

青藏高原东缘磁异常与震源区温度结构数据集

王 健^{1*}, 张广伟¹, 梁姗姗²

1. 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085; 2. 中国地震台网中心, 北京 100045

摘 要: 青藏高原东缘是我国地震活动最为强烈和复杂的区域之一。为了研究该区域地震活动与地壳温度分布之间的关系, 作者汇集了 2008–2017 年青藏高原东缘发生的震级 (Magnitude, M) $M \geq 2.0$ 地震数据 (6,406 个), 采用不同的地壳速度分区模型, 应用双差定位法对收集的地震进行了重定位, 最后获得 4,921 个精确定位的地震事件。根据 NGDC-720 地磁场模型计算了青藏高原东缘的三分量磁异常及其梯度张量。基于三维分形磁化模型获得了青藏高原东缘的居里点深度, 并在地表热流测量值的约束下, 基于一维稳态热传导方程得到了地震震源区温度结构数据集。该数据集包括: (1) 2008–2017 年青藏高原东缘 $M \geq 2.0$ 地震 (包括 $2.0 \leq M < 4.0$ 的地震 4540 次, $M \geq 4.0$ 的地震 381 次) 重定位数据; (2) 在 0 km 处观测到的 NGDC-720 三分量磁异常和总磁异常数据; (3) 在 10 km 高度处观测的 NGDC-720 磁异常梯度张量数据; (4) 青藏高原东缘居里点深度及磁性层平均地温梯度数据; (5) 震源区温度结构数据。该数据集存储为 5 个 Excel 文件 (.xls 格式), 数据量为 15.9 MB (压缩为 1 个文件, 15.3 MB)。基于该数据集的研究成果发表在《地球物理学报》2018 年第 61 卷第 5 期。

关键词: 地震重定位; NGDC-720 磁异常; 居里点深度; 地壳温度结构; 青藏高原

DOI: 10.3974/geodp.2019.03.07

1 前言

青藏高原东缘是我国地震活动最为强烈和复杂的区域之一。自 2008 年 5 月 12 日汶川 Ms8.0 地震以来, 该区域先后发了 4 次震级 (Magnitude, M) $M \geq 6.5$ 的大地震^[1–4]。一般而言, 发震层深度主要受控于岩石圈脆-塑性变形转换带的分布, 而温度则是控制岩石圈脆-塑性变形的一个主要因素。由于青藏高原东缘的地表热流测量主要分布于四川盆地内部, 在地震活动强烈的龙门山断裂带及鲜水河断裂以西的区域则缺乏测量值。因此, 很难有效地研究青藏高原东缘整个区域的地壳温度结构与地震活动之间的关系。由磁异常数据反演得到的居里点深度可以很好地用于区域深部地壳温度结构的研究。

本文首先应用双差定位法^[5]对 2008–2017 年青藏高原东缘发生的 $M \geq 2.0$ 地震进行重定位, 然后根据 NGDC-720 磁异常数据数据反演青藏高原东缘居里点深度, 在地表热流测量的约束下, 获得地壳温度结构分布, 探讨该区域地震震源区温度及其动力学意义。

收稿日期: 2019-04-13; 修订日期: 2019-06-05; 出版日期: 2019-09-25

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务专项 (ZDJ2019-09); 国家自然科学基金 (41704086, 41776057)

*通讯作者: 王健 R-5559-2019, 中国地震局地壳应力研究所, wangjianhyd@163.com

数据引用方式: [1] 王健, 张广伟, 梁姗姗. 青藏高原东缘磁异常与震源区温度结构数据集[J]. 全球变化数据学报, 2019, 3(3): 268–275. DOI: 10.3974/geodp.2019.03.07.

[2] 王健, 张广伟, 李春峰等. 青藏高原东缘磁异常与震源区温度结构数据集[DB/OL]. 全球变化科学研究数据出版系统, 2018. DOI: 10.3974/geodb.2018.08.04.V1

2 数据集元数据简介

青藏高原东缘磁异常与震源区温度结构数据集^[6]的名称、作者、地理区域、数据年代、数据集组成、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见表 1。

