

崔华伟, 郑建常, 侯志刚, 等. 湖南常德及其周边地区的地震重定位与应力场分析[J]. 华南地震, 2020, 40(4): 35-41. [CUI Huawei, ZHENG Jianchang, HOU Zhigang, et al. The Analysis of Earthquake Relocation and Stress Field in Changde and Its Adjacent Area, Hunan [J]. South China journal of seismology, 2020, 40(4): 35-41]

## 湖南常德及其周边地区的地震重定位 与应力场分析

崔华伟<sup>1,2</sup>, 郑建常<sup>1</sup>, 侯志刚<sup>3</sup>, 赵金花<sup>1</sup>, 郑旭<sup>4</sup>

(1. 山东省地震局, 济南 250102; 2. 河北省地震动力学重点实验室, 河北 三河 065201;  
3. 常德市地震局, 湖南 常德, 4. 山东省地震工程研究院, 济南 250021)

**摘要:** 基于历史地震资料, 用双差定位法对湖南常德及周边地区地震事件进行重定位, 同时使用P波初动综合震源机制解法计算了应力场。重定位结果显示: 地震位于中上地壳, 主要分布在石门附近, 而常德周边地震分布相对较少; 应力场研究显示: 常德、临澧、津市附近的应力场呈NEE-SWW向挤压NW-SE向拉张。太阳山断裂带附近的应力场呈逆冲为主兼有部分走滑的应力机制, 而澧南断裂东西两侧及石门附近地区应力轴发生偏转, 这可能是由构造垂直运动差异导致。

**关键词:** 常德地区; 双差定位法; P波极性; 综合震源机制解; 应力场

**中图分类号:** P315.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662(2020)04-0035-07

**DOI:** 10.13512/j.hndz.2020.04.05

## The Analysis of Earthquake Relocation and Stress Field in Changde and Its Adjacent Area, Hunan

CUI Huawei<sup>1,2</sup>, ZHENG Jianchang<sup>1</sup>, HOU Zhigang<sup>3</sup>, ZHAO Jinhua<sup>1</sup>, ZHENG Xu<sup>4</sup>

(1. Shandong Earthquake Agency, Jinan 250102, China; 2. Hebei Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Sanhe 065201, China; 3. Seismological Bureau of Changde city, Changde 41500, China; 4. Shandong Institute of Earthquake Engineering, Jinan 250021, China)

**Abstract:** The earthquakes were relocated based on historical seismological data with double-difference relocation algorithm in Changde and its adjacent area, Hunan Province. And the stress field was calculated by composite focal mechanism method with P wave polarity. Result of relocation shows; the source of earthquakes are located shallowly in upper crust. Most of earthquakes are situated in Shimen and its adjacent area. But earthquakes are rarely distributed in Changde. The study of stress field shows which is compressed in the direction

**收稿日期:** 2020-01-05

**基金项目:** 常德市北部新城地震小区制项目, 河北省地震局动力学重点实验室开放基金(FZ202205); 中国地震科学实验场地的地震可预测性国际合作研究(2018YFE0109700)联合资助

**作者简介:** 崔华伟(1990-), 男, 主要从事地震重定位、震源机制解和构造应力场方面的研究。

**E-mail:** cuihuawei19900920@163.com.

of NEE-SWW and extended in NW-SE. The stress field is dominated thrust regime and part of strike slip regime in Taiyangshan fault area. The stress axis is rotation between the west and east of Linan Fault and Shimen area due to vertical motion about different tectonic.

