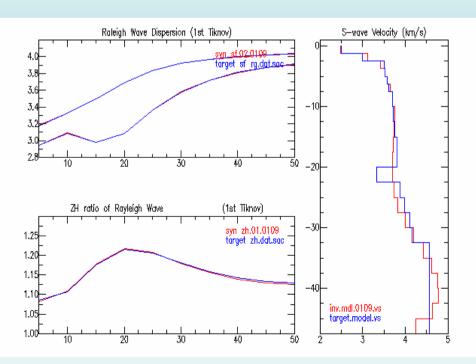
 $RF+SF+ZH \implies Vs \text{ and } Vp (Vp/Vs)$

(在可靠的横波速度结构基础上进一步约束 Vp & Vs)

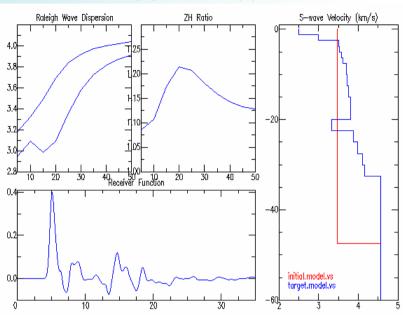
Zhang & Yao (submitted to GJI)

第一步反演 (频散+ZH振幅比)

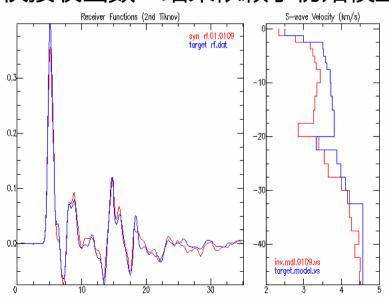
频散+振幅比:较好地恢复模型平滑部分



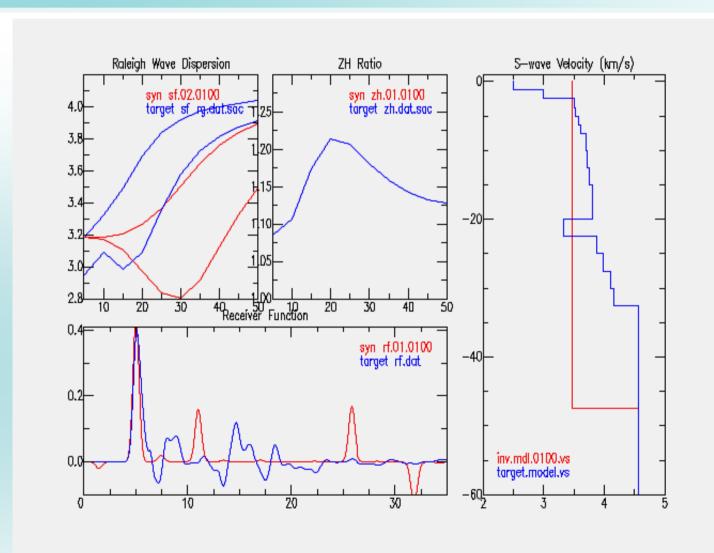
合成测试数据



仅接收函数:结果依赖于初始模型



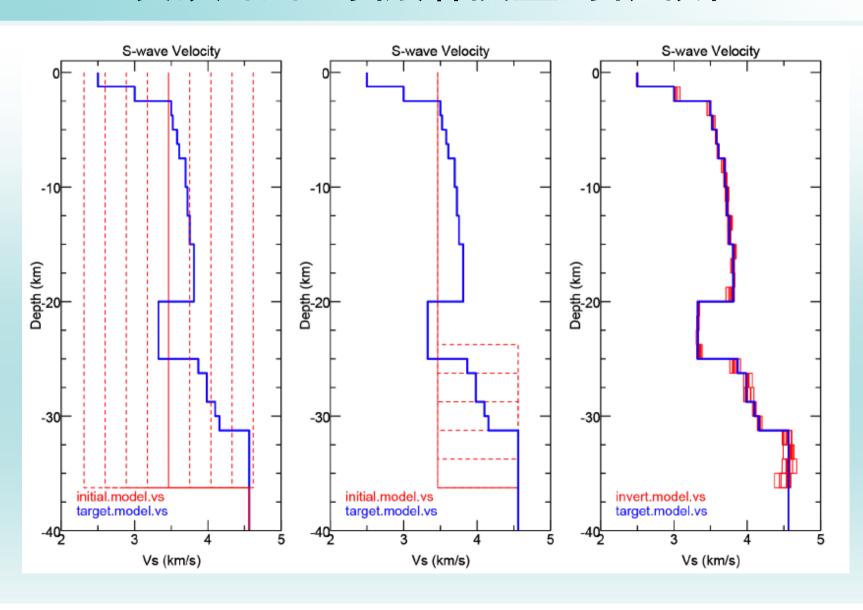
频散(SW) + 振幅比(ZH) + 接收函数(RF): 两步反演方法



第一步 (SW+ZH) 前4次迭代

第二步 (RF+SW+ZH) 第5 - 10次迭代

反演结果对初始模型的依赖性



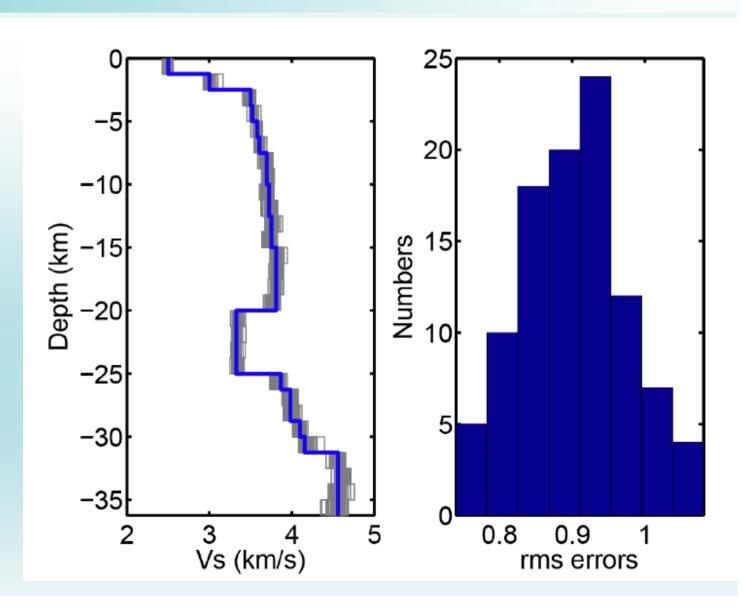
反演结果对数据噪声的依赖性

100次反演,每 次合成数据加 随机噪声

SW: 2%

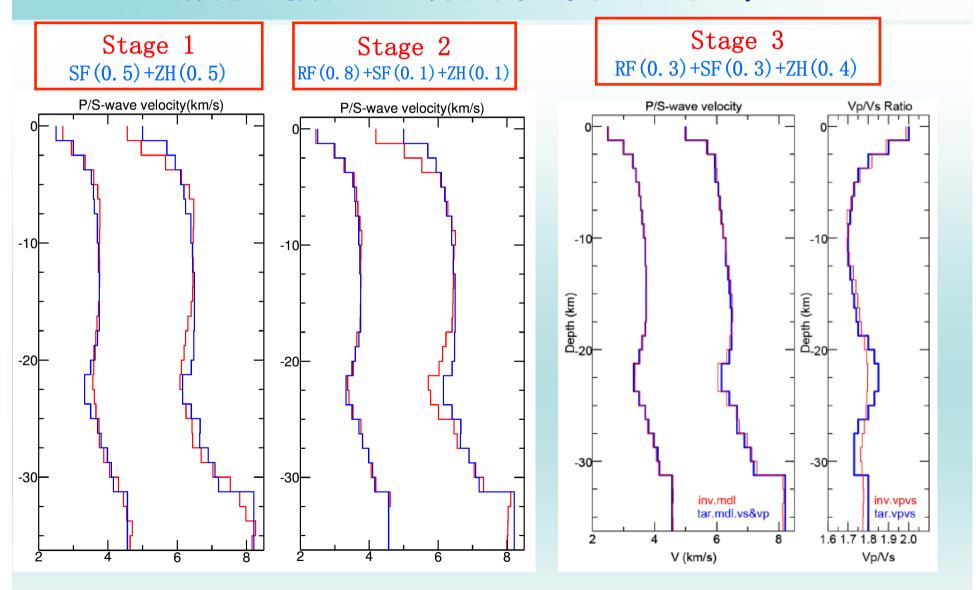
