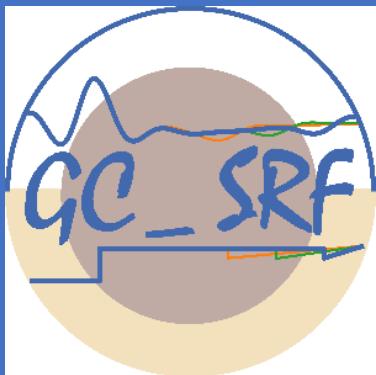


2023-地震学算法与程序培训班

GC_SRF策略的程序实现与操作案例演示



张周 邓阳凡* 胡仲发 朱晟 黄润青 罗恒

邮箱: zhangzhou3@gig.ac.cn 微信: 18672567931



中国科学院 广州地球化学研究所
2023年07月25日

开发历程与致谢

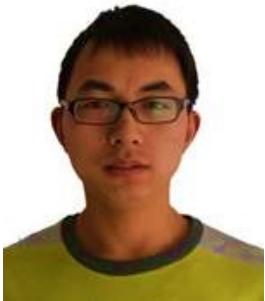
2018年

俄罗斯科学院
Vinnik 团队



2019年


第五届地震学算法
与程序培训班



长江大学
刘启民 讲师

“3~5张PPT”

Geochemistry, Geophysics, Geosystems / Volume 23, Issue 11 / e2022GC010619

Research Article | [Open Access](#) | 

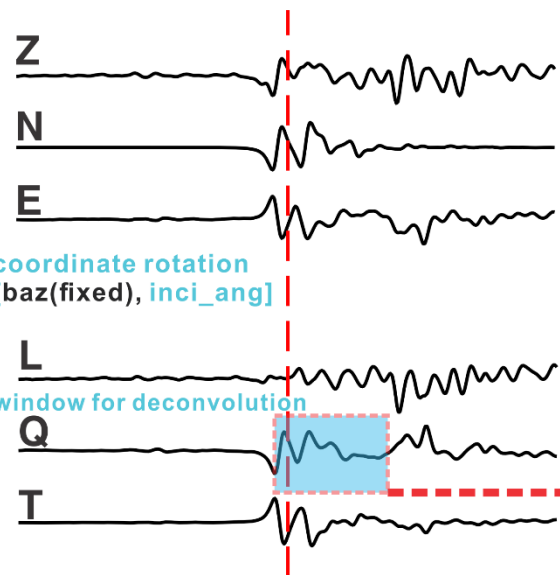
2022年

A Generalized Strategy From S-Wave Receiver Functions Reveals Distinct Lateral Variations of Lithospheric Thickness in Southeastern Tibet

Zhou Zhang, Yangfan Deng 

- 工作初期：刘启民 讲师, 徐强 研究员；
- 接收函数基础和QSEIS参数：LP Vinnik, Xiaohui Yuan；
- 早期工作在2019年地震学算法与程序培训班陈凌 研究员, 吴庆举 研究员, 姚华建 教授 给出指导和建议；
- 文章中波形模拟程序来自 Rongjiang Wang 教授团队；
- PSDM程序来自陈凌 研究员课题组；
- 程序整理：胡仲发、朱晟、黄润青、罗恒；
- 程序故障和解决方案：肖卓、韩如冰、苏文君柳、梁戍然、曾彦迪、闫晓东、寇华东。

计算SRF的大致流程



步骤 1. 坐标旋转

$$\begin{bmatrix} L \\ Q \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(i) & -\sin(i) \sin(baz) & -\sin(i) \cos(baz) \\ \sin(i) & \cos(i) \sin(baz) & \cos(i) \cos(baz) \\ 0 & -\cos(baz) & \sin(baz) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z \\ E \\ N \end{bmatrix}$$

Spiking
Deconvolution

SRF(Dec-L)

Dec-Q

Dec-T

-100 -80 -60 -40 -20 0 20 40 60 80 100
Time to S (s)

