

华南岩石圈热结构模型及构造意义

姜光政 习宇飞 王亚奇 胡圣标

成都理工大学

中国地质科学院水文地质环境地质研究所

中国科学院地质与地球物理研究所

2024年1月·开平

报告提纲

一、地球内部的热结构和放射性生热

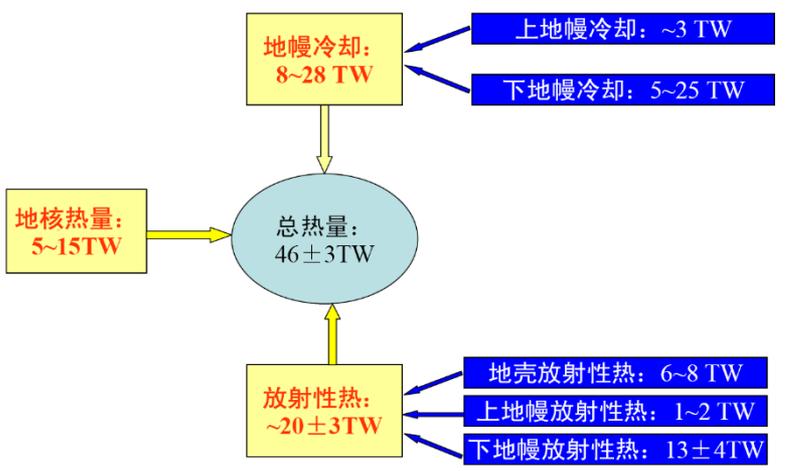
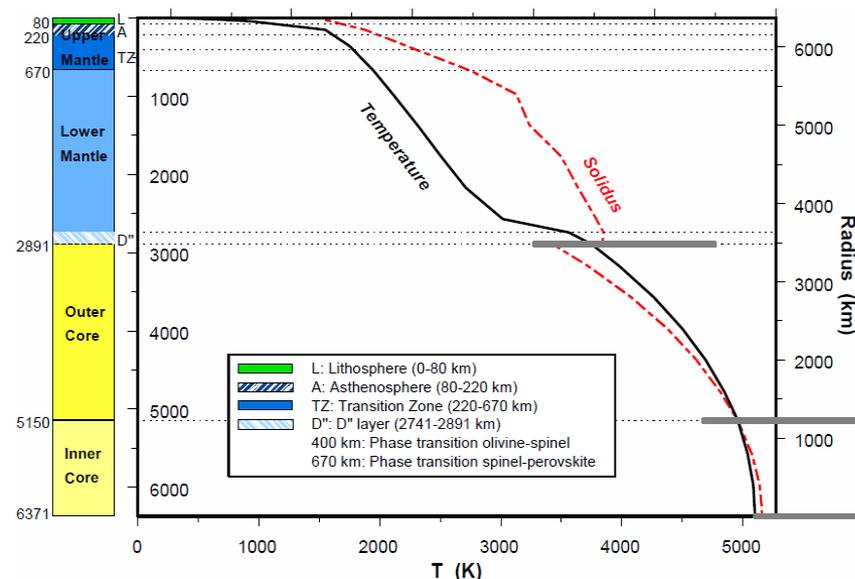
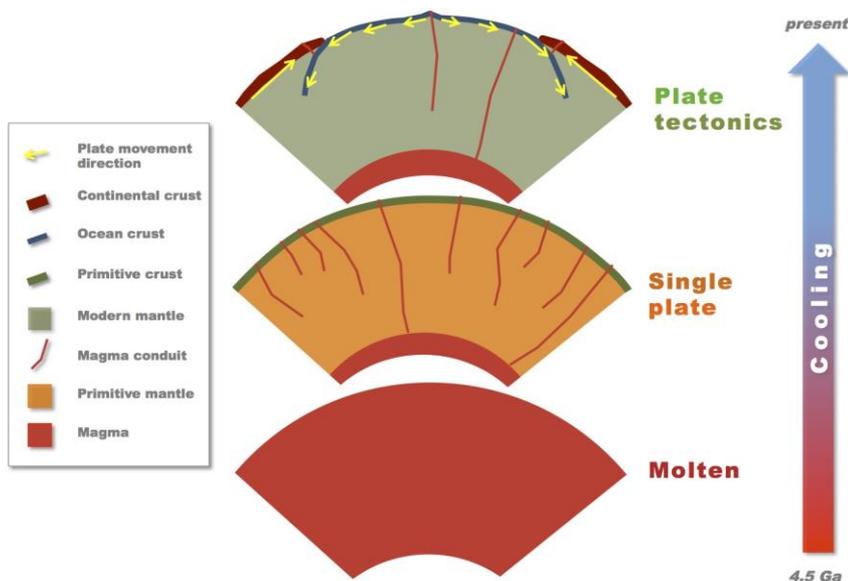
二、华南三维综合地热模型构建

三、华南地热与深部动力过程

四、地热模型的优势和局限性

岩石圈热结构

地球是个巨大的热库-不仅储热而且生热



大地热流功率**44**万亿瓦

50-80%来自放射性元素蜕变

其余部分来自行星演化余热

平均热流密度: **87mW/m²**

大陆: **65 mW/m²**

海洋: **101 mW/m²**

放射性生热对地表热流贡献

“回剥法” 计算壳、幔热流:

$$q_s = q_c + q_m$$

地表可测

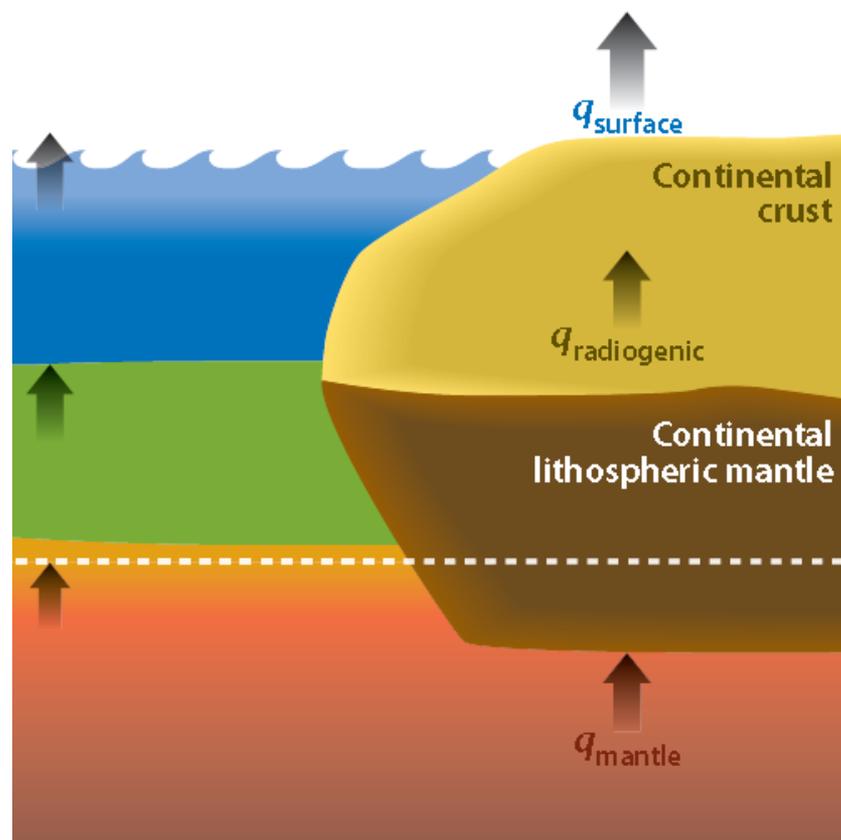
与岩石圈底界埋深
相关/1300等温面

$$q_c = \sum_0^n (A_i \cdot D_i)$$

q_s 地表热流, q_c 地壳热流, q_m 地幔热流

A_i 、 D_i 分别表示第*i*层生热率和厚度

大陆岩石圈热流构成示意图



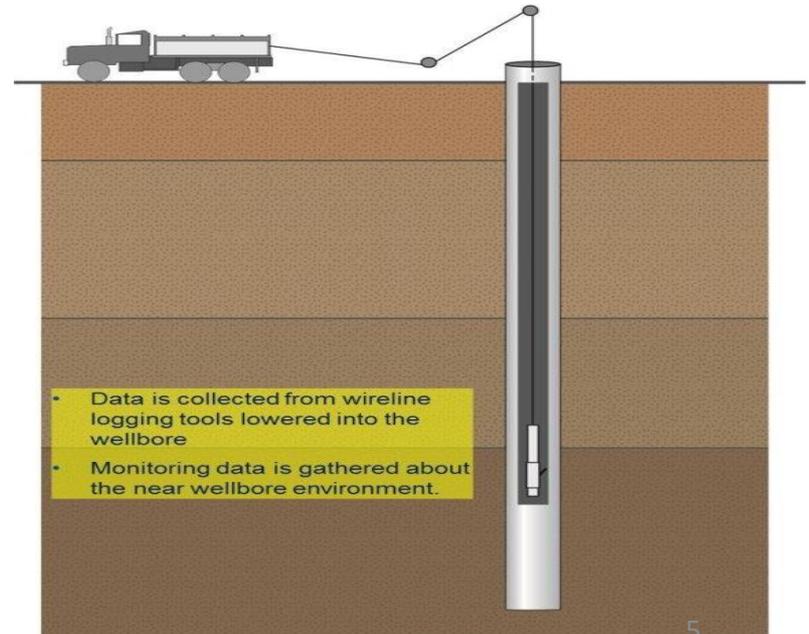
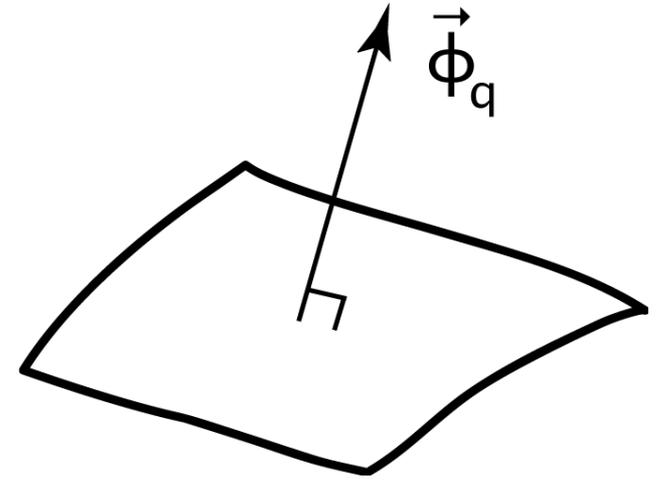
地表大地热流

