



江门及周边地区综合三维地质模型构建

汇报人：习宇飞

中国地质科学院水文地质环境地质研究所

第三届地下和空间粒子物理与宇宙物理前沿问题研讨会

2024年5月10日，西昌

目录

CONTENTS

1 项目简介

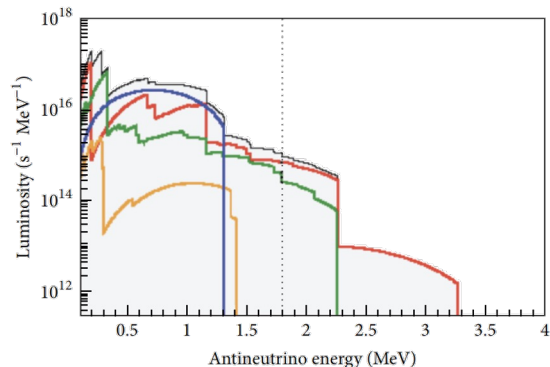
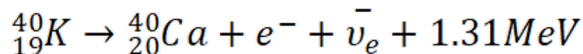
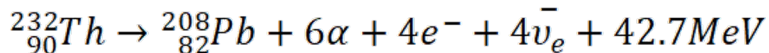
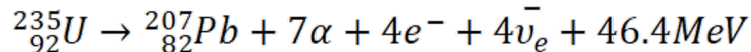
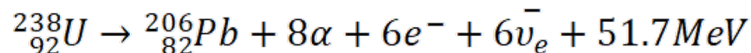
2 研究区结构模型

3 研究区放射性元素丰度分布

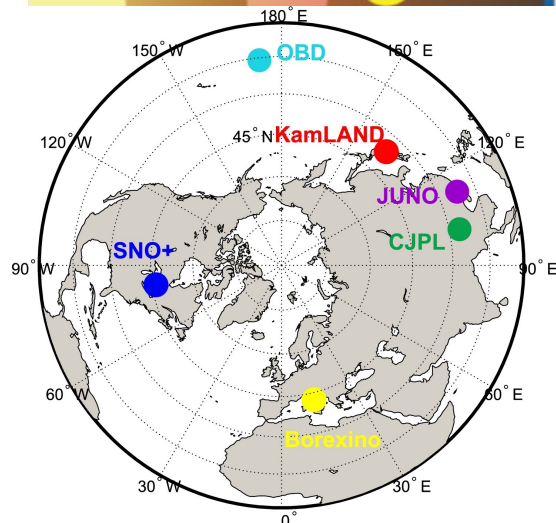
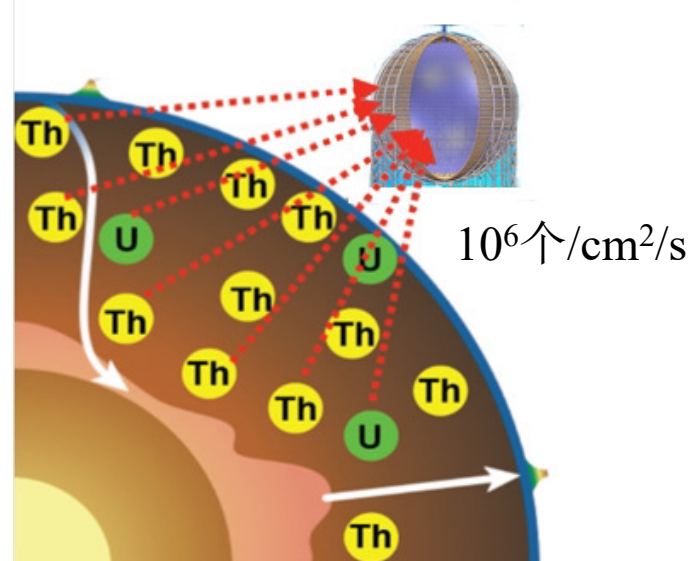
地球中微子简介

地球中微子 Geoneutrino ($\bar{\nu}_e$)，地球内部放射性元素天然衰变产生的反电子中微子。

反 β 衰变链 ($^{238}\text{U}, ^{235}\text{U}, ^{232}\text{Th}, ^{40}\text{K}$):



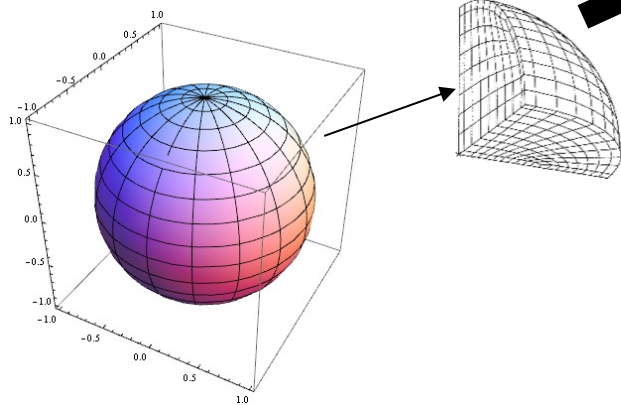
— ^{238}U series — ^{232}Th series
 — ^{235}U series — ^{40}K



地球中微子通量计算

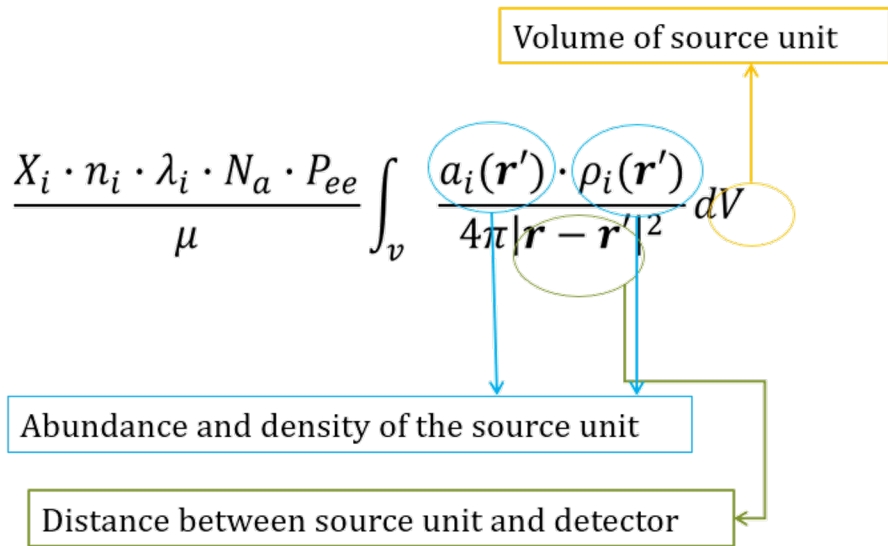
计算地球中微子通量需要的地球信息:

- 实验站位置
- 地球结构
- 地层密度
- U和Th丰度分布



地球网格剖分

$$\Phi_i(\mathbf{r}) = F_i^* \int_V \frac{a_i(\mathbf{r}') \cdot \rho_i(\mathbf{r}')}{4\pi|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^2} dV$$

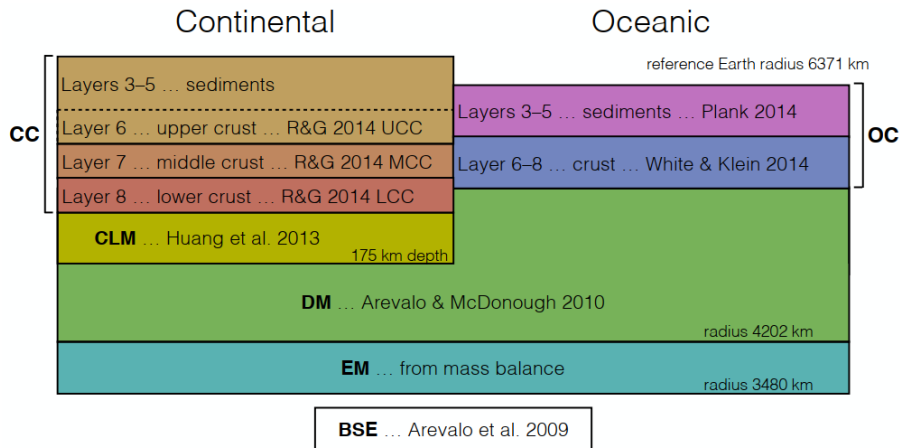
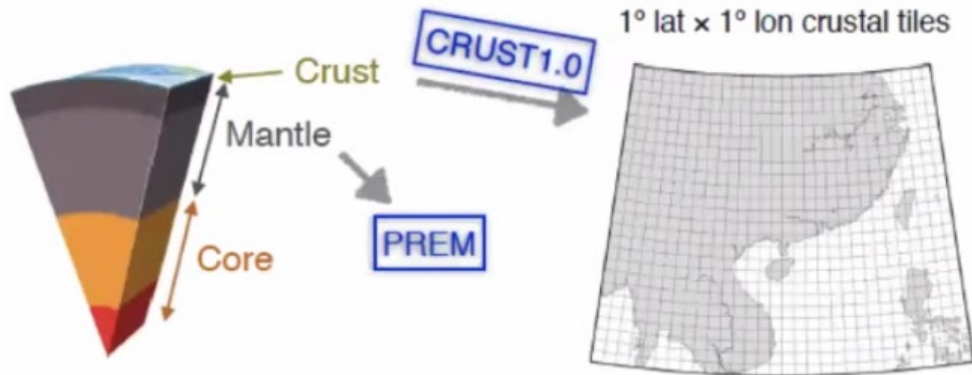


Geological inputs of Geoneutrino flux(TNU)

Earth structure (ρ and L) and **chemical composition** (a)

全球地球物理和地球化学模型

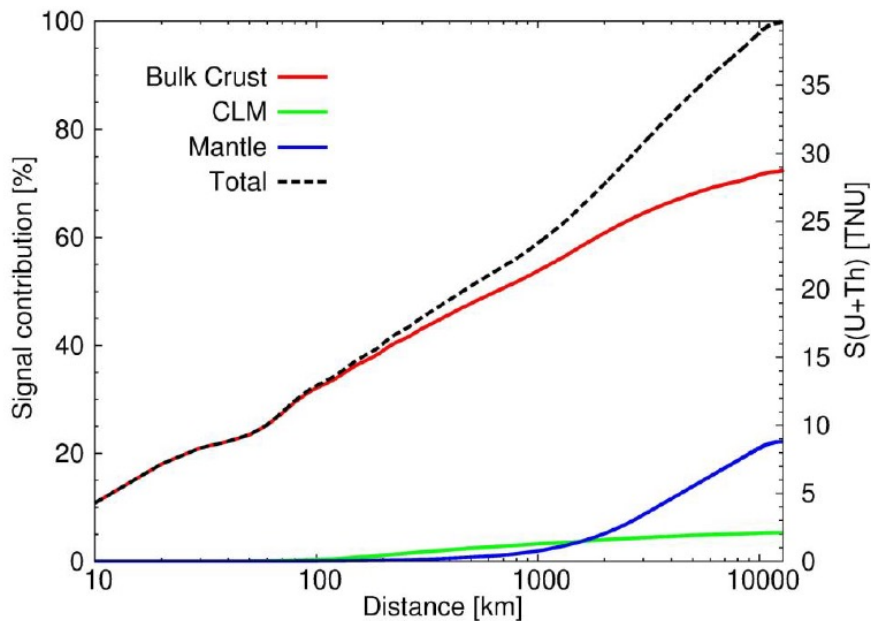
- ◆ 全球地壳地球物理模型：CRUST1.0 (深度和密度)
- ◆ 全球地幔地球物理模型：PREM模型
- ◆ 全球地球化学模型：平均U和Th丰度
- ◆ 认为地核的U和Th元素可忽略不计



