



波形梯度法

梁春涛 曹飞煌

成都理工大学地球物理学院



方法介绍

程序介绍

方法介绍

- WG基本原理
- WG理论测试
- WG-USArray应用
- 各向异性-基本原理
- 各向异性-理论测试
- 各向异性-川西台阵应用

方法介绍-WG基本原理

地震台网成像方法回顾

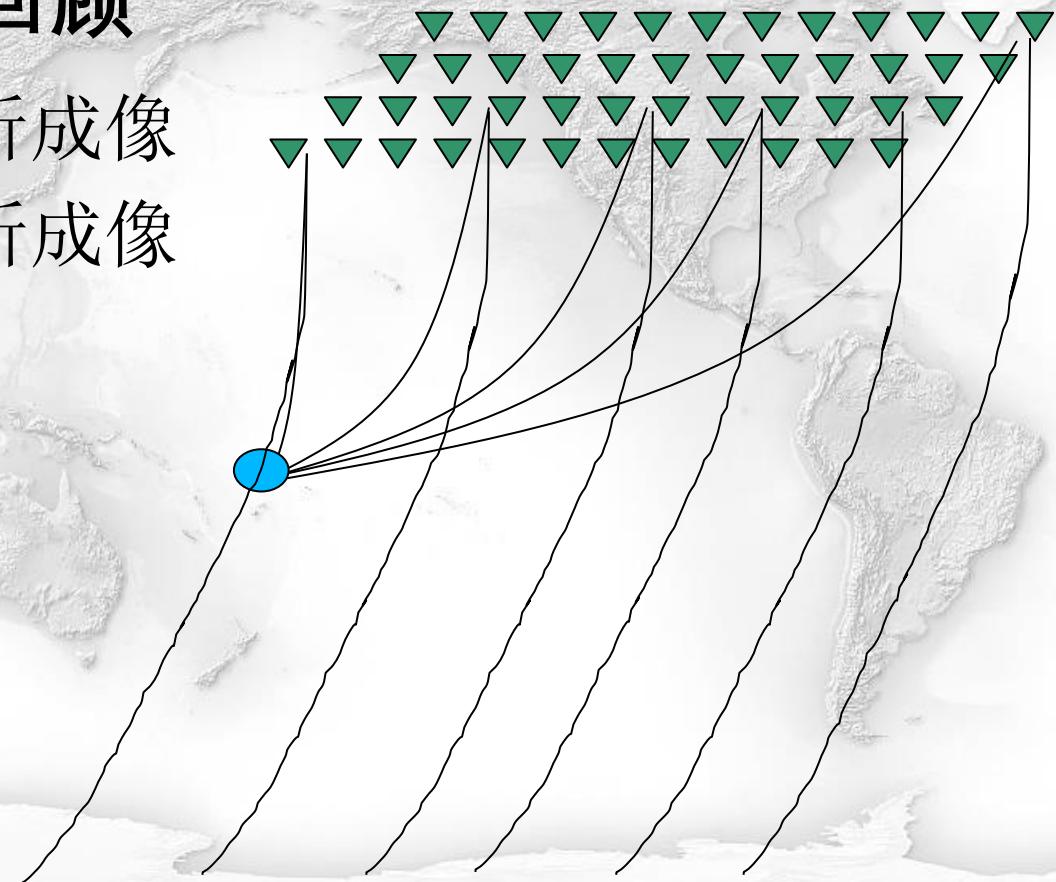
1. 近震走时、波形层析成像
2. 远震走时、波形层析成像
3. 接收函数法
4. 面波反演
5. 噪声成像

...

波形梯度法！

Langston 2007

Liang & Langston 2009



方法介绍-WG基本原理

基本假设：



相邻台站间介质分布较为均匀(黄色方框)
地震波表现为平面波：

$$u(t, x) = G(x)f(t - (x - x_0)p_x)$$

u : 位移的时空变化; G : 振幅的空间变化; f : 相位的时间和空间变化

方法介绍-WG基本原理

基本思路：

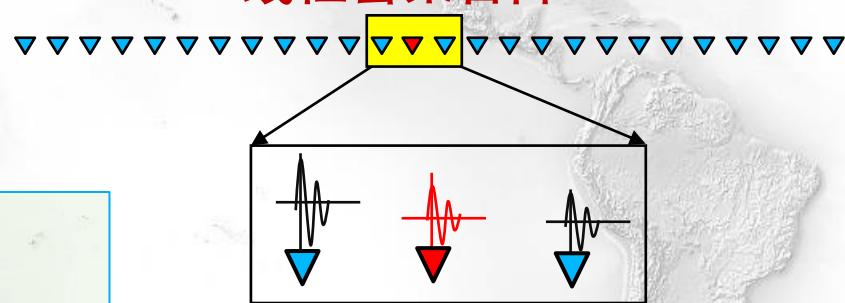
子台网：选定某个台站为参考台站(x_0)，相邻台站为辅助台站(x_i)



Ray path



线性密集台阵



波场空间梯度：

参考台站与相邻台站间的相位差异和振幅差异



地震波传播参数

相速度：地震波传播速度

方位角变化：地震波从震源传播到台站方位角发生的变化

几何扩散：地震波振幅随距离的变化

辐射花样：地震波振幅随方位角的变化

(Langston,2007)

方法介绍-WG基本原理

波动方程 → 空间导数 → 地震波传播参数

平面波动方程：

$$u(t, x, y) = G(x, y)f(t - (x - x_0)p_x - (y - y_0)p_y) \dots \quad (1)$$

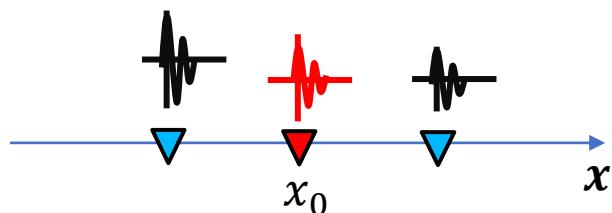
对u 求x的偏导

$$\text{令 } m = t - xp_x - yp_y$$

$$f_{,x} = f_{,x} f_{,m} = - \left(p_x + (x - x_0) p_{x,x} \right) f_{,m} \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

联合 (2) 和 (3) 得

$$u_{,x} = G_{,x}f - \left(p_x + (x - x_0)p_{x,x} \right) G f_{,m} \dots \dots \dots \quad (4)$$



其中：
 x_0 为参考台站位置
 x 为辅助台站位置

(Langston,2007)

方法介绍-WG基本原理

波动方程 → 空间导数 → 地震波传播参数

对u 求t的偏导

$$u_{,t} = G f_{,t} \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (5)$$

$$\therefore f(t - (x - x_0) p_x - (y - y_0) p_y) = f(t)$$

$$\therefore f_{t,m} = f_{m,t} \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (6)$$

联合公式(4),(5)和(6)有

$$u_{,x} = G_{,x}f - \left(p_x + (x - x_0)p_{x,x} \right) u_{,t} \dots \dots \quad (7)$$

根据公式(1), 公式 (7) 可转换为:

$$u_{,x} = G_{,x} \textcolor{red}{fG} \frac{1}{G} - \left(p_x + (x - x_0) p_{x,x} \right) \textcolor{green}{u}_{,t}$$



$$u_{,x} = G_{,x} \textcolor{red}{u} \frac{1}{G} - \left(p_x + (x - x_0) p_{x,x} \right) \textcolor{green}{u}_{,t} \dots \quad (8)$$

(Langston,2007)

方法介绍-WG基本原理

波动方程 → 空间导数 → 地震波传播参数

令：

$$A_x = G_{,x} \cdot \frac{1}{G}$$

$$B_x = -[p_x + (x - x_0)p_{x,x}]$$

有：

$$u_{,x} = A_x u - B_x u_{,t}$$

系数A和B在路径上的积分
可以得到慢度和几何扩散

$$p_x = \frac{1}{x - x_0} \int_{x_0}^x B_x dx$$

$$\int_{x_0}^x A_x(x) dx = \ln \frac{G_x(x)}{G_x(x_0)}$$

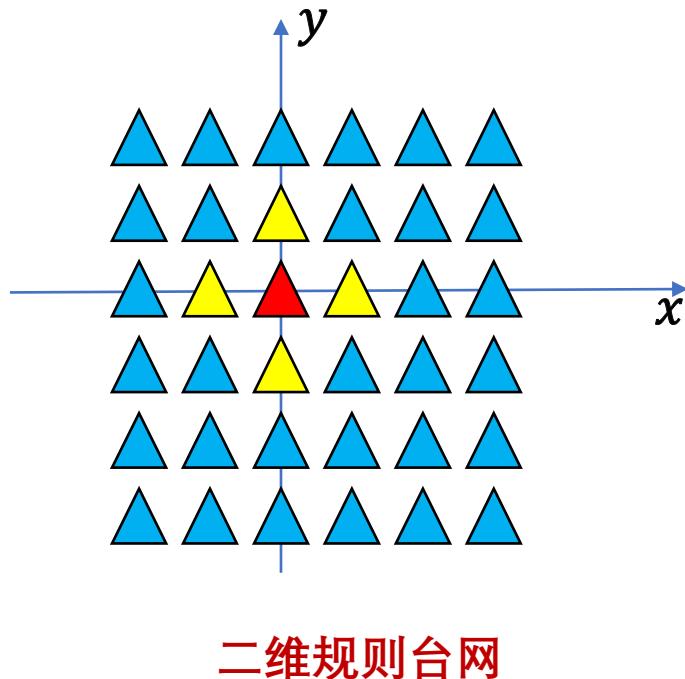
(Langston,2007a,b,c)

(Langston,2007)

方法介绍-WG基本原理

波动方程 → 空间导数 → 地震波传播参数

子台网：选定某个台站为参考台站(x_0, y_0)，相邻台站为辅助台站(x_i, y_i)



二维→两次一维：

$$u_{,x} = G_{,x} \textcolor{red}{u} \frac{1}{G} - \left(p_x + (x - x_0) p_{x,x} \right) u_{,t}$$

$$u_{,y} = G_{,y} \textcolor{red}{u} \frac{1}{G} - \left(p_y + (y - y_0) p_{y,y} \right) u_{,t}$$

(Langston, 2007)

方法介绍-WG基本原理

波动方程 → 空间导数 → 地震波传播参数

$$u_{,x} = A_x u - B_x u_{,t} \quad u_{,y} = A_y u - B_y u_{,t}$$

系数A和B在上的积分可以得到慢度

$$p_x = \frac{1}{x - x_0} \int_{x_0}^x B_x dx \quad p_x = \frac{1}{x - x_0} \int_{x_0}^x B_x dx$$

当 $(x_0, y_0) \rightarrow (x, y)$ 时

$$p_x = -B_x \quad p_y = -B_y$$

$$p_r = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$$

(Langston,2007)

方法介绍-WG基本原理

波动方程 → 空间导数 → 地震波传播参数

求得A 和B 后，相速度、入射方位角、几何扩散、辐射花样可表示为

$$v = (B_x^2 + B_y^2)^{-\frac{1}{2}}$$

$$A_r = \frac{\partial G}{\partial r} \cdot \frac{1}{G} = A_x \sin \theta + A_y \cos \theta$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{B_x}{B_y}$$

$$A_\theta = \frac{\partial G}{\partial \theta} \cdot \frac{1}{G} = r(A_x \cos \theta - A_y \sin \theta)$$

v、θ、 A_r 、和 A_θ 分别是相速度、反方位角、几何扩散和辐射花样。

方法介绍-WG基本原理

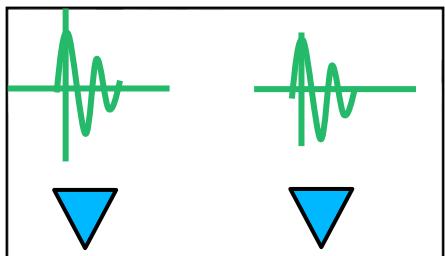
反演路线

波形空间导数

$$u_x = A_x u + B_x u_t$$

$$u_{,y} = A_y u + B_y u_{,t}$$

密集台站波形



已知信息: u, x, y, t

反演目标

$$v = (p_x^2 + p_y^2)^{-\frac{1}{2}}$$

$$= \tan^{-1} \frac{p_x}{p_y}$$

$$\mathbf{A}_r = A_x \sin \theta + A_y \cos \theta$$

$$A_\theta = r(A_x \cos \theta - A_y \sin \theta)$$

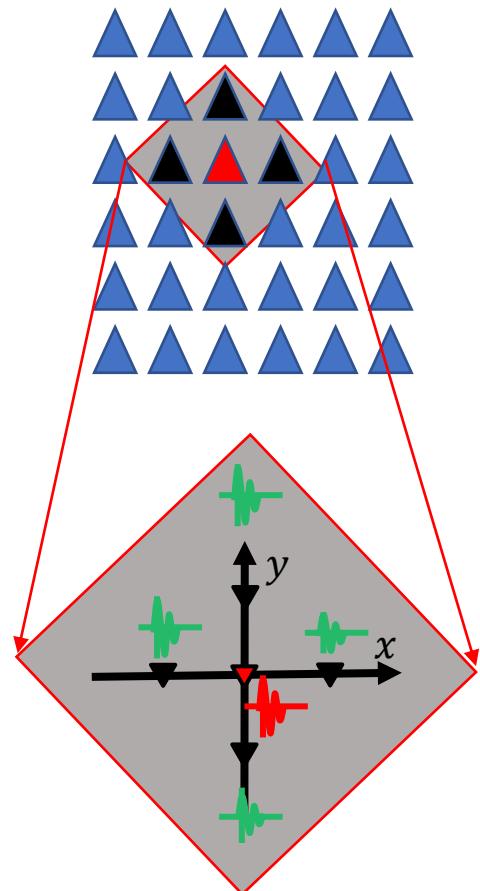
波形梯度系数

A_j 、 B_j

ω

方法介绍-WG基本原理

1. 波形空间梯度反演: 二维规则台网→有限差分



辅助台站与参考台站的波形差异
一阶泰勒展开式：

高阶截断误差

$$u_i - u_0 = \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x_i + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y_i + du_i^{err}$$

$$\begin{bmatrix} u_1 - u_0 \\ u_2 - u_0 \\ \vdots \\ u_N - u_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial x_1 & \partial y_1 \\ \partial x_2 & \partial y_2 \\ \vdots & \vdots \\ \partial x_N & \partial y_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial u / \partial x \\ \partial u / \partial y \end{bmatrix}$$

N>2

(Langston,2007)

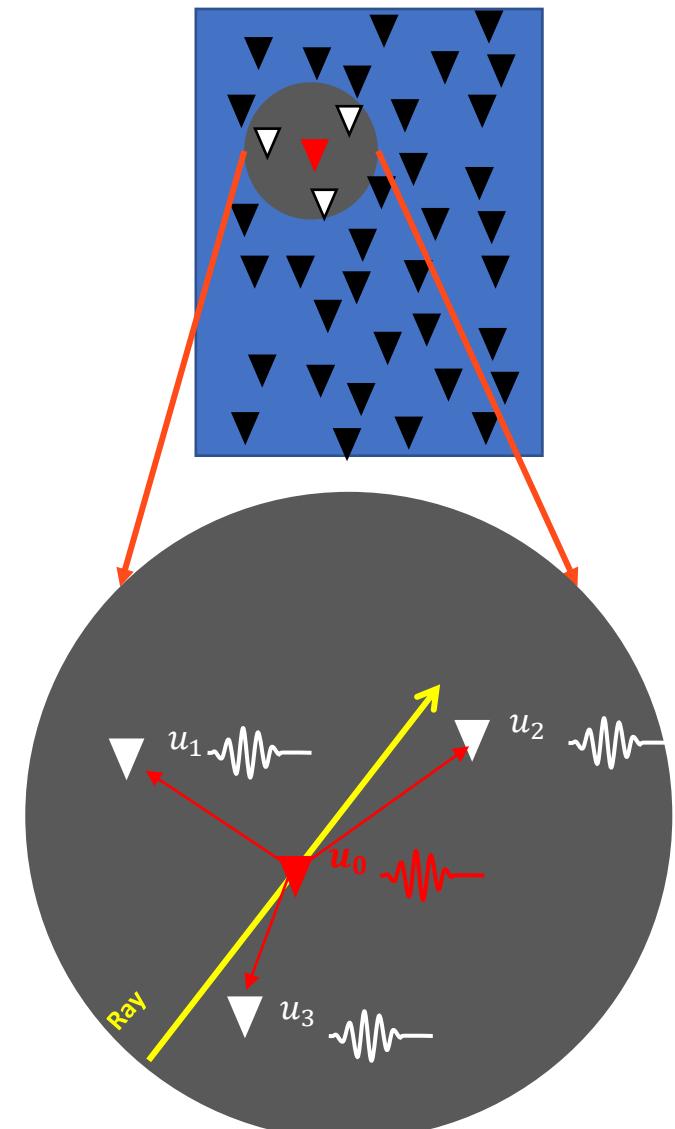
方法介绍-WG基本原理

1. 波形空间梯度反演 二维不规则台网

$$u_i - u_0 = \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x_i + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y_i + du_i^{err}$$

$$\begin{bmatrix} u_1 - u_0 \\ u_2 - u_0 \\ \vdots \\ u_N - u_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial x} & \frac{\partial y_1}{\partial y} \\ \frac{\partial x_2}{\partial x} & \frac{\partial y_2}{\partial y} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial x_N}{\partial x} & \frac{\partial y_N}{\partial y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} \end{bmatrix}$$

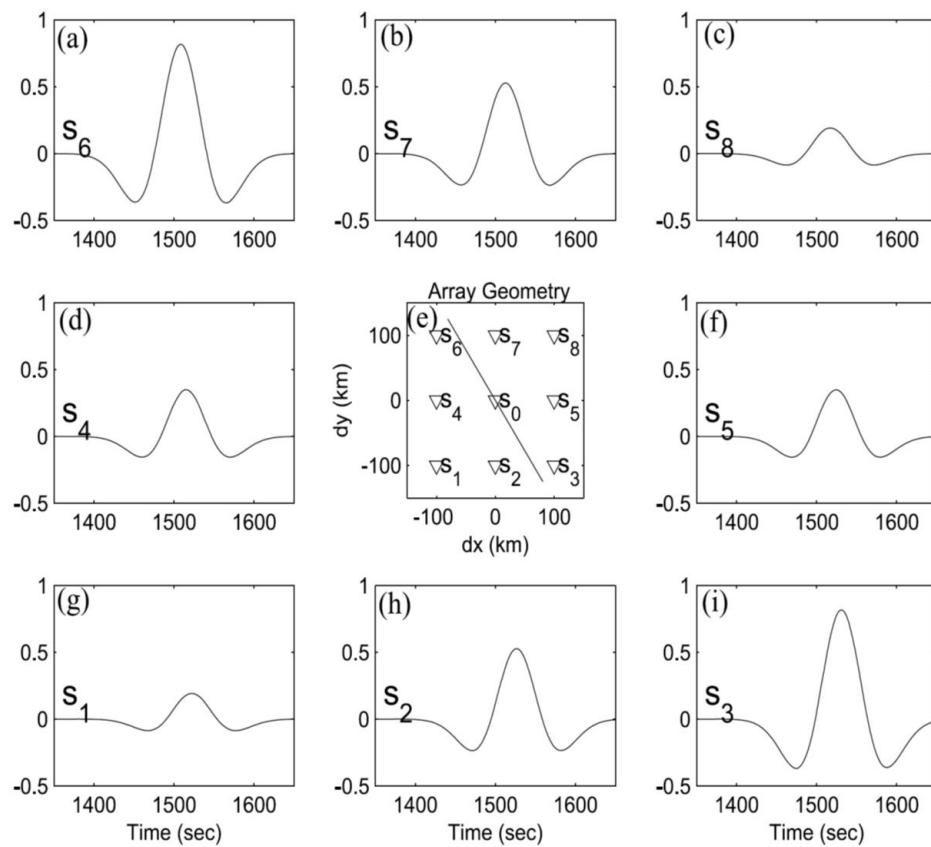
?