地表大地热流

以**传导的形式**单位时间内通过单位地球表面积的热量：

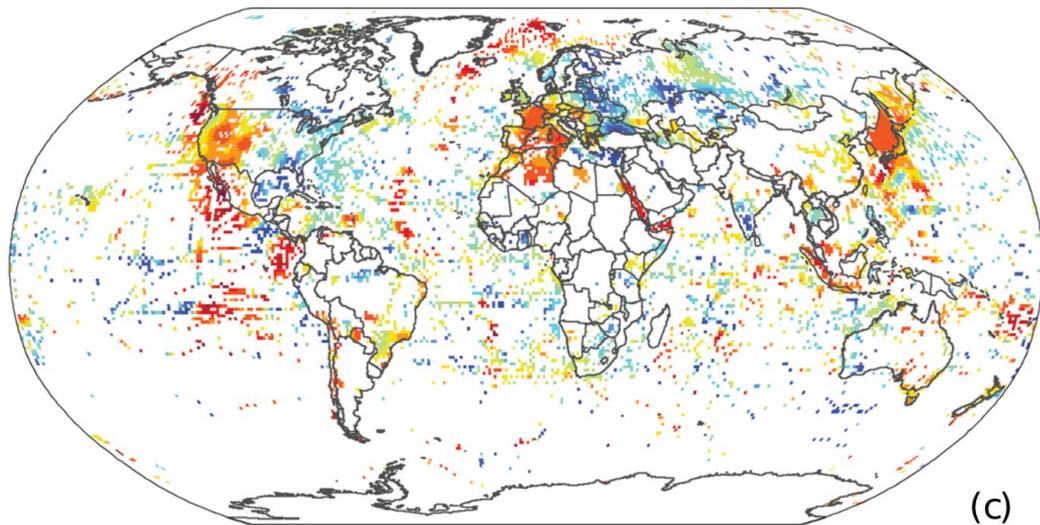
$$q = K \times (dT/dz)$$

热流 = 热导率 × 地温梯度

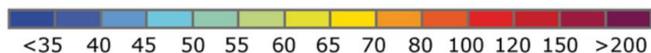


地表大地热流

全球热流测点分布图



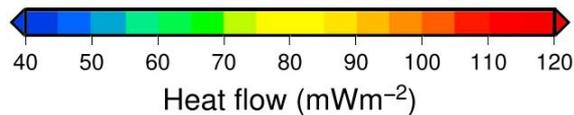
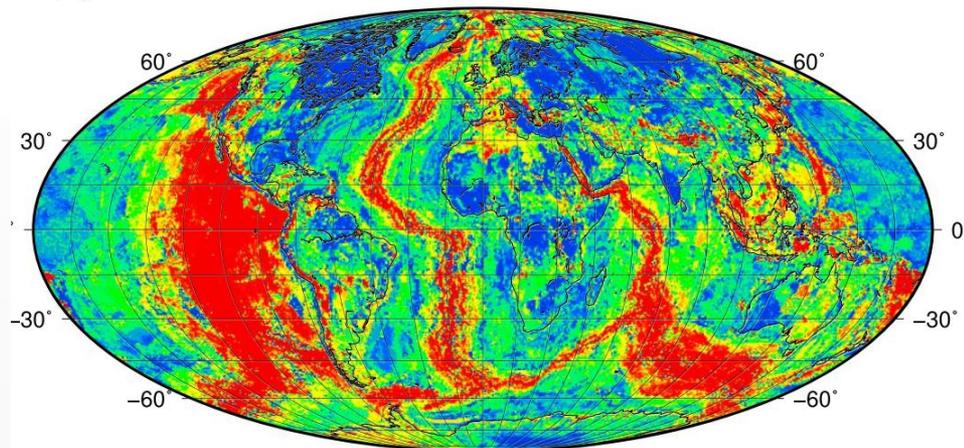
Heat flow (mW/m^2)



目前全球热流数据70000条，且逐年增加

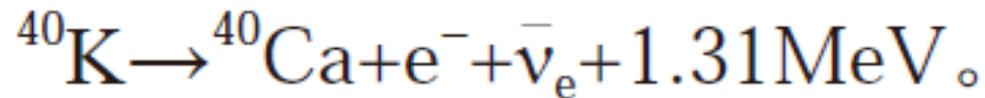
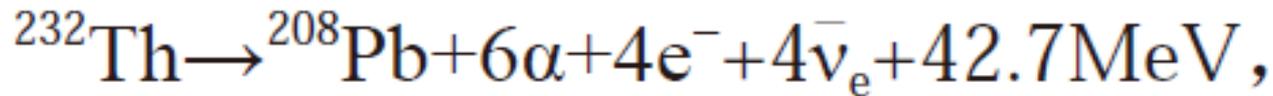
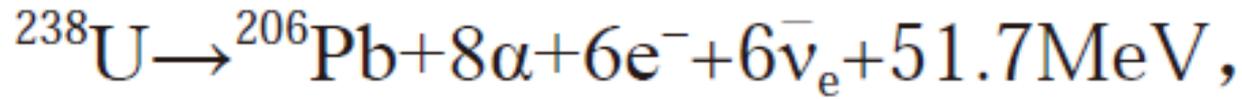
全球热流测点分布图

(c)



放射性生热

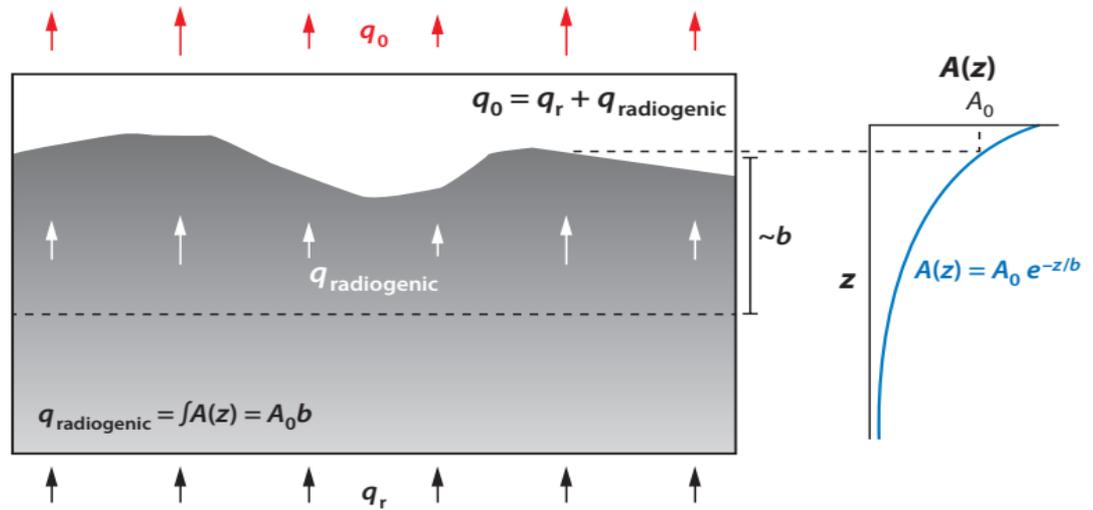
岩石放射性生热率是指单位体积的岩石在单位时间内由其所含的放射性元素衰变而产生的热量即为岩石放射性生热率，单位 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ 。