**Keywords:** Changde area; Double-difference relocation algorithm; P wave polarity; Composite focal mechanism; Stress field

## 0 引言

湖南常德位于地震活动性相对较低的华南块体,其历史地震活动较少(图1)。陈志远根据古文献记载,整理了16~19世纪的17次常德地震,发现常德在历史上每100年约有4次中小地震发生<sup>[1]</sup>。而这400年中发生过最大的地震是1631年常德以北 $6\frac{3}{4}$ 级地震<sup>[1-2]</sup>,此次地震因影响范围广、破坏性大而受到众多研究学者的广泛关注<sup>[1,3-6]</sup>。

1631年8月14日 $6\frac{3}{4}$ 级地震发生在常德以北约10 km的太阳山凸起(太阳山)附近。相关研究表明<sup>[2,4,7]</sup>震中大概位于 $29.1^{\circ}\sim 29.2^{\circ}\text{N}$ ,  $111.7^{\circ}\sim 111.8^{\circ}\text{E}$ 的区域。8月14日 $6\frac{3}{4}$ 级地震发生后<sup>[2]</sup>,同年11月,太阳山附近又发生一次 $5\frac{3}{4}$ 级地震,一般认为该地震是8月14日 $6\frac{3}{4}$ 级地震的余震<sup>[4]</sup>。

前述历史地震资料显示,常德地区破坏性地震频次较低,但历史地震震源区最大烈度为Ⅷ度。基于我国的国情及地震特点,地震的破坏性也随着经济的发展而不断影响着国民生计。正是基于这一现状,对常德及周边的地震研究显得尤为重要。本文通过现有的台阵分布,搜集历史地震资料,使用双差定位法对地震进行重定位。

湖南的构造应力场主要呈NW向挤压NE向拉张<sup>[8-11]</sup>,但湖南地区的研究范围较大结果相对不精细,很难反映常德地区的应力场特征。本文使用P波初动综合震源机制解法<sup>[9]</sup>,拟给出常德及周边地区的应力场特征。

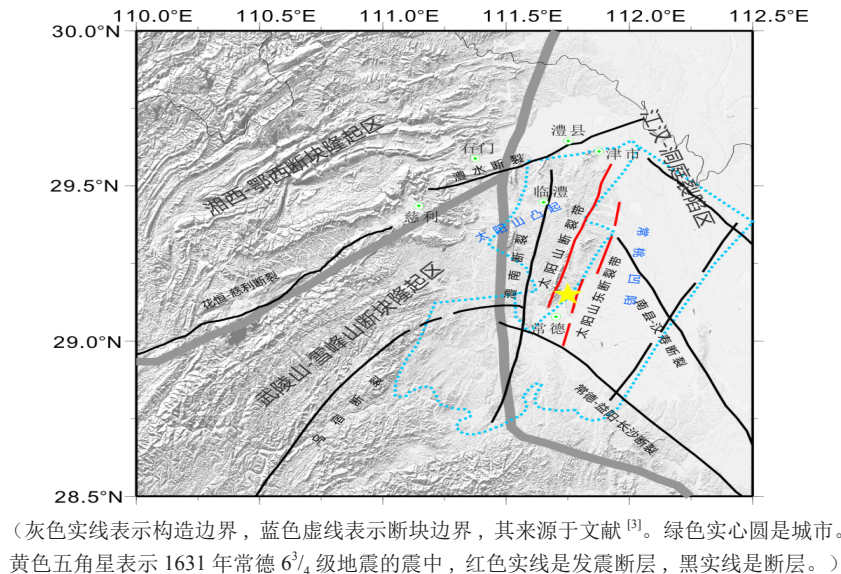
## 1 构造背景

常德1631年 $6\frac{3}{4}$ 级地震发生年代久远,缺乏直观的地震观测资料。研究学者一般根据历

史记载<sup>[1]</sup>、现场调查<sup>[4,7]</sup>、地球物理探测<sup>[6]</sup>及计算地震学<sup>[5]</sup>等手段对震中及周边区域进行研究,并进一步地推断发震背景<sup>[3-6,12-13]</sup>、震源位置<sup>[4,7]</sup>、发震断层<sup>[4,6]</sup>等信息。