步骤 2. 反褶积

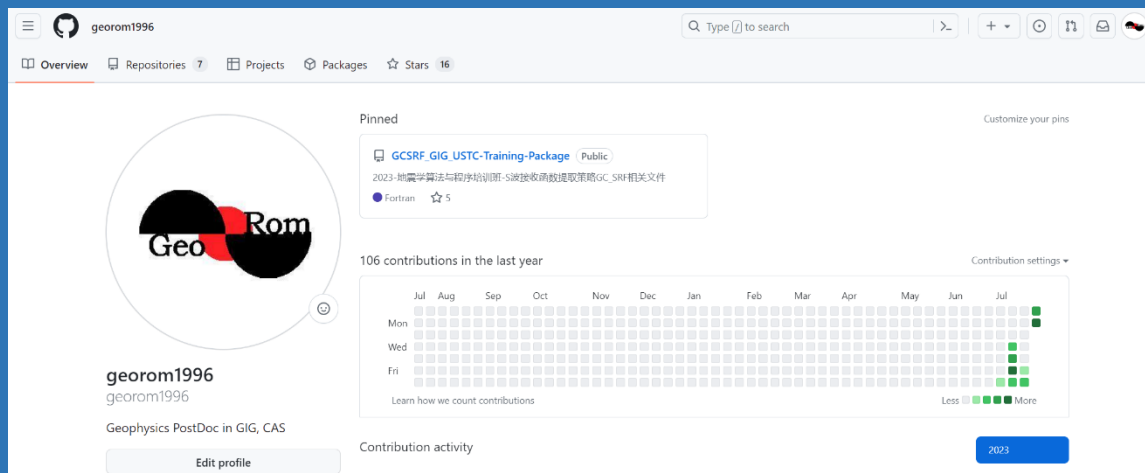
步骤 3. 质量控制

主要关注点:

传统计算流程中人工干预显著
前人研究难以完整复现

1. 计算SRF时的波形时窗长度和旋转角度如何选择?
2. 选择何种反褶积算法开展运算?
3. 怎样开展质量控制?

- 一、Section001 - S波接收函数 **提取**
- 二、Section002 - S波接收函数 **排序与筛选**
- 三、Section003 - S波接收函数 **理论数据成像案例**

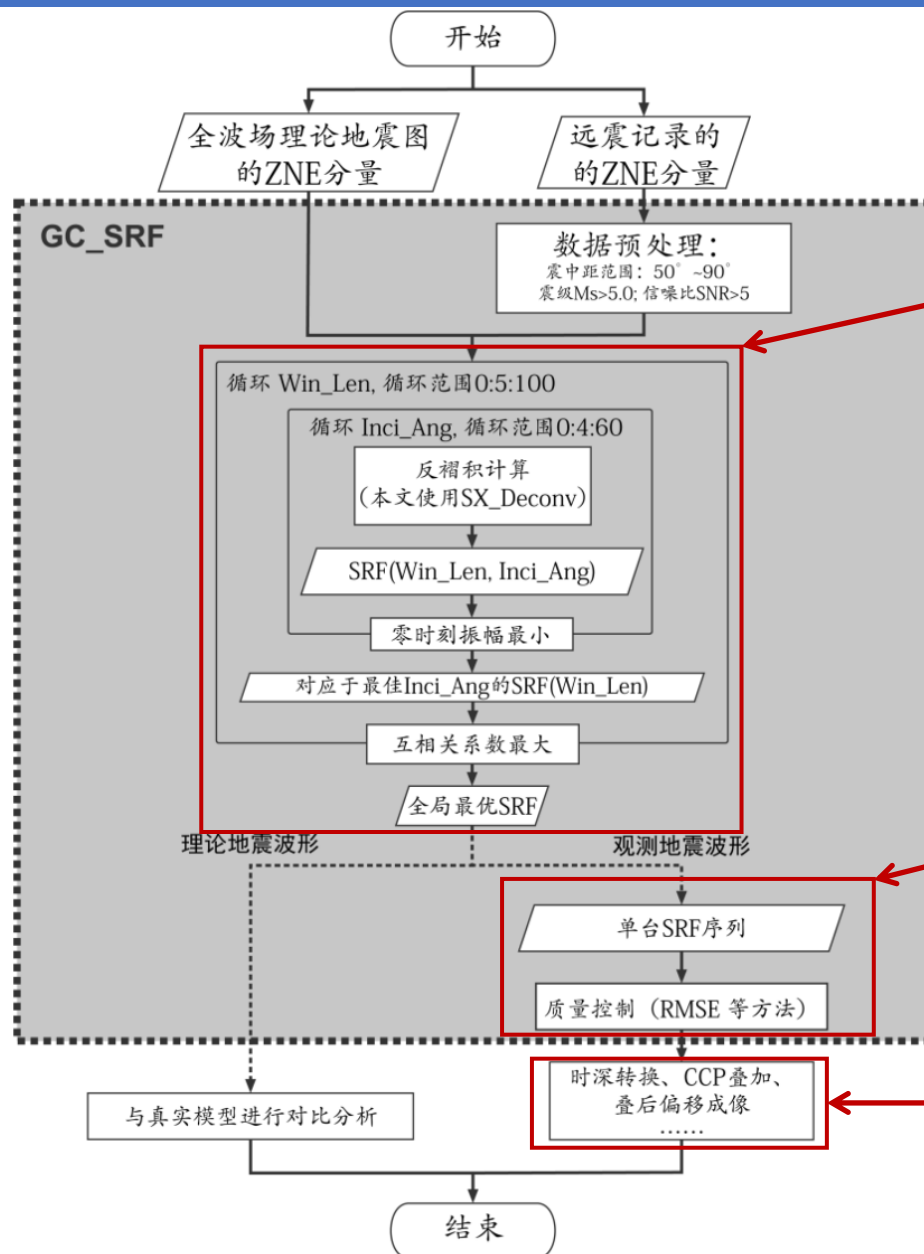


演示文件均托管于github
欢迎批评指正

<https://github.com/georom1996/GCSRFGIGUSTC-Training-Package/tree/master/>

后续将持续更新

主要操作步骤



一、Section001 - S波接收函数 提取

二、Section002 - S波接收函数 排序与筛选

三、Section003 - S波接收函数 理论数据成像案例

编译运行环境说明



GIGCAS

中国科学院广州地球化学研究所
Guangzhou institute of geochemistry, chinese academy of sciences

1. 安装 conda SAC Taup

- conda安装包链接见[conda website](#) SAC和Taup的安装流程参考[SeismanBlog](#)