表 1 青藏高原东缘磁异常与震源区温度结构数据集元数据简表

条目	描述
数据集名称	青藏高原东缘磁异常与震源区温度结构数据集
数据集短名	MagneticAnomalyTemStr_E.Tibet
作者信息	王健 R-5559-2019, 中国地震局地壳应力研究所, wangjianhydz@163.com 张广伟 R-5608-2019, 中国地震局地壳应力研究所, jluaaa@163.com 李春峰, 浙江大学, 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, cfli@zju.edu.cn 梁姗姗 R-6288-2019, 中国地震台网中心, liangshanshan@seis.ac.cn
地理区域	青藏高原东缘
数据年代	2008-2017
数据格式	.xlsx
数据量	15.3 MB (压缩后)
数据集组成	青藏高原东缘磁异常与震源区温度结构数据集包括: (1) 2008-2017 年青藏高原东缘 $M \geq 2.0$ 地震 (包括 $2.0 \leq M < 4.0$ 的地震 4540 次, $M \geq 4.0$ 的地震 381 次) 重定位数据; (2) 在 0 km 处观测到的 NGDC-720 三分量磁异常和总磁异常数据; (3) 在 10 km 高度处观测的 NGDC-720 磁异常梯度张量数据; (4) 青藏高原东缘居里点深度及磁性层平均地温梯度数据; (5) 震源区温度结构数据。
基金项目	中国地震局 (ZDJ2019-09); 国家自然科学基金 (41704086, 41776057)
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 http://www.geodoi.ac.cn
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101, 中国科学院地理科学与资源研究所
数据共享政策	全球变化科学研究数据出版系统的“数据”包括元数据 (中英文)、实体数据 (中英文) 和通过《全球变化数据学报》(中英文) 发表的数据论文。其共享政策如下: (1) “数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放, 用户免费浏览、免费下载; (2) 最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源; (3) 增值服务用户或以任何形式散发和传播 (包括通过计算机服务器) “数据”的用户需要与《全球变化数据学报》(中英文) 编辑部签署书面协议, 获得许可; (4) 摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10% 引用原则, 即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%, 同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 ^[7]
数据和论文检索系统	DOI, DCI, CSD, WDS/ISC, GEOSS, China GEOSS

3 数据研发方法

3.1 数据源

本数据集中地震重定位使用的 2008-2017 年青藏高原东缘 $M \geq 2.0$ 地震原始数据来自于中国地震台网中心。NGDC-720 磁异常模型来自美国国家地球物理数据中心 (<https://www.ngdc.noaa.gov/>), 该数据由磁异常模型 EMAG2 和卫星磁异常模型 MF6 构建成为全球 720 阶球谐磁异常模型, 可以计算任意经纬度处不同观测高度的三分量磁异常, 因而具有广阔的应用价值^[8]。

3.2 数据集研发算法原理

3.2.1 地震重定位算法原理

双差定位法是一种相对定位方法,其基本原理如下^[5]:如果两个地震震源之间的距离小于事件-台站之间的距离以及速度不均匀的尺度,那么震源区和这个台站之间的射线路径几乎相同。由于不同事件的绝对误差来源相同,只是在震源附近小区域内射线路径有所差别。因此,某个台站观测到的两个事件的走时差可以被认为是这两个事件之间的空间偏移。该方法在一定程度上消除了因地壳速度结构横向不均匀导致的定位误差。

假设两个地震事件 i 和 j 相距较近,则台站 k 观测到的事件走时差和计算走时差的残差 dr_k^{ij} , 即双差为:

$$dr_k^{ij} = (t_k^i - t_k^j)^{obs} - (t_k^i - t_k^j)^{cal} \quad (1)$$

其中, t_k^i 和 t_k^j 分别为事件 i 和 j 到台站 k 的走时 (s), obs 和 cal 分别表示观测和计算。联合所有事件对与台站,建立如下线性方程组:

$$WG_m = W_d \quad (2)$$

其中, G 为 $M \times 4N$ 矩阵 (M , 双差观测数; N , 事件数), m 为震源参数变化量, d 为方程 (1) 中的数据矢量, W 为加权对角矩阵。对方程 (2) 使用共轭梯度法求解, 得到阻尼最小二乘解^[5]。

3.2.2 NGDC-720 磁异常及其梯度张量

地磁场的位函数可表达为球谐形式^[9]:

$$V(r, \theta, \lambda) = a \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r} \right)^{n+1} \left(g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda \right) P_n^m(\cos \theta) \quad (3)$$