ZH: 2%

RF: 5%



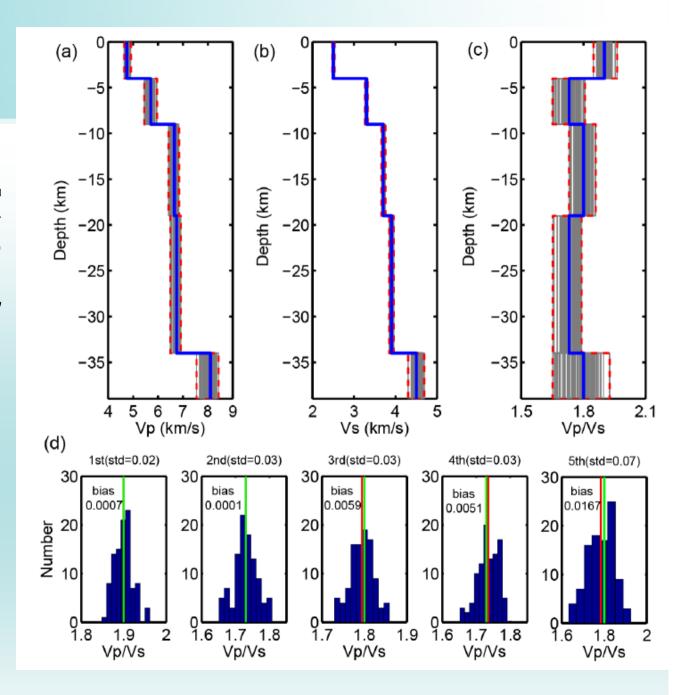
理论测试:上地壳Vp/Vs比值较好的约束

(接收函数: H-k方法给出平均地壳Vp/Vs)



地壳厚层的反演结果(50次,每次数据加入随机噪声):

每层的Vp/Vs比值 均能很好的被约束 ,有助于更好地认 识分层地壳的矿物 组成及物质状态



(2) 面波与体波走时联合反演三维Vp & Vs速度结构

面波数据(背景噪声+地震面波):主要获得 横波速度结构,对地壳浅部纵波波速有一定的 敏感性

• 主动源或地震体波走时: 纵波波速, 横波波速

● 面波与体波走时联合反演: 更好地获得纵波, 横波, Vp/Vs比(或泊松比)

台阵面波反演方法

面波传统反演方法

噪声互相关函数 / 地震面波双台法

所有双台路径相 / 群速度频散

2D 相 / 群速度分布

3D 横波速度结构

面波直接反演方法

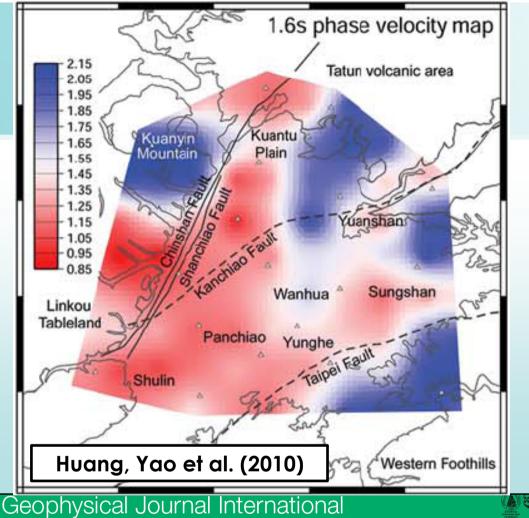
噪声互相关函数 / 地震面波双台法

所有频率双台路径面波走时

不同频率面波的路 径不同:面波路径 射线追踪(fast marching method) (Rawlinson, 2004)

3D 横波速度结构

Fang, Yao, Zhang et al. (2015)