- 例如,如果选择Miniconda3 Linux 64-bit平台,则参考如下命令安装

```
wget https://repo.anaconda.com/miniconda/Miniconda3-latest-Linux-x86_64.sh
```

```
bash Miniconda3-latest-Linux-x86_64.sh
```

```
source ~/.bashrc
```

2. 配置 conda

conda 方案一:

1. 下载最新版本中根目录中提供的GCSRF.yml文件, 在程序包根目录中进行环境配置.

2. 在conda中创建GCSRF环境并安装相应依赖:

```
conda env create -f GCSRF.yml
```

3. 安装Taup:

```
sudo apt-get install default-jdk
```

```
sudo snap install taup
```

conda activate GCSRF

推荐方案

conda 方案二:

1. 可在自己常用的conda环境中安装如下依赖:

```
conda config --add channels conda-forge
```

```
conda install obspy=1.4.0
```

```
conda install pandas
```

```
conda install octave -c conda-forge
```

```
conda install gmt -c conda-forge
```

3. 配置 源码编译环境

检查gcc, gfortran, g++, mpich等编译器是否存在:

```
g++ --version
```

```
gcc --version
```

```
gfortran --version
```

```
mpic++ --version
```

若命令不存在则需根据需要安装:

•> **Ubuntu或其他基于Debian的Linux发行版:**

```
sudo apt update
```

```
sudo apt install gcc
```

```
sudo apt install gfortran
```

```
sudo apt install mpich
```

•> **Fedora, CentOS, RHEL等基于RPM的Linux发行版:**

```
sudo dnf install gcc
```

```
sudo dnf install gfortran
```

```
sudo dnf install mpich
```

•> **macOS:** 需安装Homebrew后使用brew命令安装:

```
/bin/bash -c "$(curl -fsSL https://raw.githubusercontent.com/Homebrew/install/master/install.sh)"
```

```
brew install gcc
```

```
brew install gfortran
```

```
brew install mpich
```

Section001: S波接收函数的提取

SX_Deconv和GC_SRF程序及案例

•Section001/

- README.md

- src/ ← **源码文件夹**

复现 *Kumar et al., 2006*
*Figure 04b*的案例

SX_Deconv
案例脚本

- bin/

- example01_kumar/

- **SX_Deconv_example_kumar.sh** ←

- calculate_test/

- data/

- figs/

GC_SRF理论测试案例

GC_SRF
案例脚本

- example02_gcsrf/

- **GC_SRF_example_syn.sh** ←

- **GC_SRF_plot.py** ←

GC_SRF
绘图脚本

- calculate_test/

- data/

- figs/

- gcsrf_plot_subroutines.py

主要参考来源: [Seismic Handler \(seismic-handler.org\)](http://seismic-handler.org)

脉冲反褶积

使用方法:

```
SX_Deconv -Z Z.sac -N N.sac -E E.sac -inc 16 -t1 100 -t2 120 -D
```

程序选项:

- t1 脉冲起始时刻 (相对SAC文件开始时刻的时间)
- t2 脉冲结束时刻 (相对SAC文件开始时刻的时间)
- inc 旋转角度
- D 输出逆滤波器及波形旋转后的SAC文件

输入文件:

Z.sac N.sac E.sac

输出文件:

默认输出:

- rf.sl.sac : 未归一化的L分量反褶积波形(SRF)
- rf.sq.sac : 未归一化的Q分量反褶积波形
- rf.st.sac : 未归一化的T分量反褶积波形
- rf.nsl.sac : 振幅归一化的L分量反褶积波形(SRF)
- rf.nsq.sac : 振幅归一化的Q分量反褶积波形
- rf.nst.sac : 振幅归一化的T分量反褶积波形

若使用-D选项, 则会额外输出:

- l-com.sac : L分量原始波形
- q-com.sac : Q分量原始波形
- t-com.sac : T分量原始波形
- fil.sac : 反子波滤波器

```
85 for inci in 00 04 08 12 16 20 24 28 32 36 40 44 48 52 56 60
86 do
87 $BIN/SX_Deconv -Z $setname.z.sac -N $setname.n.sac -E $setname.e.sac -t1 190 -t2 280 -reg 1 -inc $inci -D
```

• [SX_Deconv_example_kumar.sh](#)

GC_SRF+GC_SRF_post 程序说明

GC_SRF_par是GC_SRF的并行版本

使用方法:

GC_SRF -Z [file name of Z] -N [file name of N] -E [file name of E] [-t1 t_spike_begin]
-D [with internal files]

例:

`GC_SRF -Z Z.sac -N N.sac -E E.sac -t1 t1`
-t1 脉冲起始时刻

GC_SRF得到所有波形并moveout后
执行GC_SRF_post程序获得最佳S波接收函数

```
40 timebegin=190
41 $BIN/GC_SRF_par -Z $setname.z.sac -N $setname.n.sac -E $setname.e.sac -t1 $timebegin -reg 3
42
```

• GC_SRF_example_syn.sh

输入文件:

Z.sac N.sac E.sac

输出文件:

- ("rf-%02.f-%03.f.sl.sac", inci, win_len) : 未归一化的L分量反褶积波形(SRF)
- ("rf-%02.f-%03.f.sq.sac", inci, win_len) : 未归一化的Q分量反褶积波形
- ("rf-%02.f-%03.f.st.sac", inci, win_len) : 未归一化的T分量反褶积波形
- ("rf-%02.f-%03.f.nsl.sac", inci, win_len) : 振幅归一化的L分量反褶积波形(SRF)
- ("rf-%02.f-%03.f.nsq.sac", inci, win_len) : 振幅归一化的Q分量反褶积波形
- ("rf-%02.f-%03.f.nst.sac", inci, win_len) : 振幅归一化的T分量反褶积波形

注:程序中默认循环 win_len=0:5:100; inci=0:4:60

spmove.joe
修改自Xiaohui Yuan

```
43 sac<<eof
44 cut -100 100
45 r rf*ns1.sac
46 w append .100.cut
47 cut off
48 r *.100.cut
49 reverse
50 w append rv
51 q
52 eof
53
54 for srfnm in `ls *100.cutrv`
55 do
56 $BIN/spmove.joe<<eof
57 $srfnm
58 $srfnm.rm
59 1
60 eof
61 done
62
63 sac<<eof
64 r *100.cutrv.rm
65 reverse
66 w append .rv
67 cut -30 30
68 r *100.cutrv.rm.rv
69 w append cut
70 cut off
71 q
72 eof
73 #Post CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
74 $BIN/GC_SRF_post
```

进入src文件夹，编译相关源码

```
cd src  
make clean  
make all  
cd ../
```

进入example01_kumar文件夹，执行sh脚本

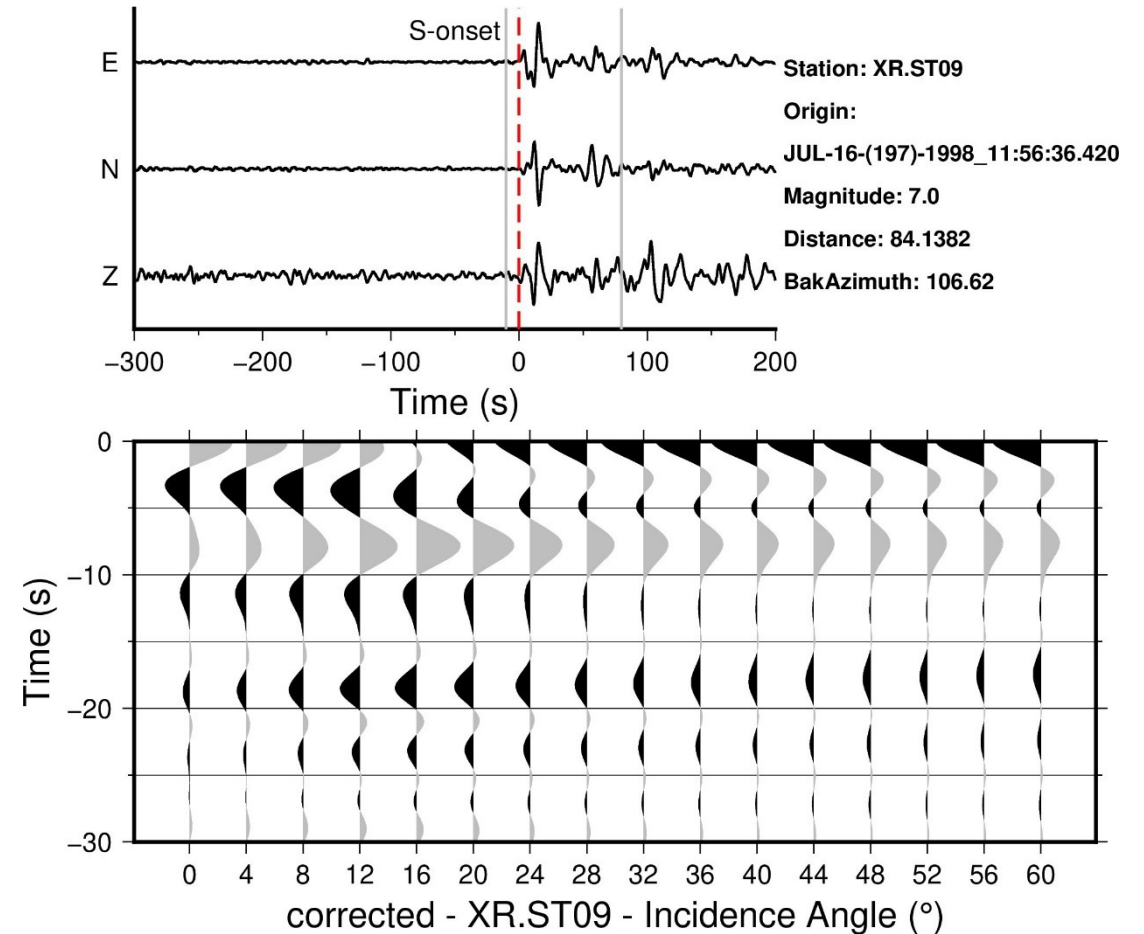
```
cd ./example01_kumar  
bash ./SX_Deconv_example_kumar.sh  
cd ../
```