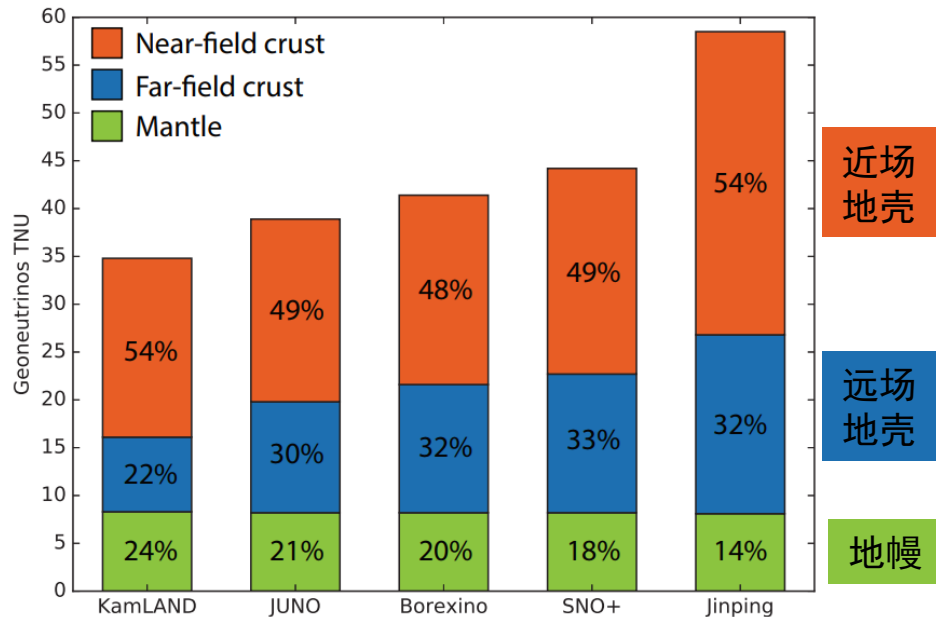
	K	Th	U	Ref.
Upper CC + sediments	$(2.32 \pm 8\%) \times 10^{-2}$	$(10.5 \pm 10\%) \times 10^{-6}$	$(2.7 \pm 21\%) \times 10^{-6}$	64
Middle CC	$(1.91 \pm 14\%) \times 10^{-2}$	$(6.5 \pm 8\%) \times 10^{-6}$	$(1.3 \pm 31\%) \times 10^{-6}$	64
Lower CC	$(0.51 \pm 30\%) \times 10^{-2}$	$(1.2 \pm 30\%) \times 10^{-6}$	$(0.2 \pm 30\%) \times 10^{-6}$	64
OC sediments	$(1.83 \pm 7\%) \times 10^{-2}$	$(8.10 \pm 7\%) \times 10^{-6}$	$(1.73 \pm 5\%) \times 10^{-6}$	69
OC crust	$(716 \pm 30\%) \times 10^{-6}$	$(0.21 \pm 30\%) \times 10^{-6}$	$(0.07 \pm 30\%) \times 10^{-6}$	70
CLM	$315^{+432}_{-183} \times 10^{-6}$	$150^{+277}_{-97} \times 10^{-9}$	$33^{+49}_{-20} \times 10^{-9}$	15
Depleted Mantle	$(152 \pm 20\%) \times 10^{-6}$	$(21.9 \pm 20\%) \times 10^{-9}$	$(8.0 \pm 20\%) \times 10^{-9}$	71
Enriched Mantle*	$402^{+350}_{-238} \times 10^{-6}$	$147^{+74}_{-57} \times 10^{-9}$	$30^{+24}_{-18} \times 10^{-9}$	
Bulk Silicate Earth	$(280 \pm 21\%) \times 10^{-6}$	$(80 \pm 15\%) \times 10^{-9}$	$(20 \pm 20\%) \times 10^{-9}$	72

Sramek et al (2016)

全球岩石圈的地层对实验站的贡献



Strati et.al(2014)



*近场地壳是实验站周边 $6^{\circ} \times 4^{\circ}$ 范围地壳
 *远场地壳是除去近场地壳之外的全球地壳

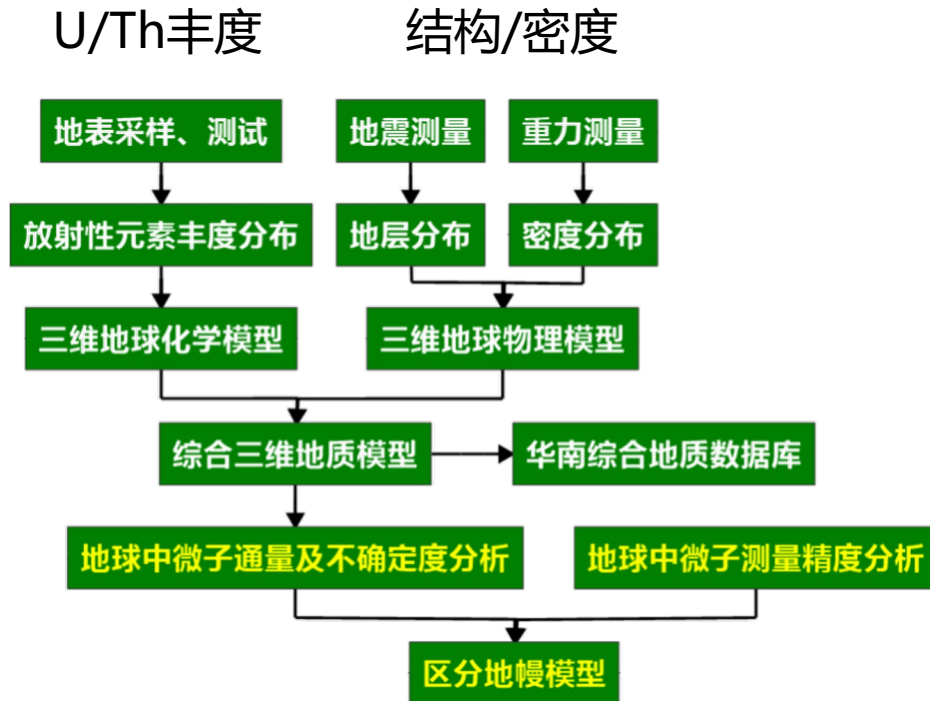
Sramek et al (2016)

工作目标

项目：高精度反应堆中微子与天体中微子物理研究 课题4：地球中微子研究

任务书：江门实验站周围 500 公里的近场范围内，通过重力、地震方法进行地下结构研究，通过岩石物性进行地下成分研究，最终将建立综合信息数据库和精确的 3D 地壳模型，准确计算近场地球中微子的贡献，进而研究测量地幔中微子的能力。