其中, a 为地球半径 (6371.2 km), r 为地心坐标 (km), θ 和 λ 分别为余纬和经度 ($^\circ$), g_n^m 和 h_n^m 为高斯系数, $P_n^m(\cos \theta)$ 为 n 阶 m 次 Schmidt 准归一化缔合勒让德函数。地磁场三分量则分别表示为球谐形式:

$$\begin{cases} F_x = \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r} \right)^{n+2} \left[g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda \right] \frac{\partial P_n^m(\cos \theta)}{\partial \theta} \\ F_y = \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r} \right)^{n+2} \left[g_n^m \sin m\lambda - h_n^m \cos m\lambda \right] \frac{m P_n^m(\cos \theta)}{\sin \theta} \\ F_z = - \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r} \right)^{n+2} \left[g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda \right] (n+1) P_n^m(\cos \theta) \end{cases} \quad (4)$$

其中 N 为计算阶数 (720), F_x 、 F_y 和 F_z 分别为 x 、 y 和 z 方向上的磁异常, 总磁异常可由 $F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$ 求得, 则梯度张量 F_{GT} 可表示为

$$F_{GT} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_x}{\partial x} & \frac{\partial F_y}{\partial x} & \frac{\partial F_z}{\partial x} \\ \frac{\partial F_x}{\partial y} & \frac{\partial F_y}{\partial y} & \frac{\partial F_z}{\partial y} \\ \frac{\partial F_x}{\partial z} & \frac{\partial F_y}{\partial z} & \frac{\partial F_z}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (5)$$

3.2.3 居里点深度反演

假设磁性层在水平方向上无限延伸, 总磁异常的径向平均振幅谱可以表示为^[9]:

$$A_{\Delta T}(|k|) = BA_M(|k|)e^{-|k|Z_t} \left(1 - e^{-|k|(Z_b - Z_t)}\right) \quad (6)$$

其中, $A_{\Delta T}(|k|)$ 和 $A_M(|k|)$ 分别为总磁异常和磁源体的径向平均振幅谱, B 为常数, Z_t 为磁源体的顶界深度, Z_b 为居里点深度, k 为波数。在分形情况下, 有如下关系:

$$A_M(|k|) \propto |k|^{-\frac{\beta-1}{2}} \quad (7)$$

其中, β 为三维功率谱指数。将方程(7)代入方程(6)并在两边取对数, 得:

$$\ln[A_{\Delta T}(|k|)] = \ln C - |k|Z_t + \ln\left[1 - e^{-|k|(Z_b - Z_t)}\right] - \frac{\beta-1}{2} \ln|k| \quad (8)$$

其中, C 为常数。方程(8)在中-高波数域内可简化为:

$$\ln[A_{\Delta T}(|k|)] \approx \ln D - |k|Z_t - \frac{\beta-1}{2} \ln|k| \quad (9)$$

其中, D 为常数。在低波数域内方程(8)可简化为:

$$\ln[A_{\Delta T}(|k|)/|k|] \approx \ln E - |k|Z_0 - \frac{\beta-1}{2} \ln|k| \quad (10)$$

应用方程(9)和(10)可以根据在中-高波数域和低波数域内分别拟合直线求得 Z_t 和 Z_0 , 则磁源体的底界深度为:

$$Z_b = 2Z_0 - Z_t \quad (11)$$

3.2.4 地壳温度结构

假设岩石圈连续热产量随深度增加呈指数衰减, 则一维稳态热传导方程可表示为^[10]:

$$k \frac{d^2 T(z)}{dz^2} = -H_0 e^{-z/h_r} \quad (12)$$

其中, T 为温度($^{\circ}\text{C}$), z 为深度(km), k 为热导率($\text{W/m}^{\circ}\text{C}$), H_0 为地表热产率($\mu\text{W/m}^3$), h_r 为热产量随深度变化的衰减因子(km)。对方程(12)积分可得:

$$kT(z) = -h_r^2 H_0 e^{-z/h_r} + A_1 z + A_2 \quad (13)$$

假设地表 $z = Z_0$ 时的温度为 T_0 , $z = Z_b$ 时的温度为 T_c , 则:

$$A_1 = \frac{k(T_c - T_0) + h_r^2 H_0 (e^{-Z_b/h_r} - e^{-Z_0/h_r})}{Z_b - Z_0}, \quad (14)$$

$$A_2 = kT_0 + \frac{kZ_0(T_0 - T_c) + h_r^2 H_0 Z_0 (e^{-Z_0/h_r} - e^{-Z_b/h_r})}{Z_b - Z_0} + h_r^2 H_0 e^{-Z_0/h_r}$$

3.3 技术路线

首先对原始地震目录应用双差定位法^[5]进行重定位，其次根据 NGDC-720 地磁场模型分别计算三分量和总磁异常以及梯度张量，然后由总磁异常根据三维分形磁化模型居里点深度，最后应用随温度变化的热导率模型计算地壳温度结构，分析并探讨地壳温度结构与地震活动的关系。具体技术路线如图 1 所示。