常德位于湘西—鄂西断块隆起区、武陵山—雪峰山断块隆起区及江汉—洞庭裂陷区三个构造区的交界带(图1),主要是江汉—洞庭裂陷区的常桃凹陷和太阳山凸起(太阳山隆起)交界的太阳山东断裂附近。1631年的常德地震大致发生在NNE走向的太阳山断裂及太阳山东断裂带之间的区域<sup>[2,4,7]</sup>。以太阳山东断裂为界,西侧属于太阳山凸起,东侧是常桃凹陷(图1)。基于这一地区的地质构造运动复杂性,前人在该地区做了相关研究<sup>[3-6,12-13]</sup>。

徐杰等<sup>[3]</sup>整理的剩余重力异常结果显示:以太阳山为分界线,西侧太阳山隆起区附近重力异常偏高约为15 mgal,东部常桃凹陷的重力异常偏低约为-10 mgal,太阳山构造区位于断块差异升降活动最强烈的地区,升降差异较大为地震的孕育和发生提供了基础。沈得秀等<sup>[4]</sup>的地质野外调查显示太阳山附近构造地貌反差强烈,说明该地区存在明显的不均匀垂直运动。高海丽<sup>[12]</sup>的地表垂直形变研究表明,太阳山断裂带西侧主要是向上的隆升运动,东侧主要是向下的沉降运动。肖和平等<sup>[13]</sup>认为震区构造运动主要表现为掀斜和间歇性升降运动,不均匀运动成分为地震的孕育、发生提供了应力积累和释放条件。速度结构及重定位<sup>[5]</sup>研究显示在常德以北太阳山凸起的下方为P波高速区,大多数小震分布在高、低速体的交界带,靠近高速体一侧。赵凌强等<sup>[6]</sup>的大地电磁研究发现,太阳山断裂带附近是高、低阻电性边界带,常德1631年常德 $6\frac{3}{4}$ 级就发生在高低电阻边界带的高电阻地区。



(灰色实线表示构造边界，蓝色虚线表示断块边界，其来源于文献<sup>[3]</sup>。绿色实心圆是城市。黄色五角星表示 1631 年常德 6<sup>3</sup>/<sub>4</sub> 级地震的震中，红色实线是发震断层，黑实线是断层。)

图 1 湖南常德地区构造  
Fig.1 The tectonic map of Changde area in Hunan

根据前人的研究<sup>[4,6]</sup>，本文选择 111.75°E, 29.15°N 为 1631 年常德 6<sup>3</sup>/<sub>4</sub> 级地震的震中(图 1)，并搜集了常德及其周边地区的地震资料进行重定位，拟对其地震活动、发震背景进行分析。

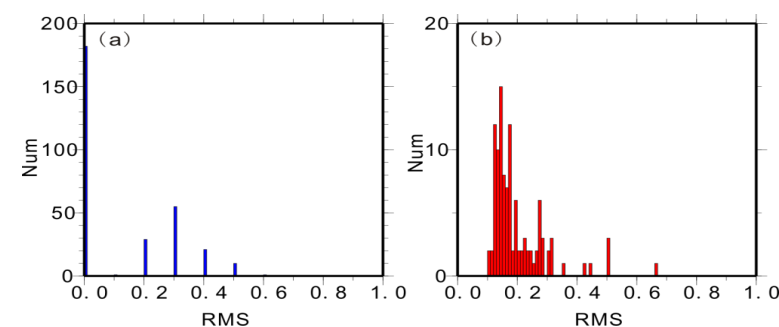
2 数据及方法

2.1 数据

本研究选取 28.5°~30°N, 110°~112.5°E 为研究区域。基于湖南省地震局多批次布设的台站测网及周边省份的台站，搜集 1970 年以来的地震观测记录，其中 1970—2007 年数据来源于《国