江门实验站周围500km范围



近场模型要素：结构、密度、丰度

研究区地质特征

- 华南大陆边缘，涉及洋、陆不同性质的地壳
- 岩石圈减薄
- 岩浆多次侵入，高放射性花岗岩广泛分布

共通问题

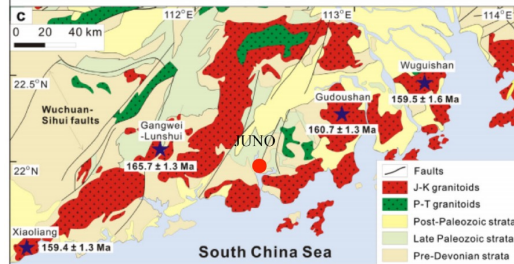
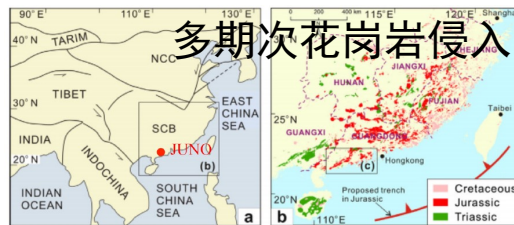
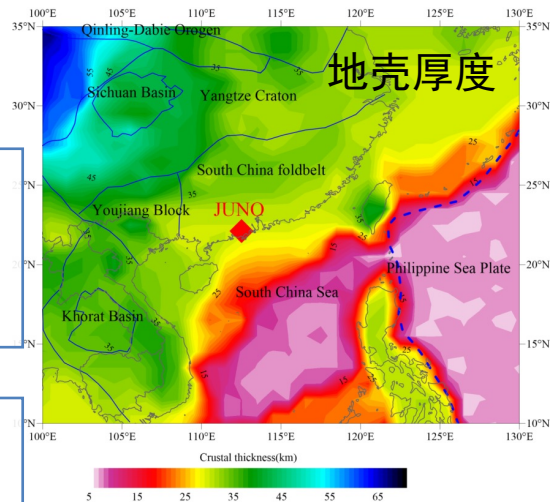
- 地表的密度和丰度都可以测量获得
- 随深度的变化如何判断
- 不确定度的计算