方法介绍-WG基本原理

1. 波形空间梯度反演:二维不规则台网

台站分布与截断误差的关系



$$\left| \frac{du_i^{err}}{du_i} \right|$$

Ratio between higher-order truncation errors and the first-order of Gaussian waves.

The center of the array is located at (3300 km, 5100 km) with respect to a source at (0 km, 0 km).

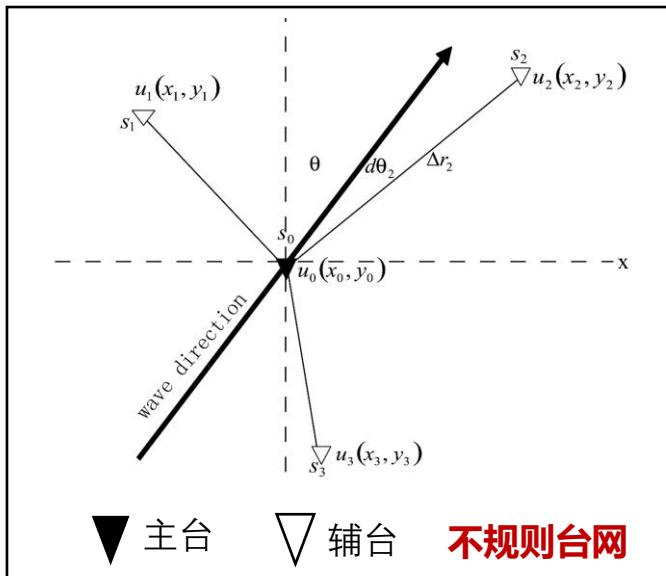
The master receiver s_0 is surrounded by eight supporting receivers $s_i = 1, 2, \dots, 8$.

The other eight windows show the ratio between the truncation errors and the first order for the eight corresponding receivers. See the text for details.

方法介绍-WG基本原理

1. 波形空间梯度反演:二维不规则台网

● 加权反演



$$u_i - u_0 = \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x_i + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y_i + du_i^{err}$$

$$\left| \frac{du_i^{err}}{du_i} \right| \leq \frac{\pi f}{c} \delta r_i \cos(d\theta_i)$$

$$w_i = \frac{1}{\frac{\pi f}{c} \delta r_i \cos(d\theta_i) + D_{error}}$$

$$\begin{bmatrix} w_1 & w_2 & \ddots & w_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 - u_0 \\ u_2 - u_0 \\ \vdots \\ u_N - u_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1 & w_2 & \ddots & w_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 & \Delta y_1 \\ \Delta x_2 & \Delta y_2 \\ \vdots \\ \Delta x_N & \Delta y_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} \end{bmatrix}$$

(C Liang et al. JGR, 2009)

方法介绍-WG基本原理

1. 波形空间梯度反演:二维规则台网

折合速度方法

高阶阶段误差: $\left| \frac{du_i^{err}}{du_i} \right| \propto \frac{\pi f}{c} \delta r_i \cos(d\theta_i)$

高阶截断误差与相速度成反相关, 人为地增加相速度降低相速度对截断误差的影响

折合速度方法假设子台网内的介质是均匀介质, 并假设平均慢度 \bar{p}_i ($i = x, y$) 是已知的, 因此可以将 p_x 和 p_y 分布替换为:

$$\begin{aligned} p'_x &= p_x - \bar{p}_x \\ p'_y &= p_y - \bar{p}_y \end{aligned}$$

(Langston, 2007b; Liang and Langston, 2009)

方法介绍-WG基本原理

2. 波形空间梯度→波形梯度系数A、B

波形空间导数

$$u_{,x} = A_x u + B_x u_{,t}$$

$$u_{,y} = A_y u + B_y u_{,t}$$



波形梯度系数

$$A_j, B_j$$

方法介绍-WG基本原理

2. 求解系数A、B

实部

$$\frac{\partial u}{\partial x} = A_x u + B_x \frac{\partial u}{\partial t}$$

Langston,2007c

↓ 希尔伯特变换

$$H \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right] = A_x H[u] + B_x H \left[\frac{\partial u}{\partial t} \right]$$

↓ 乘以 $-i$

虚部

$$-iH \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right] = -iA_x H[u] - i H \left[\frac{\partial u}{\partial t} \right]$$

相加

$$\frac{\partial u}{\partial x} - iH \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right] = A_x u - iA_x H[u] + B_x \frac{\partial u}{\partial t} - iB_x H \left[\frac{\partial u}{\partial t} \right]$$

方法介绍-WG基本原理

2. 求解系数A、B：解析信号

$$\frac{\partial u}{\partial x} - iH \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right] = A_x u - iA_x H[u] + B_x \frac{\partial u}{\partial t} - iB_x H \left[\frac{\partial u}{\partial t} \right]$$

↓
解析信号

$$U_{,x} = AU + BU_{,t}$$

希尔伯特变换是线性系统：

$$H \left[\frac{\partial u}{\partial t} \right] = \frac{\partial}{\partial t} H[u]$$

$$U_{,x} = AU + B \frac{\partial}{\partial t} U$$

方法介绍-WG基本原理

2. 求解系数A、B：推导步骤

$$U_{,x} = AU + B \frac{\partial}{\partial t} U$$

(1). 将解析信号用向量形式表示

(2). 求时间偏导

(3). 检查实部和虚部的结果

(4). 系数A、B关于波形空间梯度的表达式

怎么利用解
析信号求解
A, B?

方法介绍-WG基本原理

2. 求解系数A、B：解析信号用向量形式表示

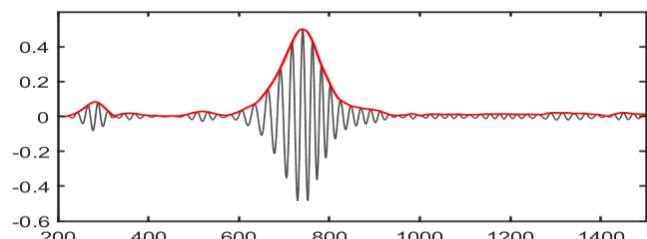
(1). 将解析信号用向量形式表示

$$U_{,x} = AU + B \frac{\partial}{\partial t} U$$

$$|U_{,x}| e^{i\psi} = A|U| e^{i\phi} + B \frac{\partial}{\partial t} \left\{ |U| e^{i\phi} \right\}$$

Ψ : 波形空间梯度的瞬时相位

Φ : 波形的瞬时相位



(2). 求时间偏导

$$|U_{,x}| e^{i\psi} = A|U| e^{i\phi} + B \frac{\partial}{\partial t} \left\{ |U| e^{i\phi} \right\}$$



Chain rule

$$|U_{,x}| e^{i\psi} = A|U| e^{i\phi} + B \frac{\partial |U|}{\partial t} e^{i\phi} + B|U| e^{i\phi} i \frac{\partial \phi}{\partial t}$$

(Langston,2007)

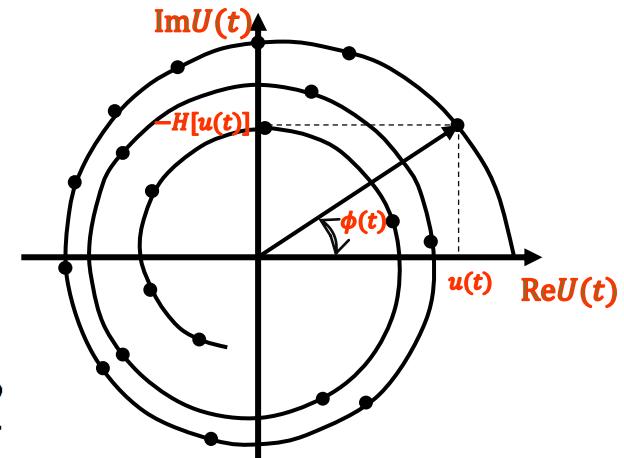
方法介绍-WG基本原理

2. 求解系数A、B

Φ 、 $\omega(t)$ 和 $u(t)$ 的关系

$\omega(t)$ ：瞬时频率

$$|U_x| e^{i\psi} = A|U| e^{i\phi} + B \frac{\partial |U|}{\partial t} e^{i\phi} + B|U| e^{i\phi} i \frac{\partial \phi}{\partial t}$$



$$\omega(t) = \frac{\partial \phi(t)}{\partial t}$$

$$\phi(t) = \tan^{-1} \left[\frac{-H[u(t)]}{u(t)} \right]$$

$$\omega(t) = \frac{1}{|U|^2} \{ \dot{u}(t) H[u(t)] - u(t) H[\dot{u}(t)] \}$$

$$|U_x| e^{i(\psi - \phi)} = A|U| + B \frac{\partial |U|}{\partial t} + iB|U| \boxed{\omega(t)}$$

(Langston,2007)

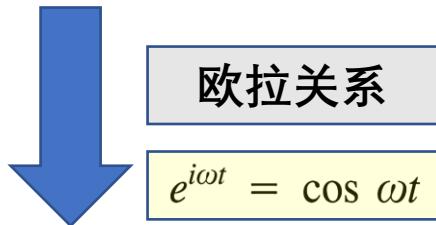
方法介绍-WG基本原理

2. 求解系数A、B

(3). 检查实部和虚部的结果

$$|U_{,x}| e^{i(\psi - \phi)} = A|U| + B \frac{\partial |U|}{\partial t} + iB|U|\omega(t)$$

(Langston,2007)



实部: $|U_{,x}| \cos(\psi - \phi) = A_x(x)|U| + B_x(x) \frac{\partial |U|}{\partial t}$

虚部: $|U_{,x}| \sin(\psi - \phi) = B_x(x)|U|\omega(t)$



$$\mathbf{A}_x = \frac{|U_{,x}|}{|U|} \cos(\psi - \phi) - \frac{1}{\omega(t)} \frac{|U_{,x}|}{|U|^2} \frac{\partial |U|}{\partial t} \sin(\psi - \phi)$$

$$\mathbf{B}_x = \frac{1}{\omega(t)} \frac{|U_{,x}|}{|U|} \sin(\psi - \phi)$$

方法介绍-WG基本原理

2. 求解系数A、B

$$A_x = \frac{|U_{,x}|}{|U|} \cos(\psi - \phi) - \frac{1}{\omega(t)} \frac{|U_{,x}|}{|U|^2} \frac{\partial |U|}{\partial t} \sin(\psi - \phi)$$

$$B_x = \frac{1}{\omega(t)} \frac{|U_{,x}|}{|U|} \sin(\psi - \phi)$$

已知变量：

$$u, x, t, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial t}$$

直接代入可得A、B
精确解



解析信号 (analytic signal):

$$U = u - iH[u]$$

$$U_{,t} = \frac{\partial |U|}{\partial t} = \frac{\partial u}{\partial t} - iH\left[\frac{\partial u}{\partial t}\right]$$

$$U_{,x} = \frac{\partial u}{\partial x} - iH\left[\frac{\partial u}{\partial x}\right]$$

瞬时相位 (instantaneous phases):

$$\phi(t) = \tan^{-1} \left[\frac{-H[u(t)]}{u(t)} \right]$$

$$\psi(t) = \tan^{-1} \left[\frac{-H[u_{,x}(t)]}{u_{,x}(t)} \right]$$

瞬时频率 (instantaneous frequency):

$$\omega(t) = \frac{1}{|U|^2} \{ \dot{u}(t) H[u(t)] - u(t) H[\dot{u}(t)] \}$$

方法介绍-WG基本原理

3. 波形梯度系数A、B → 地震波传播参数

波形梯度系数

$$A_x = \frac{|U_x|}{|U|} \cos(\psi - \phi) - \frac{1}{\omega(t)} \frac{|U_x|}{|U|^2} \frac{\partial |U|}{\partial t} \sin(\psi - \phi)$$

$$B_x = \frac{1}{\omega(t)} \frac{|U_x|}{|U|} \sin(\psi - \phi)$$



地震波传播参数

$$v = (p_x^2 + p_y^2)^{-\frac{1}{2}}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{p_x}{p_y}$$

$$A_r = A_x \sin \theta + A_y \cos \theta$$

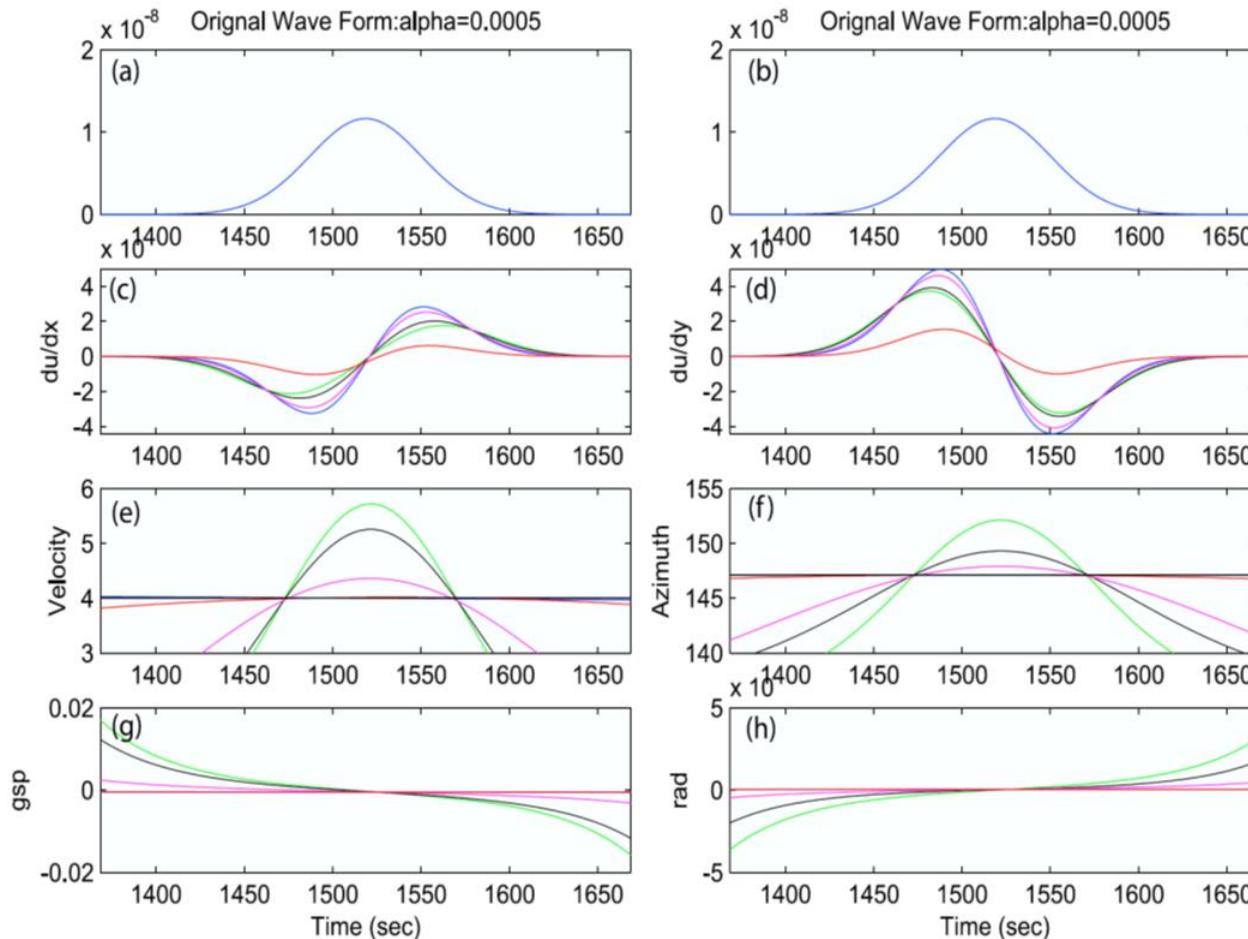
$$A_\theta = r(A_x \cos \theta - A_y \sin \theta)$$

(Langston, 2007)

方法介绍-WG理论测试

不同反演方法的差异

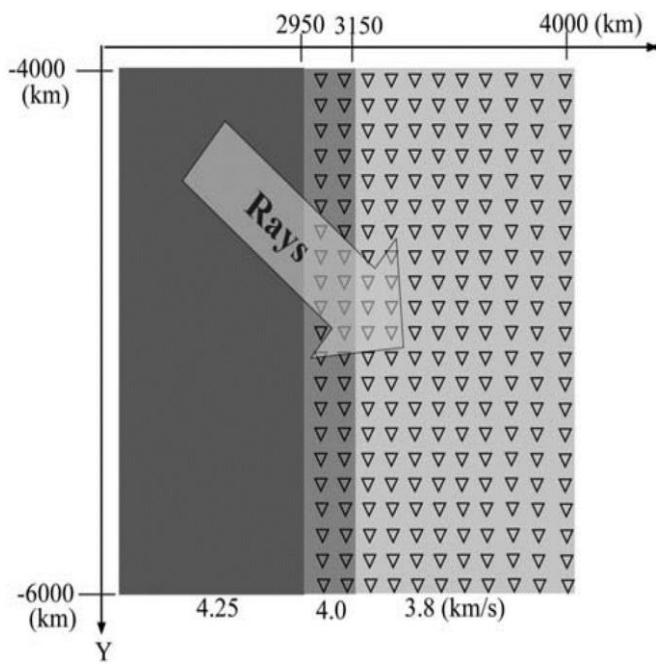
$$u(t, x, y) = \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} \exp \left[-\alpha (t - xp_x - yp_y)^2 \right]$$