$$\text{生热率: } A = 10^{-5} \rho (9.25C_U + 2.56C_{\text{Th}} + 3.48C_K)$$

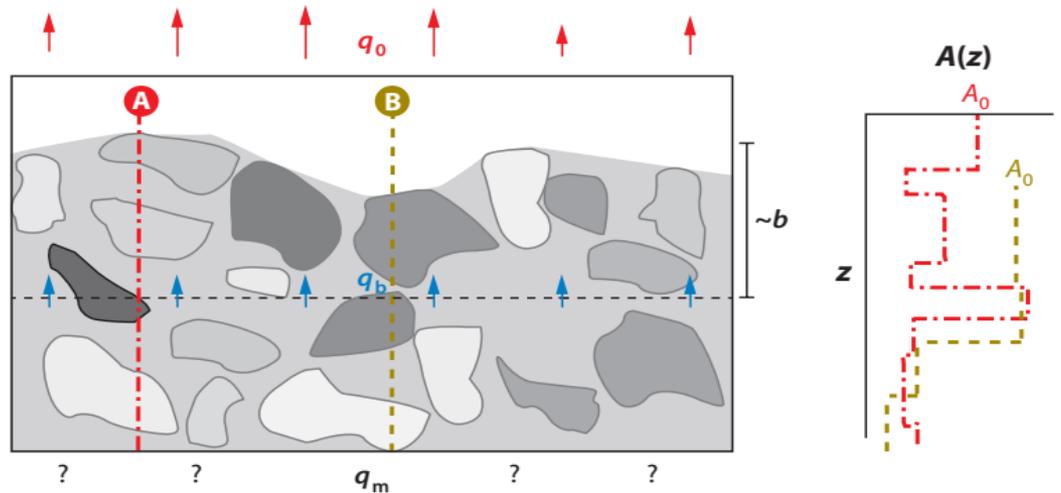
生热率及垂向分布模型

指数模型



Exponential model

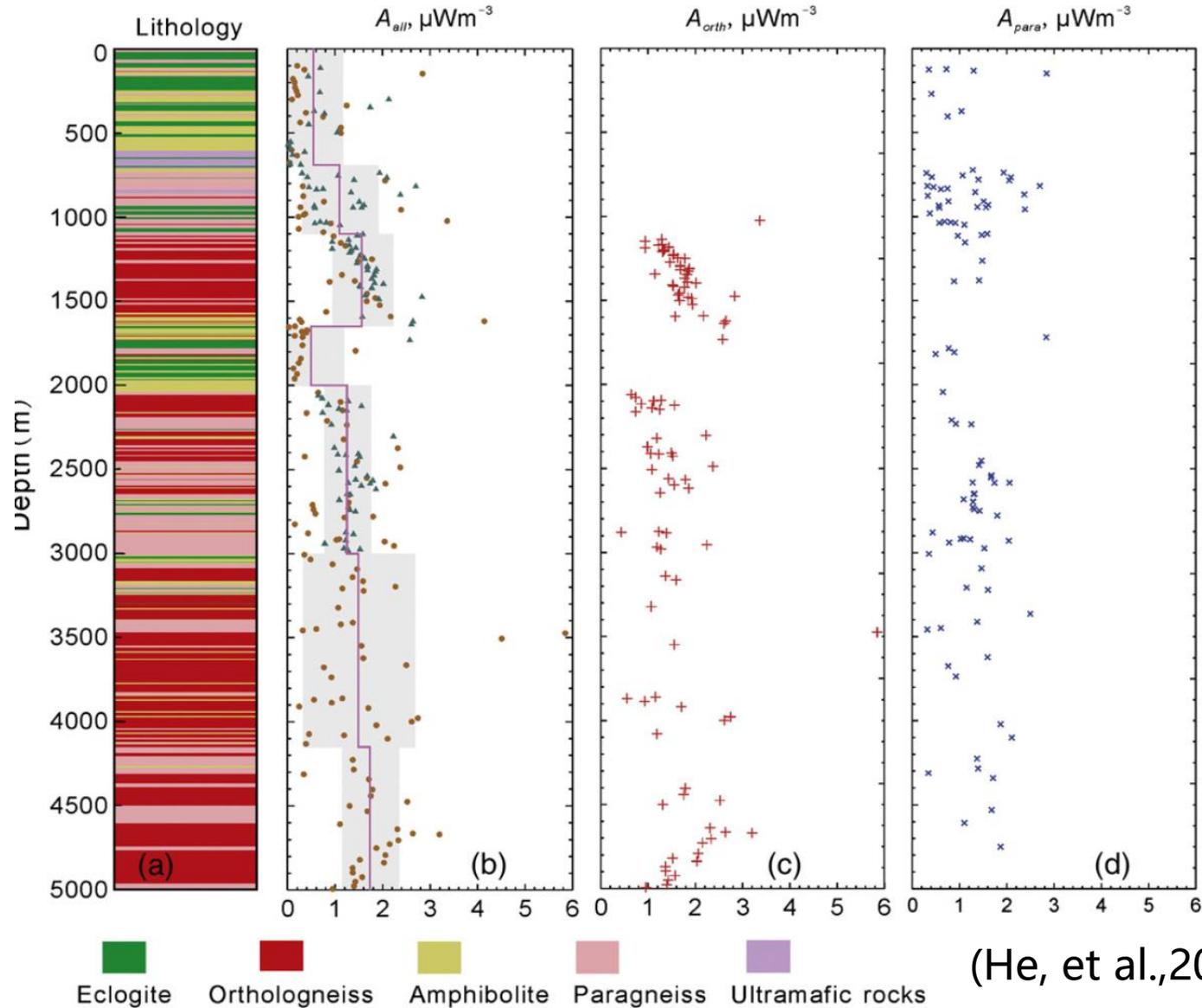
阶状模型



Heterogeneity model

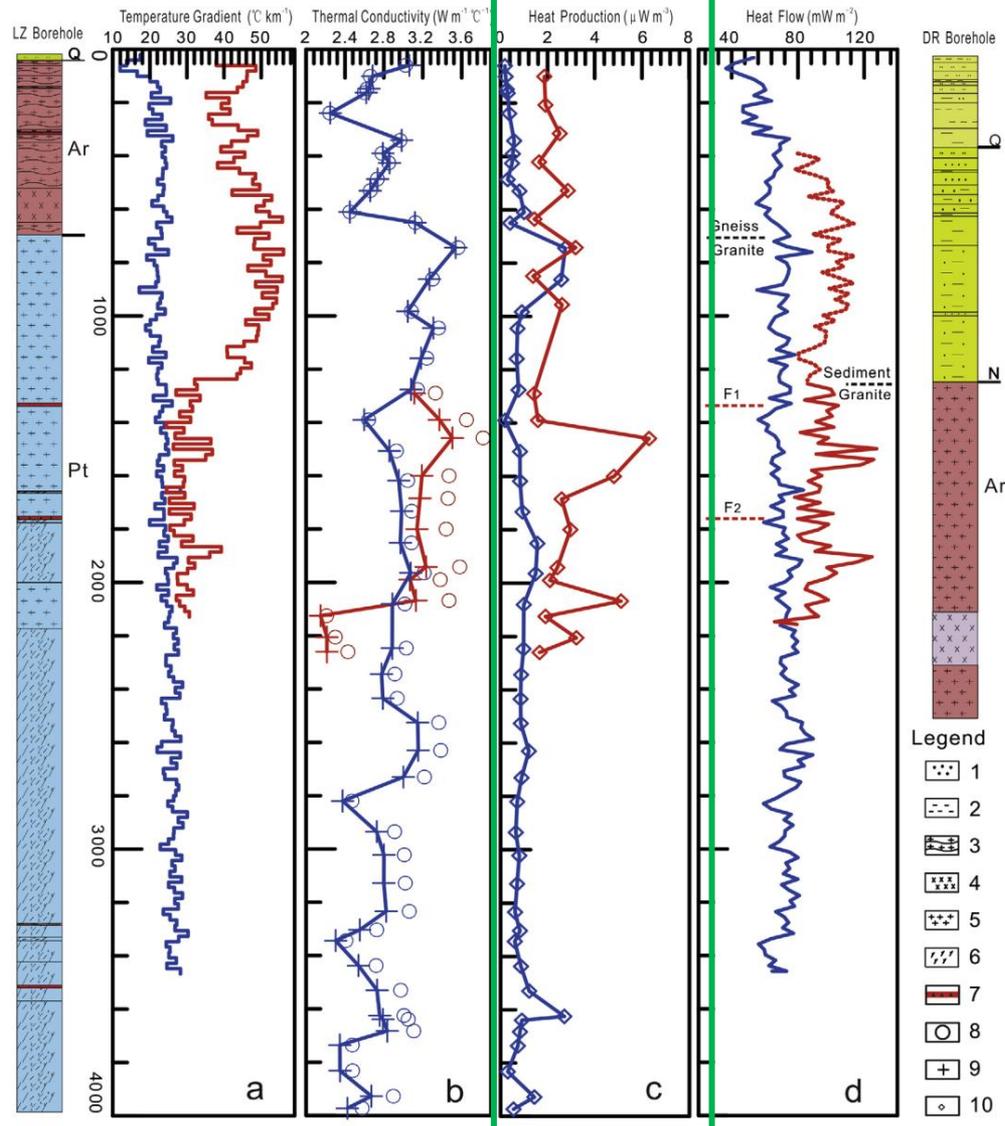
生热率及垂向分布模型

江苏东海中国大陆科学钻井生（CCSD-MH）热率垂向分布



生热率及垂向分布模型

山东莱州金矿探井生热率垂向分布



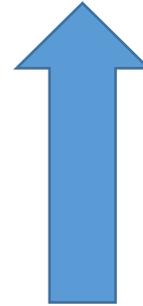
(Jiang, et al., 2016)

关键科学问题

问题

地球内部放射性元素分布

地球内部地幔热流贡献



切入点

多学数据 (地球化学、地球物理、中微子)

报告提纲

一、地球内部的热平和放射性生热

二、华南三维综合地热模型构建

三、综合地热模型的优势和局限性

报告提纲

一、地球内部的热结构和放射性生热

二、华南三维综合地热模型构建

三、华南地热与深部动力过程

四、地热模型的优势和局限性

计算方法

三维温度场数值模拟:

控制方程:

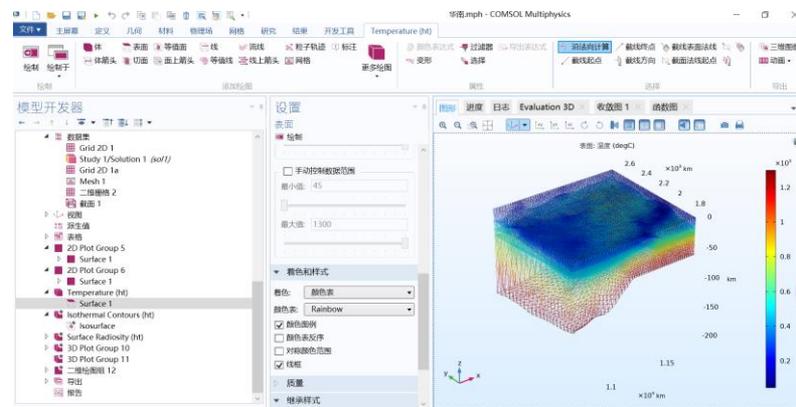
$$\frac{\delta}{\delta x} (k \frac{\delta T}{\delta x}) + \frac{\delta}{\delta y} (k \frac{\delta T}{\delta y}) + \frac{\delta}{\delta z} (k \frac{\delta T}{\delta z}) + A(x, y, z) = 0$$