必要工具和库

Linux

Taup GMT 6 SAC MPIC++ GCC

结果图件放置于example01_kumar/figs文件夹中



example02_gcsrf 操作流程

进入example02_gcsrf文件夹, 执行bash脚本

```
cd ./example02_gcsrf  
bash ./GC_SRF_example_syn.sh
```

然后执行绘图命令

```
python ./GC_SRF_plot.py
```

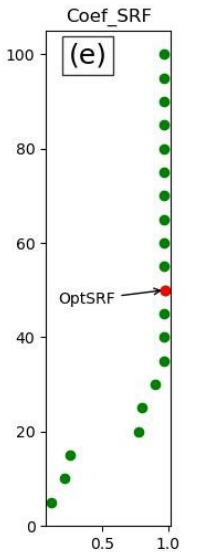
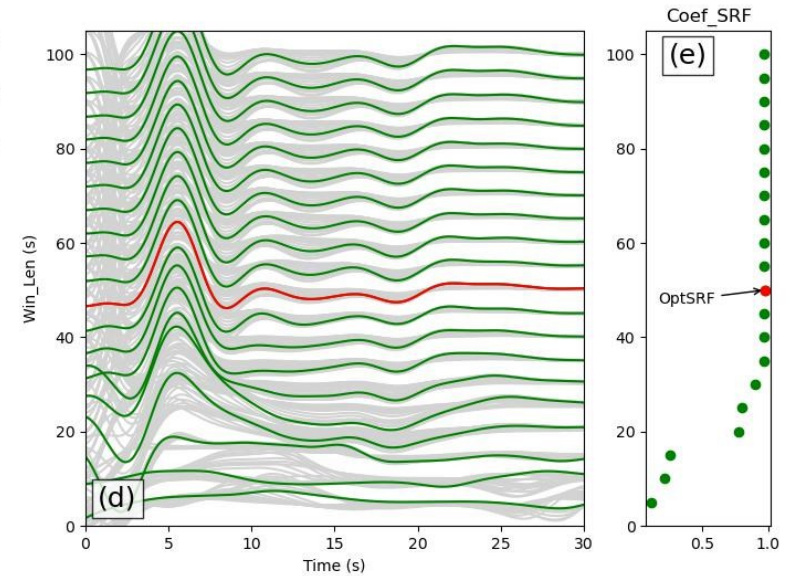
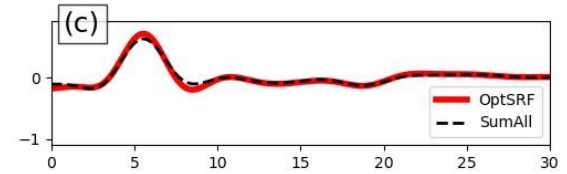
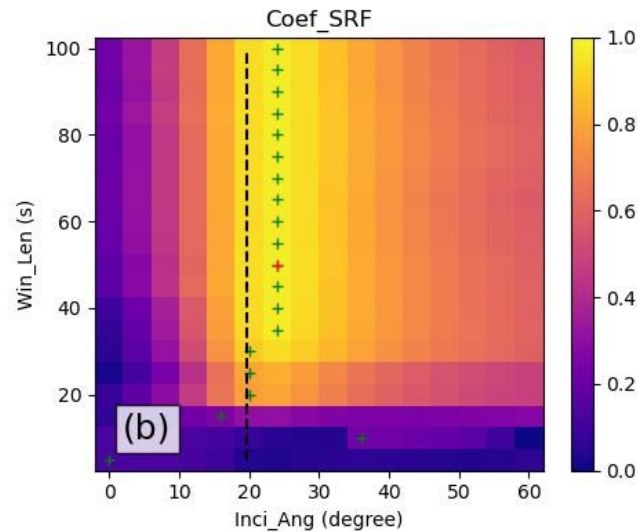
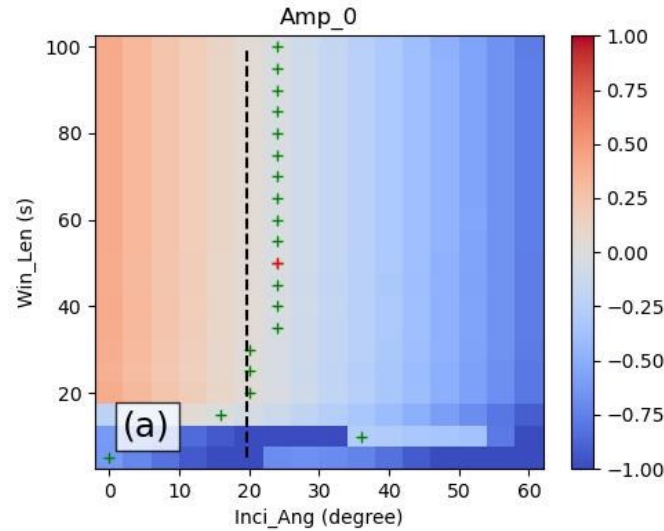
必要工具和库