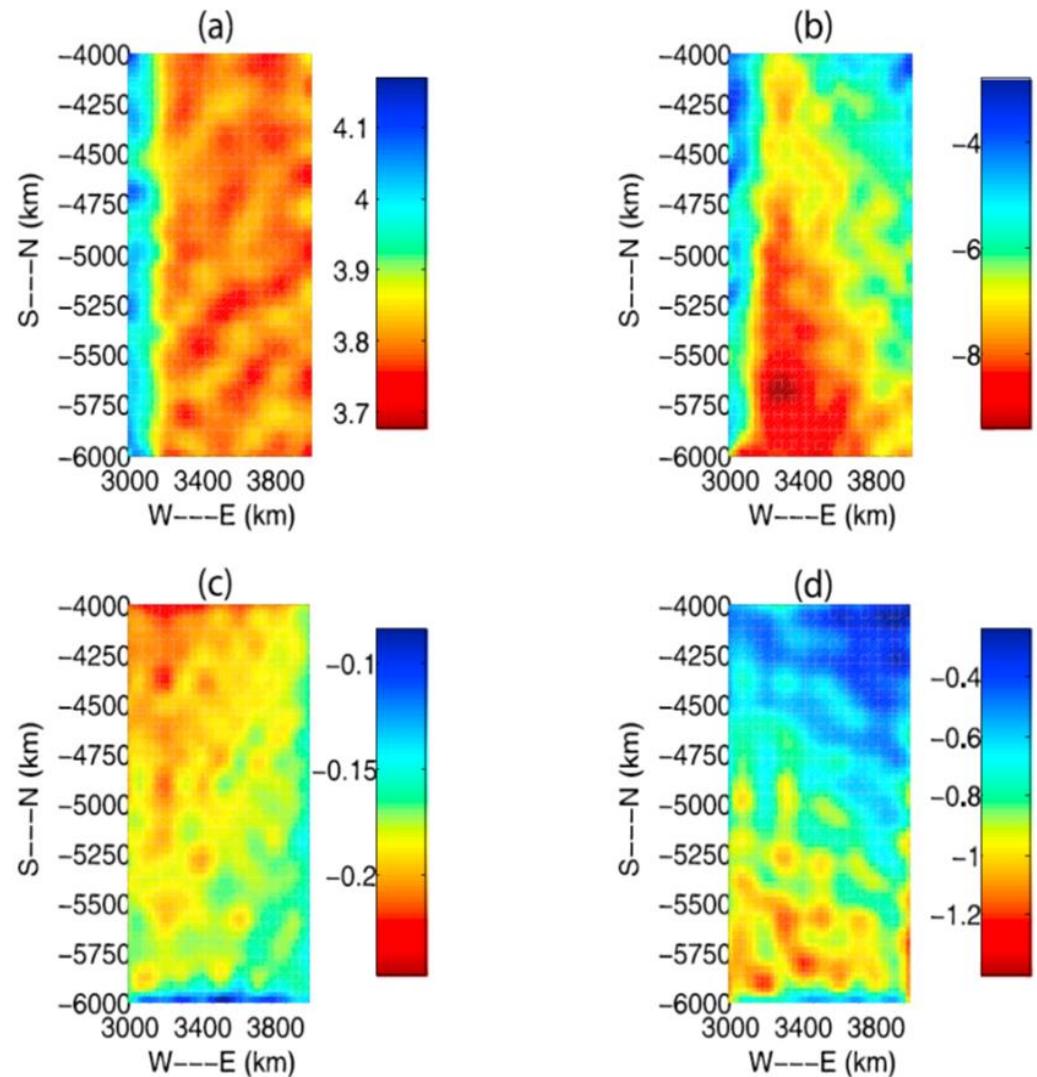
Liang and Langston, 2009

方法介绍-WG理论测试

模型



$$u(t, x, y) = \frac{-\sin(2\theta)}{\sqrt{x^2 + y^2}} \exp[-0.0005(t - xp_x - yp_y)]$$

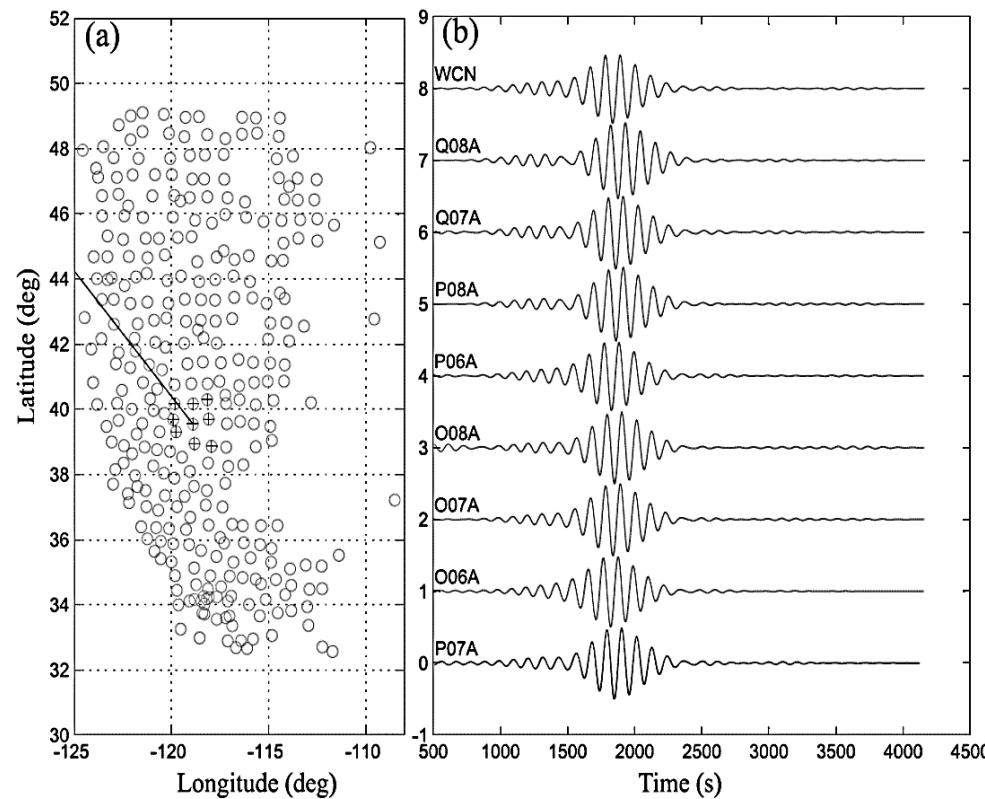


a. 速度; b. 方位角变化; c. 几何扩散; d. 辐射花样

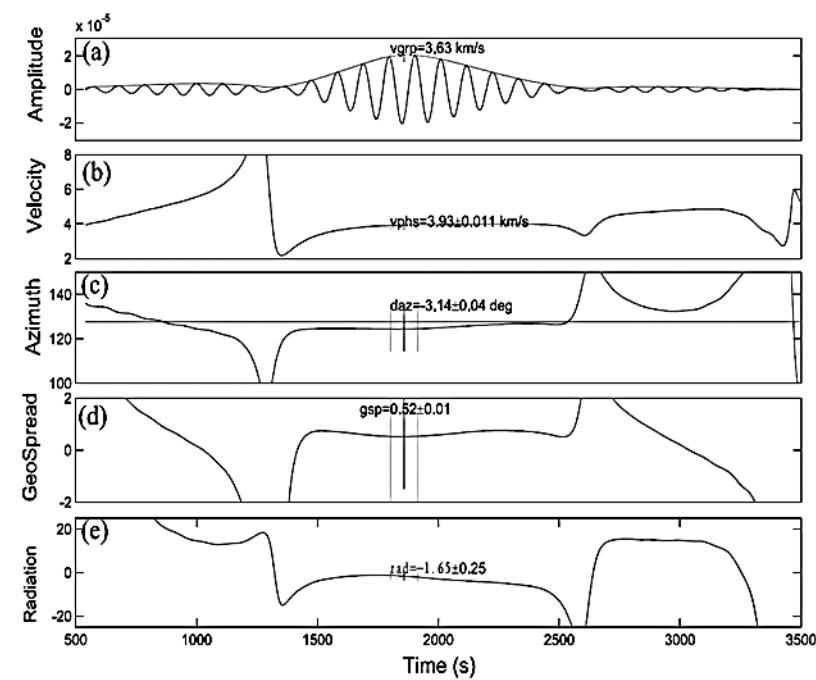
方法介绍-WG-USArray应用

单个子台网

子台网及其波形



主台站的波形梯度结果



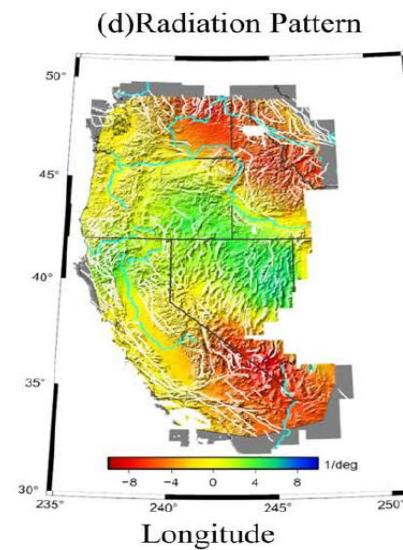
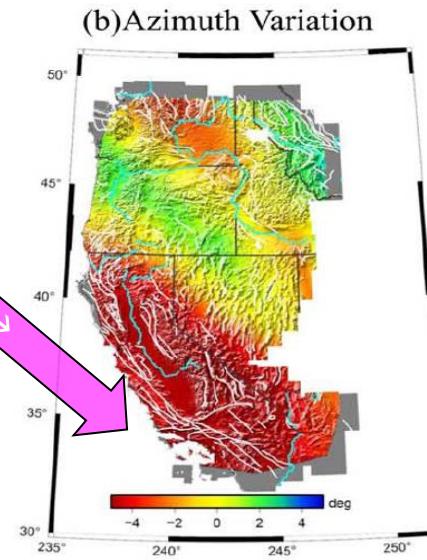
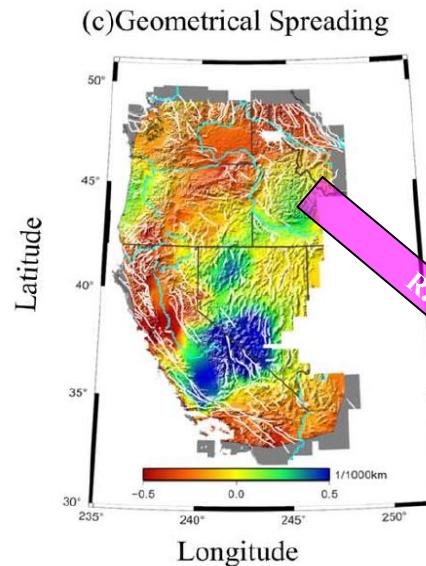
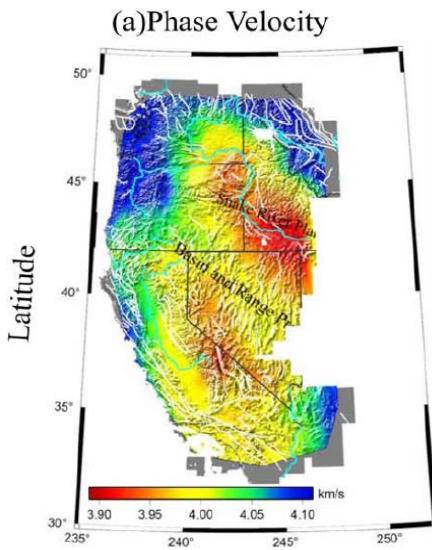
(C Liang et al. JGR, 2009)

Kurile01 earthquake

方法介绍-WG-USArray应用

USArray 的波形梯度结果

Kurile earthquake (2006)



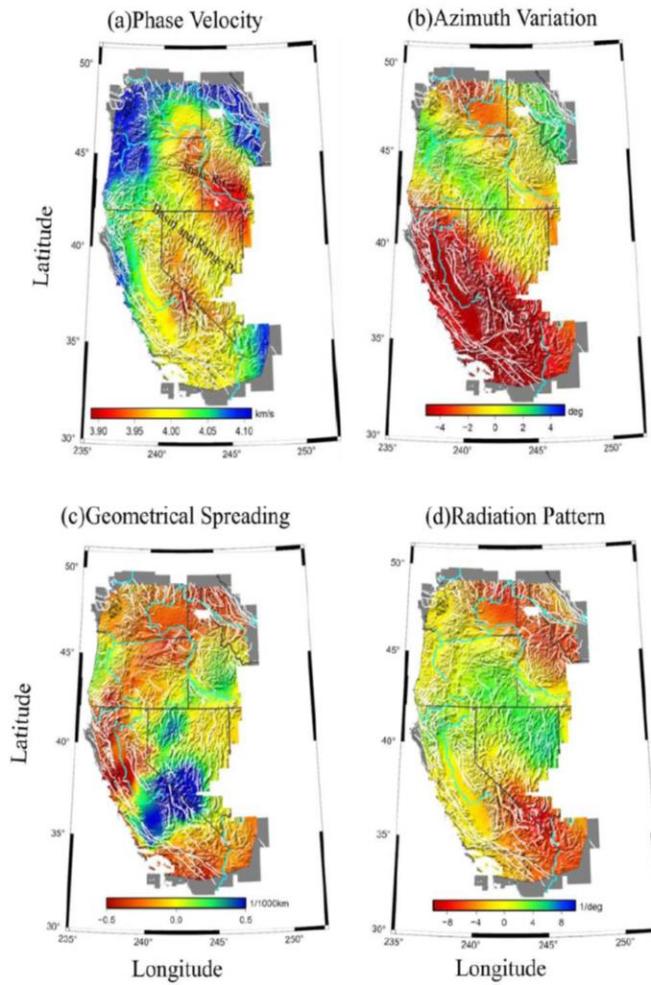
100-115S

(C Liang et al. JGR, 2009)

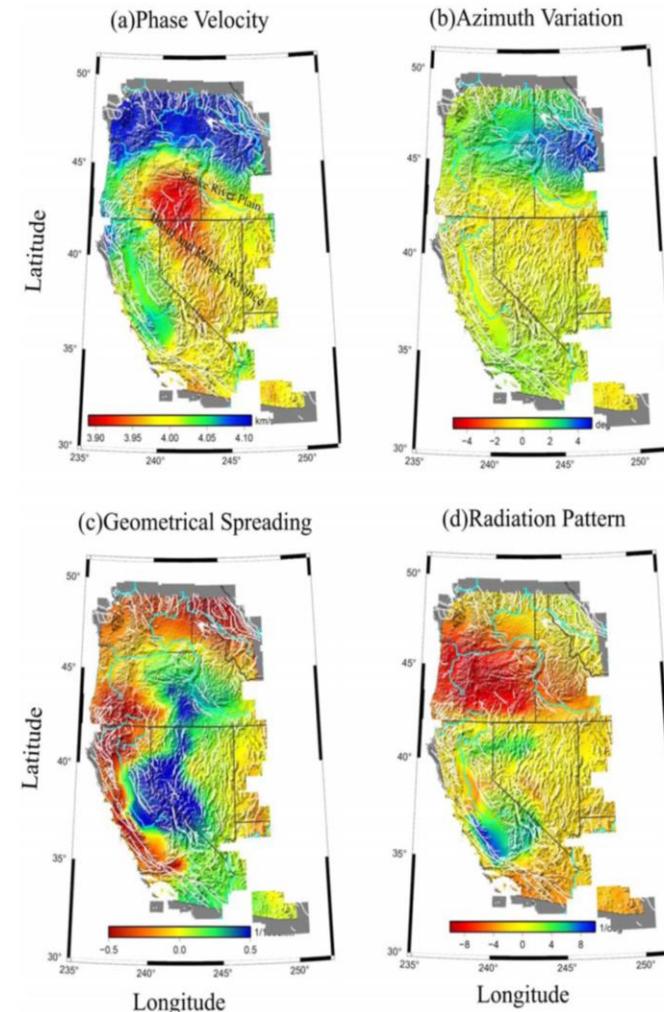
方法介绍-WG-USArray应用

USArray：两个不同地震的结果比较

Liang and Langston, 2009



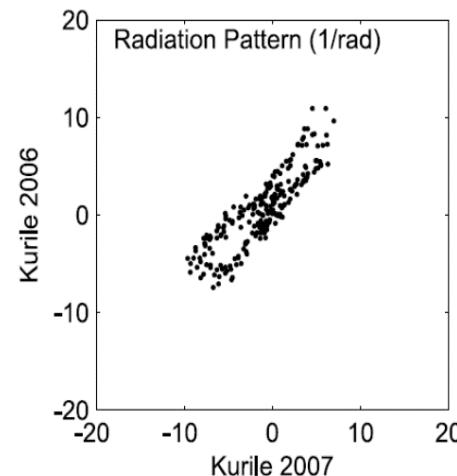
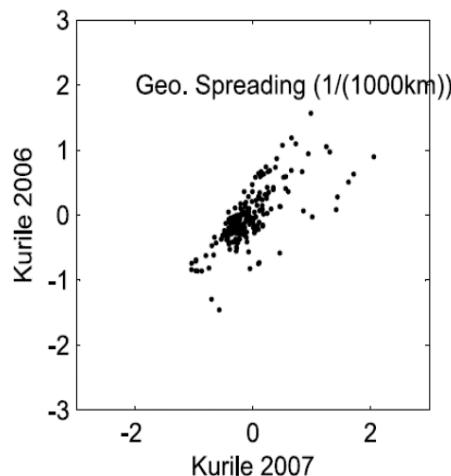
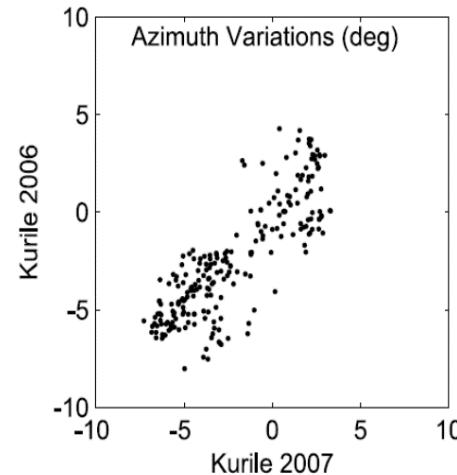
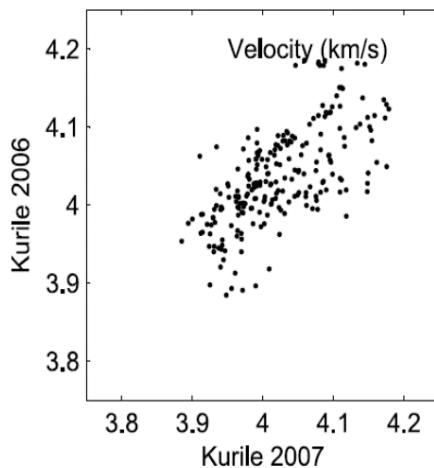
Kurile earthquake (2006)



Kurile earthquake (2007)

