

郯庐断裂带南段及其周边地区应力场分区与反演^{*}

宋尚武, 王庆良, 张佩, 李煜航, 周琳

(中国地震局第二监测中心, 陕西 西安 710054)

摘要: 基于震源机制解和地应力测量资料, 研究分析郯庐断裂带南段及其周边地区的应力场分布特征, 并结合大地构造特征将该区域应力场分为3个子区域: 郯庐断裂带西侧应力区、苏北断陷应力区和苏南隆起应力区。分区反演构造应力场结果显示: (1) 郯庐断裂带以西区域和苏北断陷区水平方向受到 NEE 向的挤压作用, 苏南隆起区水平方向受到近 EW 向的挤压作用; (2) 郯庐断裂带以西区域水平方向受到的挤压作用方向介于苏北断陷区 NEE 向与苏南隆起区近 EW 向之间; (3) 郯庐断裂带以东区域构造应力场为正断兼走滑机制, 以西区域为走滑机制; (4) 整个研究区域水平方向挤压应力自西向东呈放射状分布。

关键词: 震源机制解; 构造应力场; 分区反演; 郯庐断裂带

中图分类号: P315.725

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2018)03-0457-07

0 引言

郯庐断裂带是中国东部地区最大构造带, 其南段及其周边地区跨越华北地块、下扬子地块和大别造山带, 构造演化历史复杂, 历史上曾多次发生中强震(1668年郯城8½级地震), 是中国东部重要的地震活动区域。根据应力场特征划分准则(谢富仁等, 2004), 该区属于中国东部应力区(一级应力区)的东北—华北应力区(二级应力区)。区域动力学研究结果认为该区动力来源一方面为印度洋板块向欧亚板块碰撞形成喜马拉雅山的侧向推挤力, 另一方面则是太平洋板块和菲律宾板块俯冲日本海的侧向阻挡力。

孕震过程是一个地应力长期积累集中的过程, 应力强度最终超过地壳岩体极限强度, 应力会突然释放导致断裂错动而发生地震。早期, 我国学者为研究构造应力场与地壳运动及地震的关系, 通过原地应力测量(李方全, 王连捷, 1979; 高龙生, 1973; 任希飞, 王连捷, 1980)的方式获得区域构造应力场结果。1996年数字地震台网大规模建设以来记录的大量地震数据, 为开展构造应力场的研究提供了宝贵的资料。目前, 地震学者利用震源机制解结果反演(徐纪人等, 2008; 崔效锋等, 2005; 倪红玉等, 2013; 孙业君等,

2015; 刘泽民等, 2011)以及数值模拟(陈连旺, 詹自敏, 2011; 刘峡等, 2006)等手段对郯庐断裂带南段及其周边局部地区构造应力场特征进行了大量研究, 并得到了较为一致的结果: 郯庐断裂带南段及其周边地区主压应力方向为近水平的 NEE—EW 向(刘泽民等, 2011; 倪红玉等, 2013; 盛书中等, 2013)。

郯庐断裂带南段及其周边地区构造应力场已有大量的研究成果, 但是构造应力场分区研究尚局限于小区域(孙业君等, 2015; 郑先进等, 2010), 本文选用2008—2015年基于HASH方法解算的可靠震源机制解、该区域相关文献中搜集到的震源机制解以及中国大陆地壳应力环境基础库的应力资料, 对郯庐断裂带南段及周边地区(29°~36°N, 112°~124°E范围内的大陆地区)的应力场进行分区研究, 探讨分析该区域应力场的分区分布形态特征。

1 数据收集

本研究所利用的数据有3种来源:

(1) 选取2008—2015年研究区域(图1)小震HASH震源机制解($M_2 \sim 4.8$)作为应力场反演与统计的资料; (2) 搜集区域相关应力场

^{*} 收稿日期: 2017-08-25.