上温度边界: $T(x, y, 0) = T_0(x, y)$

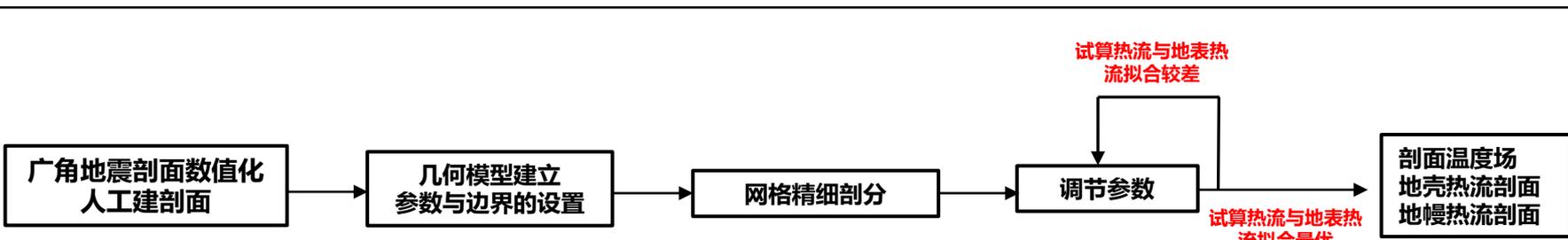
左右绝热边界: $\frac{\delta T}{\delta x}(x_1, z) = \frac{\delta T}{\delta y}(y_1, z) = \frac{\delta T}{\delta z}(x_2, z) = 0$

下热流边界: $T_b(x, y, zb) = T_m$

COMSOL 5.4a



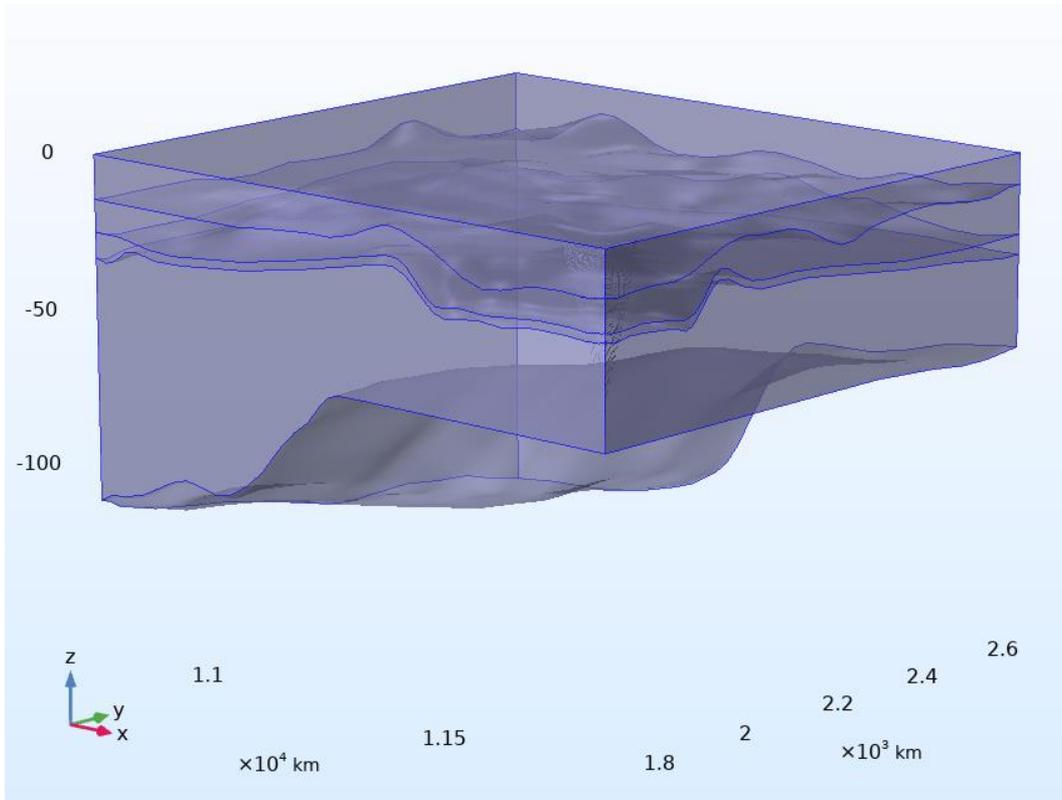
计算过程



模型输入

几何模型

—地震分层数据



物理模型

—热物性参数

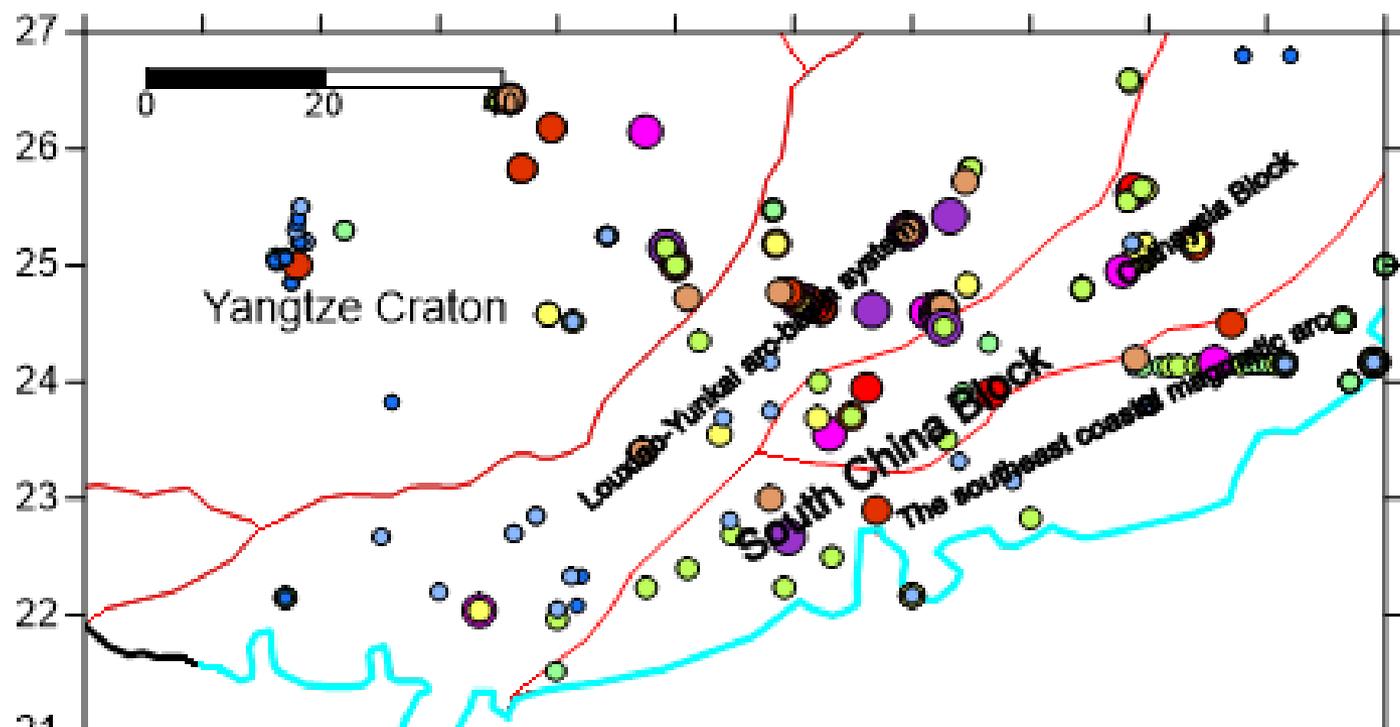
热导率: K

生热率: A (地表)

- 密度: ρ
- 丰度: C_U 、 C_{Th} 、 C_K

$$A = 10^{-2} \rho (9.52 C_U + 2.56 C_{Th} + 3.48 C_K)$$

华南地区花岗岩类生热率



Tectonic unit	Heat-flow (mW/m^2)	Heat production (uW/m^3)
Louxiao-Yunkai arc-basin system	68.0 ± 11.6	5.73 ± 2.73
Cathaysia Block	75.7 ± 6.5	4.53 ± 2.18
The southeast coastal magmatic arc	65.9 ± 11.8	3.91 ± 1.24
Hainan Block	71.7 ± 6.7	--