方法介绍-WG-USArray应用

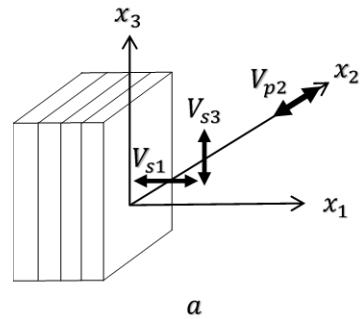
USArray：两个不同地震的结果比较



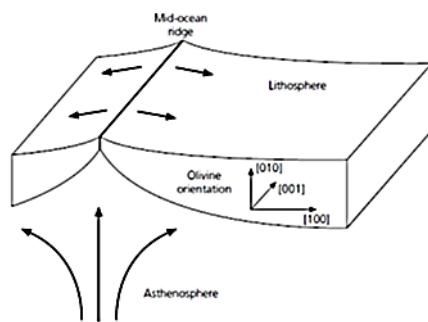
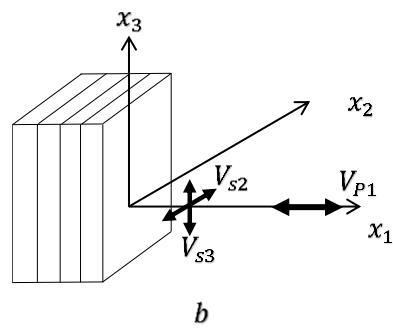
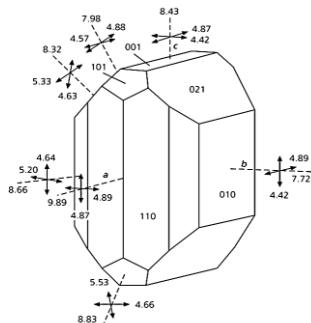
各向异性-基本原理

各向异性的两种类型

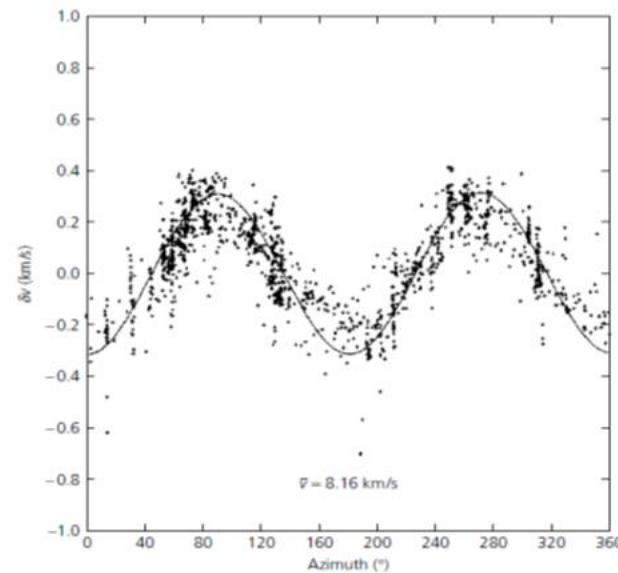
形状优选



晶格优选



P波速度随方位角的变化



(Morris et al., 1969.JGR)

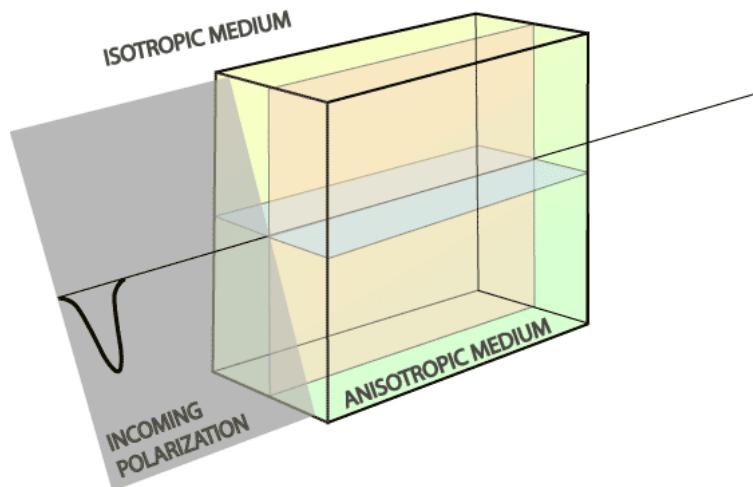
各向异性-基本原理

地震各向异性的不同成因

地震各向异性的研究

- 面波频散
- Pn&Sn波走时
- 接收函数
- 剪切波分裂
- ...

剪切波分裂示意图



地震各向异性成因

应力诱导各向异性

裂隙的定向排列

构造诱导各向异性

断层区结构
沉积层理面

矿物定向排列

岩石圈最后一次构造变形

现今的软流圈运动

Andreas Wüstefeld

各向异性-基本原理

各向异性模型 (Rayleigh)

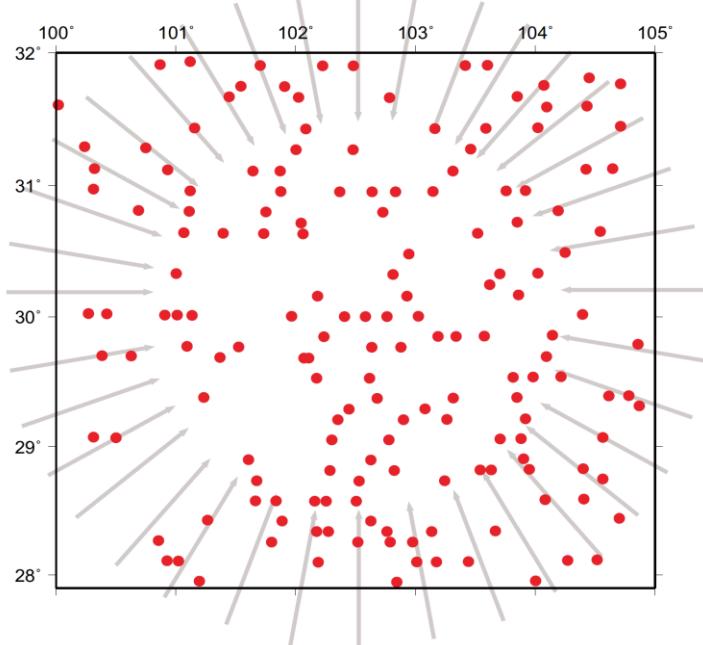
$$v = v_{iso} + a \cos(2\theta) + b \sin(2\theta)$$

各向异性强度: $\gamma = 2 \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{v_{iso}}$

快波方向: $\phi = \tan(b/a)/2$

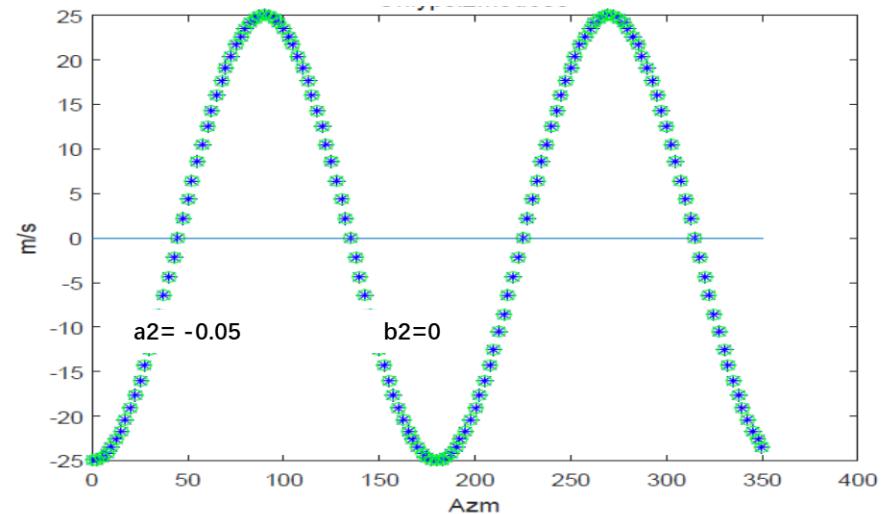
各向异性-理论测试

合成数据



谱元法→AxiSEM 软件包：

<https://geodynamics.org/cig/software/axisem>
Nissen et al., 2004; Driell et al., 2014

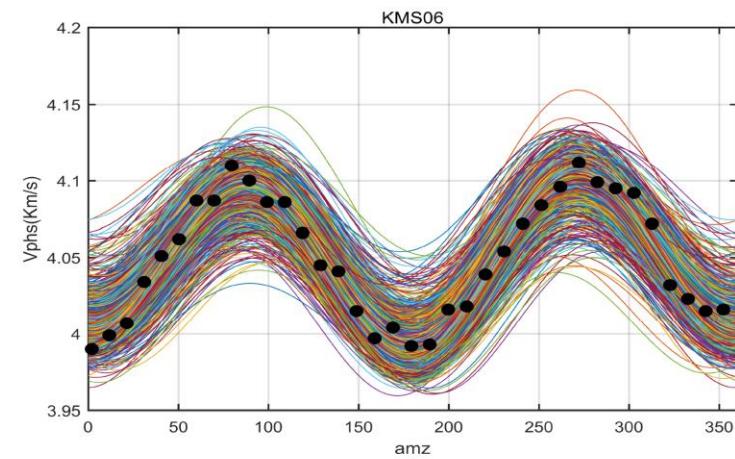


$$\text{各向异性模型: } v = v_0 - 0.05 \cos(2\theta)$$

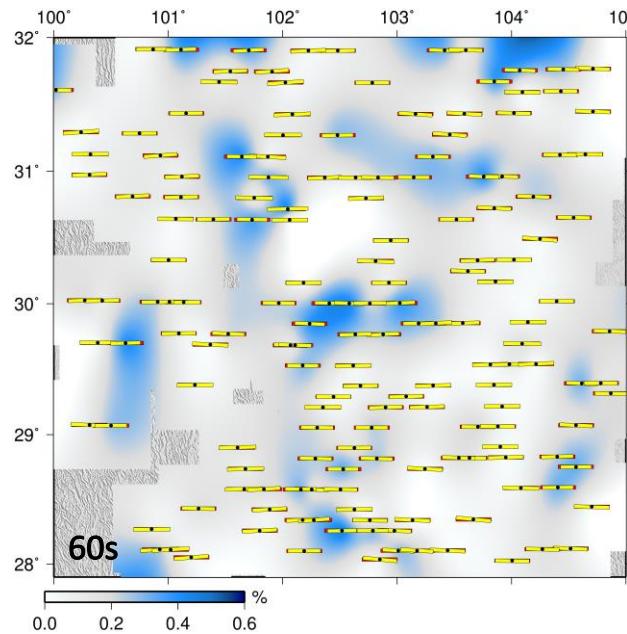
各向异性-理论测试

无随机噪音

各向异性拟合

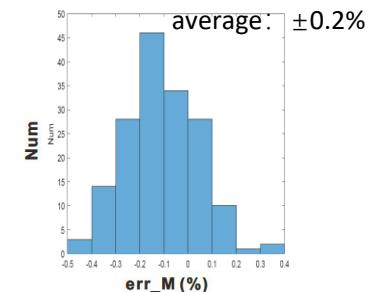
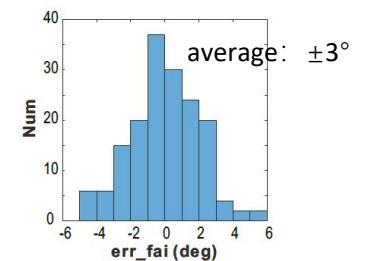


曲线: Bootstrap, 1000次的拟合结果
黑点: 不同方位角地震相速度反演结果



底图: 各向异性强度误差
红色短棒: 各向异性模型
黄色短棒: 各向异性计算结果

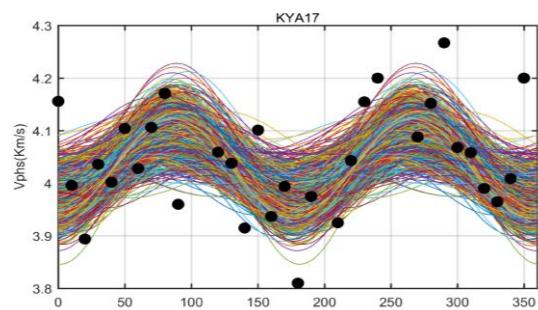
快波方向误差统计



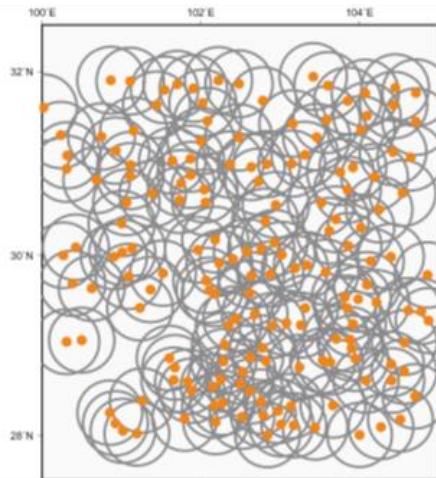
各向异性强度误差统计

各向异性-理论测试

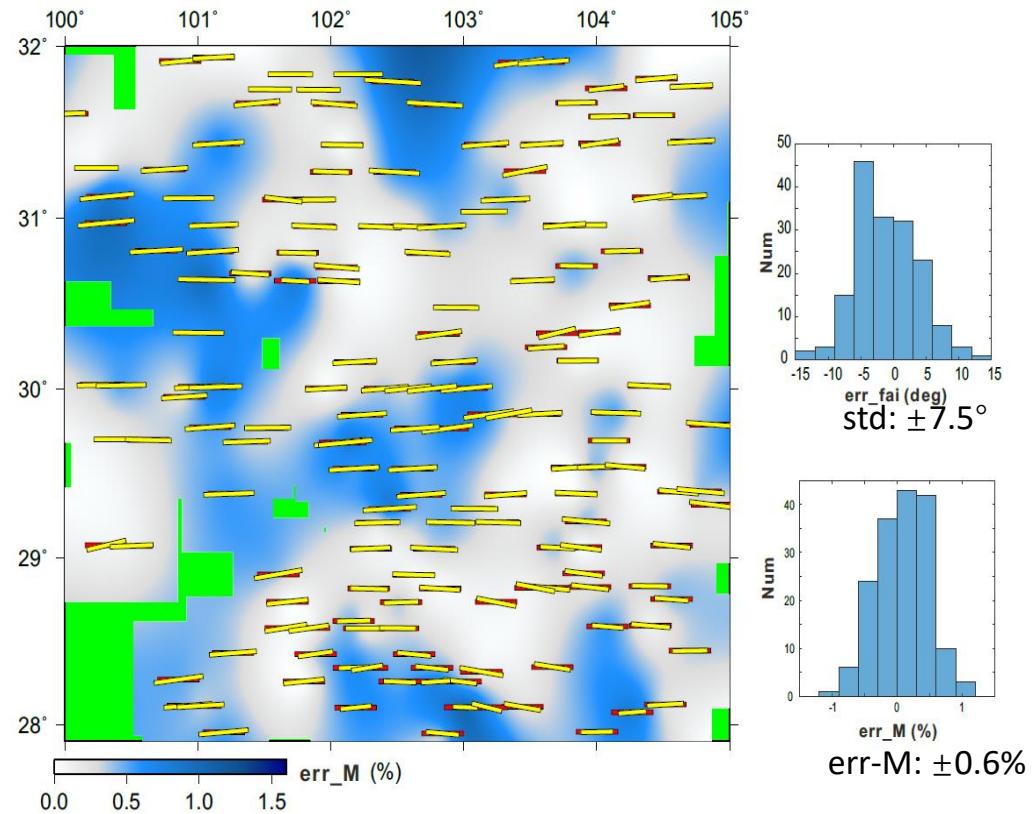
10%随机噪音



曲线: Bootstrap, 1000次的拟合结果
黑点: 不同方位角地震相速度反演结果



圆圈: 空间滑动平均尺度; 橙点: 台站



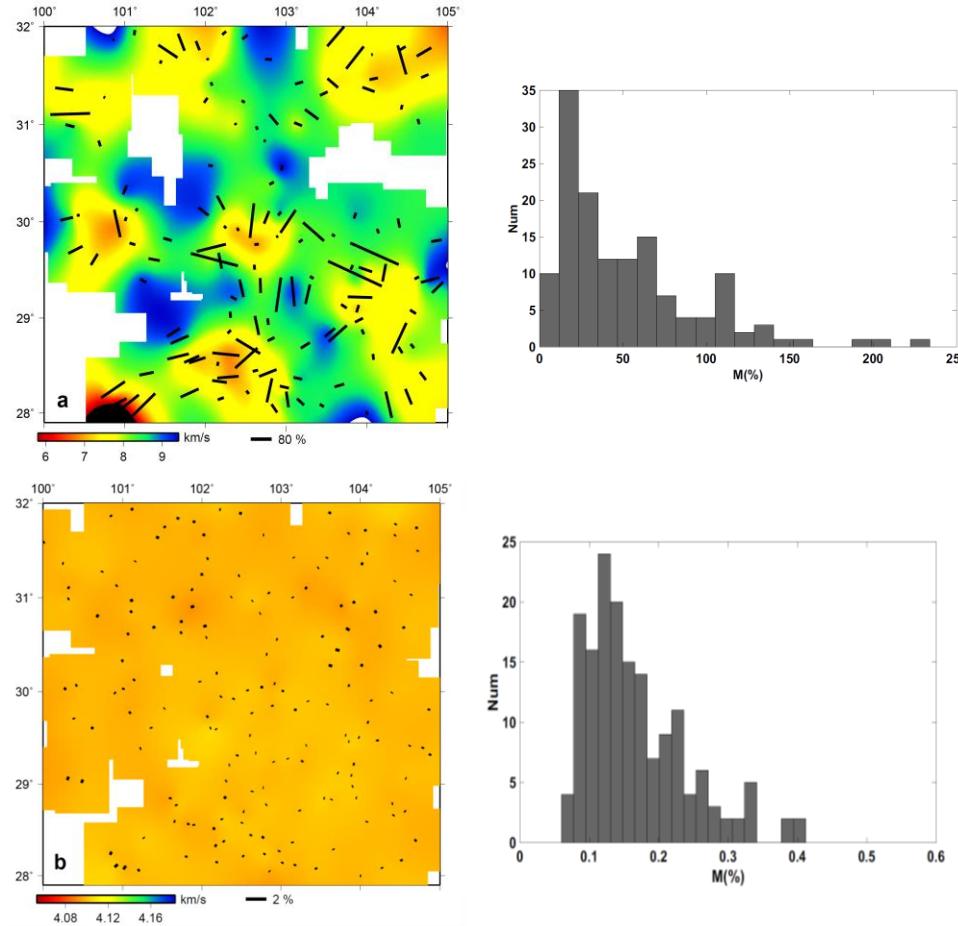
底图: 各向异性强度误差; 红色短棒: 各向异性模型
黄色短棒: 各向异性计算结果