基金项目: 中国综合地球物理场观测——大华北地区项目(201508009)和自然科学基金——潼关高程演变中地壳运动作用及其定量研究(51479163)。

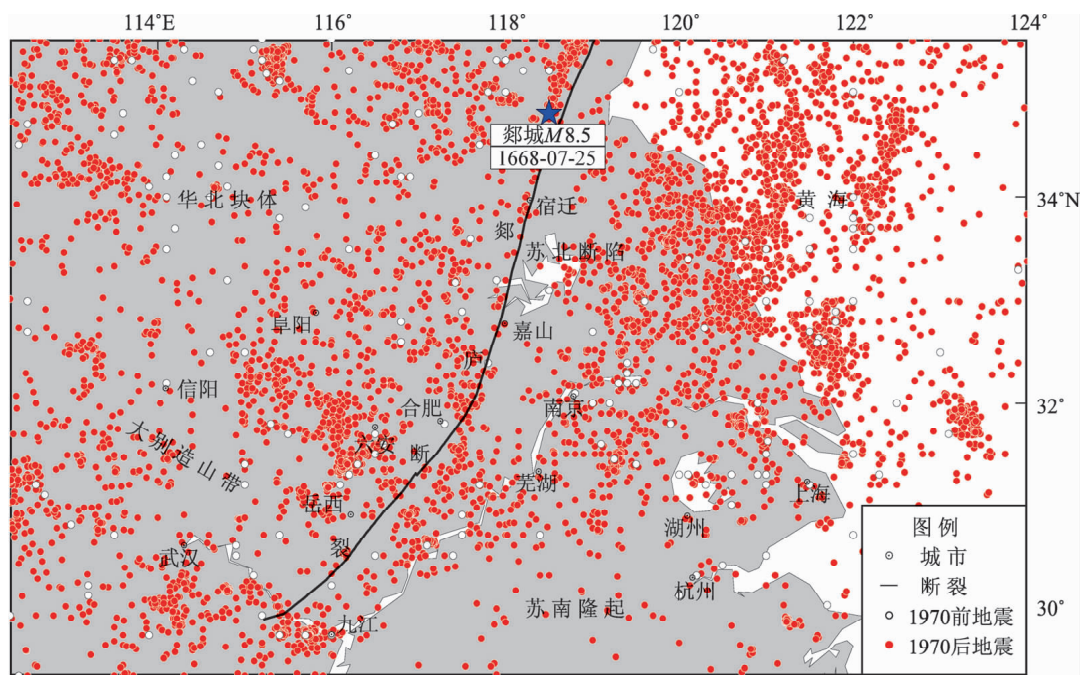


图 1 研究区 $M > 3$ 地震分布示意图

Fig. 1 The sketch map of the studied region and $M > 3$ earthquakes distribution

研究文献中已有震源机制解结果作为应力场反演与统计的资料；（3）选取中国大陆地壳应力环境基础数据库可靠的应力测量资料用于统计。其中包含 6 大类地应力基础资料：地震震源机制解数据、断层滑动反演资料、水压致裂原地应力测量数据、应力解除数据、钻孔崩落数据和应力应变连续观测资料，但该数据库给出的震源机制解只包含水平最大主应力方位，没有反演所需要的节面数据。

由于沿海地区单侧台站接收地震波初动信号，解算的部分震源机制解可信度偏低，为提高可信度，剔除大陆以外地区震源机制解。同时参照世界应力图的划分原则（Zoback, 1992）划分反演得到的断层体系，根据震源机制解 3 个应力主轴倾角的大小，将应力状态分为：正断型、正走滑型（Normal Strike - Slip，正断层兼有走滑分量）、走滑型（Strike Slip）、逆走滑型（Thrust Strike - Slip，逆断层兼有走滑分量）、逆断型（Thrust Faulting）以及除上述之外的不确定型（Unknown），并将其中的不确定型震源机制解剔除。最后得到 815 个地震资料，其中包括 HASH 震源机制解与搜集相关文献（王铮铮等，2001；谢智等，2002；刘红桂等，2004；周春喜，1990；郑月军等，2006；王洪涛，曾建民，2007；李传友等，