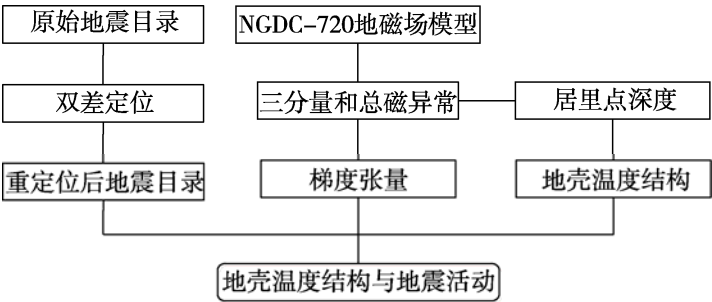


图 1 数据研发技术路线图

4 数据结果与验证

4.1 数据结果组成

本数据集包括：

- (1) 2008-2017 年青藏高原东缘 $M \geq 2.0$ 地震（包括 $2.0 \leq M < 4.0$ 的地震 4540 次， $M \geq 4.0$ 的地震 381 次）重定位数据：RelocatedEarthquakes.xlsx。
- (2) 在 0 km 处观测到的 NGDC-720 三分量磁异常和总磁异常数据：MagneticAnomaly_NGDC-720.xlsx。
- (3) 在 10 km 高度处观测的 NGDC-720 磁异常梯度张量数据：GradientTensor_NGDC-720.xlsx。
- (4) 青藏高原东缘居里点深度及磁性层平均地温梯度数据：CurieDepth_Tem.Gradient.xlsx。
- (5) 震源区温度结构数据：Tem.Structure.xlsx。

4.2 数据结果验证

上述结果已经在《地球物理学报》发表^[11]。通过对比前人结果，发现青藏高原东缘 $M \geq 6.5$ 地震的重定位结果深度差异约为 ± 2 km，如表 2 所示^[11]。根据居里点深度获得了青藏高原东缘磁性层的平均地温梯度，结果显示大部分区域具有明显较低的地温梯度（ $< 20^\circ\text{C}/\text{km}$ ）。四川盆地的钻井资料表明该盆地地温梯度约为 $17.7\text{--}33.3^\circ\text{C}/\text{km}$ ，平均约为 $22.8^\circ\text{C}/\text{km}$ ^[12]，表明本文计算得到的青藏高原东缘磁性层平均地温梯度较符合实际地质情况。应用最小二乘法得到的地壳温度结构参数（ $k = 3.39\text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C})$ ， $h_r = 8.684\text{ km}$ ， $H_0 = 2.08\text{ }\mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$ ）与四川盆地钻孔岩心样品实验室测量^[12,13]较为一致（图 2）。震源区温度计算表明 2008 年汶川 Ms8.0、2013 年芦山 Ms7.0、2013 年岷县 Ms6.6、2014 年鲁甸 Ms6.5 以及 2017 年九寨沟 Ms7.0 地震均发生在地壳脆-塑性变形过渡区（图 3）。

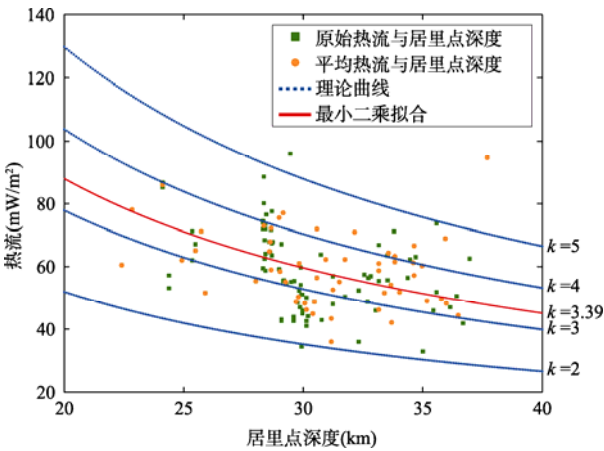


图 2 地表热流与居里点深度之间的关系图^[11]

表 2 青藏高原东缘 $M \geq 6.5$ 地震重定位结果^[11]