家地震科学数据共享中心》网站，2008 年 1 月至 2020 年 3 月地震数据来源于《地震编目系统》。

本文使用震级介于  $M_L$  1.0~3.8 之间的地震事件 299 个，到时数据共计 6615 条。重定位使用了周边地区 25 个台站，双差重定位过程中，选择震中距小于 200 km 的地震事件，设置相邻地震事件的空间距离为 10 km，参与重定位的地震 288 个，震相数据 4264 条。由于 2008 年之前的地震事件缺乏走时残差，导致地震重定位前的残差存在异常的空值，在本文中以 0 (图 2(a)) 代替。地震重定位后，走时残差呈现正态分布，主要集中在 0.1~0.3 s 之间 (图 2(b))。



(a) 地震重定位前的走时残差统计 ; (b) 地震重定位后的走时残差统计图)

图 2 地震重定位前后走时残差  
Fig.2 Travel time residual before and after earthquake relocation

2.2 方法

本文使用 Waldhauser 和 Ellsworth<sup>[14]</sup> 提出的双差定位法对地震进行重新定位，双差定位

法是一种比较成熟能提高地震相对定位精度的方法。其理论是如果两个地震事件之间的距离小于地震到台站的距离和速度不均匀的尺度，

那么震源区到台站之间的整个射线路径几乎一致<sup>[14]</sup>。此时在某个台站观测到的两个事件的走时差源于地震事件之间的高精度空间位移偏差<sup>[14]</sup>。该方法能够有效地消除震源至台站之间共同的传播路径效应,对地下介质速度结构依赖程度相对较小,在一定程度上消除了由于地下介质的速度结构而引起的定位误差<sup>[15]</sup>。

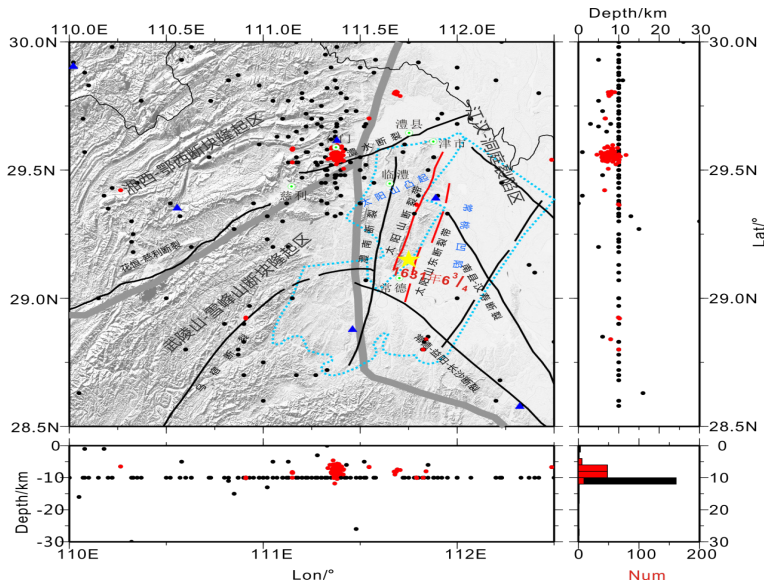
鞠慧超等<sup>[15]</sup>对2019年甘肃张掖 $M_{5.0}$ 级地震序列重定位,给出了地震序列的空间分布特征。杨智娴等<sup>[16]</sup>将双差地震定位法应用在中国中西部地区地震精确定位。张广伟等<sup>[17]</sup>使用双差对2014年新疆于田 $M_{7.3}$ 级地震主震及余震序列重定位,并分析了发震背景。房立华等<sup>[18]</sup>使用该方法对2014年新疆于田地震序列进行重定位,推断出于田地震的发震断层。Supendi等<sup>[19]</sup>基于双差定位法对2018年帕卢 $M_w7.5$ 地震序列进行重定位,结果显示地震序列与帕卢—克茹断裂存在较好的对应关系。本文采用敬少群等<sup>[5]</sup>一维地壳速度模型(表1),对常德及周边地区的历史地震,使用双差法对地震进行重定位工作。