边界条件与初始值

模型边界条件为：

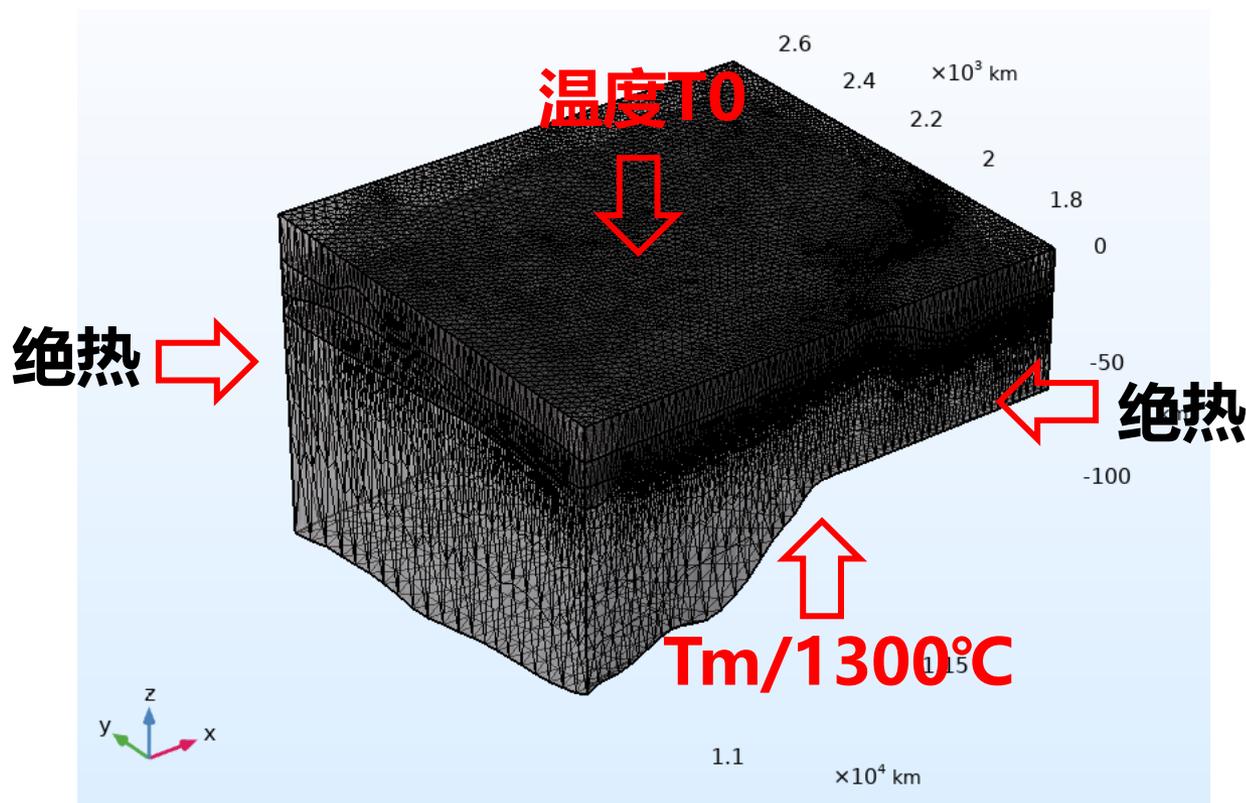
$$T(x, y, z_0) = T_0(x, y) \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x}(x_l, z) = \frac{\partial T}{\partial x}(x_0, z) = \frac{\partial T}{\partial x}(x_r, z) = 0 \quad (3)$$

$$-k(x, y, z_b) \frac{\partial T}{\partial z}(x, y, z_b) = Q_b(x, y) \quad (4)$$

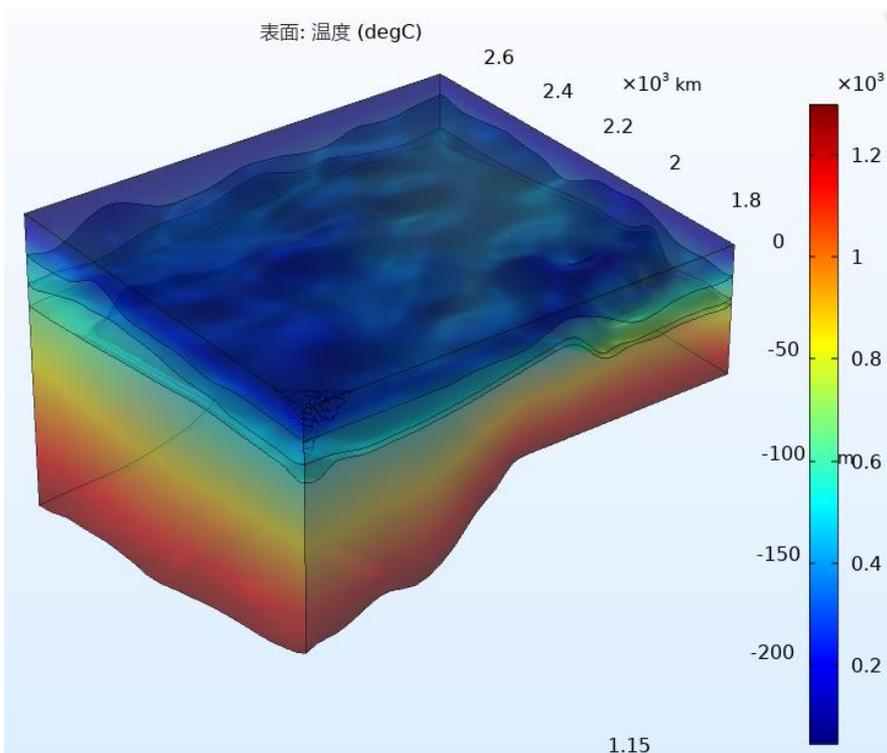
输入：

- 地表温度
- 岩石圈底界温度
- 生热率分布 (D)

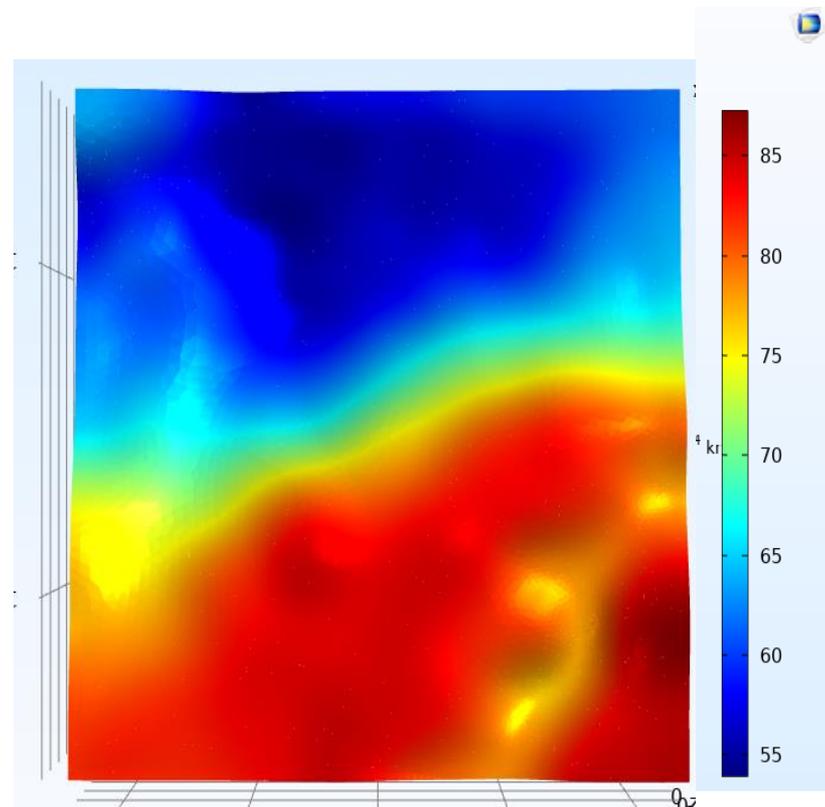


模型输出

三维温度结构



模拟地表热流值



波速、密度是温度函数，
可作为综合联合反演桥梁

与观测值对比，优化参数

优化放射性元素垂向分布

观测热流: qm_{ij} (二维网格)

模拟热流: qc_{ij}

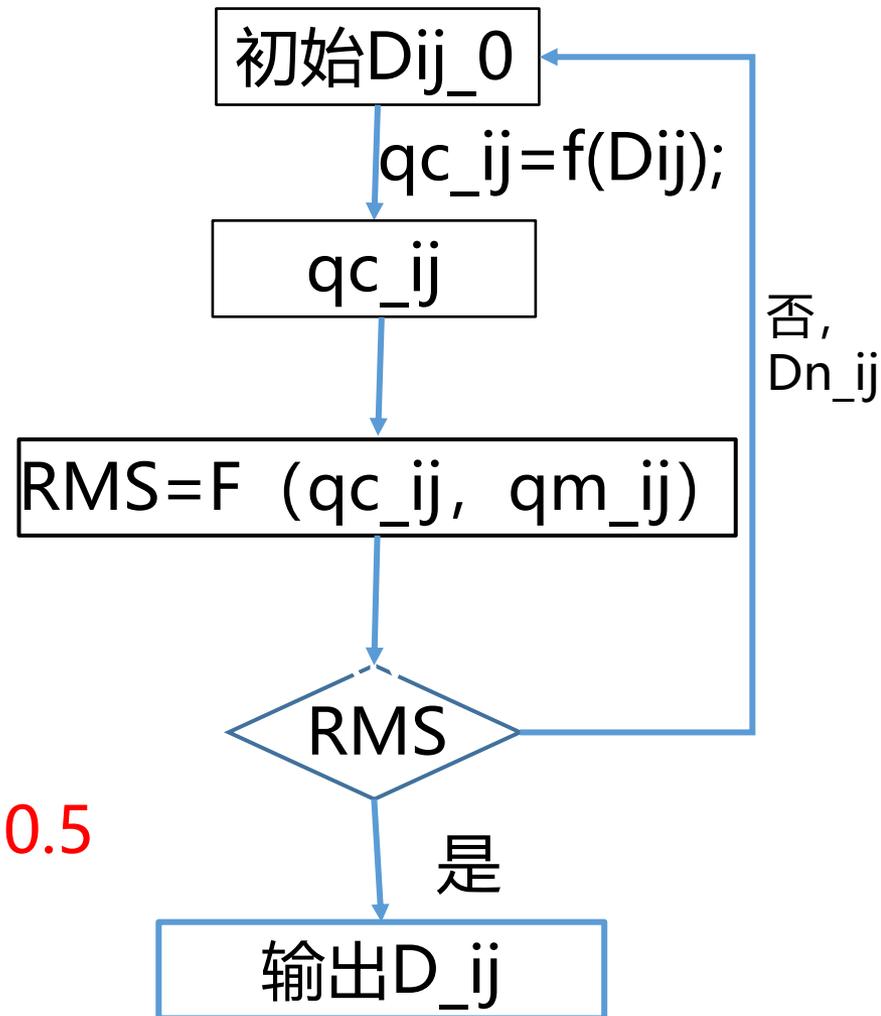
优化的参数: 放射性层厚度 D_{ij}

$qc_{ij}=f(D_{ij})$; qc_{ij} 与 D_{ij} 非简单线性关系, 但是是正相关的, 由于热是三维方向传导的, 相邻单元格之间也有影响, f 函数即解热传导方程