相速度变化 > 30%, 必须 考虑面波非 大圆路径传 播→射线追 踪

Geophys. J. Int. (2015) 201, 1251-1263 GJI Seismology

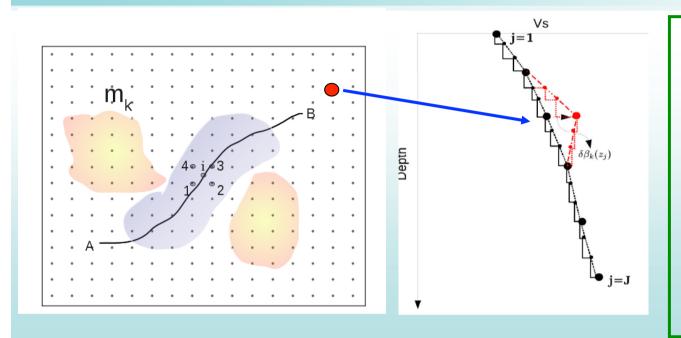
doi: 10.1093/gji/ggv080

Direct inversion of surface wave dispersion for three-dimensional shallow crustal structure based on ray tracing: methodology and application

Hongjian Fang, 1,2 Huajian Yao, 1,2 Haijiang Zhang, 1,2 Yu-Chih Huang 3,4 and Robert D. van der Hilst⁵

Laboratory of Seismology and Physics of Earth's Interior, School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China. E-mail: hjyao@ustc.edu.cn

面波频散直接三维成像方法



更新3D模型→

计算不同周期2D相 速度分布图→

重新计算不同周期 面波射线路径,更 新G矩阵

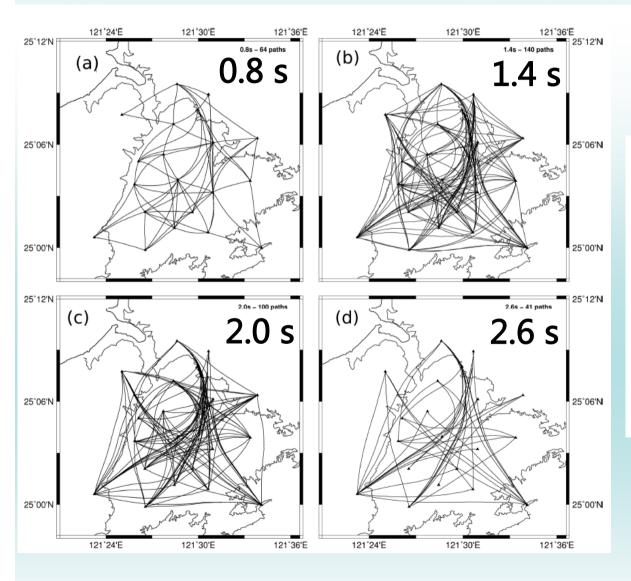
$$\delta t_{i}(w) = \sum_{k=1}^{K} \left(-\frac{v_{ik}}{C_{k}^{2}(\omega)} \right) \sum_{j=1}^{J} \left[R_{\alpha}(z_{j}) \frac{\partial C_{k}(\omega)}{\partial \alpha_{k}(z_{j})} + R_{\rho}(z_{j}) \frac{\partial C_{k}(\omega)}{\partial \rho_{k}(z_{j})} + \frac{\partial C_{k}(\omega)}{\partial \rho_{k}(z_{j})} \right] \Big|_{\Theta_{k}} \delta \beta_{k}(z_{j}) = \sum_{l=1}^{M} G_{il} m_{l},$$

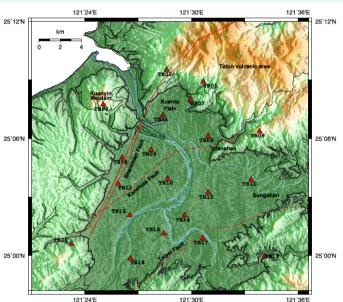
$$(10)$$

 $\Longrightarrow \mathbf{d} = \mathbf{Gm}$

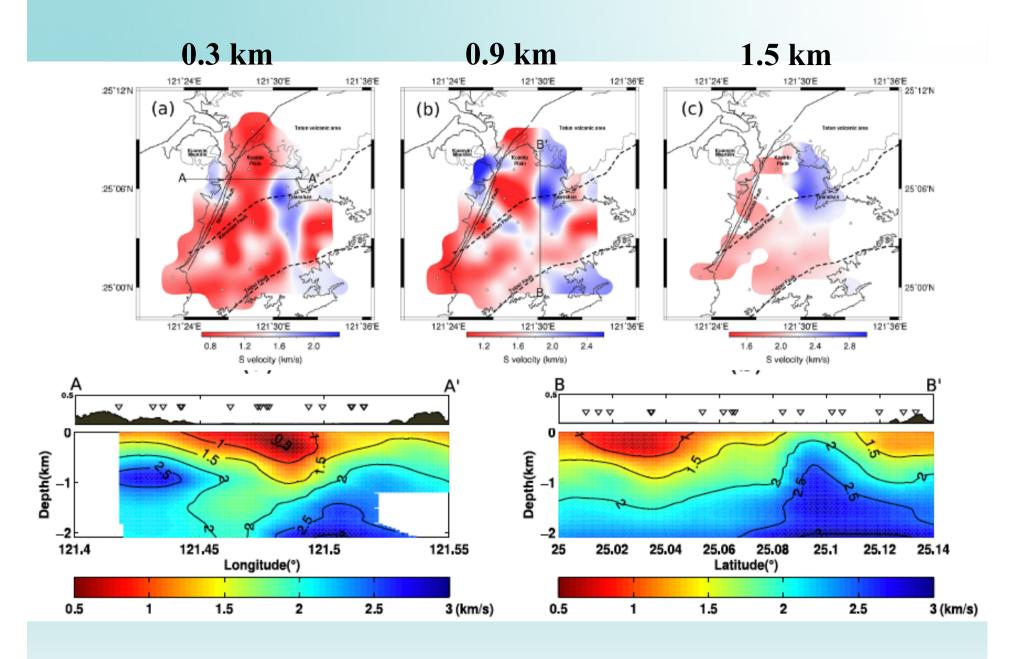
Fang, Yao, Zhang et al. (2015)