不同之处

- 密度从地表到地幔差异不到一倍，研究地球内部密度分布的方法相对成熟
- U/Th丰度差异可达数十倍，研究手段有限

本次工作

- 密度和丰度两个参数并非孤立，都与岩性和地震波速密切相关，建立耦合了密度、丰度等岩性的综合三维地质模型

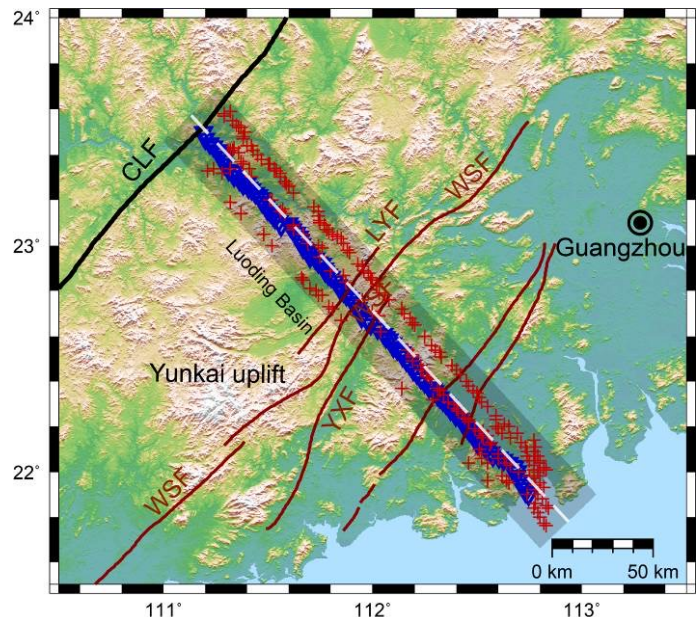


第二部分

研究区结构研究

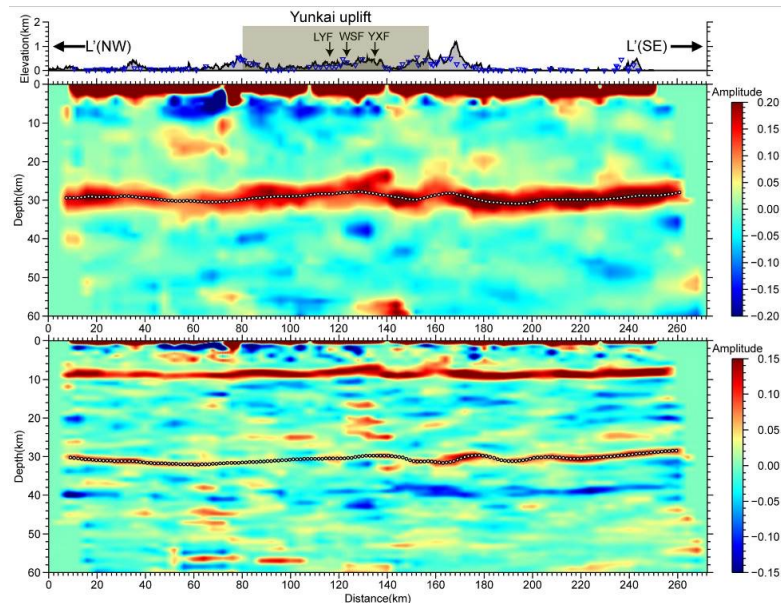
近场三维地壳结构研究

密集台阵布置工作（200km长，112台）



200km长的密集台阵获知地下结构信息，为构建三维地壳模型提供约束

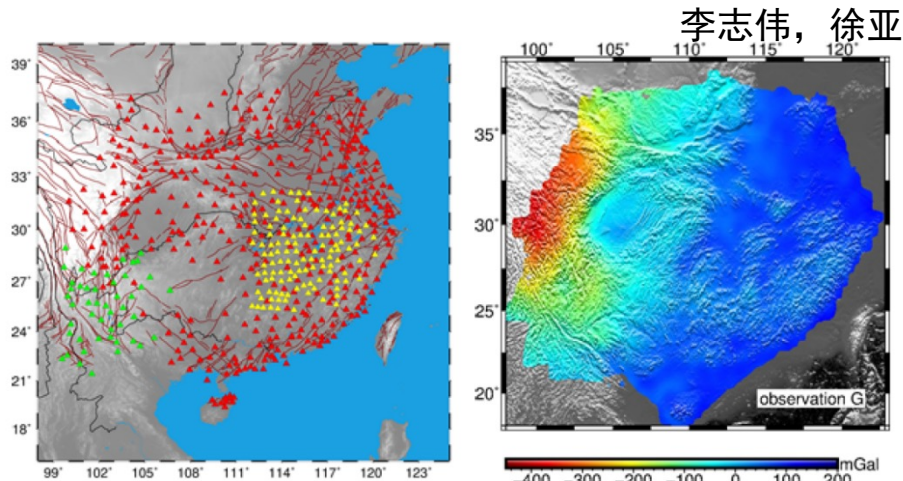
李志伟



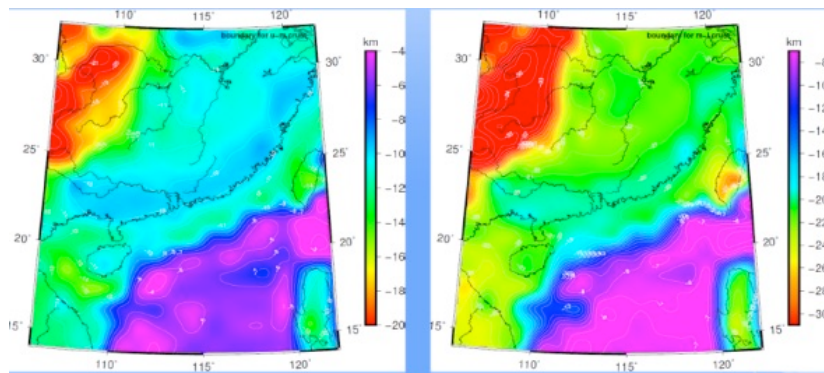
基于密集地震台阵获得JUNO附近地区可靠的地壳结构模型

近场三维地壳结构研究

- ◆ 全球地壳模型CRUST1.0误差较大，分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ，需要分辨率更高、更加精确的近场地壳模型。
- ◆ 基于地震数据，建立地壳结构模型。
- ◆ 地震背景噪声成像：加入200km密集台阵数据，更好约束地壳结构。
- ◆ 地震+卫星重力联合反演，改善结构模型、更好拟合重力数据、提高模型可靠性。



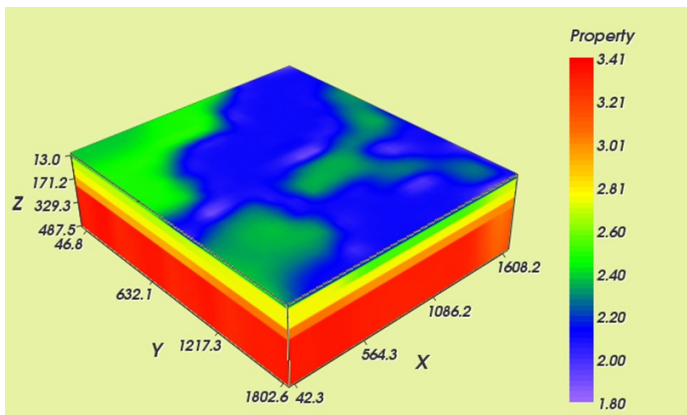
地震台阵分布和卫星重力



Crust1.0模型和优化后的近场地壳厚度

近场三维地壳密度分布

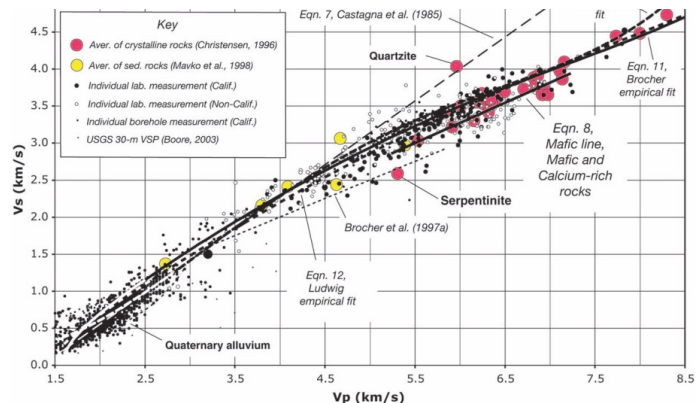
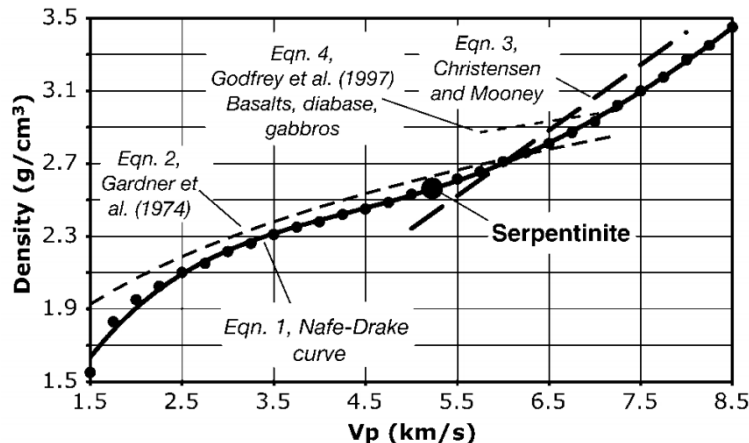
李志伟, 徐亚