RMS均方根误差

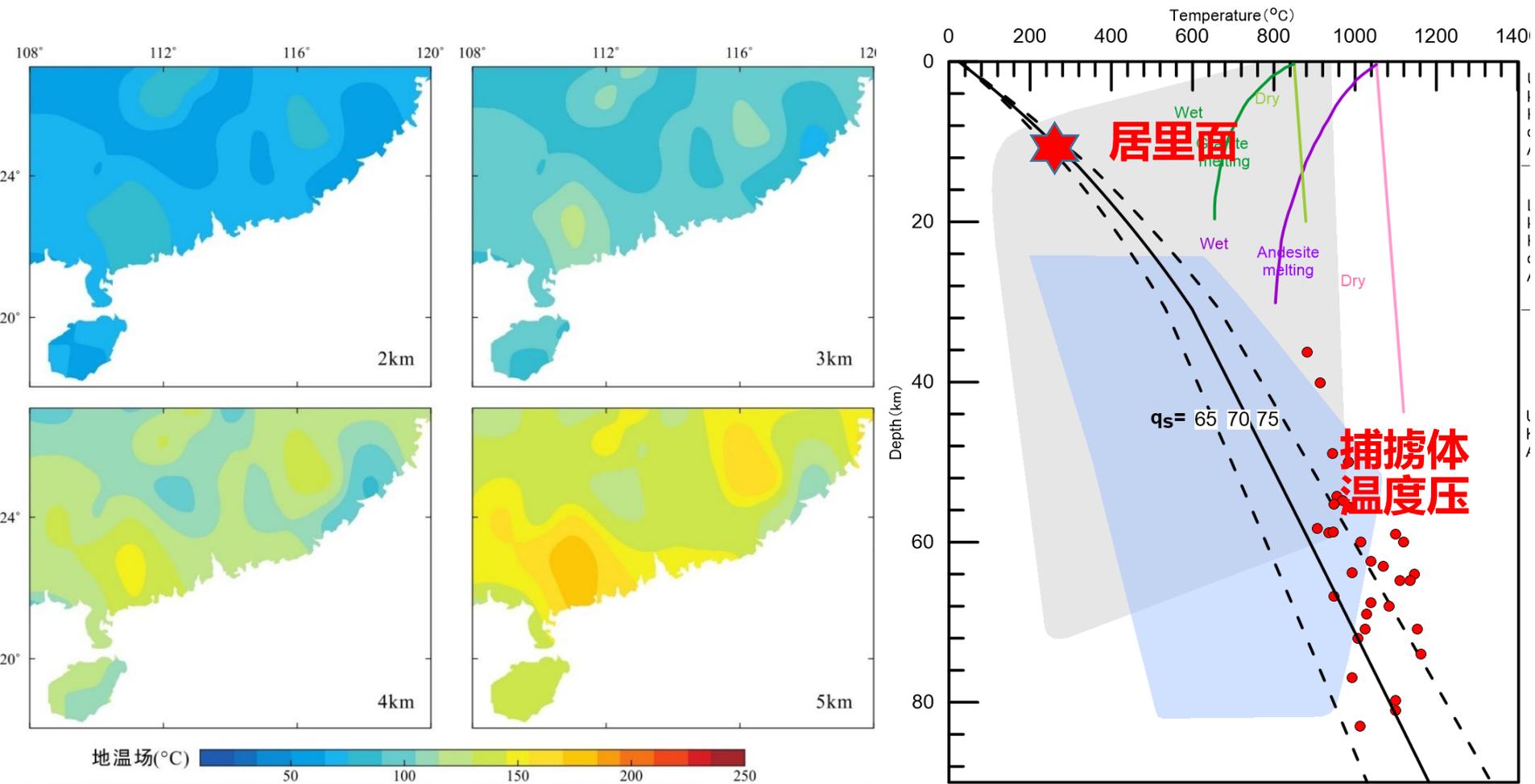
$$RMS = (\sum (qc_{ij} - qm_{ij})^2 / N)^{0.5}$$

Matlab优化: 蒙泰卡罗? 梯度下降法?



温度为桥梁的多学科数据约束

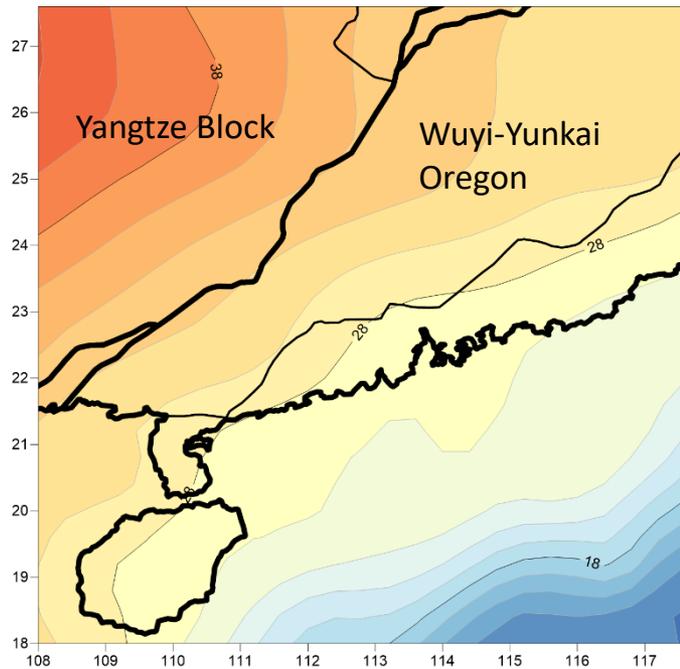
不同深度温度



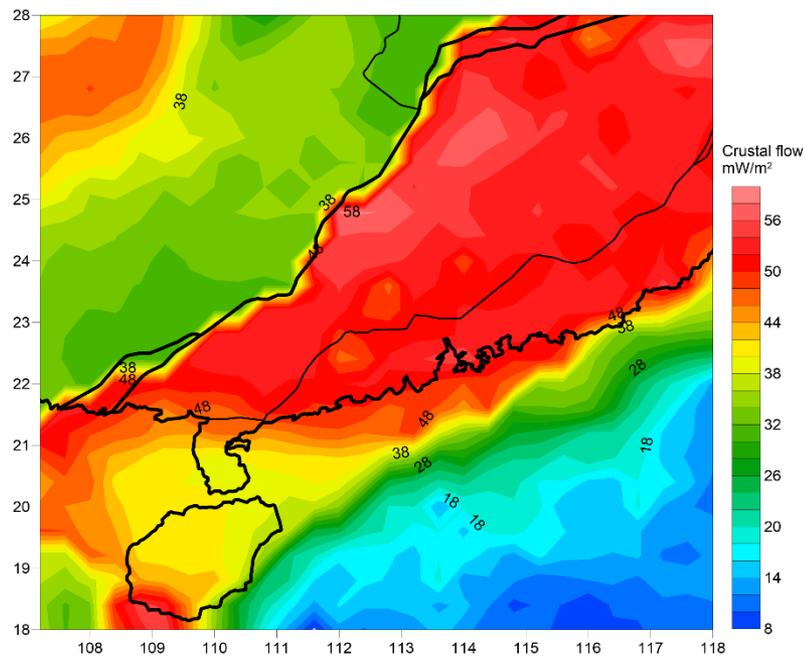
地壳热流贡献

Crustal heat flow contribution

$$q_c = \sum_1^n (A_i \cdot D_i)$$



Crustal thickness



Crustal contribution

地幔热流贡献

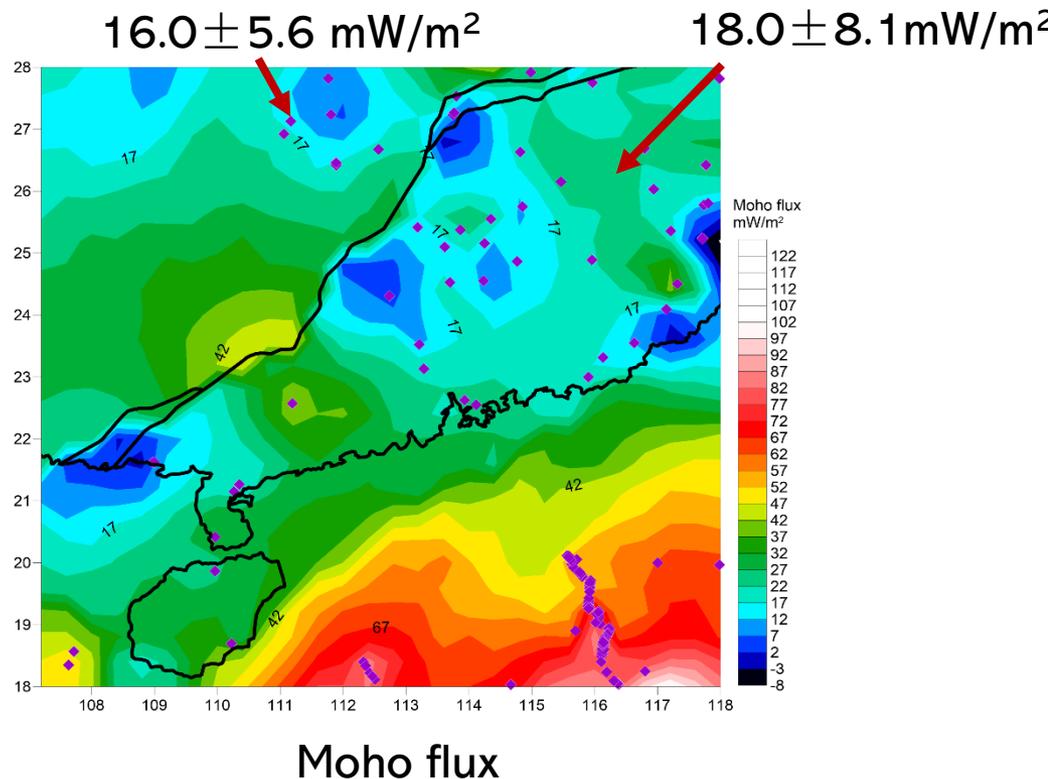
Moho flux in South China Block

$$q_m = q_s - q_c$$

For the Moho flux with heat flow measurements

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

Wuyi-Yunkai Orogen: $18.0 \pm 8.1 \text{ mW/m}^2$



地幔热流贡献

Discussions about Moho flux

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

11-18 mW/m^2 for Precambrian terrains or stable continents (Jaupart et al, 2015). Estimated from:

- ◆ surface heat flux and crustal heat production.
- ◆ condition of no melting in the lower crust at the time of stabilization.
- ◆ geothermobarometry on mantle xenoliths.