Linux

Taup GMT 6 SAC MPIC++ GCC

Python Lib

obspy pandas numpy matplotlib



结果图件放置于example02_gcsrf/figs文件夹中

单台S波接收函数的RMSE排序和筛选

- Section002/

- **Plot_RMSE.sh**
- README.md
- data/
 - CQ.ROC/
 - SC.MGU/
 - **Do_RMSE.sh**
 - Silent_FiltRMSE.m
 - fdd.lst
 - readsac.m
- figs/
- tmp/

RMSE
绘图脚本

单台原始S波接收函数数据

RMSE
排序计算脚本

操作流程

进入Section002/data/文件夹中，对单台数据进行RMSE排序操作，linux执行命令

```
cd ./data/  
bash Do_RMSE.sh  
cd ../
```

在Section002文件夹中，直接执行bash脚本

```
bash ./Plot_RMSE.sh CQ.ROC
```

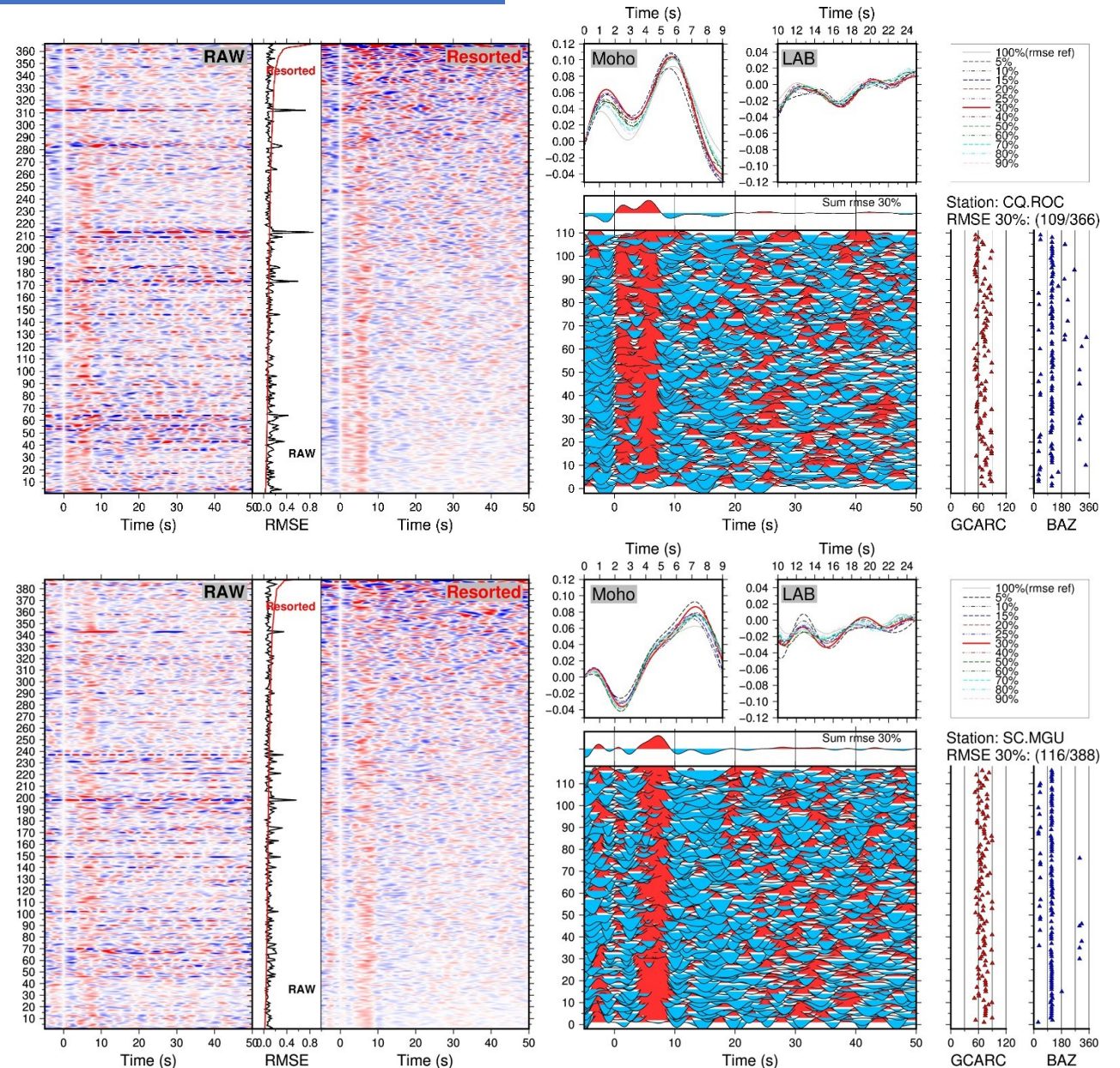
完成后继续执行bash脚本

```
bash ./Plot_RMSE.sh SC.MGU
```