台北盆地地反演实例





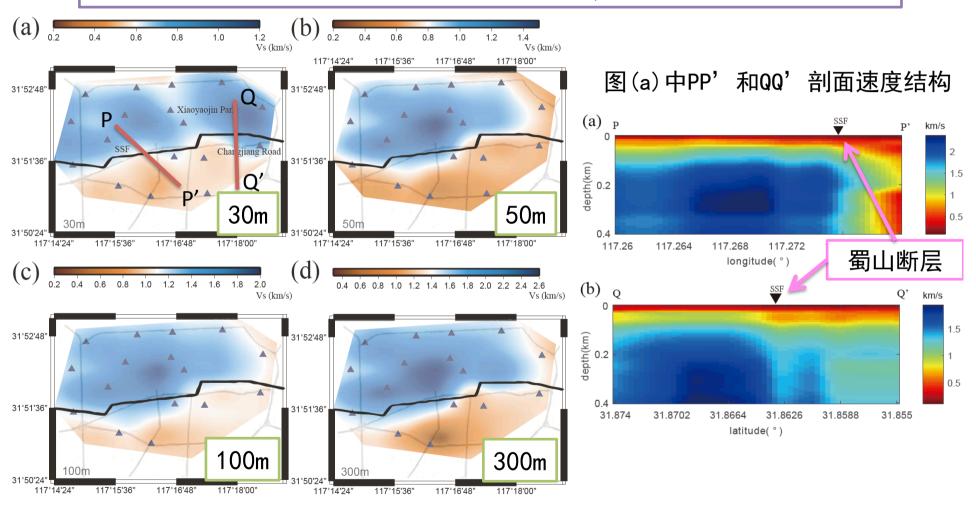
频率0.3 - 4 Hz



Fang, Yao, Zhang et al. (2015)

噪声成像: 合肥市近地表三维横波速度结构

17个台站(红色三角):5公里x7公里区域,两周背景噪声观测时间



合肥市长江路以北近地表为高速,以南为低速, 基本上以蜀山断层(SSF)(图中黑线)为界

Li, Yao et al (2016)

面波体波走时联合反演方法

(Fang, Zhang, Yao et al., JGR 2016)

体波走时反演

$$egin{bmatrix} \mathbf{G}_{H}^{T_p} & \mathbf{G}_{Vp}^{T_p} & \mathbf{0} \ \mathbf{G}_{H}^{T_s} & \mathbf{0} & \mathbf{G}_{Vs}^{T_s} \end{bmatrix} egin{bmatrix} oldsymbol{\Delta}\mathbf{H} \ oldsymbol{\Delta}\mathbf{m}_p \ oldsymbol{\Delta}\mathbf{m}_s \end{bmatrix} = egin{bmatrix} \mathbf{d}^{T_p} \ \mathbf{d}^{T_s} \end{bmatrix}$$

面波走时反演

$$\left[\mathbf{G}_{V_p}^{SW} + R_{\rho}\mathbf{G}_{\rho}^{SW} \ \mathbf{G}_{V_s}^{SW}\right] \begin{bmatrix} \mathbf{\Delta}\mathbf{m}_p \\ \mathbf{\Delta}\mathbf{m}_s \end{bmatrix} = \mathbf{d}^{SW}$$

直波面波
$$\begin{bmatrix} \mathbf{G}_{H}^{T_{p}} & \mathbf{G}_{V_{p}}^{T_{p}} & \mathbf{0} \\ \mathbf{E} \mathbf{H} \mathbf{G}_{H}^{T_{s}} & \mathbf{0} & \mathbf{G}_{V_{s}}^{T_{s}} \\ \mathbf{G}_{H}^{T_{s}} & \mathbf{0} & \mathbf{G}_{V_{s}}^{T_{s}} \\ \mathbf{0} & \mu(\mathbf{G}_{V_{p}}^{SW} + R_{\rho}\mathbf{G}_{\rho}^{SW}) & \mu\mathbf{G}_{V_{s}}^{SW} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Delta}\mathbf{H} \\ \boldsymbol{\Delta}\mathbf{m}_{p} \\ \boldsymbol{\Delta}\mathbf{m}_{s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{d}^{T_{p}} \\ \mathbf{d}^{T_{s}} \\ \mu\mathbf{d}^{SW} \end{bmatrix}$$

面波体波走时联合反演方法

(Fang, Zhang, Yao et al. 2016, JGR)

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G}_{H}^{T_{p}} & \mathbf{G}_{Vp}^{T_{p}} & \mathbf{0} \\ \mathbf{G}_{H}^{T_{s}} & \mathbf{0} & \mathbf{G}_{Vs}^{T_{s}} \\ \mathbf{0} & \mu(\mathbf{G}_{V_{p}}^{SW} + R_{\rho}\mathbf{G}_{\rho}^{SW}) \ \mu\mathbf{G}_{Vs}^{SW} \\ \mathbf{0} & \lambda_{1}\mathbf{L} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \lambda_{2}\mathbf{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Delta}\mathbf{H} \\ \boldsymbol{\Delta}\mathbf{m}_{p} \\ \boldsymbol{\Delta}\mathbf{m}_{s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{d}^{T_{p}} \\ \mathbf{d}^{T_{s}} \\ \mu\mathbf{d}^{SW} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \lambda_{3}\mathbf{I} & -\lambda_{3}\kappa\mathbf{I} \end{bmatrix}$$