地震波速和密度的经验公式

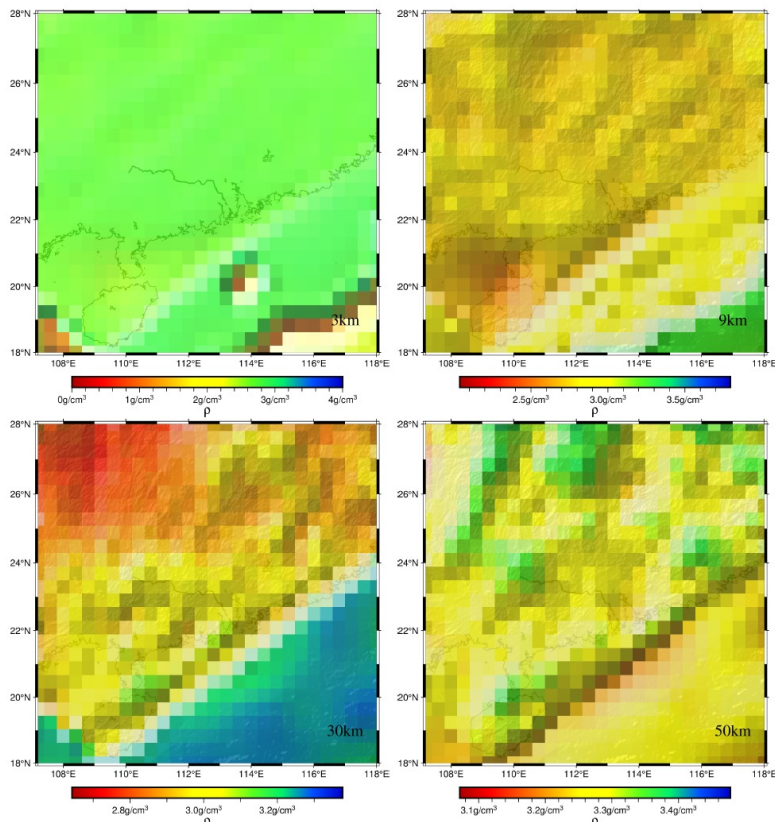
$$V_p(\text{km/sec}) = 0.9409 + 2.0947V_s - 0.8206V_s^2 + 0.2683V_s^3 - 0.0251V_s^4.$$

$$\rho(\text{g/cm}^3) = 1.6612V_p - 0.4721V_p^2 + 0.0671V_p^3 - 0.0043V_p^4 + 0.000106V_p^5.$$



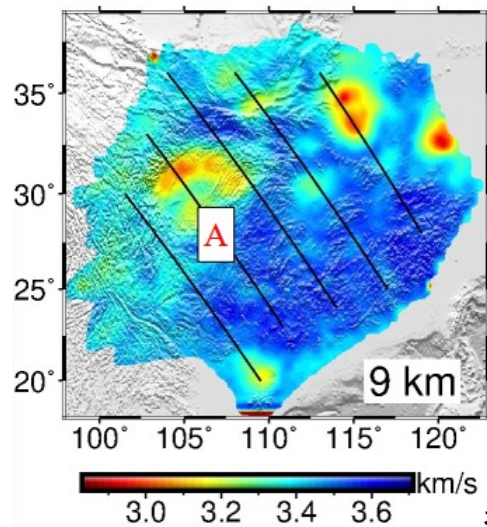
Brocher 2005

近场三维地壳密度分布

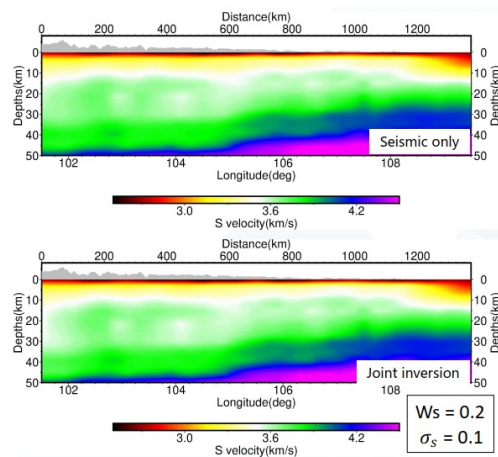


重震联合反演3D密度分布模型

Comparison of Vs at vertical slice



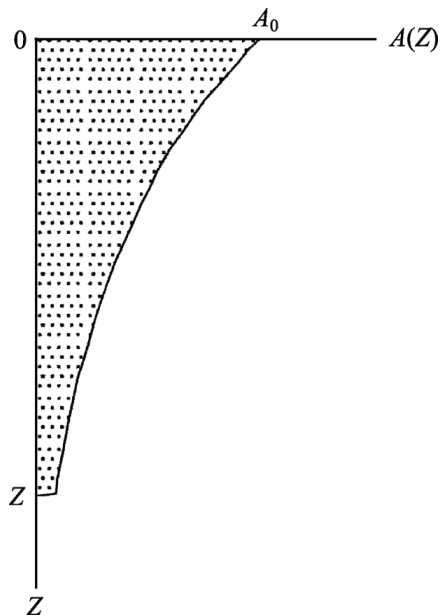
李志伟, 徐亚



第三部分

研究区放射性元素丰度分布

U和Th随深度变化：经验公式，波速，二氧化硅含量



生热率随指数衰减的经验公式

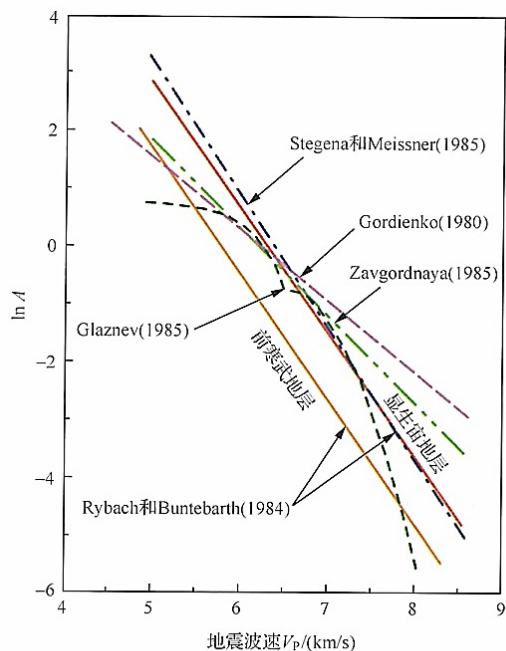


图 6-4 地震波速与生热率定量关系对比(据赵平,1995)