Wuyi-Yunkai Orogen: $18.0 \pm 8.1 \text{ mW/m}^2$

11-21 mW/m^2 for Paleozoic-Mesozoic orogens (Jaupart et al, 2015), estimated from surface heat flux and crustal heat production.

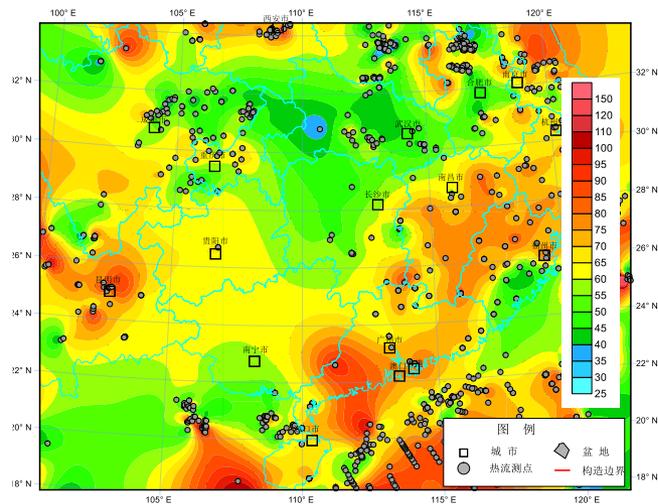
Table 7 Various estimates of the heat flux at Moho in stable continental regions

<i>Location</i>	<i>Heat flux (mW m^{-2})</i>	<i>Reference</i>
Norwegian Shield	11 ^a	Swanberg et al. (1974) and Pinet and Jaupart (1987)
Baltic Shield	7–15 ^a	Kukkonen and Peltonen (1999)
Siberian craton	10–12 ^a	Duchkov (1991)
Dharwar Craton (India)	11 ^a	Roy and Rao (2000)
Kapusking (Canadian Shield)	11–13 ^a	Ashwal et al. (1987) and Pinet et al. (1991)
Grenville (Canadian Shield)	13 ^a	Pinet et al. (1991)
Abitibi (Canadian Shield)	10–14 ^a	Guillou et al. (1994)
Trans-Hudson orogen (Canadian Shield)	11–16 ^b	Rolandone et al. (2002)
Slave province (Canada)	12–24 ^c	Russell et al. (2001)
Vredefort (South Africa)	18 ^a	Nicolaysen et al. (1981)
Kalahari Craton (South Africa)	17–25 ^c	Rudnick and Nyblade (1999)

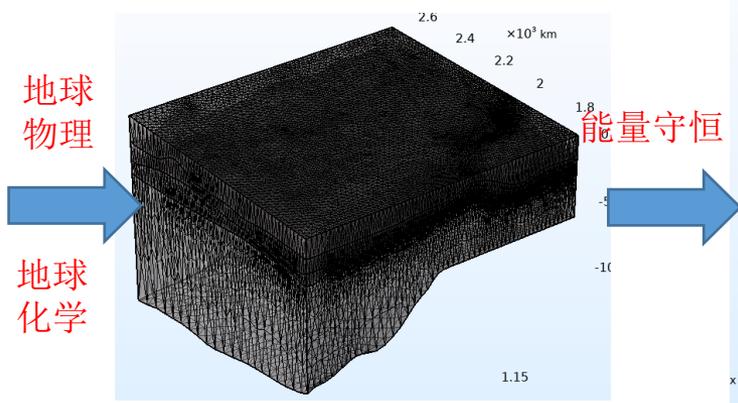
综合地热模型

- 以热传导理论（能量守恒）为基础，综合地球物理（分层）、地球化学（U-Th含量）和地热数据（地表热通量）三类数据，构建了华南地热模型。
- 地热模型包含了地球物质、能量信息，是具有代表性的综合模型
- 通过U-Th放射性生热建立U-Th含量（丰度和地壳中厚度）和地热模型的联系，从而约束地壳中高中放射性元素含量，最终为中微子通量计算提供约束