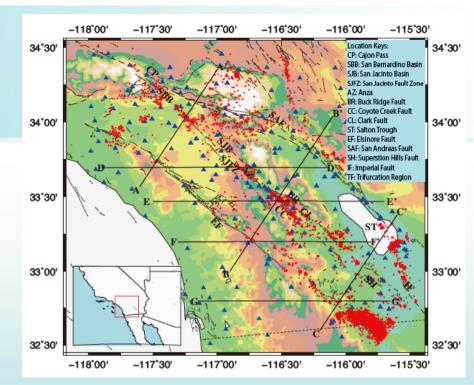
λ1,λ2:三维模型空间平滑约束

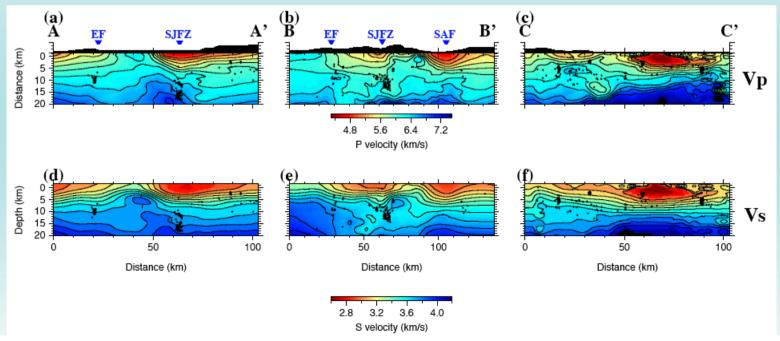
λ3, κ: Vp/Vs比值约束(例如以1.73为均值的高斯平滑约束)

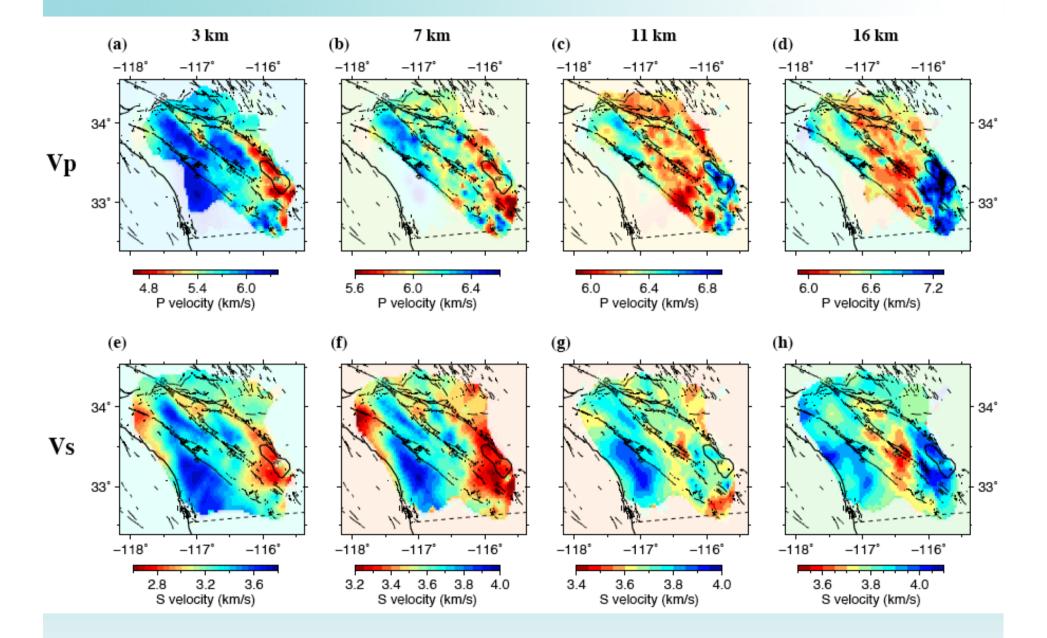
$$(\mathbf{m}_p + \Delta \mathbf{m}_p) = \kappa(\mathbf{m}_s + \Delta \mathbf{m}_s)$$

美国南加洲地区 20万P波走时,4. 5万S波走时,3万 面波群速度频散 数据(3-12秒)

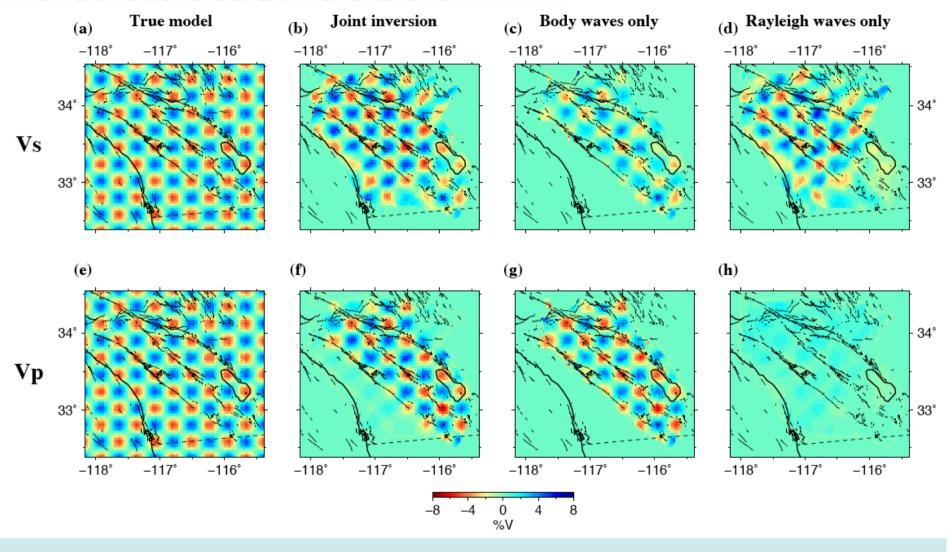
Fang, Zhang, Yao et al. (2016, JGR)