2008）获得的 438 个震源机制解资料，以及中国大陆地壳应力环境数据库 148 个震源机制解和 229 个地应力测量数据。由于数据较多，本文不一一列出每个震源机制解的详细参数，只给出了剔除后的数据使用情况，见表 1。

表 1 本研究所用统计资料来源
Tab. 1 The sources of statistical data in this study

资料类型	资料来源	所占比例	参与反演
震源机制解	HASH 震源机制解与搜集相关文献获得的震源机制解	54%	是
	中国大陆地壳应力环境基础数据库	18%	是
测量应力	中国大陆地壳应力环境基础数据库	28%	否

2 分区与应力场反演

2.1 震源机制解分布特征

利用 Zoback 全球应力场的分类标准将本文收集到的震源机制解划分为正断型、逆断型和走滑型 3 种，其中将兼有走滑分量的正断层和逆断层分别划分到正断型和逆断型震源机制解中。基于上述分类给出 3 种类型震源机制解分布图（图 2），

剔除图 2 中虚线右侧黄海区域震源机制解，并给出各震源机制解类型所占的比例（表 2）。

根据给出的震源机制解分布图（图 2）及各类型所占的比例（表 2），发现研究区域内震源机制解主要以走滑型（43%）为主，正断型与兼有走滑分量的正断型（35%）次之，逆断型与兼有走滑分量的逆断层（22%）所占比例最小，区域内 3 种类型的震源机制解在空间上整体分布较为均匀，局部震源机制解类型差异小。