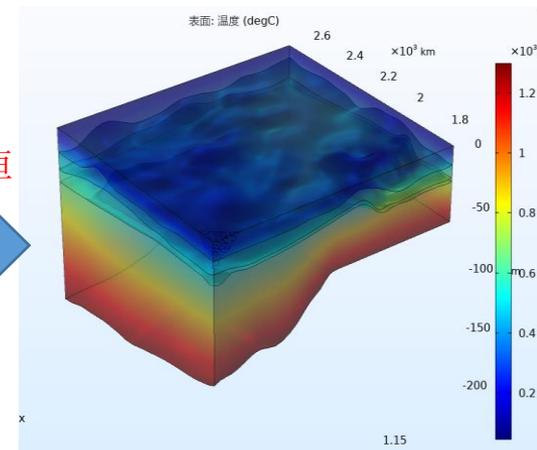
地热数据



地质模型



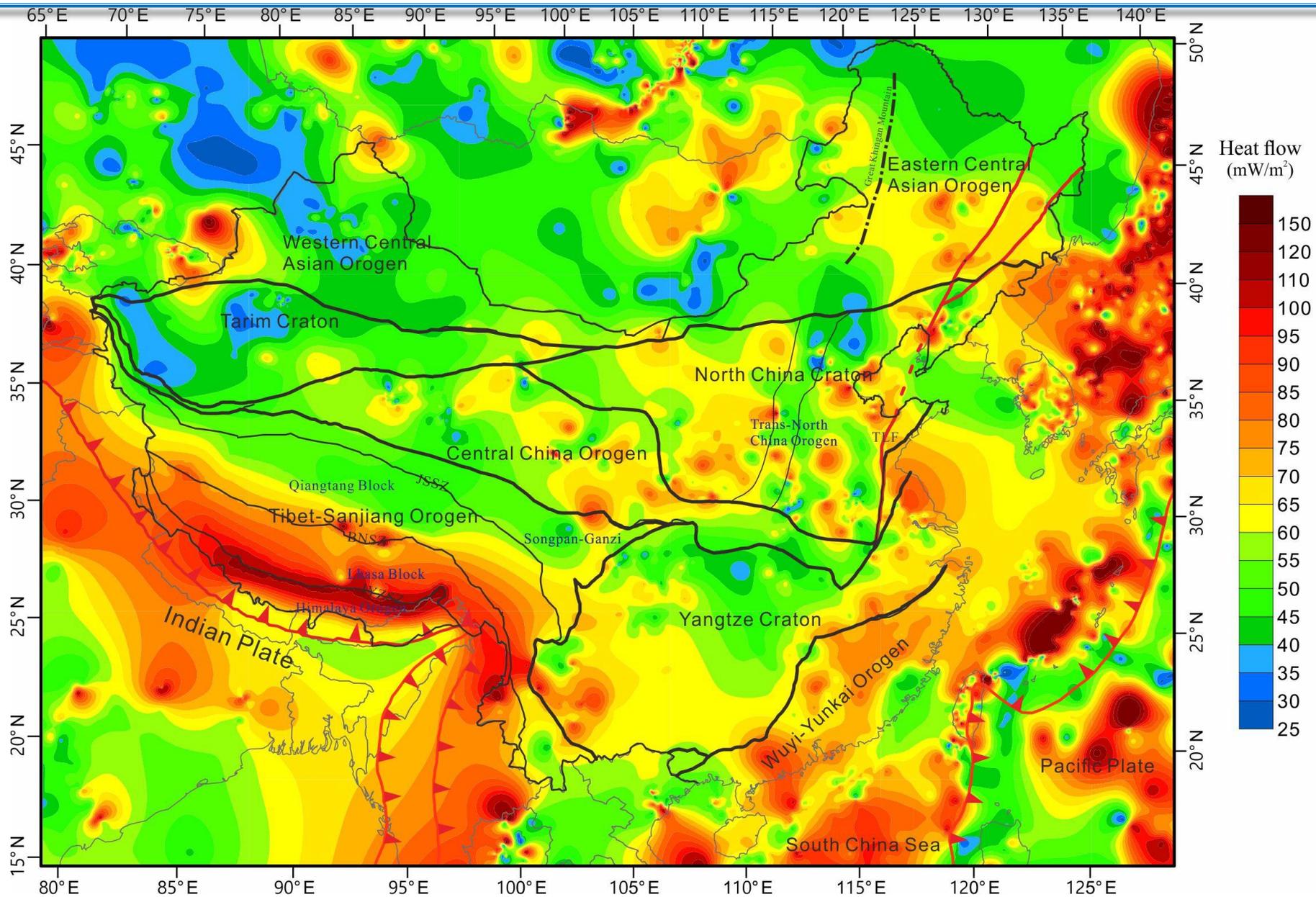
地热模型



报告提纲

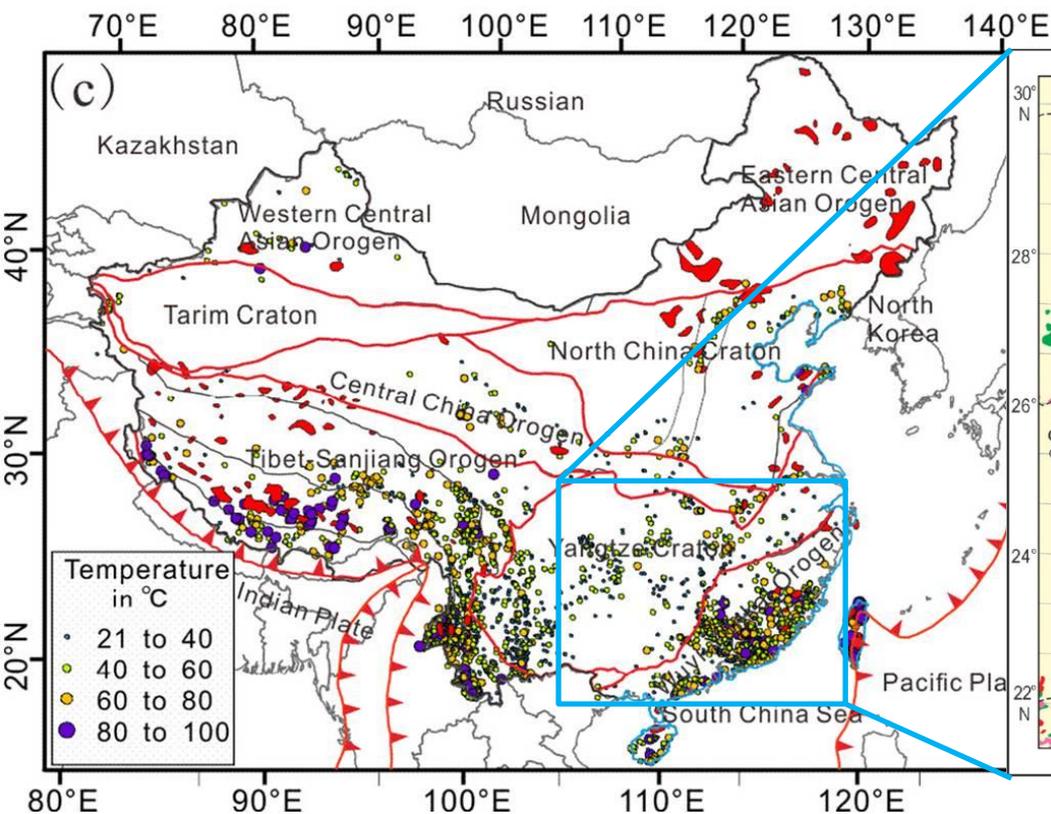
- 一、地球内部的热结构和放射性生热
- 二、华南三维综合地热模型构建
- 三、华南地热与深部动力过程
- 四、地热模型的优势和局限性

华南热背景



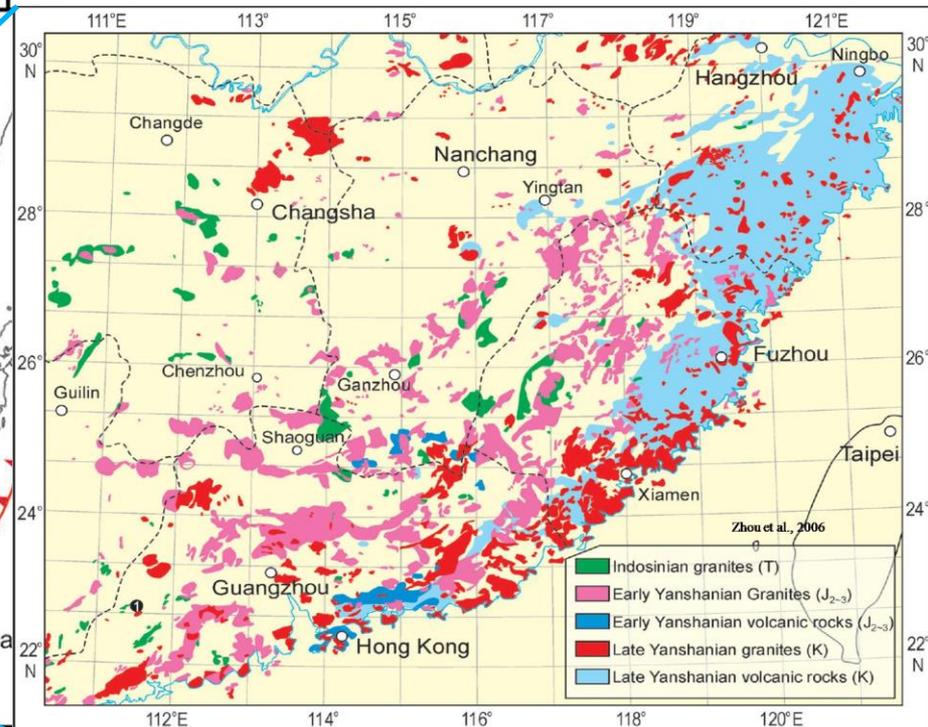
华南热背景

热泉分布与火成岩区



中国温泉分布图

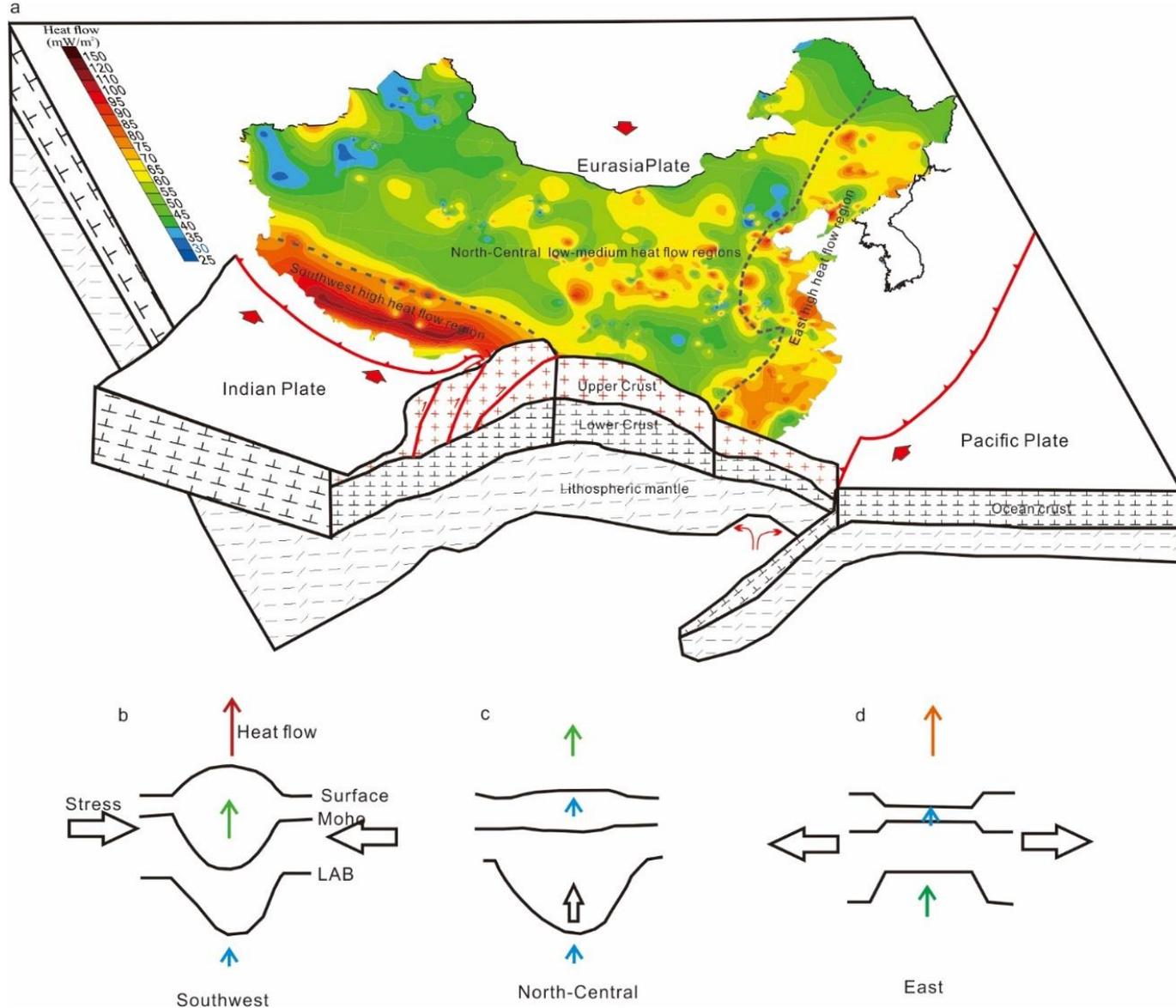
(Jiang et al., 2019)



超过百万平方公里巨型岩浆岩省

(Zhou et al., 2006)

中国大陆热流分布的深部动力过程



(Jiang et al, 2017 under review)

报告提纲

- 一、地球内部的热结构和放射性生热
- 二、华南三维综合地热模型构建
- 三、华南地热与深部动力过程
- 四、地热模型的优势和局限性

优势和局限性

优势：

- 综合了地球物理、地球化学、地热学多学科的数据，反映了地球内部能量的平衡，能为垂向生热率提供多维度约束；
- 提供的放射性元素分布不确定性比单一方法的可信度更高；
- 可以作为多参数（地震、重力、地热、地化）联合反演的桥梁。

局限性：

- 地表热流数据依赖于已有钻井（通常大于500米），数据分布稀少且不均匀；
- 三维模型计算优化话费大量计算时间，寻找的最优解可能是局部最优解。

Thanks !