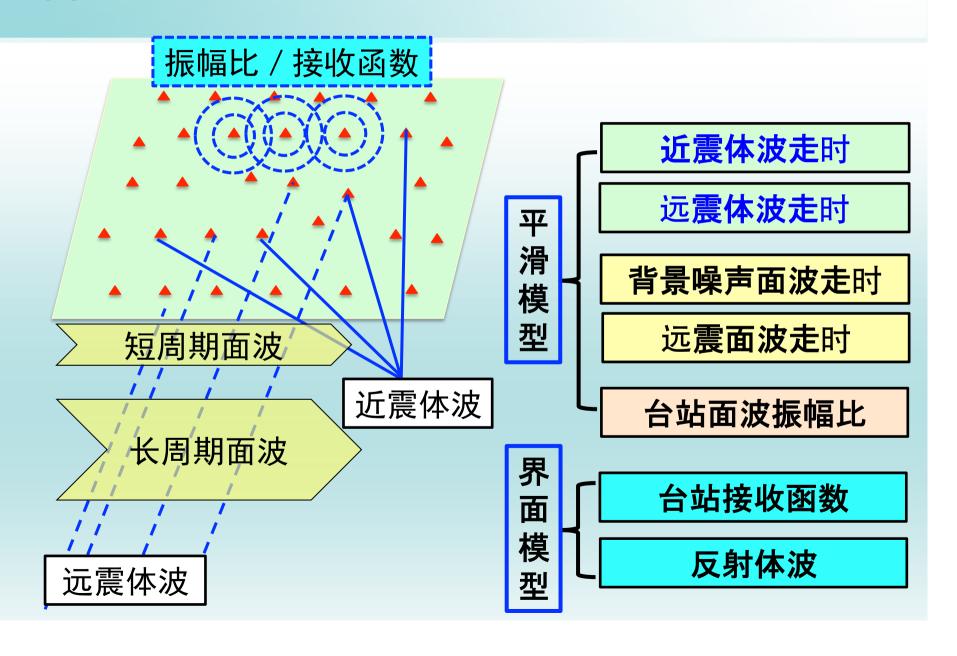




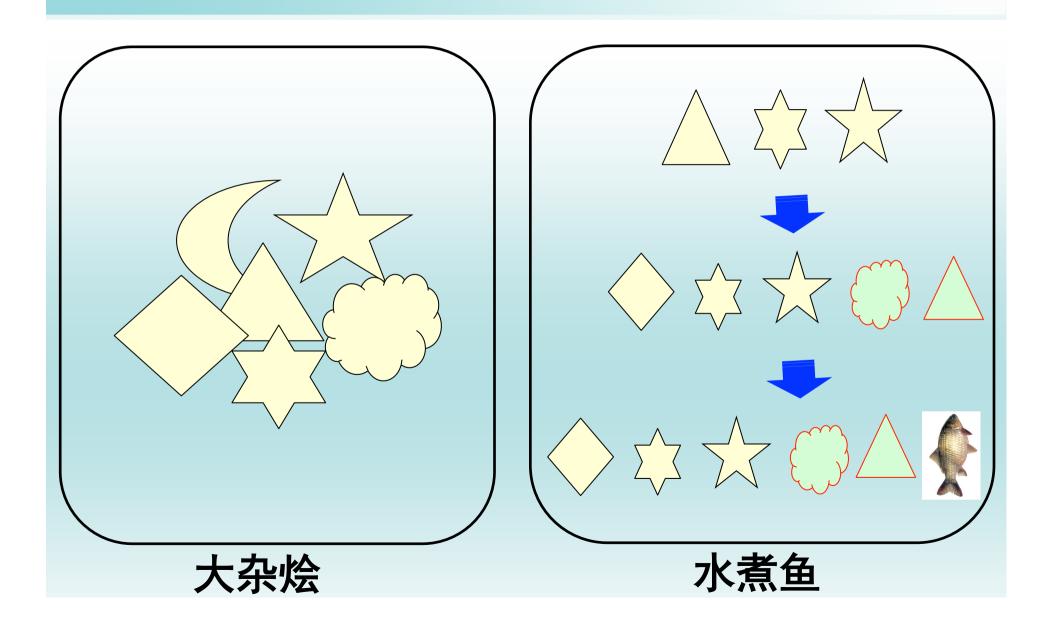
水平方向检测版模型恢复测试



(3) 基于台阵的联合地震学成像框架的构建



联合反演的思路: 基于数据物理性质的迭代反演



联合地震学成像反演的策略

● 迭代策略: 先反演平滑背景速度结构模型(走时数据),再反演界面信息(接收函数,反射波)

• 数据权重: 基于数据标准误差或数据拟合残差

● 模型约束:将物理约束/观测约束作为先验信息

多尺度分辨:采用基于小波域的多尺度成像算法(数据分布不均匀,模型参数的敏感性存在差异)

报告提纲

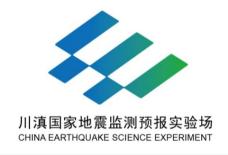
- 1. 川滇地区构造背景及地震活动性
- 2. 川滇地区已速度结构模型现状
- 3. 基于台阵数据的地震学联合成像方法进展
- 4. 川滇地区公共速度模型构建的一些建议与思考

川滇国家地震监测预报实验场组织的调研

2016年3-6月,组织10多个工作组调研(1)南加州地震中心(SCEC)研究和管理模式,取得的科研成果,各研究模块之间的关系;(2)川滇地区相关研究现状,差距,3-5年及10年的研究建议等



















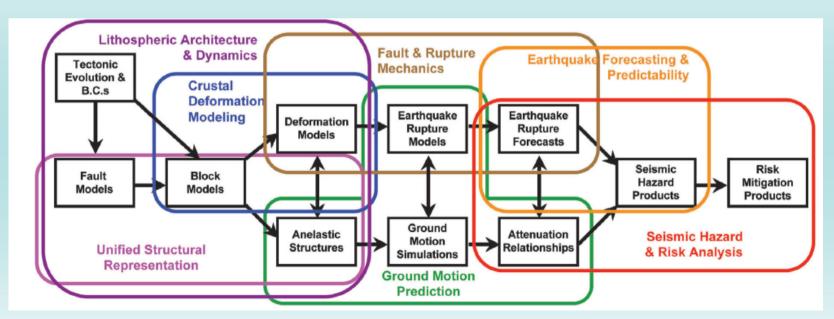




地震预测研究所、中国地震台网中心、地球物理研究所、地质研究所、 地壳应力研究所、物探中心、第一监测中心、第二监测中心、地壳工程 中心、防灾科技学院、四川省地震局、云南省地震局

与速度模型构建相关的调研小组

- 数字地震学小组(姚华建,韩立波,周龙泉,田晓峰,王伟涛)调研内容:台站、数据、模型(速度模型,断层模型)
- 震源反演组(张勇,储日升,房立华,孙道远)调研内容:地震定位,震源机制,地震破裂过程
- 川滇研究基础梳理组(郑勇,王武星,徐岳仁)