表 1 常德重定位速度模型<sup>[5]</sup>

Table 1 The relocation velocity model of in Changde <sup>[5]</sup>	
深度 /km	速度 / (km.s <sup>-1</sup> )
0	4.8
2	5.5
6	5.73
10	6.09
15	6.05
20	6.55
25	6.98
30	7.01
33	7.02

3 重定位结果

重定位前的地震(黑色圆点)显示,大多数地震分布在西北地区的慈利、石门及澧县西北(图3(a)),除石门附近的地震有丛集特征外,其它地区没有明显的丛集特征。原始地震剖面图和柱状统计图显示(图3(b、c、d)),地震深度主要集中在10 km附近,主要是因为历史地震的观测资料年代较为久远,地震定位深度的精度较差致使震源深度出现10 km集中现象。



(重定位前后的地震分别用黑色和红色实心圆表示,蓝色三角表示台站。其它标识见图1)  
图3 常德及周边地区地震重定位结果

Fig.3 The earthquake relocation results in Changde and its adjacent area

根据地震重定位后的分布(图3(a)),对地震深度进行2 km为间隔统计,结果显示震源深度介于4~12 km的上地壳(图3(b,c)),与

敬少群等<sup>[5]</sup>定位结果基本一致。地震深度统计图来看(图3(d)),地震重定位之后(红色柱状统计图)震源深度主要集中在6~14 km,比重



定位之前(黑色柱状统计图)更符合正态分布(图3(d))。常德地震分布相对稀疏,可能是该区域构造相对稳定,地壳相对运动速率较小<sup>[20-22]</sup>的原因。

根据重定位的结果(图3(a)),地震主要分布在NE走向的花垣—慈利断裂带东北段的慈利附近,及澧水—石首—临湘断裂带的最西段的澧水断裂带西段。花垣—慈利断裂带的最北端的慈利附近,断裂带沿NE向延伸,倾向北西,倾角约为 $45^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 。澧水断裂带近SWW-NEE走向展布于慈利—石门—澧县一带,倾向北西倾角约为 $60^{\circ}$ ,断裂带南侧抬升,北侧下沉,1717年该地区曾发生1次 $5\frac{3}{4}$ 级地震<sup>[23]</sup>,近年来陆续记录到小震活动。分析分为,花垣—慈利断裂带向NE延伸与澧水断裂带的交汇区域,断裂带交汇区易于应力集中,是地震的多发区域,且该地区地震活动受石门附近采矿活动<sup>[24]</sup>影响。

常德地区的地震重定位结果显示(图3),1631年常德 $6\frac{3}{4}$ 级地震的震源区附近的地震分布并不十分集中,可能是因为近代常德地震活动性较低<sup>[5,25]</sup>,也可能是该地区地壳运动相对缓慢<sup>[20-22]</sup>的佐证。但是少数的地震沿着SSW-NNE走向的太阳山断裂附近呈线性分布,可能暗示了太阳山断裂带较低的地震活动性,但是鉴于常德及周边地区的地震活动非常少,而沿着太阳山断裂带出现的地震活动值得更加详细的深入研究和探讨。

## 4 应力场结果

为探讨该地区的地震构造特征,本文搜集了1970年来的观测报告数据,使用地震的P波初动综合震源机制解法<sup>[27]</sup>,求解了常德及周边地区的应力场参数。本研究采用大量P波初动资料求解该地区的平均P轴、T轴方向,虽然P轴和T轴与地壳应力场的压缩轴和拉张轴并不完全一致,但在一定程度上预示着应力场的方向<sup>[27]</sup>。

本文计算结果显示(图4),应力场整体上呈近E-W向挤压及NW-SE向拉张,研究结果与前人<sup>[9-10]</sup>在应力场方面的工作基本一致,也同该地区的小震震源机制解的P、T轴方向<sup>[8]</sup>基本相同。