各向异性-川西台阵应用

折合速度法对各向异性的影响

Cao et al., 2020

模型：
各向同性
一维均匀介质

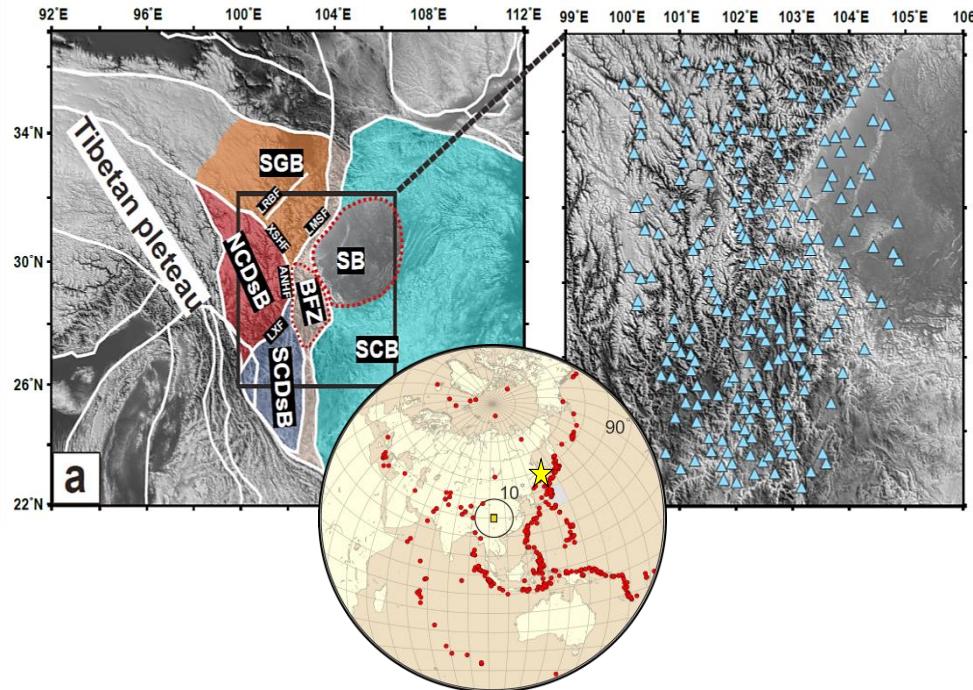


底图：相速度；短棒：各向异性；统计图：各向异性强度

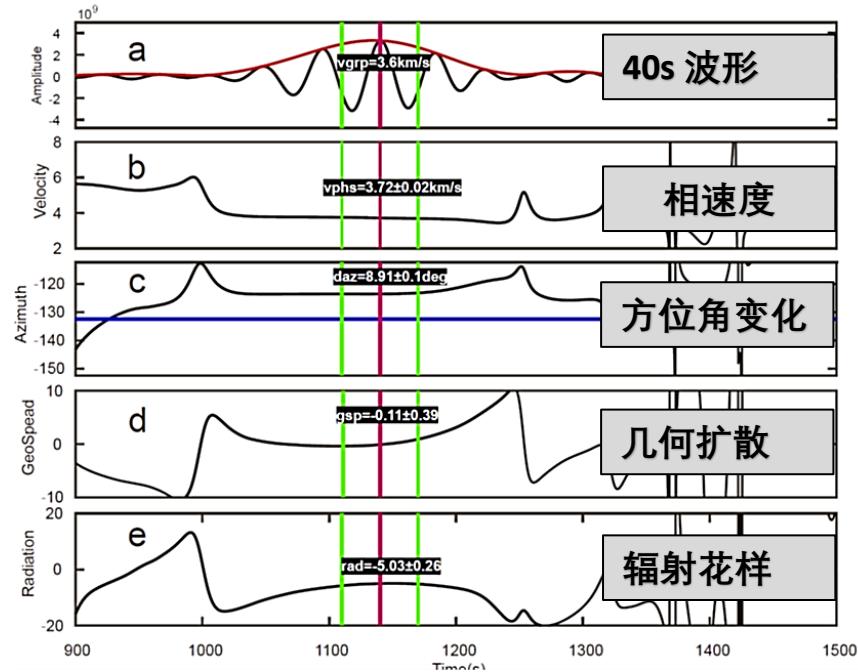
Cao et al., 2020

各向异性-川西台阵应用

川西台阵数据的反演



台站数量: 289; 台间距: ~30km;
地震数量: ~300
震中距: 10°-90°

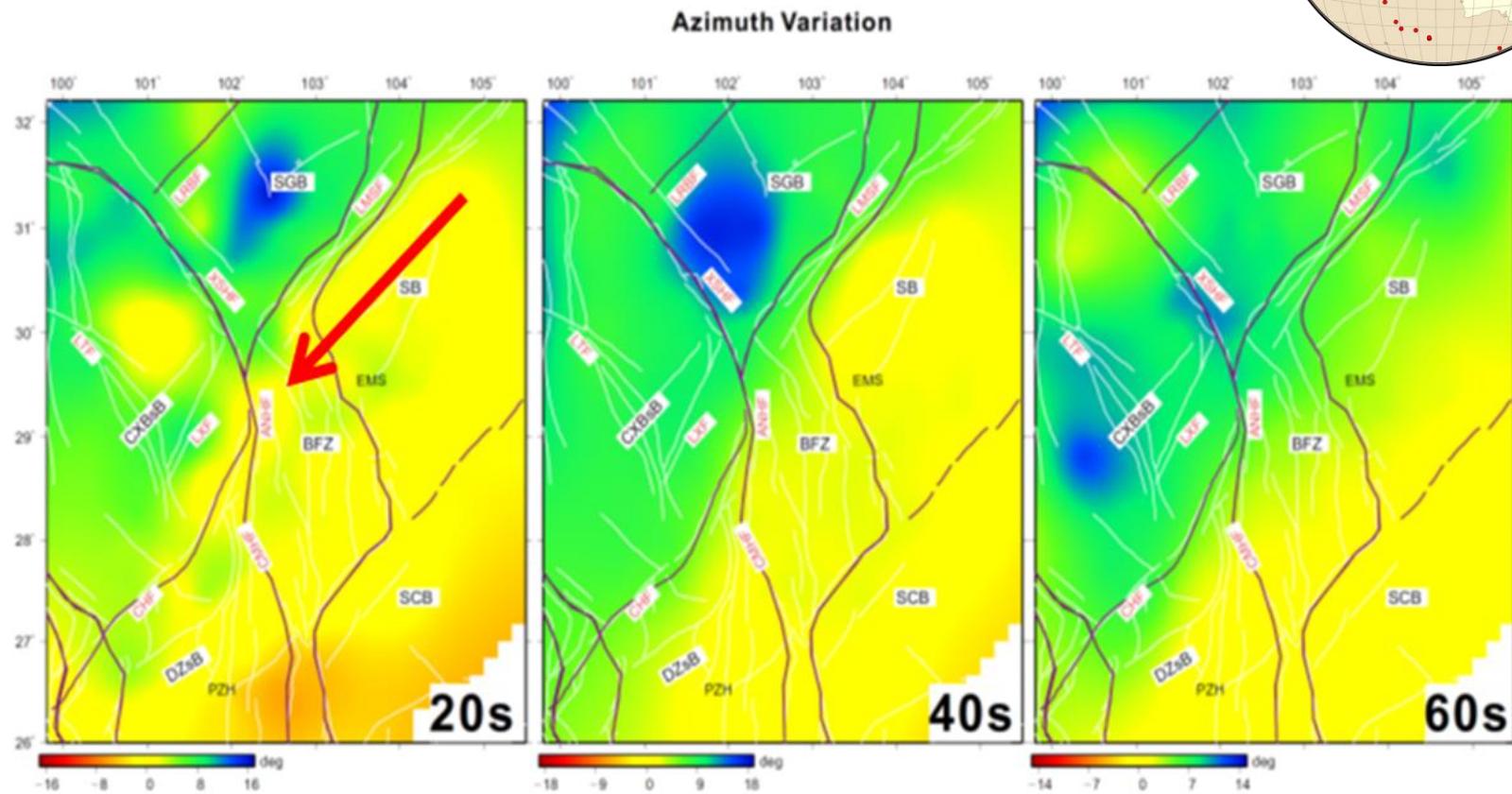
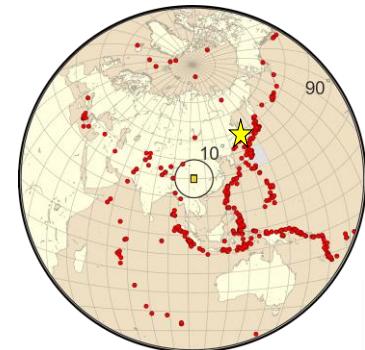


郯靼海峡6.2级地震(黄色五角星)

各向异性-川西台阵应用

地震波传播参数

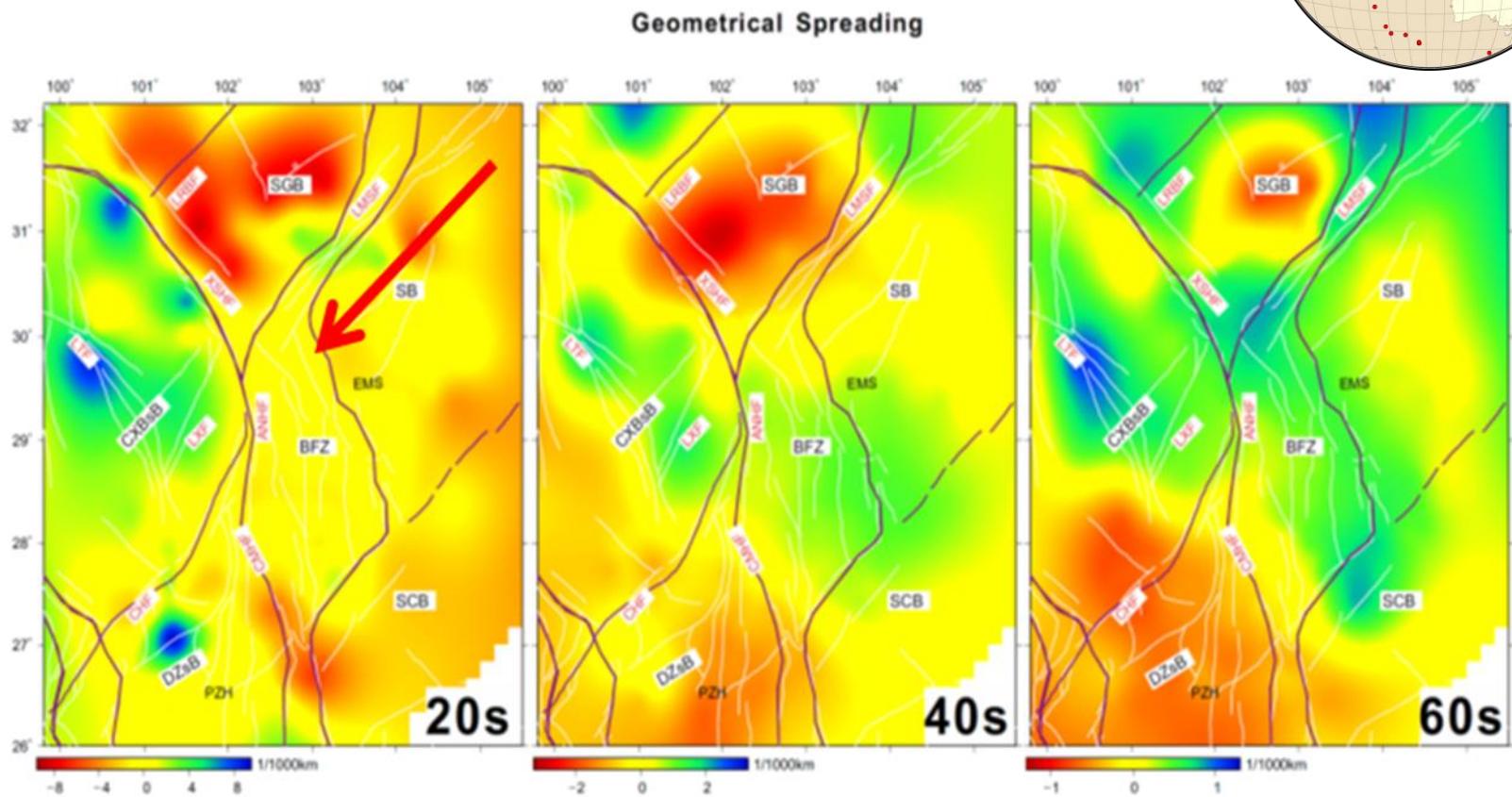
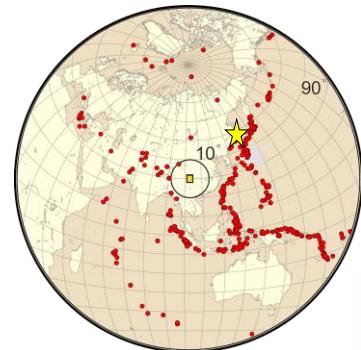
鞑靼海峡6.2级地震



各向异性-川西台阵应用

地震波传播参数

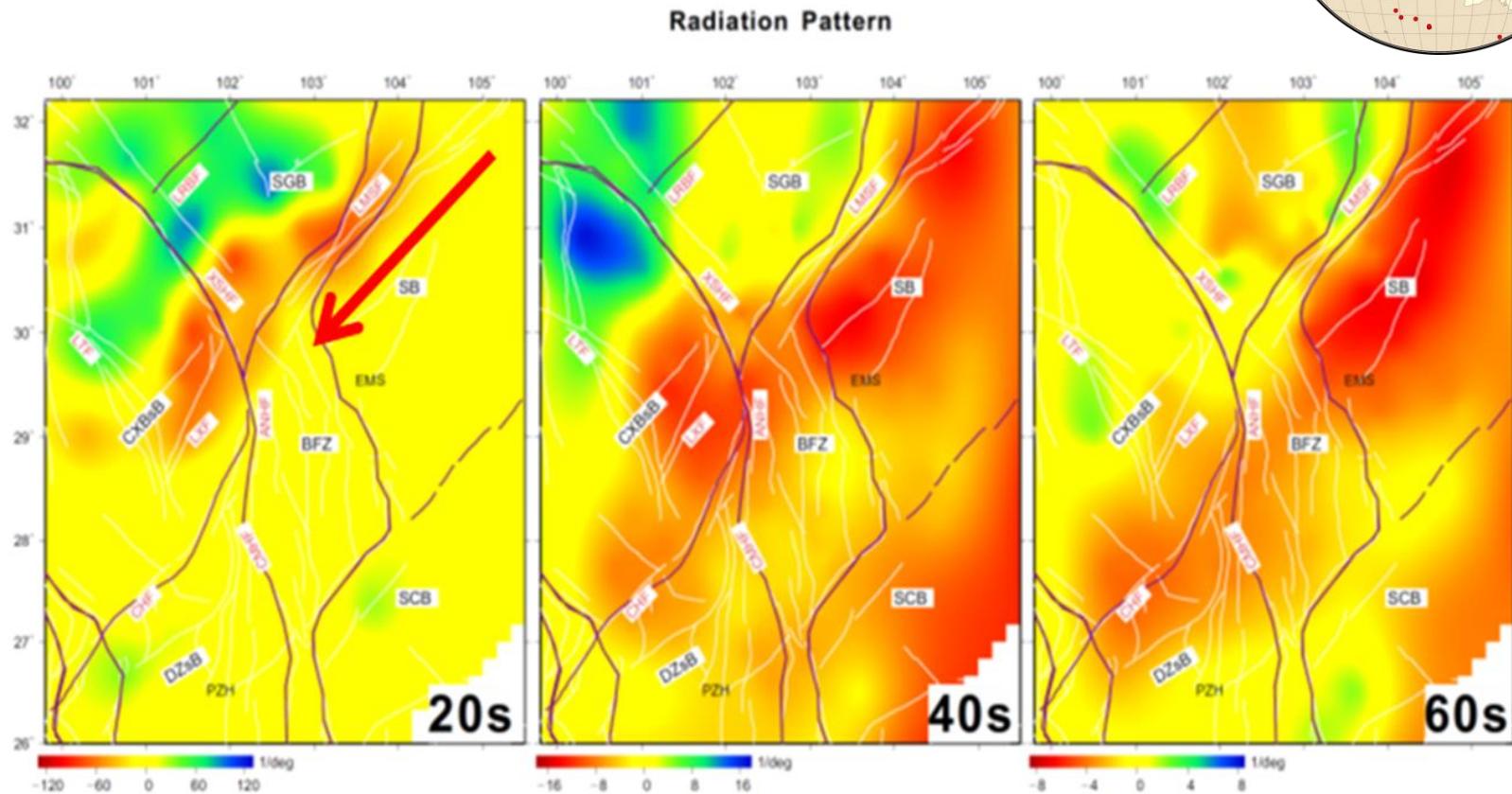
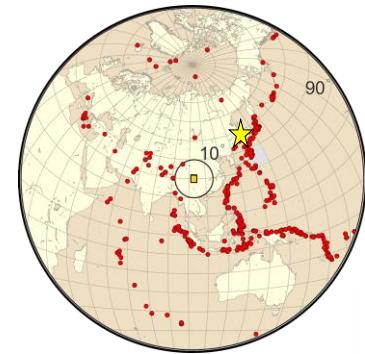
郯靼海峡6.2级地震