SCEC Master Model示意图(Jordan, 2006)

SCEC Unified Structural Representation (USR)

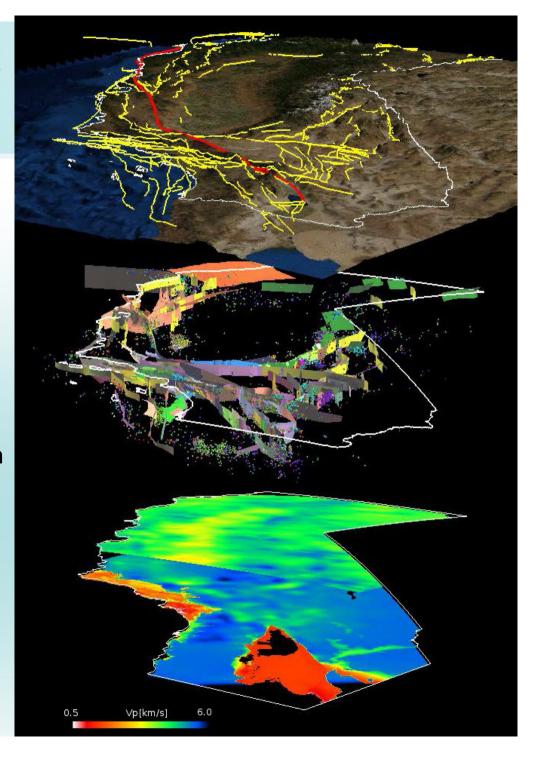
The SCEC USR is a 3D description of crustal and upper mantle structure in California that integrates many forms of data and model results.

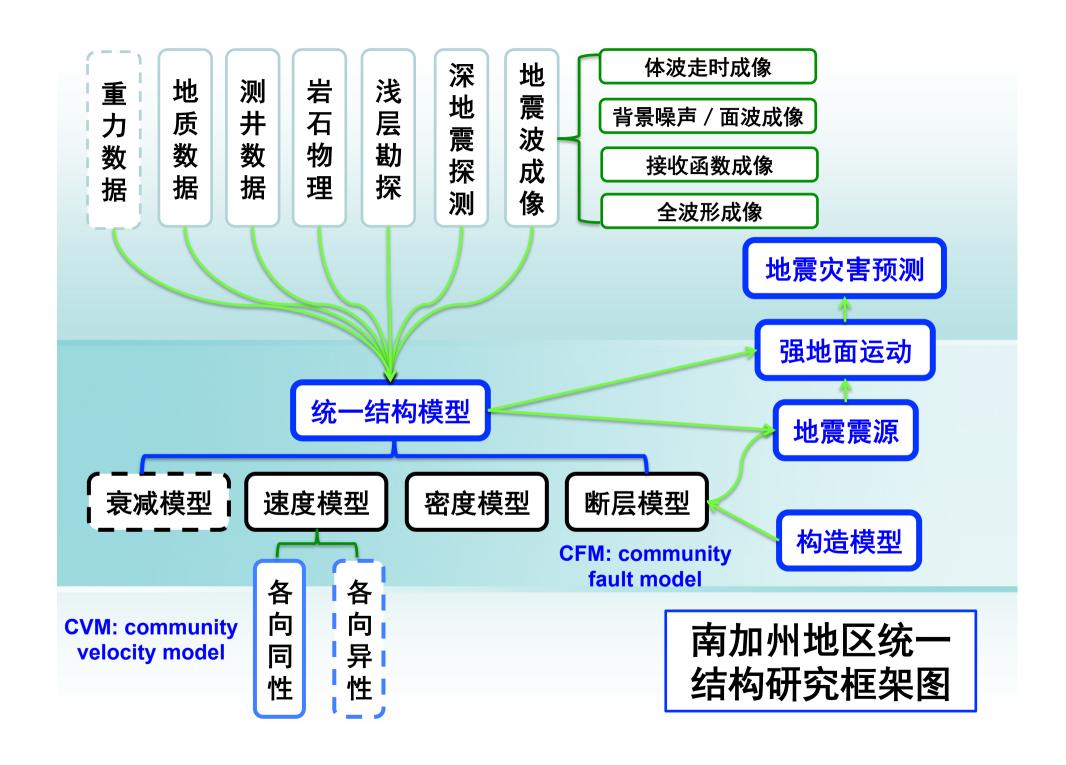
Models and supporting datasets are evaluated and vetted by the SCEC community.

The USR serves a broad range of science and hazards assessment efforts, including strong ground motion prediction and PSHA.

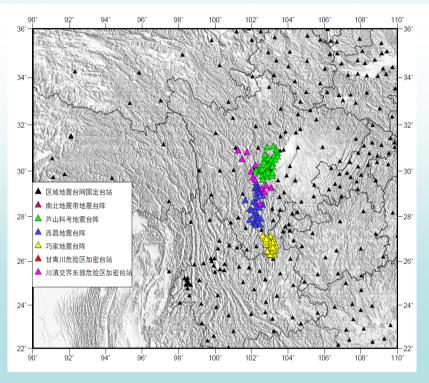
The USR consists of

- Community Fault Models (CFM, CFM-R, SCFM)
- Community Velocity Models (CVM, CVM-H)