常德附近地区的P轴近E-W向挤压,T轴NW-SE拉张,应力场一致性较好,该区域分布

着NNE走向的太阳山断裂及太阳山东断裂,反映出了局部地区的相对稳定性,这可能与稳定的太阳山凸起及常桃凹陷构造有关<sup>[3]</sup>。太阳山断裂带附近的应力机制是逆冲兼有部分走滑的应力机制,这与沈得秀等<sup>[4]</sup>野外地质考察得出的该地区断裂是逆冲类型的研究结论一致。

在研究区域的东南部(图4左下角黄色矩形),P轴呈NNE向挤压,T轴呈NW向拉张,其应力场特征与周边的应力场存在明显的应力轴偏转现象(图4)。应力场的P、T轴偏转的东分界线与洞庭—江汉裂陷区的西边界及NNE走向的澧南断裂(图1)基本重合<sup>[5]</sup>,其原因可能是澧南断裂切穿上地壳,致使上地壳应力场不连续,反映出了武陵山—雪峰山断块隆起区与洞庭—江汉裂陷区的构造运动差异性。应力场P、T轴偏转区的北边界是石门附近,该地区位于三个构造区的交界区,应力场P、T轴的急剧偏转说明交界地区的构造复杂性。

## 5 常德地区发震构造分析

前人<sup>[1,3-6]</sup>关于常德1631年 $6\frac{3}{4}$ 级地震发震构造的研究有很多,野外地质调查<sup>[4,7,13,26]</sup>、地球物理勘探<sup>[3,6]</sup>、计算地震学<sup>[5]</sup>、地表形变测量<sup>[12,28]</sup>给出的调查研究结果基本一致。均认为太阳山断裂的产生与太阳山断裂两侧的不均匀隆升有直接关系,这种不均匀垂直运动导致了太阳山断裂的存在,同时也导致了深部地球物理场<sup>[3,6]</sup>和应力场的差异性。

本文地震重定位结果显示:地震主要分布在石门附近。该地区是武陵—雪峰山断块隆升区、江汉—洞庭湖裂陷区及湘西—鄂西断块隆起区三个构造区的交界位置,由于构造区运动差异的原因导致小震集中活动,并且在该区域的应力轴存在明显的偏转,也反映了该地区的地壳不稳定,小震的发生是正常构造运动应力释放的信号之一,且在采矿<sup>[24]</sup>活动的影响下,小震可能会持续长时间不间断活动。在常德北部沿着太阳山断裂带分布着一些稀疏的小震分布,由于常德地区的低地震活动性,线性排列的小震正好验证了太阳山断裂带的地震活动的持续性,并且该地区是太阳山凸起及常桃凹陷的边界,小震的出现同样反映了两个断块的差异性运动。

本文应力场研究结果显示:在武陵—雪峰

山断块隆升区与东部江汉—洞庭湖裂陷区分界线附近的澧南断裂带两侧,应力轴存在偏转现象,其反映出了武陵—雪峰山断块隆升区与江汉—洞庭湖裂陷区的隆升沉降作用控制着整个研究区域的应力场特征。同时,两个构造区的隆升沉降也控制着澧南断裂、太阳山断裂及太阳山东断裂的地震活动,而太阳山凸起与常桃凹陷的垂直运动差异是 1631 年常德 6<sup>3</sup>/<sub>4</sub> 级地震的发震原因。

## 6 结语

本文使用双差定位法,对常德及周边地区 1970 年来的地震进行了重定位,分析讨论了地震分布及断裂带特征,并计算了该地区的应力场参数。

集中在石门附近的地震,主要是武陵—雪

峰山断块隆升区、江汉—洞庭湖裂陷区及湘西—鄂西断块隆起三个构造区的运动差异及采矿活动对石门地区的应力场产生了扰动,致使地震集中分布。沿着太阳山断裂带线性分布的少量地震,是由江汉—洞庭湖裂陷区内太阳山凸起及常桃凹陷垂直运动差异导致的地震活动,其断块间的运动差异及地震活动性明显低于石门地区。