各向异性-川西台阵应用

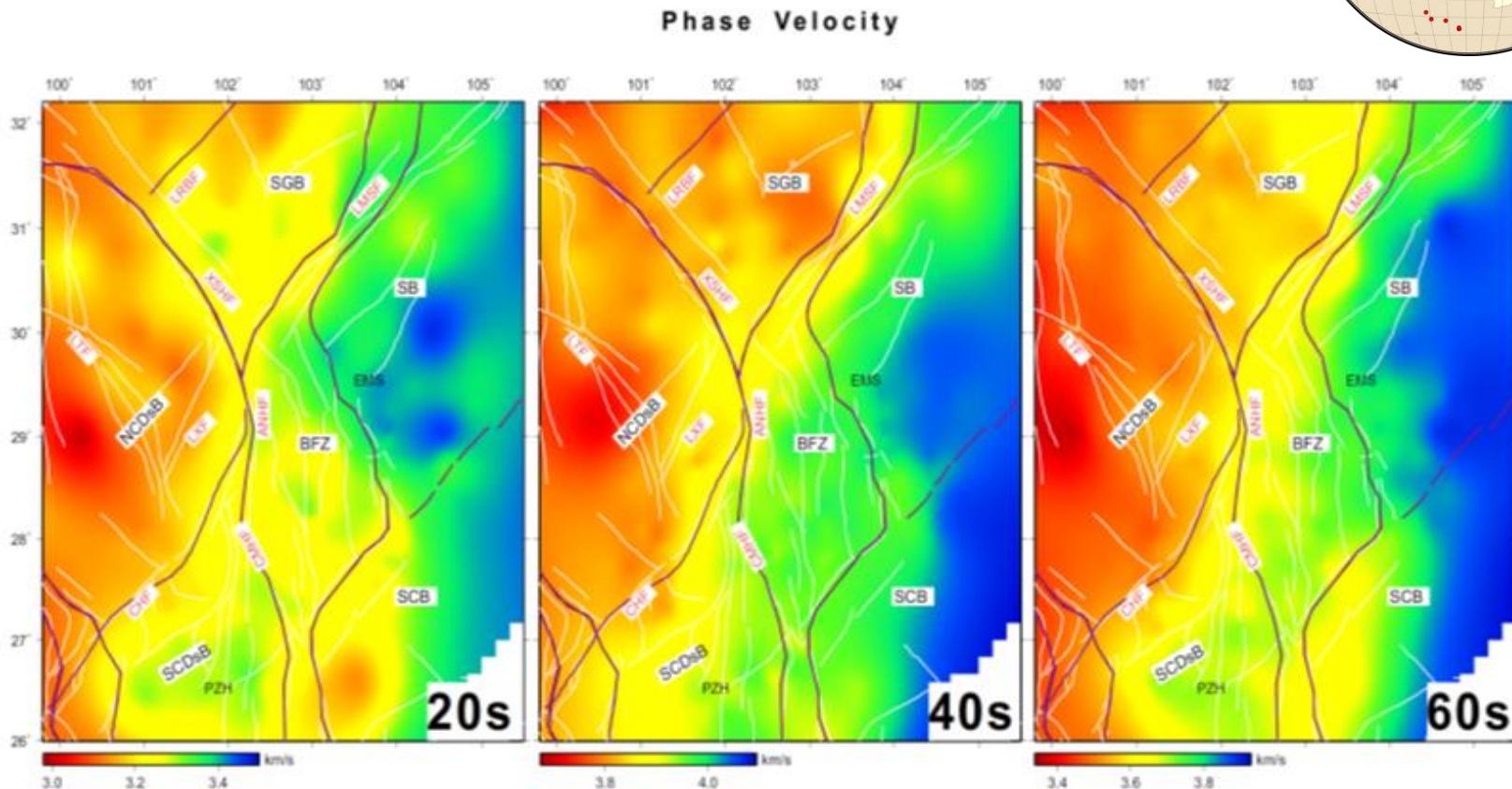
地震波传播参数

郯靼海峡6.2级地震



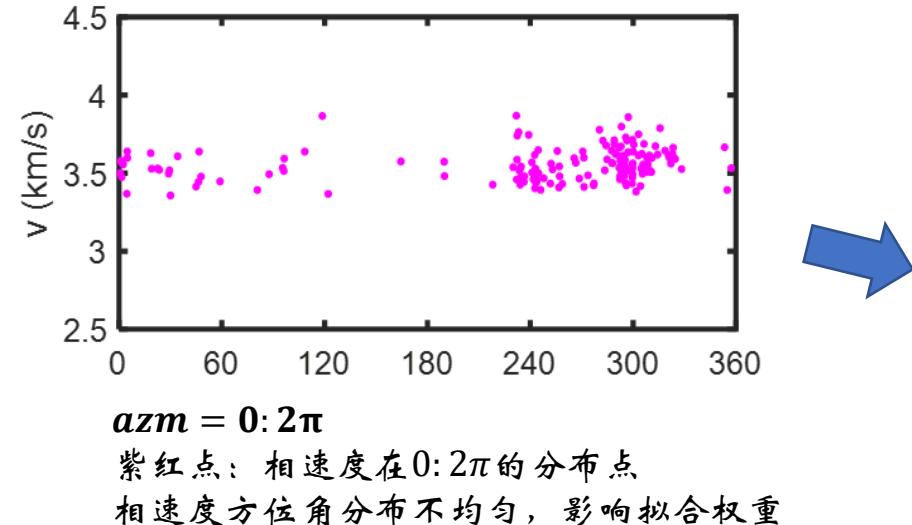
各向异性-川西台阵应用

各向同性相速度

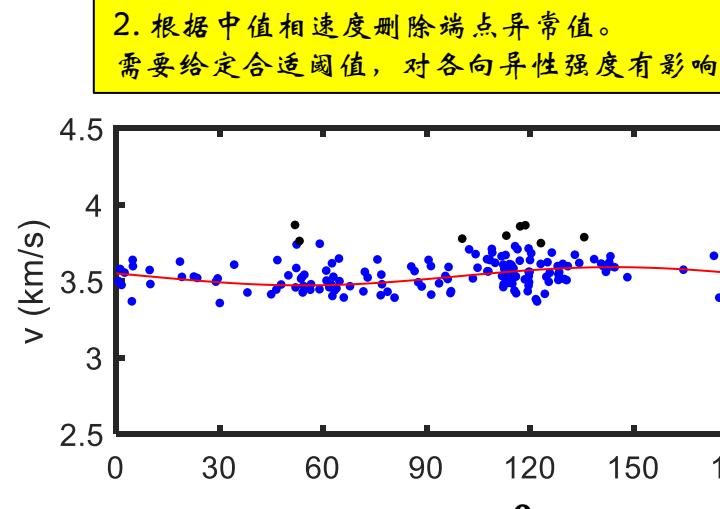


各向异性-川西台阵应用

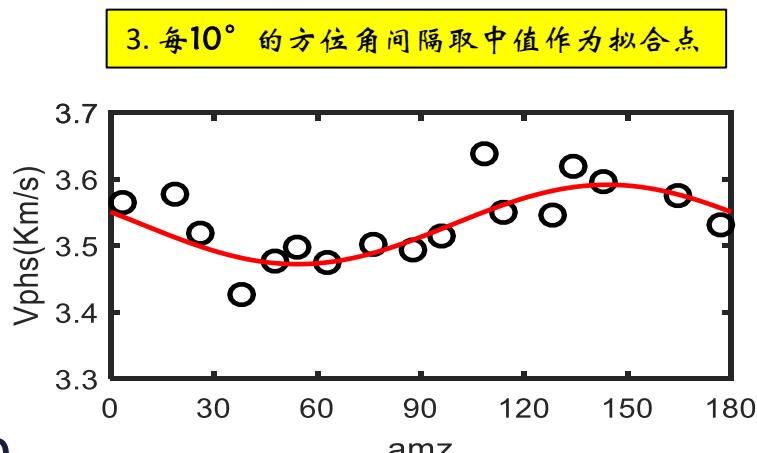
各向同性拟合



1. $v = v_{iso} + a \cos(2\theta) + b \sin(2\theta)$
模型：相速度随方位角变化的周期为 π
方位角转换： $\pi: 2\pi \rightarrow 0:\pi$



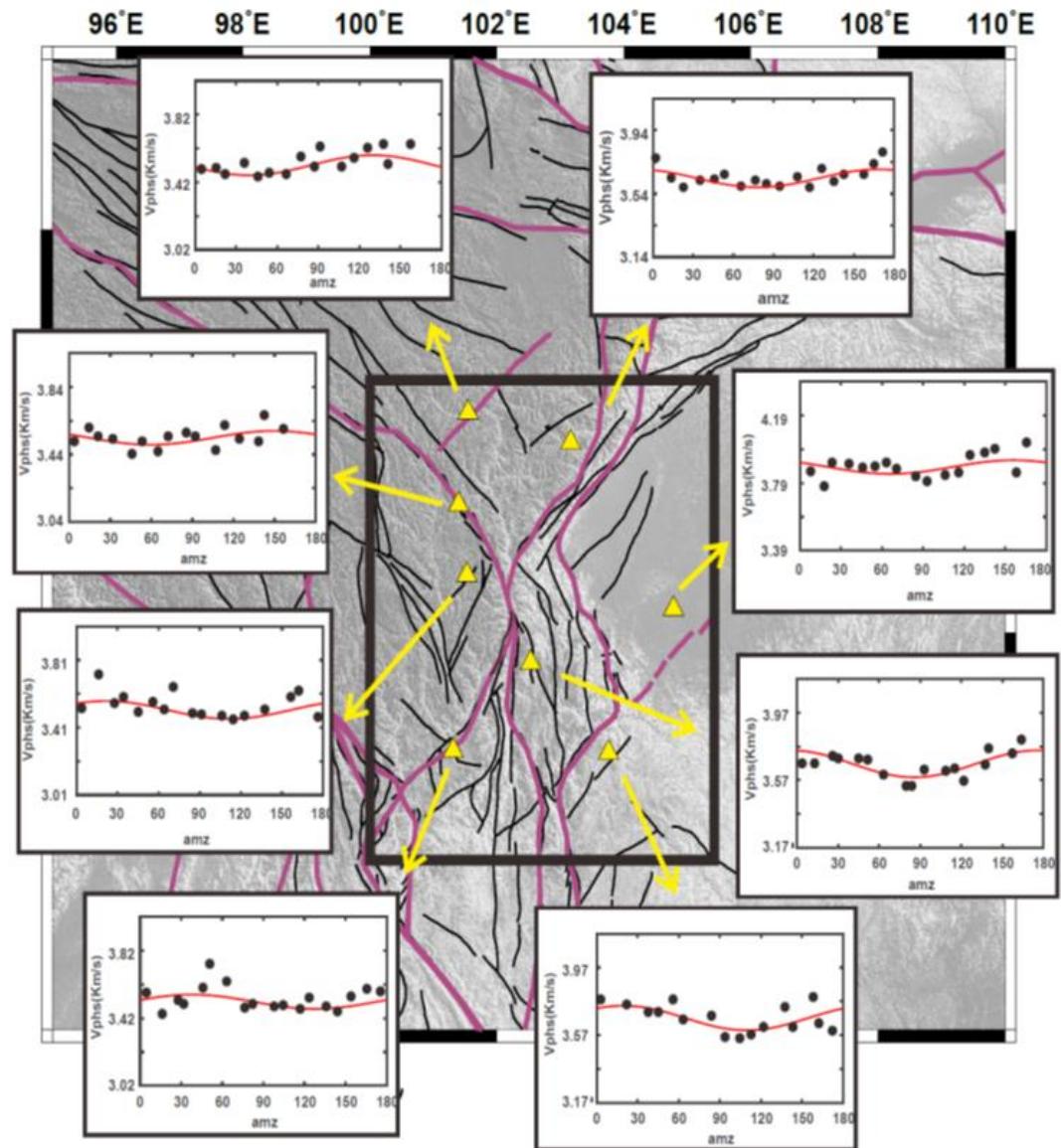
2. 根据中值相速度删除端点异常值。
需要给定合适阈值，对各向异性强度有影响



各向异性-川西台阵应用

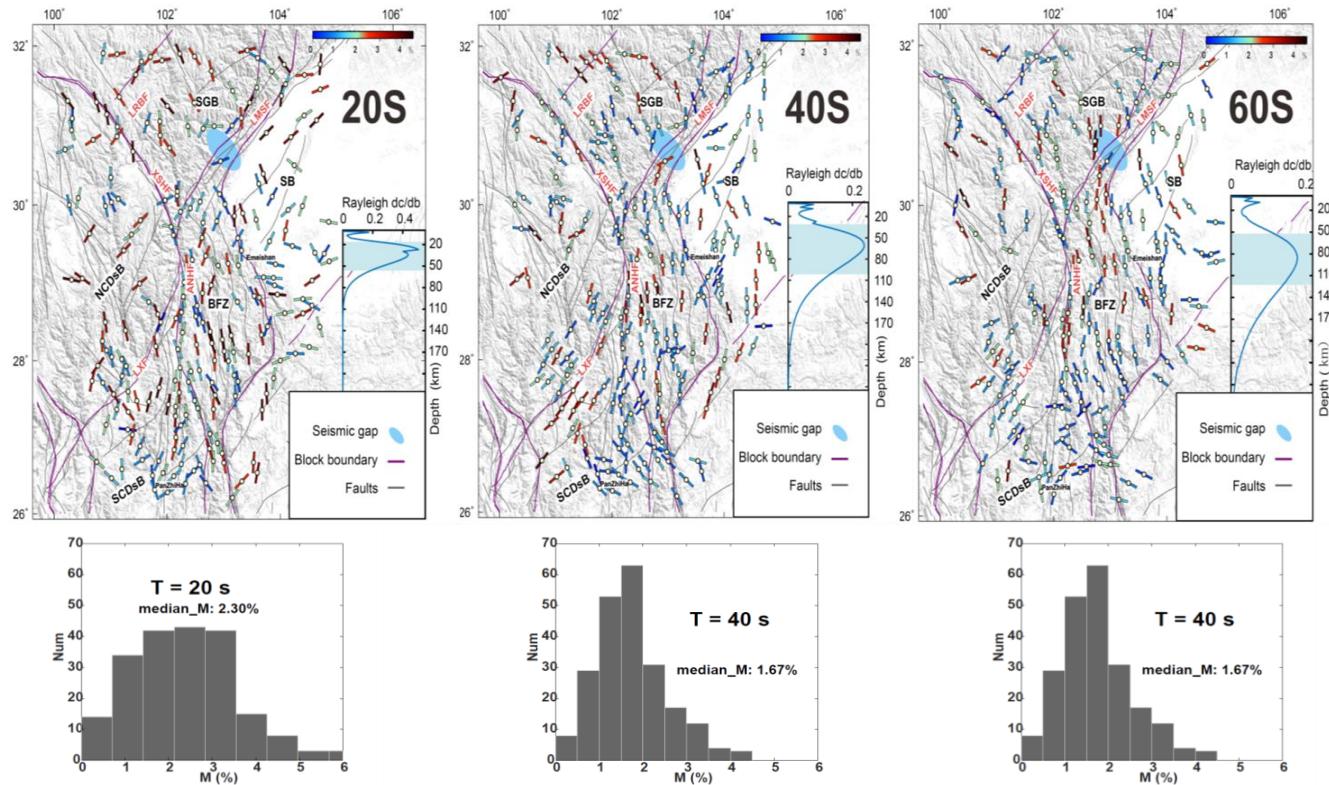
不同块体的
各向异性拟合情况

黄色三角形：台站
红色曲线：拟合结果
黑色圆点：拟合点



各向异性-川西台阵应用

川西台阵的各向异性结果



彩色短棒

方向：快波方向

颜色：各向异性强度

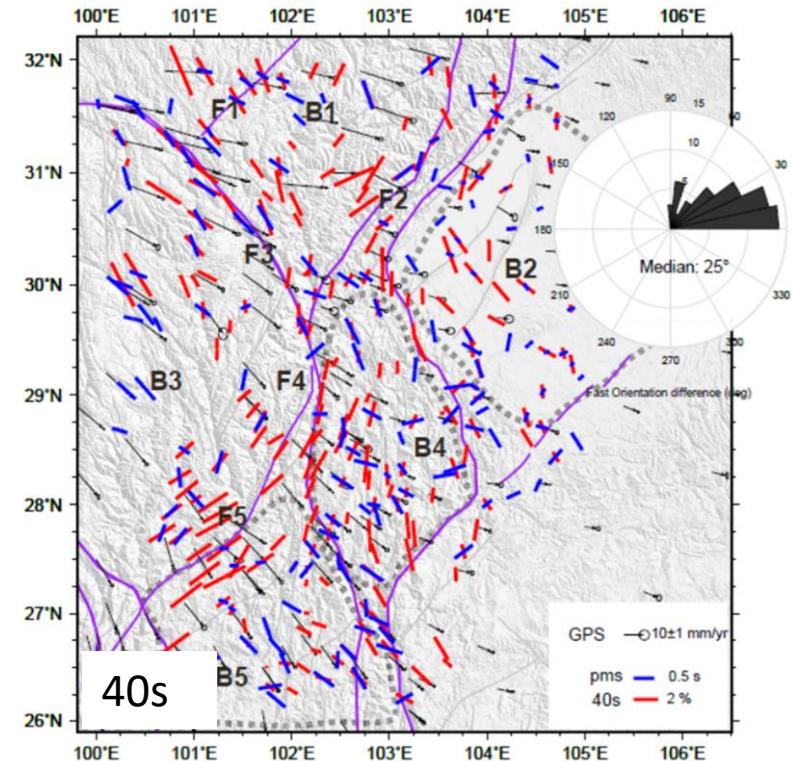
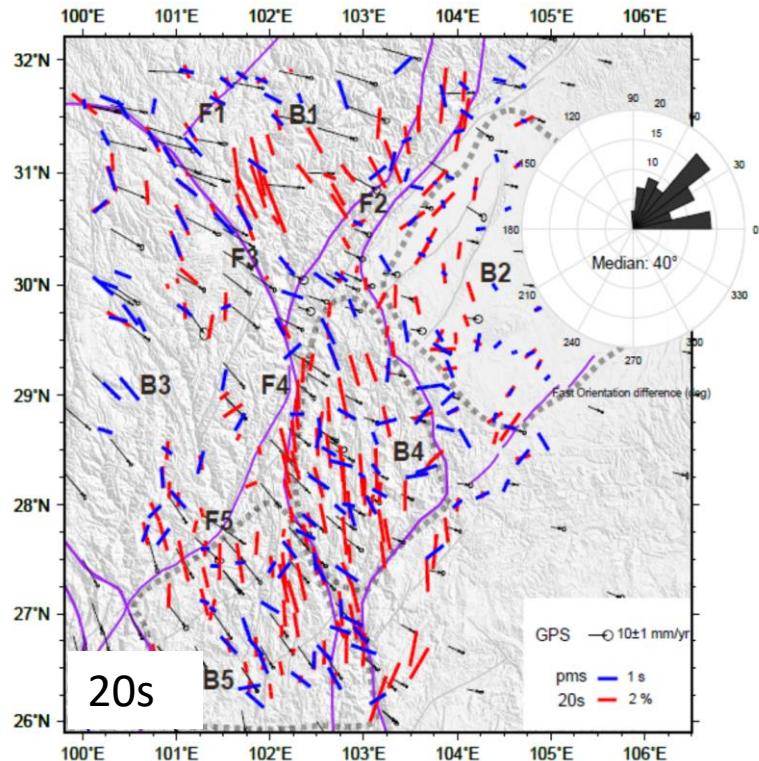
蓝色曲线：敏感核