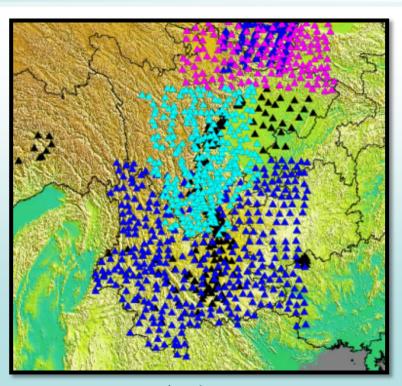




川滇地区地震台阵现状



宽频带省台:云南60十四川60

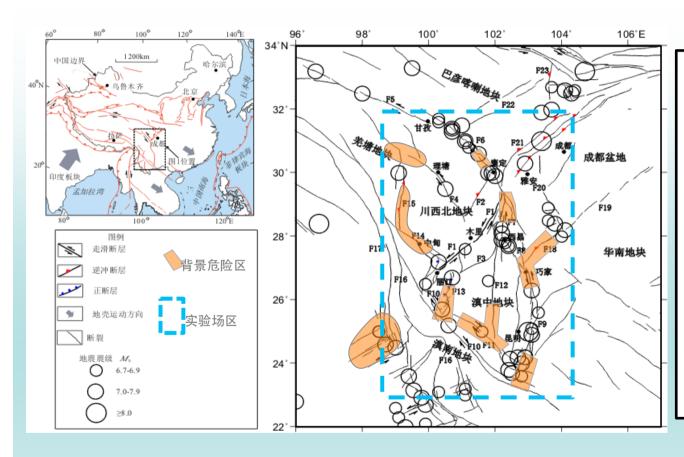


川西台阵: 300 喜马拉雅台阵-1期: 350

其他临时宽频带台阵: MIT-China Array, 西昌台阵,安宁河台阵, 巧家台阵,四川盆地台阵,腾冲台阵等(>150)

川滇地区宽频带地震台阵~1000, 间距~15-30公里

川滇地区公共速度模型构建的一些思考与建议



5种分辨尺度模型

全国: ~0.5°

川滇: ~20 公里

主要断裂带: ~5公里

核心城市: ~1公里

重点断层: ~几十米

根据科学/工程需求: 多尺度地震学速度模型的构建

川滇地区公共速度模型构建的一些思考与建议

地震精定位、震源机制 (20年广义震源参数目录) (至少3个小组独立做) 广义震源参数 公共速度模型 速度模型验证 CD-CVM1. 0 川滇地壳上地幔三维速度结 基于三维模型的走时、波形 构模型 + 主要界面特征 模拟, 与观测数据对比, 建 [多种地震学数据联合反演 立模型评价体系 → 波形反演]

川滇地区公共速度模型构建的一些思考与建议

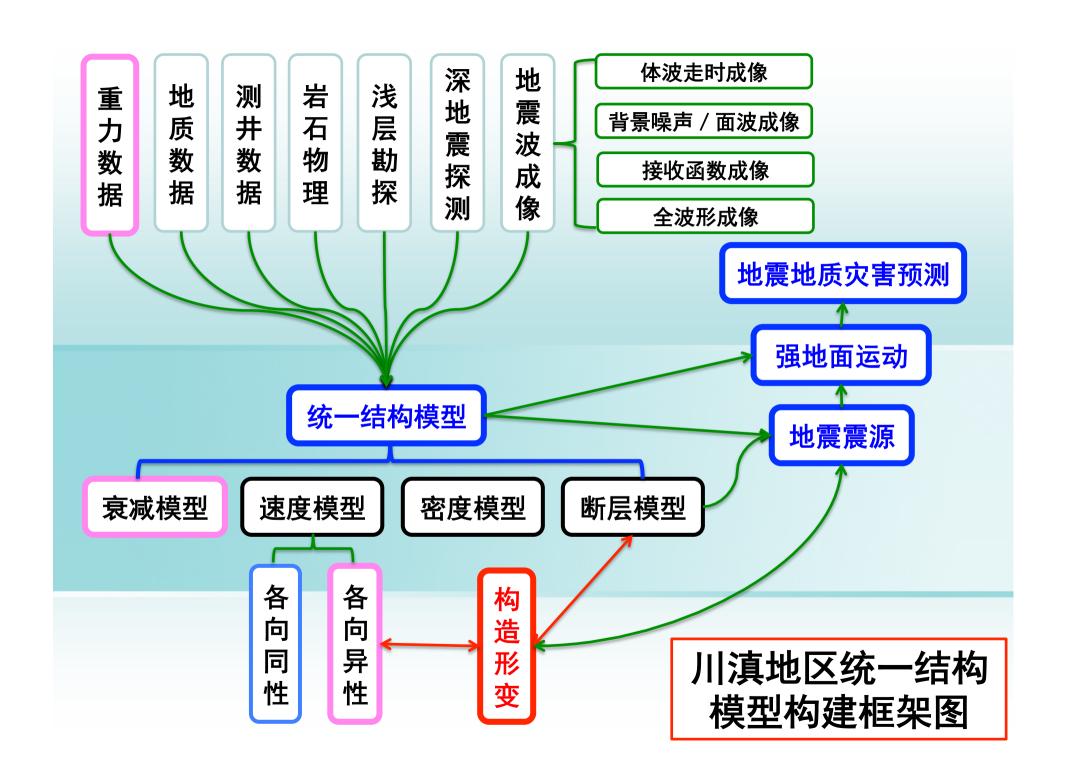
川滇实验场公共速度模型构建的3-10年研究建议

- 综合川滇所有台阵的近震远震体波走时、面波及背景噪声得到的频散数据和振幅比、接收函数、重力异常数据的联合反演,获得更为可靠的川滇三维地壳上地幔三维各向同性纵波/横波速度结构模型[数据重新测量,反演方法创新,深地震剖面数据的融合或联合] → 川滇地区公共速度(Vp, Vs, Vp/Vs, G/C/M界面)模型1.0版本(3年)
- 1.0 版本 + 各向异性参数联合反演(面波,体波,接收函数,横波分裂) →三维方位及径向各向异性模型: 1.1版本(4-5年)

川滇实验场公共速度模型构建的3-10年研究建议

- 1.0版本+盆地、城市等浅层剖面和测井数据: 2.0版本(3-4年)
- 2.0版本+波形成像模型优化: 3.0版本(4-5年)
- 3.0版本十地震波振幅信息→ 地壳上地幔衰减模型: 3.1
 版本(4-6年)
- 3.0版本十公共断层模型数据的嵌入十构造地质模型信息(地质年代,岩性,构造历史):4.0版本(5-10年)

相关问题:联合成像方法的发展和可靠性验证(火箭炮),波形及各种地球物理数据质量(炮弹),模型的检验,模型数据库的建立(多尺度分辨的问题),不同块工作的同步开展,模型工作组的定期进展研讨等



谢谢!

敬请批评指正