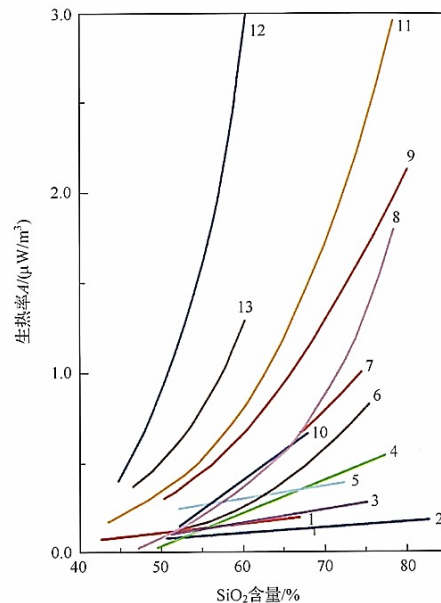
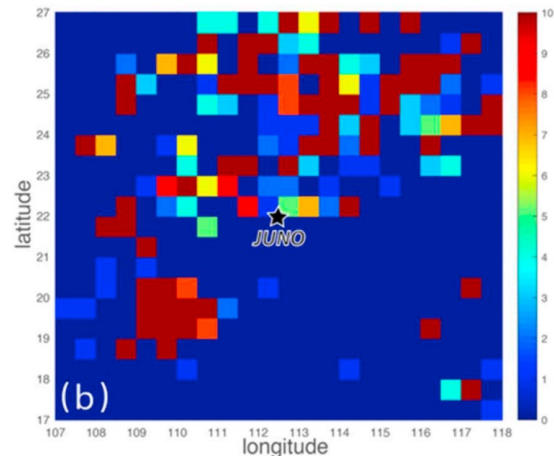
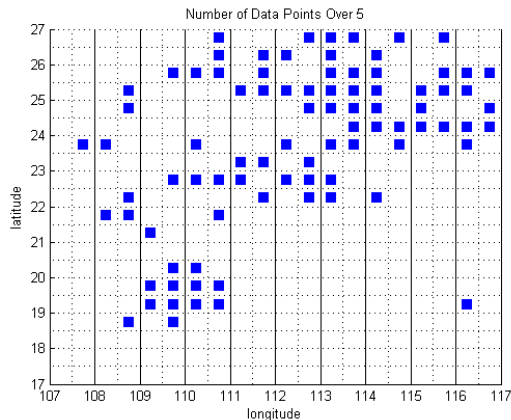


图 6-5 岩浆演化过程中 SiO_2 含量与生热率(A)的变化关系(据 Tilling et al., 1971)
 1-堪察加半岛; 2-马里亚纳群岛; 3-大加里波第山; 4-草莓山; 5-拉森岩体; 6-南加州岩基; 7-莫多克岩体; 8-朱梅山脉; 9-博学德岩体; 10-宾州迪尔斯堡岩体; 11-德州大弯岩体; 12-弗吉尼亚岩体; 13-熊掌山脉

近场模型丰度-岩性丰度统计

- 文献收集丰度数据3000+个，500km范围采集岩样1017个，50km范围采样253个，覆盖主要岩性。
- 对主量元素和微量元素丰度测试，统计不同岩性的丰度分布。

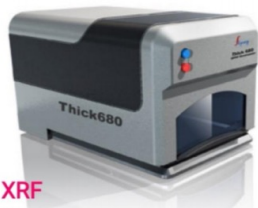


微量元素测试



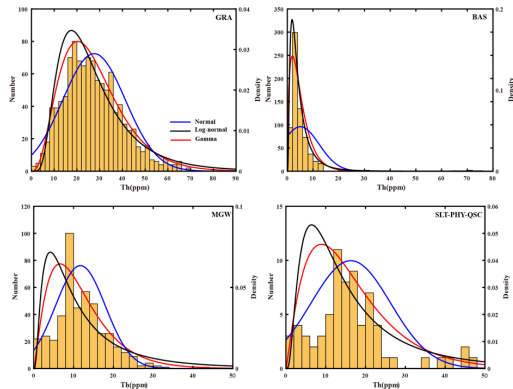
岩性	数量 (件)
花岗岩	138
砂岩	8
灰岩	3
低级变质岩	3
安山岩	2
总计	154

主量元素测试



岩性	数量 (件)
花岗岩	84
砂岩	4
灰岩	1
低级变质岩	6
泥岩	1
其它	4
总计	100

Part1



Carleton University Geoscience Laboratories, Canada

中国地质大学 (北京) 放射性同位素地球化学实验室

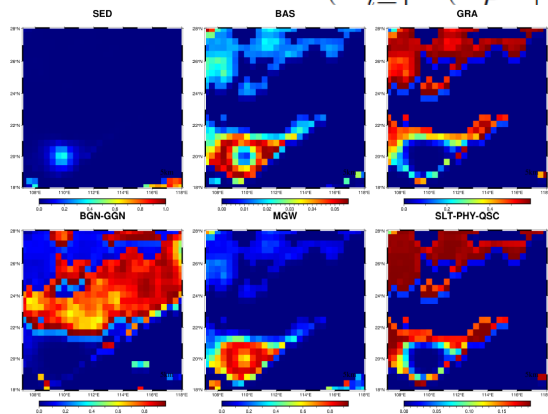
代表性岩性丰度PDF

近场模型丰度

先验岩性分布概率

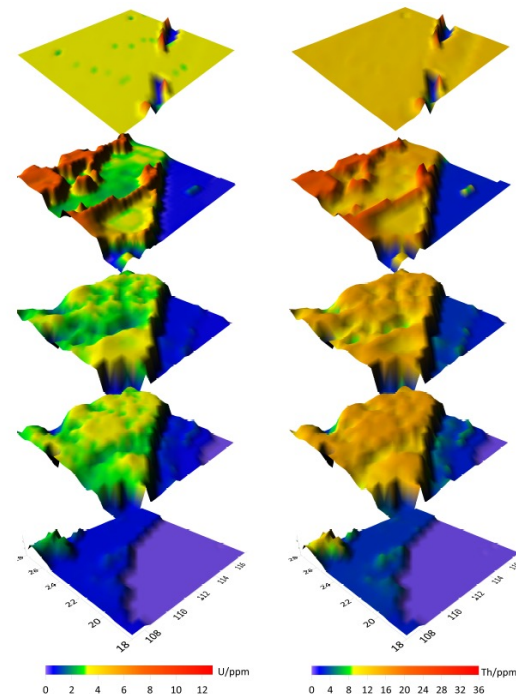
Upper Crust (UC)	Middle Crust (MC)	Lower Crust (LC)
SED 0.08	BGN-GGN 0.2	IGR 0.6
BAS 0.02	AMP 0.8	MGR 0.15
BGN-GGN 0.1		MPE 0.15
GRA 0.4		GAB 0.05
MGW 0.25		MTL 0.05
SLT-PHY-QSC 0.15		