Median_M: 各向异性中值

M: 各向异性强度

各向异性-川西台阵应用

不同结果比较



红色短棒: WC

蓝色短棒: 接受函数, Pms方位各向异性

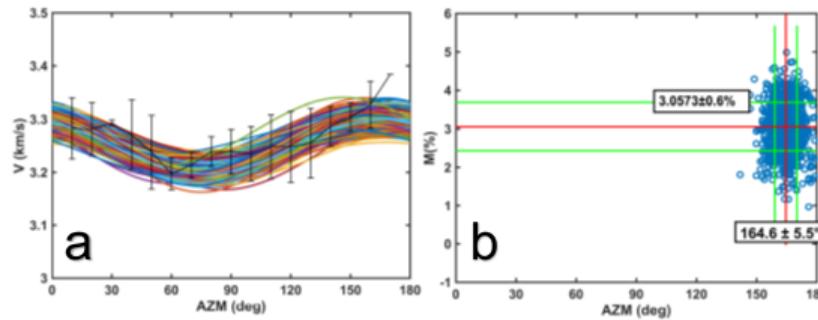
黑色箭头: GPS

统计图: 瑞利面波方位各向异性与Pms方位各向异性的快波方向差异

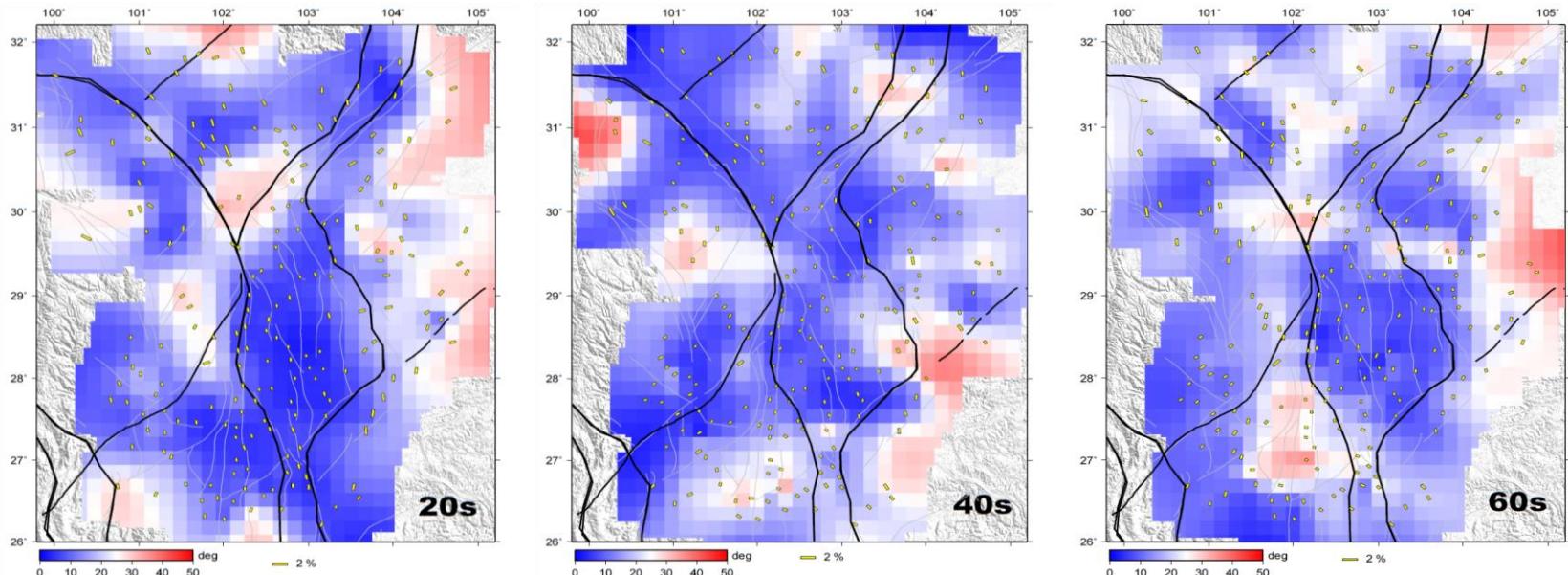
各向异性-川西台阵应用

稳定性测试：bootstrap

一个台站的稳定性分析结果



所有台站的各向异性标准偏差



底图：快波方向标准偏差；黄色短棒：各向异性强度标准偏差

Cao et al., 2020

程序介绍

- 波形质量控制
- 波形梯度计算
- 平滑
- 各向异性计算
- 画图

程序介绍

1. 波形质量控制:

wview.m

功能：删除劣质波形，输出平均群速度

界面按钮介绍：

DATDIR: 当前地震事件；

NWFPag: 每页显示波形道数

Pband: 滤波频带 (s)

VGroup: 拾取的平均群速度，对应于波形上的红色竖杠

“-”：点击→上一个地震；

“+”：点击→下一个地震

output_Vg: 点击→将文件夹名称、Vg和滤波周期输出到 evg.txt 文件中

Back: 点击→上一页波形；

Next: 点击→下一页波形

MoveTo: 将选择的波形移动到“bad”文件夹

Remove: 将选择的波形直接删除；

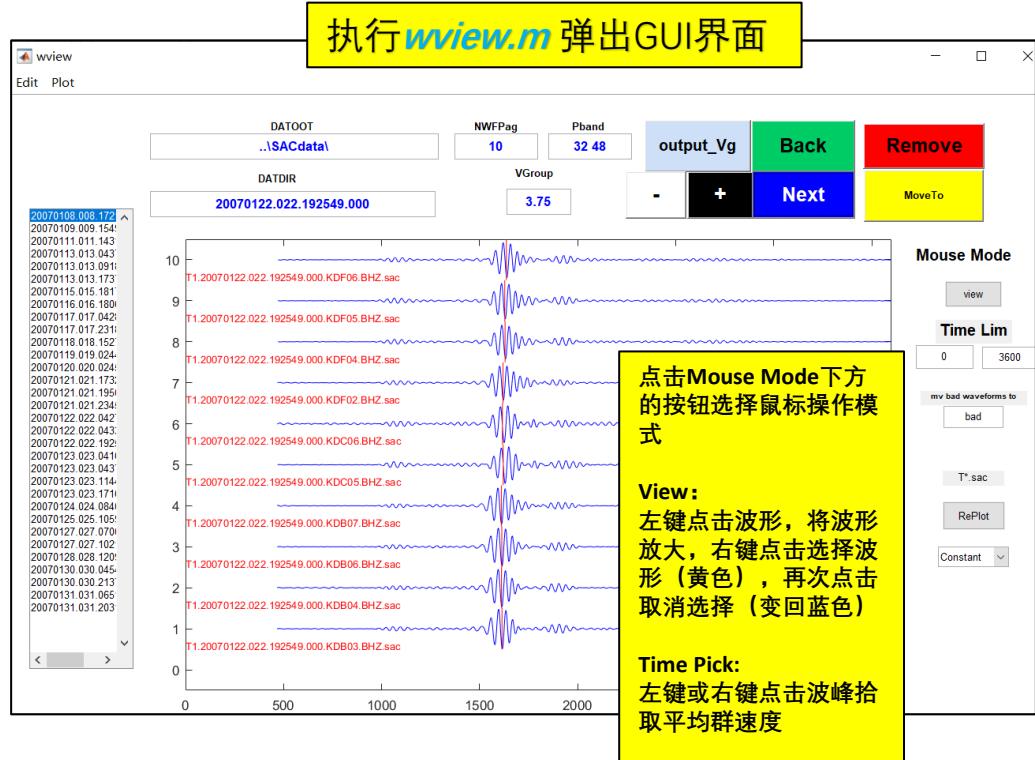
Time Lim: 横轴范围

Replot: 刷新页面

修改参数：

wview.m → function: wview_OpeningFcn

```
datroot='..\SACdata\'; %SAC 数据根目录  
fddi=dir([datroot '200*']); %事件波形文件夹  
fptn='T*.sac'; %波形文件通用名
```



程序介绍

1. 波形质量控制：输入输出

输入

名称	修改日期	类型
20070127.027.070037.130	2021/7/22 17:09	文件夹
20070127.027.102146.760	2021/7/22 17:10	文件夹
20070128.028.120905.000	2021/7/22 17:10	文件夹
20070129.030.045450.000	2021/7/22 17:11	文件夹
20070130.030.213744.000	2021/7/22 17:11	文件夹

名称	修改日期	类型
T1.20070127.027.102146.760.KCD01.BHZ.sac	2019/8/21 11:24	SAC 文件
T1.20070127.027.102146.760.KCD03.BHZ.sac	2019/8/21 11:24	SAC 文件
T1.20070127.027.102146.760.KCD04.BHZ.sac	2019/8/21 11:24	SAC 文件
T1.20070127.027.102146.760.KCD06.BHZ.sac	2019/8/21 11:24	SAC 文件

输入: 地震事件波形，SAC格式（以发震时刻作为参考时刻）

输出: *evg.txt*; 并在每个事件波形目录下建立“bad”用于存放低质量的波形数据

Vg: 平均群速度

T1: 濾波频带最小周期

T2: 濾波频带最大周期



输出

evg.txt

事件波形文件夹	Vg	T1	T2
20080802.215.153422.760	3.50	16	24
20080606.158.134248.950	3.35	16	24
20080827.240.013532.150	3.61	32	48
20080106.006.051420.180	3.71	32	48
...			

程序介绍

2. 波形梯度计算 *GradAnaReg.m*

GradAnaReg.m

功能：执行程序，用于周期循环和地震循环

GradAna0.m

功能：被调用程序，波形梯度分析主程序

修改参数

```
pathroot='.\SACdata'; %事件波形根目录;
datout='.\WG'; %输出目录
wparamters=[pathroot fs 'evg.txt']; %参数输入文件
cmp='BHZ'; %波形分量
sacftyp=['T1*' cmp '.sac']; %波形文件通用名
par.dt=0.1; %波形数据采样率 (s)
par.reg=[25.8 32.5 ; 99.8 105.2];%研究区域
par.dsmax=50; %子台网最大半径
par.dsmin=5; %子台网最小半径
```

程序介绍

2. 波形梯度计算: 输入输出

程序自动建立输出目录WG，目录下自动建立每个地震事件的输出文件夹用于存放该地震波形梯度分析输出的不同周期的结果

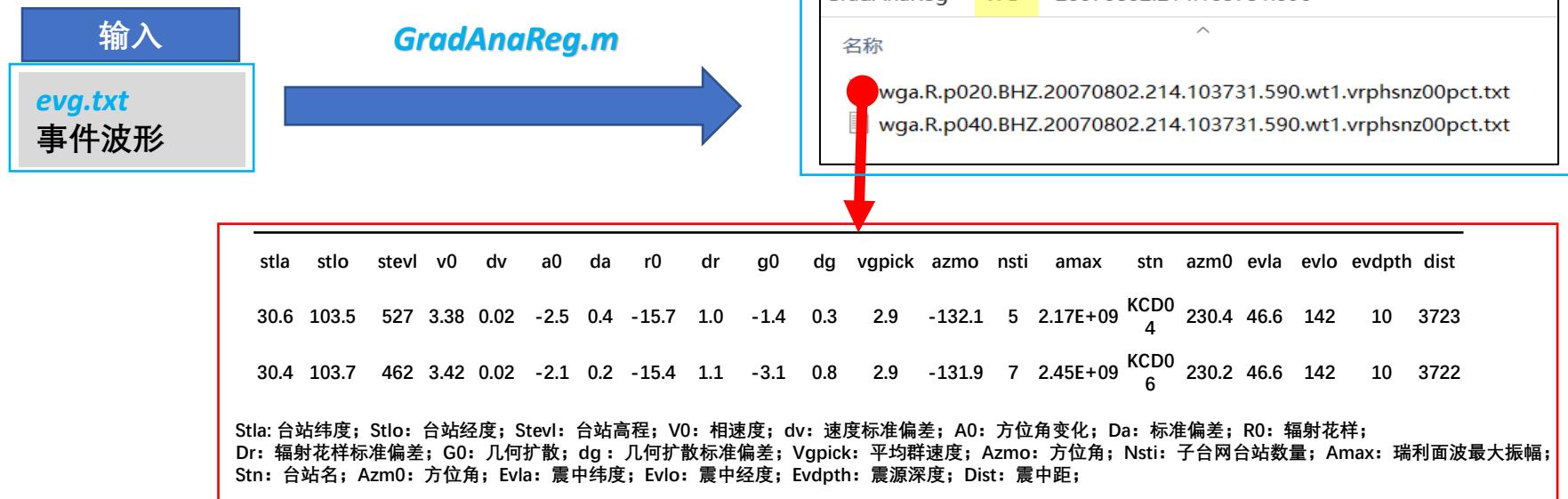
输出文件命名规则：

R: 瑞利波

P020: 中心周期

BHZ: Z分量

20070802.214.103731.590 : 地震发震时刻



程序介绍

3. 平滑 *movavgforWG.m*

功能：

1. 删除异常值：

根据研究区域给定阈值：

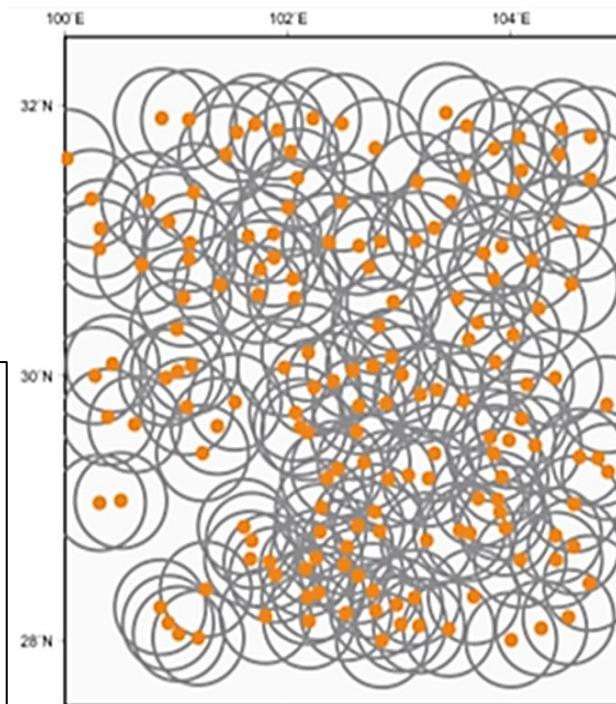
$$abs(V - median(V_i)) > 0.3 \text{ km/s}$$

2. 台站一定范围内的结果做平均

movavgforWG.m

修改参数：

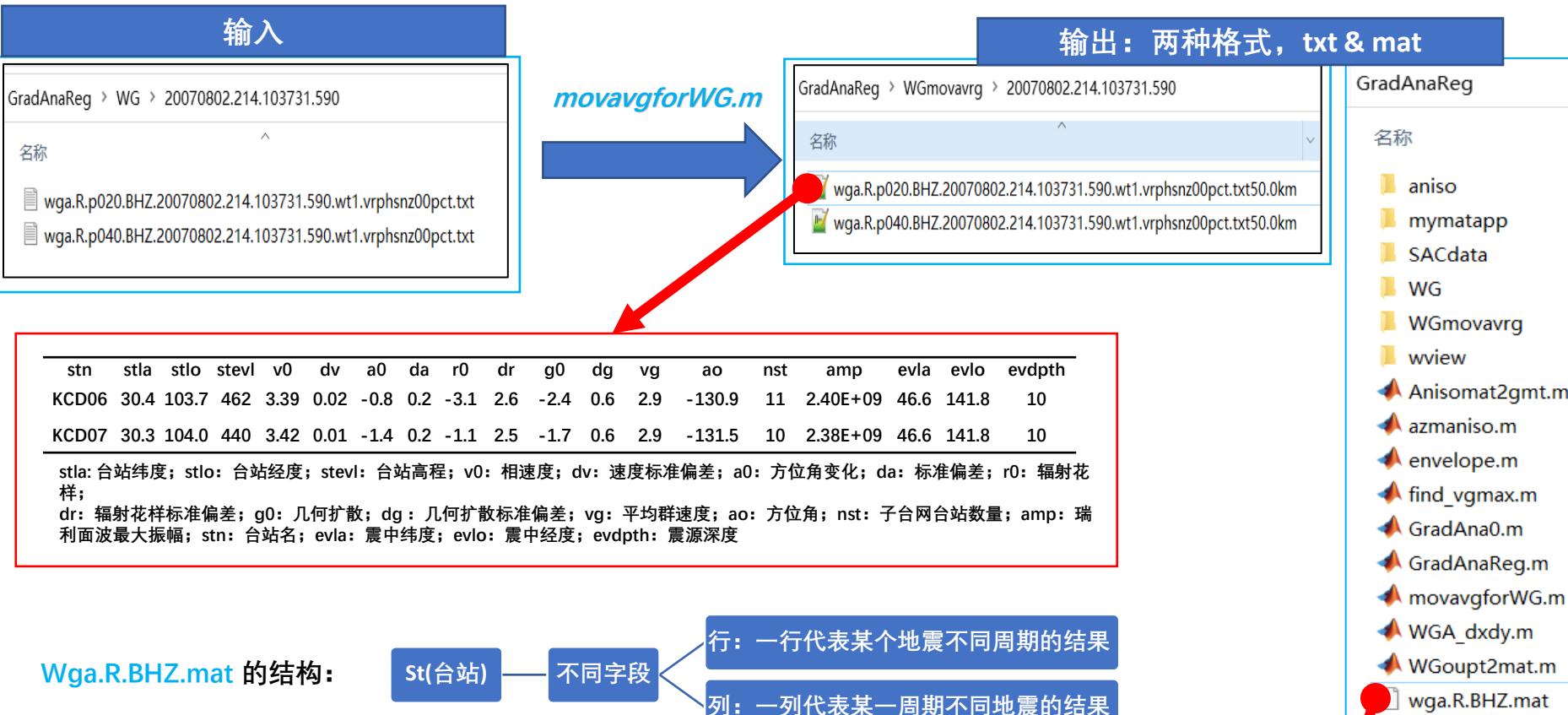
```
indir = './WG/'; % 输入路径
outdir = './WGmovavrg/'; % 输出路径
evid = dir([indir,'200*']); % 输入文件夹
wgfileType = 'wga.R.*nz00pct.txt'; % 文件格式
vlim = 0.5; % 速度阈值，用于删除大于或小于区域平均速度0.5km/s
par.knst=3; % 最少辅助台站个数
isFixedSmrad = 1; % =1, 滑动平均半径固定为smradi, =0, 滑动平均半径
% 为半波长，但最大半径MaxSmrad
smradi=50; % 固定的滑动平均半径, isFixedSmrad=1 可用
MaxSmrad = deg2km(0.6); % 最大滑动平均半径 isFixedSmrad=0 可用
```