应力场结果显示,常德北部太阳山断裂带附近 P 轴呈近水平 NEE-SWW 挤压, T 轴呈近 NW-SE 向拉张。可能是在武陵—雪峰山断块隆升区与江汉—洞庭湖裂陷区的隆升沉降作用下,使得澧南断裂带东西两侧的应力轴偏转。但是该地区的地质构造及地球物理特征仍然很复杂。鉴于地震观测资料偏少,未来应继续对该地区进行相关的研究工作。

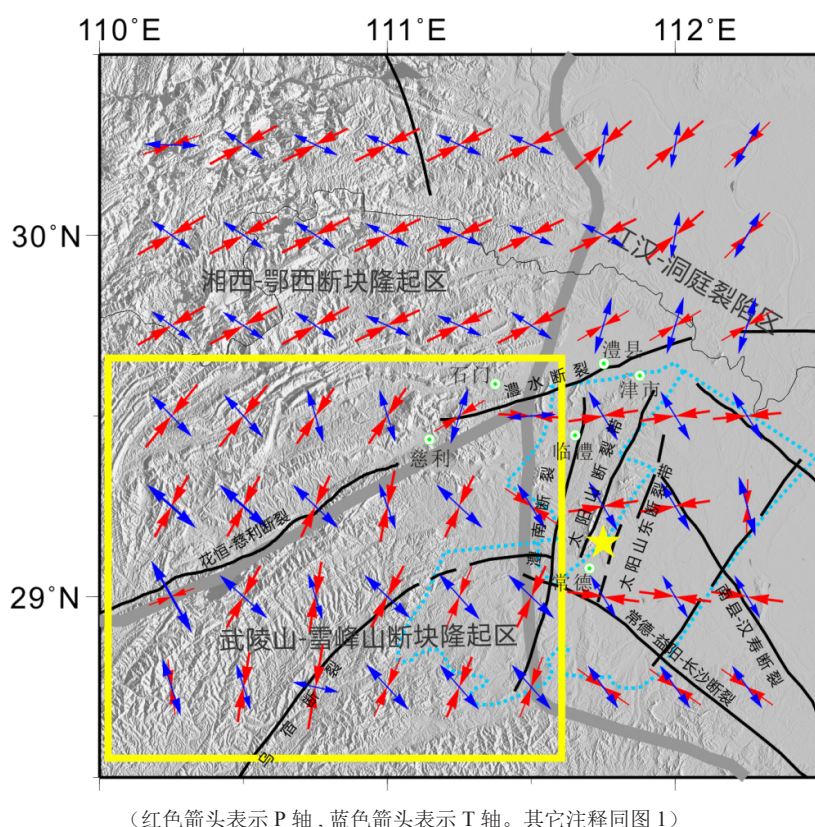


图 4 常德及周边地区的 P、T 轴分布

Fig.4 The distribution of P and T axis in Changde and its adjacent area

**致谢:** 感谢审稿专家和编辑对本文提出的宝贵建议和意见。感谢防灾科技学院万永革教授提供的 P 波初动综合震源机制解法求解应力场的

程序,本文中所使用的部分地震、断层数据由湖南省地震局和常德市地震局提供。文中图件采用 GMT 软件绘制在此一并致谢。

## 参考文献:

- [1] 陈致远. 历史上常德的水灾和地震[J]. 武陵学刊, 1998, 06(04): 90-93.
- [2] 国家地震局震害防御司. 中国历史强震目录(公元前23世纪-公元1911)[M]. 北京: 地震出版社, 1995.
- [3] 徐杰, 邓起东, 张玉岫, 等. 江汉-洞庭盆地构造特征和地震活动的初步分析[J]. 地震地质, 1991, 1(04): 332-342.
- [4] 沈得秀, 周本刚, 杨晓平, 等. 湖南太阳山隆起区断层活动性研究[J]. 中国地震, 2008, 24(01): 38-47.
- [5] 敬少群, 王佳卫. 常德及邻区小震重新定位与速度结构的联合反演[J]. 华南地震, 2016, 36(02): 13-19.
- [6] 赵凌强, 詹艳, 周本刚, 等. 1631年常德历史地震区深部结构的大地电磁探测研究[J]. 地震地质, 2018, 40(01): 155-170.
- [7] 沈得秀. 华南地区中强地震发震构造的判别及其工程应用研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2007.
- [8] 蒋维强, 林纪曾, 赵毅, 等. 华南地区的小震震源机制与构造应力场[J]. 中国地震, 1992, 8(01): 38-44.
- [9] Wan Y. Contemporary tectonic stress field in China[J]. Earthquake Science, 2010, 23(4): 377-386.
- [10] 谢富仁, 张红艳, 崔效锋, 等. 中国大陆现代构造应力场与强震活动[J]. 国际地震动态, 2011, 385(01): 4-12.
- [11] 董瑞树, 周庆, 陈晓利, 等. 1631年湖南省常德地震的再考证[J]. 地震地质, 2009, 31(01): 162-173.
- [12] 高海丽. 洞庭盆地西部地表垂直形变研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2012.
- [13] 肖和平, 陈学良, 高孟潭. 湖南省抗倒塌地震区划图预编试验的潜在震源区划分原则[J]. 震灾防御技术, 2012, 7(01): 12-25.