必要工具和库

GMT6 SAC octave

结果图件放置于/figs文件夹中



Section003 : S波接收函数成像

以PSDM程序包为基础构建的python Runner

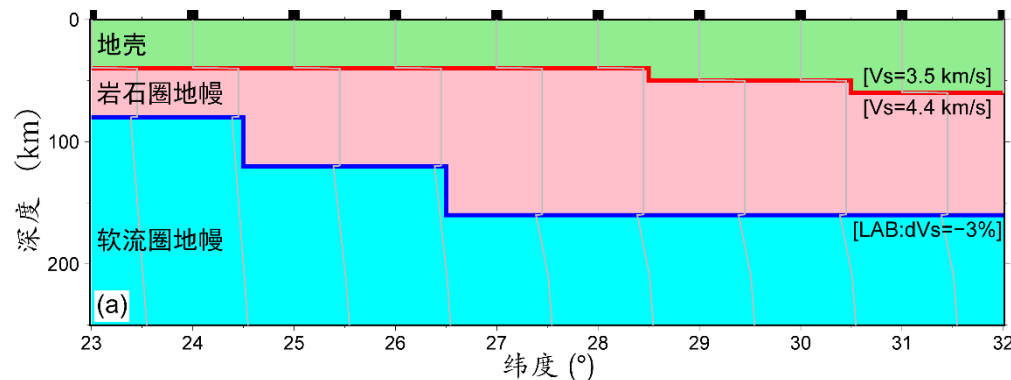
- Section003/
 - README.md
 - `example001_pyPSDM_runner_CDMOD.py`
 - `example002_pyPSDM_runner_IASP.py`
 - data_gcsrf/
 - figs/
 - mod/
 - psdm/

自定义速度模型的
偏移成像案例脚本

IASP91速度模型偏
移成像案例脚本

理论S波接收函数数据集
qseis理论波形->GC_SRF计算

PSDM成像工作目录, 成像代码
来自陈凌研究员课题组



演示案例

在Section003文件夹中，直接执行python脚本

```
python example001_pyPSDM_runner_CDMOD.py  
python example002_pyPSDM_runner_IASP.py
```