红色圆点：川西台阵
灰色圆圈：滑动平均半径

程序介绍

3. 平滑:输入输出



程序介绍

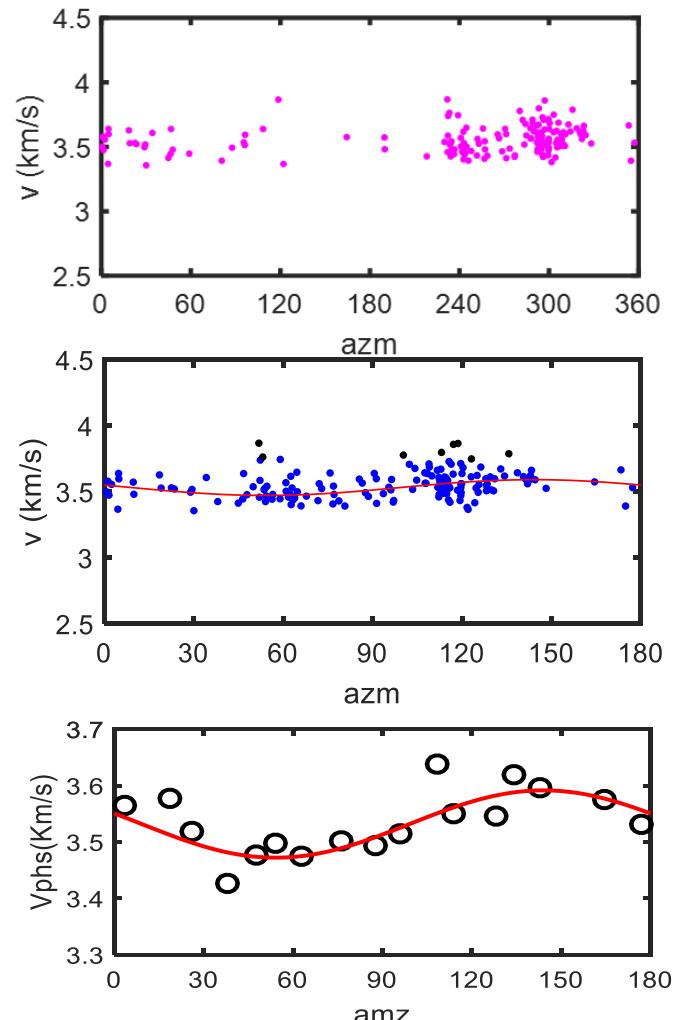
4. 各向异性计算 *azmaniso.m*

功能：给定不同方位角速度采样点，利用非线性最小二乘反演各向异性模型

azmaniso.m

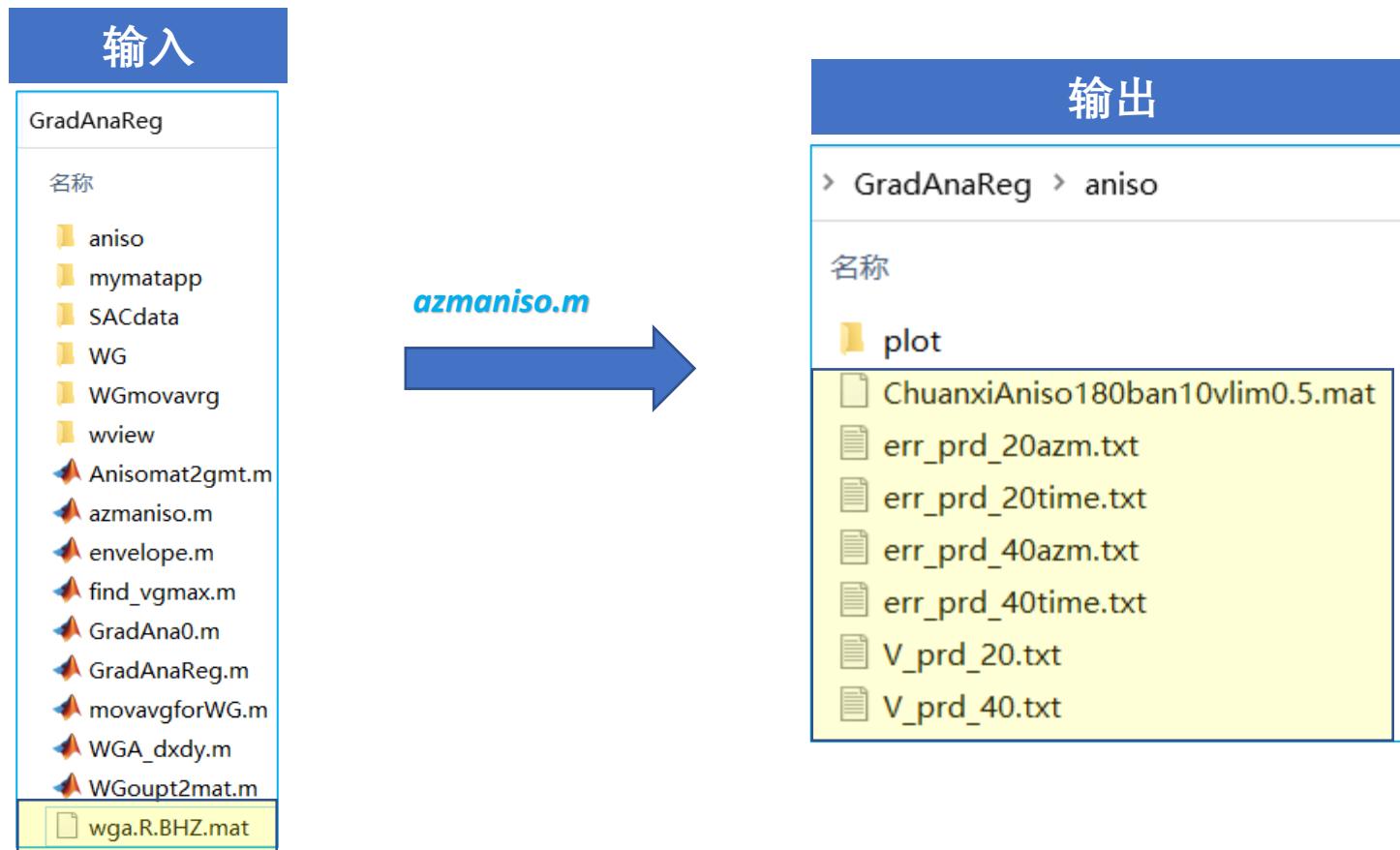
修改参数

```
infile = './wga.R.BHZ.mat'; %输入文件  
outpath = './aniso/'; %输出路径  
periods = [20 40]; %计算周期  
bootNum = 500; % bootstrap times  
vlims = 0.5; % 相对于各向同性相速度的阈值  
azmban = 10; %平均方位角间隔  
MaxAzms = 180; %各向异性模型最大方位角周期  
isbootstrap = 1; %是否使用bootstrap方法评估稳定性  
isoverwrite = 0; %是否覆盖之前的结果
```



程序介绍

4. 各向异性计算:输入输出



程序介绍

4. 各向异性计算:输出文件数据结构

ChuanxiAniso180ban10vlim0.5.mat

Aniso	
	绘图 变量 视
1x1 struct 包含 15 个字段	
字段	值
stn	298x5 char
st	298x2 double
viso	298x2 double
Fai	298x2 double
M	298x2 double
fitRsrn	298x2 double
a	298x2 double
b	298x2 double
stdv	298x2 double
stdv2	298x2 double
stdFai	298x2 double
stdA	298x2 double
stdM	298x2 double
stdB	298x2 double
period	[20,40]
周期	

err_prd_20time.txt

st-lat	st-lon	stdv1	stdM	stdFai
27.5	102.5	0.05	0.4	9.5
27.6	102.4	0.05	0.5	5.6
...				

err_prd_20azm.txt

st-lat	st-lon	stdv	stdM	stdFai
27.9	102.3	0.01	0.6	10.5
27.5	102.1	0.02	0.4	15.6
...				

V_prd_20.txt

st-lat	st-lon	viso	M	Fai
31.9	101.1	3.2	3.4	5.0
29.0	102.3	3.3	2.3	-4.4
...				

程序介绍

5. 画图：标准偏差

执行文件：[ploterr.sh](#)

修改参数：

```
#!/bin/bash
gmt set MAP_FRAME_TYPE=plain #坐标系
gmt set PS_MEDIA=a4          #图纸大小
R=99.6/106/25.9/32.5        #画图区域：最小经度/最大经度/最小纬度/最大纬度
J=M102.5/29/7i               #图形中心经度/图形中心纬度/图形大小
FT=CN-faults.dat            #断层数据
BD1=block.dat                #板块边界数据1
BD2=block_add.dat           #板块边界数据2
infile=$1                     #输入文件
v1=$2                         #色标起始值
v2=$3                         #色标末尾值
ban=$4                        #色标图例标签间隔
```

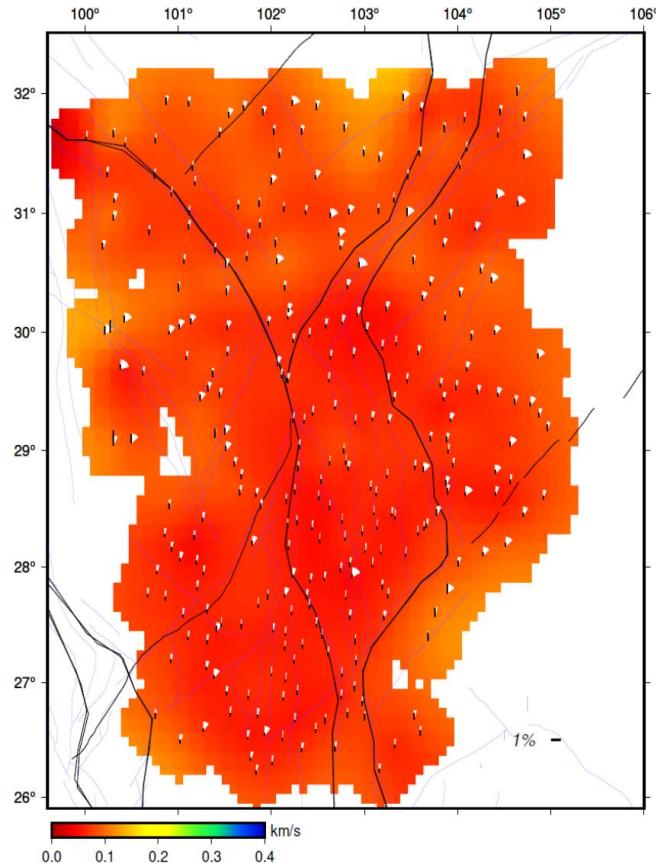
在Linux 系统的终端下执行./ploterr.sh infile 0 b ban

例如 ./ploterr.sh err_prd_20azm.txt 0 0.4 0.1

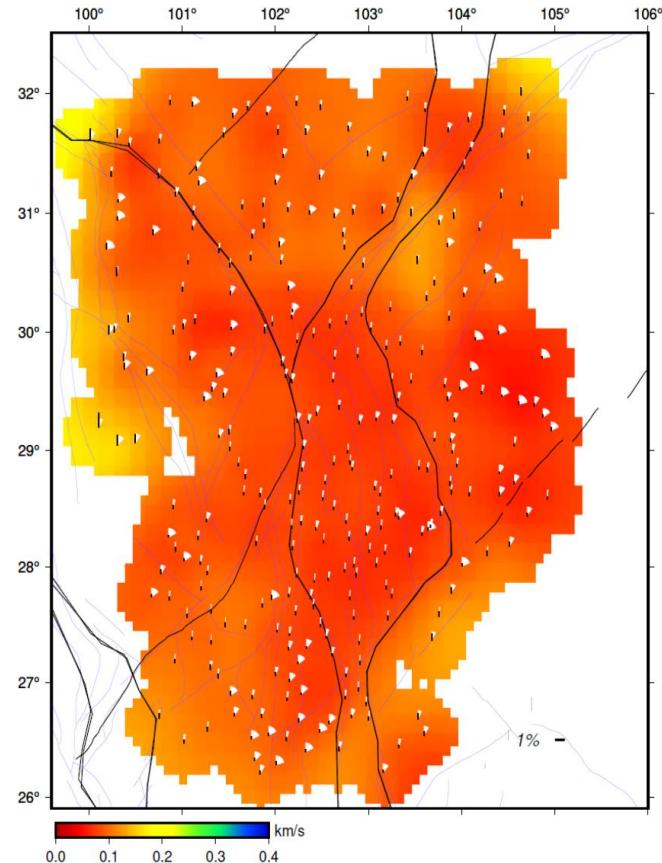
程序介绍

5. 画图：标准偏差

err_prd_20azm.txt



err_prd_40azm.txt



底图：相速度标准偏差 白色扇形夹角：快波方向标准偏差
黑色短棒长度：各向异性强度标准偏差

程序介绍

5. 画图：速度个各向异性结构

执行文件：[plot.sh](#)

修改参数：

```
#!/bin/bash
gmt set MAP_FRAME_TYPE=plain #坐标系
gmt set PS_MEDIA=a4          #图纸大小
R=99.6/106/25.9/32.5        #画图区域：最小经度/最大经度/最小纬度/最大纬度
J=M102.5/29/7i              #图形中心经度/图形中心纬度/图形大小
FT=CN-faults.dat            #断层数据
BD1=block.dat                #板块边界数据1
BD2=block_add.dat           #板块边界数据2
infile=$1                     #输入文件
b=$2                         #色标范围
ban=$3                        #色标图例标签间隔
```

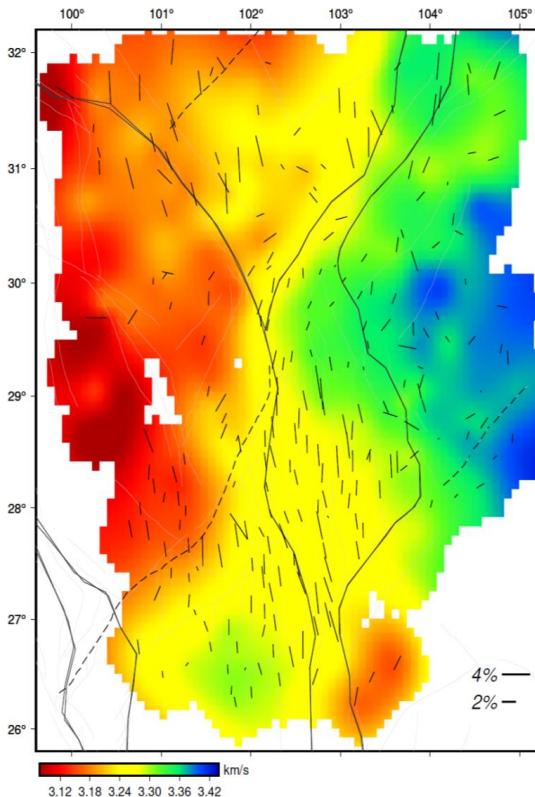
在Linux 系统的终端下执行./plot.sh infile b ban

例如 ./plot.sh ./V_prd_40.txt 0.18 0.06

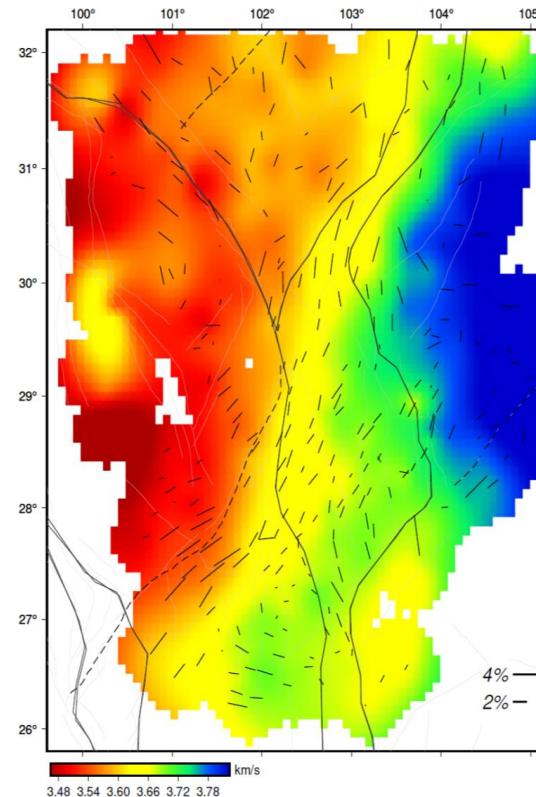
程序介绍

5. 画图：速度个各向异性结构

V_prd_20.txt



V_prd_40.txt



底图：各向同性相速度

黑色短棒方向：快波方向 黑色短棒长度：各向异性强度

程序介绍

程序执行流程

1. 数据下载

下载地址: <http://www.chinarraydmc.cn/>

数据产品→低采样波形数据(Tele-seismic surface wave data from ***)入口→下载

The screenshot shows the homepage of the China Seismic Array Data Management Center. The top navigation bar includes links for 首页 (Home), 数据资源 (Data Resources), 最新地震 (Latest Earthquakes), 台站分布 (Station Distribution), 研究成果 (Research Results), 数据申请 (Data Application), 数据产品 (Data Products), 软件下载 (Software Download), 数据中心介绍 (Data Center Introduction), and 联系我们 (Contact Us). The login link is also present.

The main content area features a search bar with the placeholder "输入关键字" (Input Keyword) and a "搜索" (Search) button. Below the search bar is a table listing three data products:

编号	产品类型	产品名称	doi号	简介	入口
1	信息类数据	Earthquake Catalogue in Tangshan Region with cutoff magnitude 2.5 (1970~2019)	10.2.12001.dp.cat.tangshan	Earthquake Catalogue in Tangshan Region with cutoff magnitude 2.5 (1970~2019)	入口
2	低采样波形数据	Tele-seismic surface wave data from temporary stations in Sichuan-Yunnan area	10.12001.dp.surf	The global tele-seismic surface wave waveform; Magnitude ≥ 6.0; 1 Hz sampling rate; recorded by temporary stations in the SE Tibetan Plateaus	入口 2
3	低采样波形数据	Tele-seismic surface wave data from permanent stations in Sichuan-Yunnan area	10.12001.dp.surf	The global tele-seismic surface wave waveform; Magnitude ≥ 6.0; 1 Hz sampling rate; recorded by permanent stations in the SE Tibetan Plateaus	入口

To the right of the table is a list of seismic events with their details and download links:

发震时刻	纬度	经度	深度	震级	下载
2006-10-10 08:02:51.000	-56.04	-122.33	10	6	下载
2006-10-10 23:58:04.000	37.197	142.664	9	6	下载
2006-10-12 18:05:56.000	-31.26	-71.33	31	6.3	下载
2006-10-15 17:07:48.000	19.86	-155.99	29	6.7	下载
2006-10-15 17:14:09.000	20.129	-155.983	18.9	6	下载
2006-10-15 17:14:12.000	20.07	-156.04	18.9	6	下载
2006-10-17 01:25:12.000	-5.89	151.03	32	6.7	下载
2006-10-20 10:48:55.000	-13.45	-76.66	23	6.7	下载
2006-10-22 08:55:16.000	-45.77	95.92	10	6	下载
2006-10-23 21:17:19.000	29.34	140.3	11	6.4	下载
2006-10-26 22:54:32.000	-13.39	-76.64	28.1	6	下载
2006-11-07 17:38:33.000	-6.48	151.26	11	6.5	下载

程序介绍

程序执行流程

2. 数据预处理

解压



重命名将文件夹命名为发震时刻，然后复制到SACdat文件夹下



修改参考时刻为发震时刻、去趋势、去均值

```
sac << EOF
r $trace
ch O GMT $YEAR $JDAY $HR $MN $SEC $MSEC0
ch allt (0 - &1,o&) iztype IO
ch lovrok true
ch lcalda true
rtr
rmean
wh over
w over
q
EOF
```

程序介绍

程序执行流程

3. *wview.m*

(注意：执行之前需要将mymatapp文件夹及其子文件夹添加到路径)

波形挑选的GUI界面

输入：sac文件

输出：evg.txt

4. *GradAnaReg.m*

波形梯度计算程序

输入：挑选过sac文件， evg.txt

输出：./WG/200*/wga*.txt

5. *movavgforWG.m*

空间滑动平均

输入：WG/200*/wga*.txt

输出：./Wgmovavrg/200*/wga.R*km
./wga.R.BHZ.mat

6. *azmaniso.m*

各向异性计算

输入：./wga.R.BHZ.mat

输出：*Aniso*ban*vlim*.mat
err_prd*.txt
V_prd*.txt