- [14] 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(06): 1353-1368.
- [15] 鞠慧超, 张元生, 刘旭宙. 2019年甘肃张掖M5.0地震余震序列重定位[J]. 地震工程学报, 2019, 41(06): 1396-1401.
- [16] 杨智娴, 陈运泰, 郑月军, 等. 双差地震定位法在我国中西部地区地震精确定位中的应用[J]. 中国科学(D辑), 2003, 33(B04): 129-134.
- [17] 张广伟, 雷建设, 孙长青. 2014年2月12日新疆于田 $M_s$ 7.3级地震主震及余震序列重定位研究[J]. 地球物理学报, 2014, 57(03): 1012-1020.
- [18] 房立华, 吴建平, 王未来, 等. 2014年新疆于田 $M_s$ 7.3级地震序列重定位[J]. 地球物理学报, 2015, 58(03): 802-808.
- [19] Supendi P, Nugraha A D, Widiyantoro S, et al. Hypocenter relocation of the aftershocks of the  $M_w$  7.5 Palu earthquake (September 28, 2018) and swarm earthquakes of Mamasa, Sulawesi, Indonesia, using the BMKG network data[J]. Geoscience Letters, 2019, 6(01): 1-11.
- [20] 牛之俊, 王敏, 孙汉荣, 等. 中国大陆现今地壳运动速度场的最新观测结果[J]. 科学通报, 2005, 50(08): 839-840.
- [21] 王敏. GPS观测结果的精化分析与中国大陆现今地壳形变场研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2009.
- [22] 赵国强, 苏小宁. 基于GPS获得的中国大陆现今地壳运动速度场[J]. 地震, 2014, 34(01): 97-103.
- [23] 李浩民, 吴中海, 王浩男, 等. 长江中游湖南、湖北地区主要活动断裂及地震地质特征[J]. 地质力学学报, 2016, 22(03): 478-499.
- [24] 彭蓉辉. 综合找矿方法在石门雄黄矿深部找矿中的应用研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.
- [25] 韩竹军, 聂晓东, 周本刚, 等. 湖南常德地区桃源推测隐伏断层是否存在?[J]. 地震地质, 2006, 28(01): 1-11.
- [26] 杨斌. 常德1631年地震与该地区地震监测预防中应注意的问题[J]. 地质灾害与环境保护, 2013, 97(04): 52-56.
- [27] 万永革, 吴逸民, 盛书中, 等. P波极性数据所揭示的台湾地区三维应力结构的初步结果[J]. 地球物理学报, 2011, 54(11): 2809-2818.
- [28] 甘家思, 刘锁旺, 申重阳. 常德1631年大震事件的多场点群发式构造模型[J]. 地壳形变与地震, 1991, 13(04): 17-23.