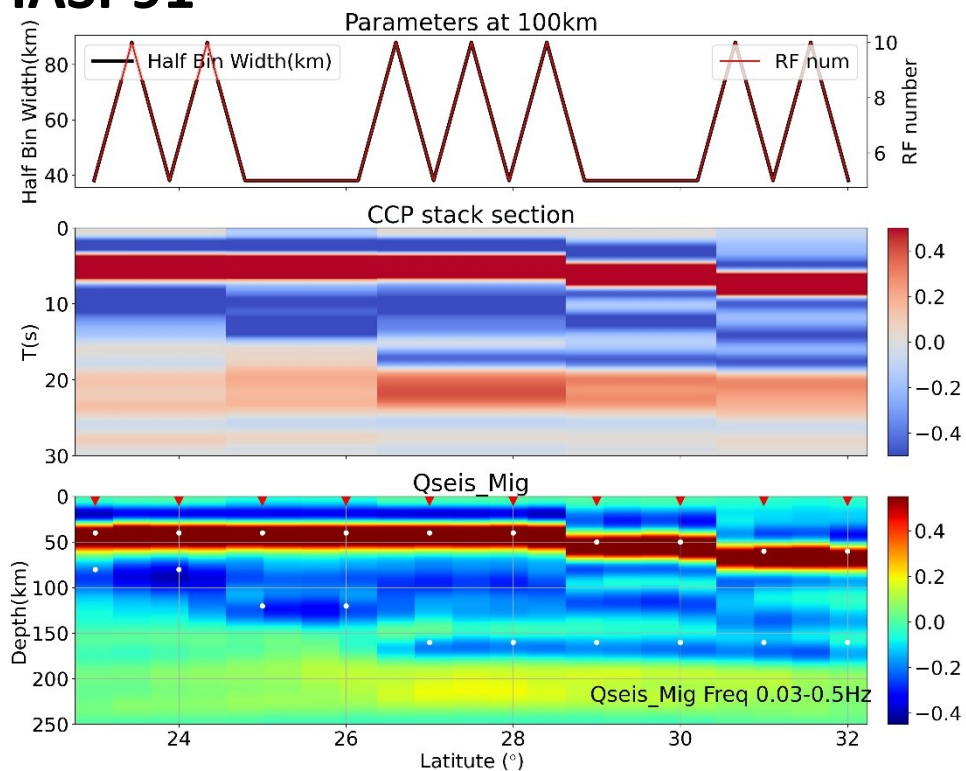
必要工具和库

SAC

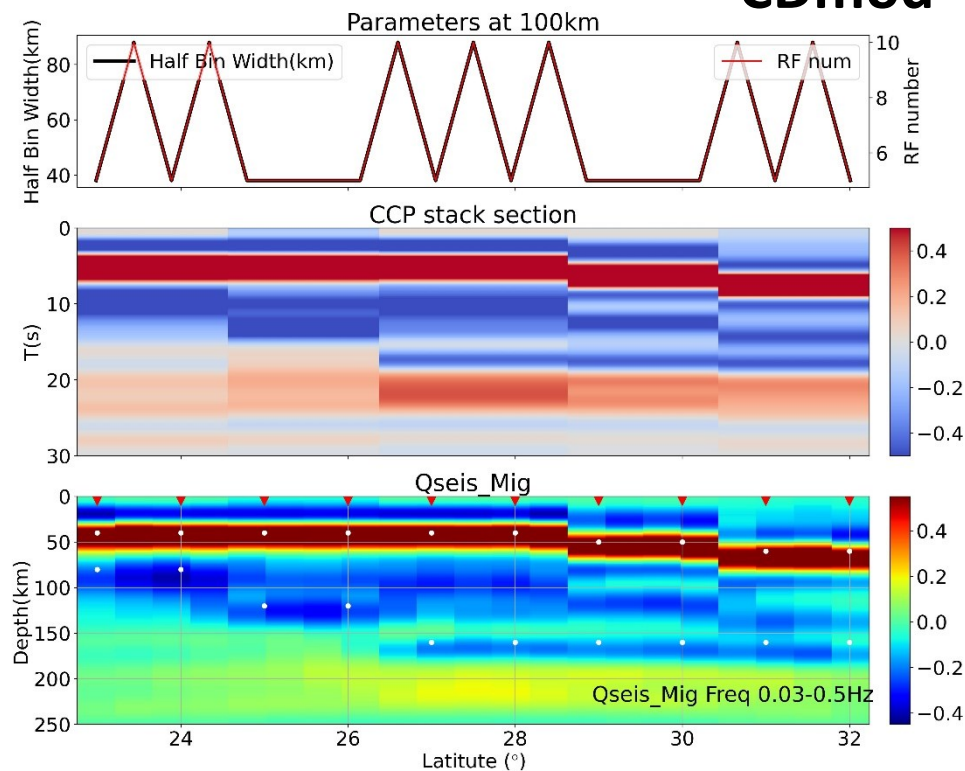
obspy numpy pandas scipy matplotlib

结果图件放置于/figs文件夹中

IASP91



CDmod



参考文献

GC_SRF策略, 请引用:

Zhang Z., & Deng Y. (2022). A Generalized Strategy From S-Wave Receiver Functions Reveals Distinct Lateral Variations of Lithospheric Thickness in Southeastern Tibet. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 23(11). <https://doi.org/10.1029/2022GC010619>.

脉冲反褶积计算, 请附加引用:

Stammler, K. (1993). “Seismichandler Programmable Multichannel Data Handler for Interactive and Automatic Processing of Seismological Analyses.” *Computers & Geosciences*, 19, no. 2 135–40. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(93\)90110-q](https://doi.org/10.1016/0098-3004(93)90110-q).

Treitel, S., & Robinson, E. (1966). Seismic wave propagation in layered media in terms of communication theory. *Geophysics*, 31(1), 17– 32. <https://doi.org/10.1190/1.1439729>.

Robinson, E., & Treitel, S. (2000). *Geophysical signal analysis*. Society of Exploration Geophysicists. <https://doi.org/10.1190/1.9781560802327>.

PSDM成像, 请附加引用:

Chen, L., Wen, L., & Zheng, T. (2005a). A wave equation migration method for receiver function imaging: 1. Theory. *Journal of Geophysical Research*, 110 (B11). <https://doi.org/10.1029/2005JB003665>.

Chen, L., Wen, L., & Zheng, T. (2005b). A wave equation migration method for receiver function imaging: 2. Application to the Japan subduction zone. *Journal of Geophysical Research*, 110 (B11). <https://doi.org/10.1029/2005JB003666>.

Demo