岩性后验分布概率 $P(V_P^{obs}|i) = \frac{P(V_P^{obs}|i)P_x(i)}{(\sum_{i=1}^n P(V_P^{obs}|i)P_x(i))}$



5km深度，后验岩性分布概率

岩性分布概率结合岩性的丰度分布，可以得到丰度分布。

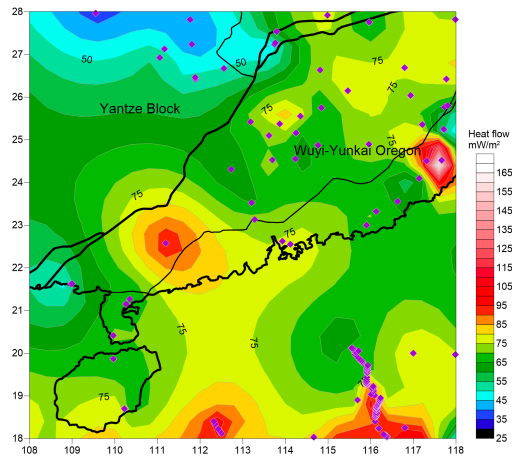


3-D U/Th 丰度分布图

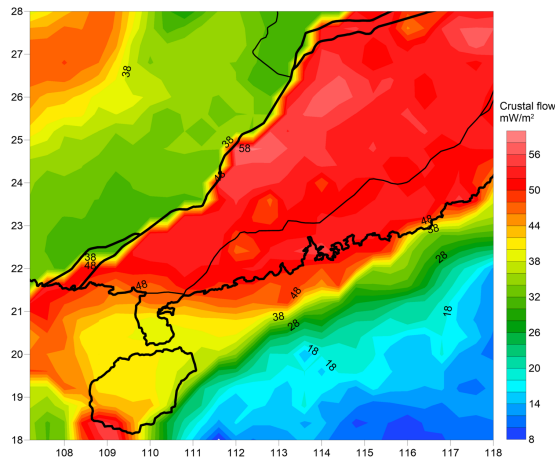
$0.4^\circ \times 0.4^\circ \times 1\text{km}$

地表热流对模型的检验

地表热流



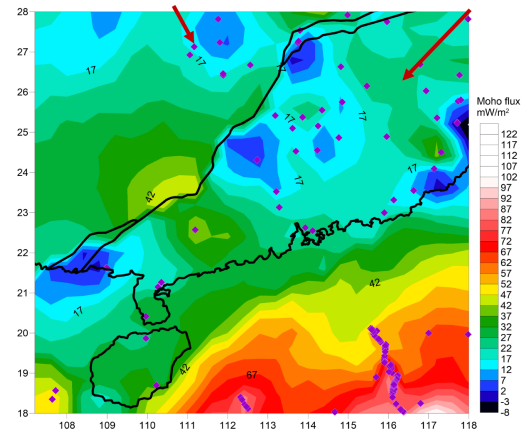
地壳热流贡献



地幔热流

$16.0 \pm 5.6 \text{ mW/m}^2$

$18.0 \pm 8.1 \text{ mW/m}^2$



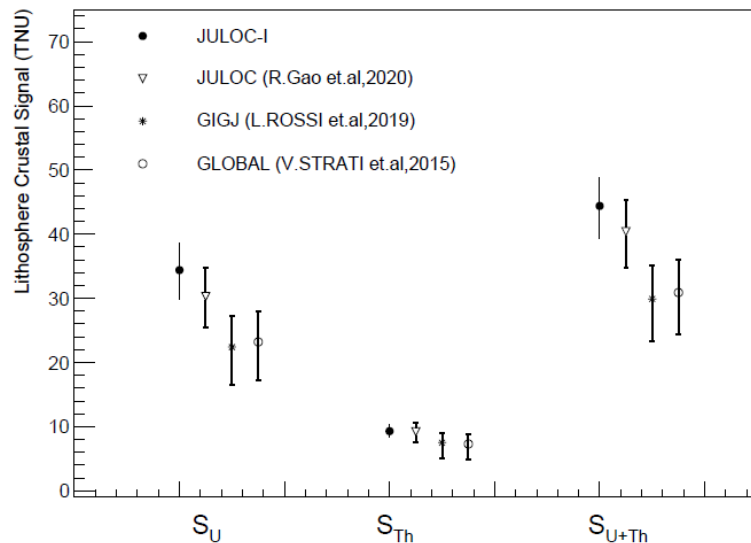
Jiang et al., 2019
Tectonophysics

Calculated based on JULOC-I model

地球中微子通量的计算

韩然

- ◆ 地壳中微子通量预测：信号显著增加的主要原因是华南地块上地壳的U/Th含量高于全球平均水平。
- ◆ 地球科学：这一发现与JUNO周边地区高U-Th花岗岩侵入体的广泛分布一致，也能够通过抽样调查结果和热流数据得到证实。



不同模型下，岩石圈地壳JUNO地球中微子通量

总结

01

综合交叉学科

多学科交叉

02

三维综合建模

结构模型：方法相对成熟，不确定度比较低

成分模型：项目的难点。综合地球物理、地球化学方法、利用地热模型约束

03

启示

针对区域地质特征，开展有针对性的相关工作





江门地球中微子合作小组

地球物理：李志伟（北京卫星环境工程研究所），徐亚（中科院地质与地球物理所）

地球化学：高若涵（中国地质大学北京）

地质：王安东（东华理工大学）

地热：习宇飞（地科院水文地质环境地质研究所）姜光政（成都理工大学）

粒子物理：韩然（北京卫星环境工程研究所），李玉峰（中科院高能所）