事件	经度 (°E)	纬度 (°N)	深度 (km)	对比深度 (km)
2013 年芦山 Ms7.0	102.971,0	30.298,3	19.5	17.8 ^[1]
2013 年岷县 Ms6.6	104.211,7	34.546,9	13.0	13.5 ^[2]
2014 年鲁甸 Ms6.5	103.330,1	27.115,5	13.5	15.0 ^[3]
2017 年九寨沟 Ms7.0	103.837,6	33.165,5	15.9	16.9 ^[4]

5 讨论和总结

青藏高原东缘磁异常与震源区温度结构数据集包括基于双差定位法应用不同的地壳速度分区模型得到的 2008–2017 年青藏高原东缘 4921 个 $M \geq 2.0$ 地震的精确定位结果，重定位后的地震震源深度多分布在 5–20 km。

本数据集还包括根据 NGDC-720 地磁场模型计算得到的三分量和总磁异常以及梯度张量，发现大多数地震位于负磁异常区域或强-弱磁异常边界。梯度张量相对于总场和三分量磁异常能更好地识别地震活动强烈区域，特别是大地震发生的区域。除了 2013 年岷县 Ms6.6 地震以外，该区域其他 4 次 $M \geq 6.5$ 地震震源区均位于居里点深度较大、地温梯度较低的区域。地壳温度结构表明青藏高原东缘大多数 $M \geq 2.0$ 地震震源区温度为 100–500 °C， $M \geq 4.0$ 地震震源区温度多为 200–400 °C。

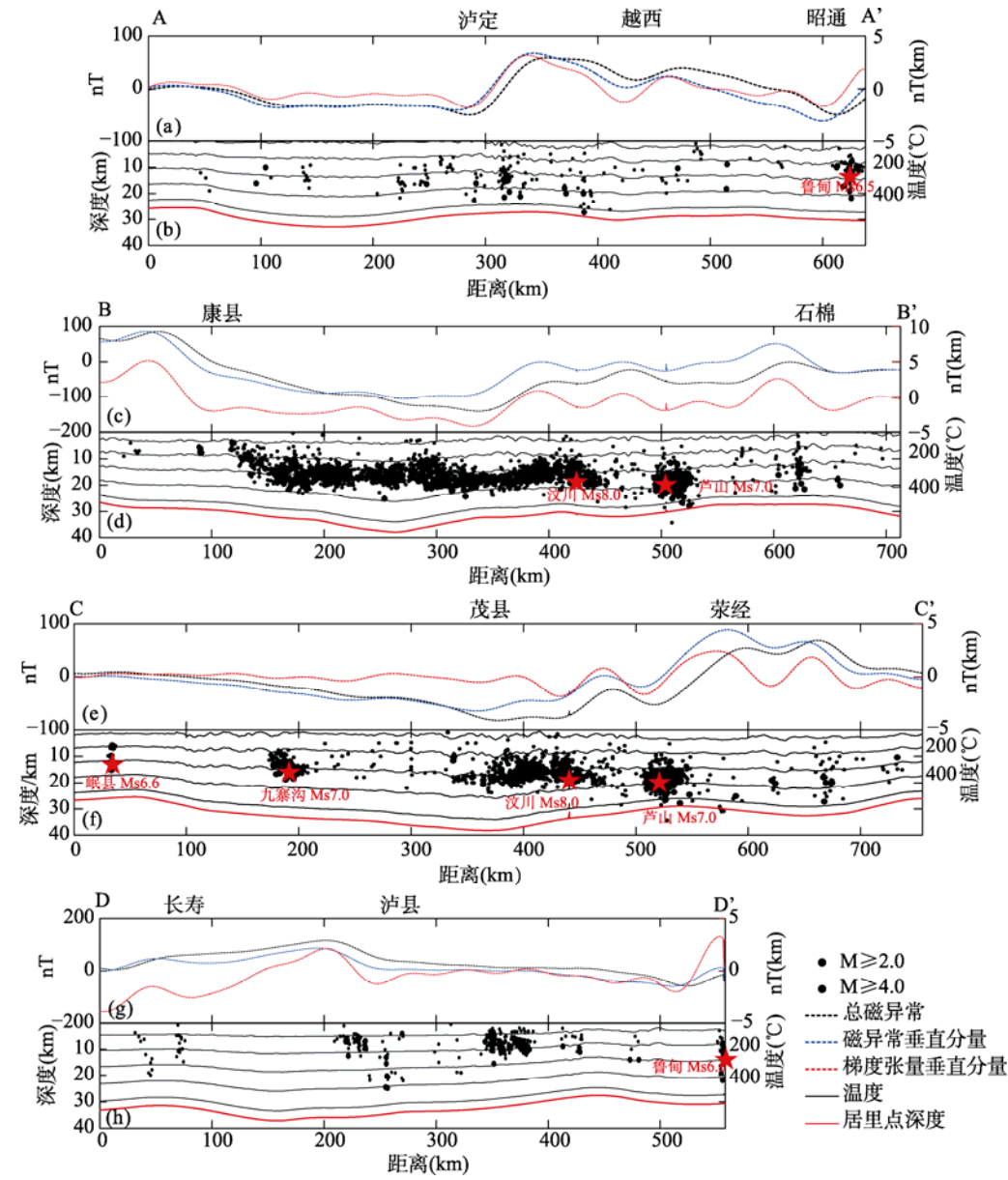


图3 不同剖面 AA' (a 和 b)、BB' (c 和 d)、CC' (e 和 f) 以及 DD' (g 和 h) 的磁异常、梯度张量以及地壳温度结构和重定位后的震源深度分布图^[11]

2008 年汶川 Ms8.0、2013 年岷县 Ms6.6、2014 年鲁甸 Ms6.5 以及 2017 年九寨沟 Ms7.0 地震震源区温度大约均为 300 °C 左右,而 2013 年芦山 Ms7.0 地震震源区温度接近约 400 °C,更多与局部构造应力异常有关。

本数据集中的地震重定位结果可用于区域地震活动与地震构造研究,相关的磁异常数据还可用于区域深部构造研究。其不足之处是本数据集仅对 $M \geq 6.5$ 地震震源区的温度进行了详细分析,需要对 $4 < M < 6.5$ 地震震源区温度进行进一步分析,特别是 $M \geq 5.0$ 和 $M \geq 6.0$ 地

震源区温度特征是怎样的, 以及这些温度的动力学意义需要更详细的研究。

作者分工: 王健负责数据集的开发、设计和论文的撰写工作。张广伟和梁姗姗对地震重定位进行了数据收集和分析工作。另外, 感谢浙江大学李春峰教授对数据集的数据验证工作提供了指导意见。

参考文献

- [1] 赵博, 高原, 黄志斌等. 四川芦山 Ms7.0 地震余震序列双差定位、震源机制及应力场反演[J]. 地球物理学报, 2013, 56(10): 3385–3395.
- [2] 冯红开, 张元生, 刘旭宙等. 2013 年甘肃岷县漳县 Ms6.6 地震及其余震序列重定位[J]. 地震工程学报, 2013, 35(3): 443–447.
- [3] 王未来, 吴建平, 房立华等. 2014 年云南鲁甸 Ms6.5 地震序列的双差定位[J]. 地球物理学报, 2014, 57(9): 3042–3051.
- [4] 易桂喜, 龙锋, 梁明剑等. 2017 年 8 月 8 日九寨沟 M7.0 地震及余震震源机制解与发震构造分析[J]. 地球物理学报, 2017, 60(10): 4083–4097.
- [5] Waldhauser, F., Ellsworth, W. L. A double difference earthquake location algorithm: Method and application to the Northern Hayward fault, California [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2000, 90(6): 1353–1368.
- [6] 王健, 张广伟, 李春峰等. 青藏高原东缘磁异常与震源区温度结构数据集[DB/OL]. 全球变化科学研究数据出版系统, 2018. DOI: 10.3974/geodb.2018.08.04.V1.
- [7] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策. DOI: 10.3974/dp.policy.2014.05 (2017 年更新).
- [8] Maus, S. An ellipsoidal harmonic representation of Earth's lithospheric magnetic field to degree and order 720 [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2010, 11: Q06015.
- [9] Blakely, R. J. Potential theory in gravity and magnetic applications [M]. London: Cambridge University Press. 1996: 1–441.
- [10] Li, C. F., Wang, J. L., Zhou, Z. Y., *et al.* 3D geophysical characterization of the Sulu-Dabie orogen and its environs [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2012, 192/193: 35–53.
- [11] 王健, 张广伟, 李春峰等. 青藏高原东缘地震活动与居里点深度之间的相关性[J]. 地球物理学报, 2018, 61(5): 1840–1852.
- [12] 徐明, 朱传庆, 田云涛等. 四川盆地钻孔温度测量及现今地热特征[J]. 地球物理学报, 2011, 54: 1052–1060.
- [13] 黄方, 刘琼颖, 何丽娟等. 晚喜山期以来四川盆地构造—热演化模拟[J]. 地球物理学报, 2012, 55: 3742–3753.