表 2 震源机制解类型及比例

Tab. 2 The types and proportion of focal mechanism solutions

震源机制解类型	所占比例
正断型	29%
正走滑型	6%
走滑型	43%
逆走滑型	15%
逆断型	7%

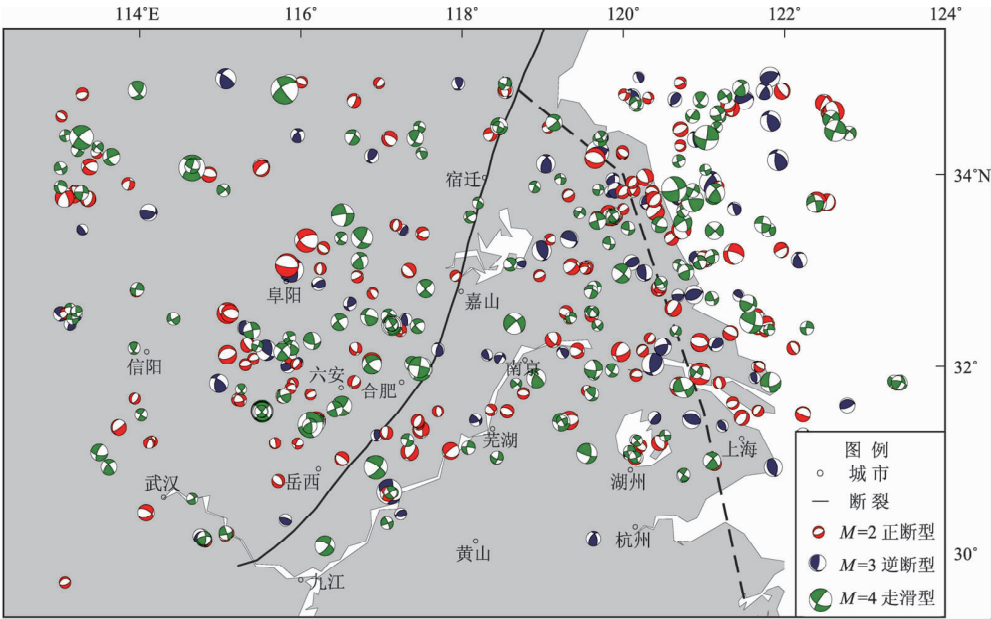


图 2 震源机制解分布图

Fig. 2 The distribution map of the focal mechanisms

2.2 分区依据及压应力 P 轴分布结果

中国大陆东部的现今构造应力场主要是由于大陆板块边界受到外部挤压而引起，在相同的内外部受压环境下，同一构造区域的各构造块体产生相同的构造体系和构造形式。一般情况下，内部应力形态具有较好的统一性，因此根据块体构造，结合构造应力场划分应力分区具有一定可靠性。根据大地构造特征，研究区域内西侧，即郯庐断裂带南段以西包括秦岭—大别山造山带和华北地块 2 个构造区，郯庐断裂带以东为苏北断陷带和苏南隆起区 2 个构造区，结合构造应力场平均方向，对研究区域进行应力分区。

震源机制解分布不等于构造应力场，但受控于构造应力场（六省震源机制小组，United Group of Focal Mechanism, 1981）。Aki 提出只要数据足

够多，并且地震散布于所研究的区域，就可以从平均 P，B，T 轴推断一个地区的平均构造应力场的方向，基于本研究收集到的资料，用震源机制解的 P 轴与地应力测量结果的水平最大主应力对应构造应力最大主应力轴 σ_1 轴，统计近似表示平均构造应力场方向，得到了压应力 P 轴分布结果（图 3）。

由图 3 可见，郯庐断裂带西侧近 EW 方向 P 轴较广泛；苏北断陷带区域 P 轴的优势方向为 NEE 向；苏南隆起区位于华北构造应力场与华南构造应力场交界处，P 轴的分散性较大，优势方向不明显。P 轴统计结果也存在局部异常的情况，六安南侧的霍山震群区域表现为各个方向具有挤压，推测主要因为霍山震群区域位于右旋的 NWW 向信阳舒城断裂和左旋的 NEE 向霍山断裂 2 个方向的断

裂交汇区, 2 组断裂构成共轭剪切, 应力易集中, 地震活动频发且破裂来自于多个方向; 大别造山带南麓的震群区域也出现了各个方向挤压的现象, 这可能是由于该区域位于华北地块和华南地块交界区, 在反映华南整体应力场特征的同时, 又受到华北地块应力场的干扰和影响。

压应力 P 轴分布结果区域差异明显, 总体与上述构造区的范围大体相吻合, 因此将研究区域构造应力场划分为 3 个分区: 郯庐断裂带以西应力区、苏北断陷应力区和苏南隆起应力区 (以下简称郯庐带以西区、苏北区和苏南区)。吴晶等 (2010) 在对江苏及邻区地壳介质各向异性分析研究过程中发现长江可能是 2 个具有不同应力特征活动构造的边界, 结合本文统计结果, 大致以长江流域作为苏北区和苏南区的界线。

利用极坐标图统计 3 个分区的压应力 P 轴 (图 3 中右侧, 角度表示压应力 P 轴方位, 极轴长度表示该方向压应力 P 轴的数量归一化结果, 其

中黑色、蓝色、红色、紫色玫瑰统计图分别为研究区域整体、郯庐带以西区、苏北区、苏南区的 P 轴的统计结果)。郯庐带以西区 P 轴统计结果显示区域有 NEE 和 EW 向 2 个优势方向, 与整个研究区域 P 轴统计结果较为吻合, 苏北区 P 轴优势方位为 NEE 向, 苏南区 P 轴优势方向不明显。

对于中国大陆构造应力环境, 目前已经达成了较为一致的观点, 中国大陆华北地区主要受到青藏高原隆起产生的近 EW 侧向挤压力和太平洋向西俯冲产生的 NE 向挤压力的联合作用, 而华南地区主要受到菲律宾板块北西向推挤的作用。郯庐断裂带作为我国东部地区的最大的断裂带, 是中生代发生巨大左行平移形成深切至上地幔的深断裂 (牛漫兰等, 2000), 在一定程度上起到了东西 2 侧应力阻挡减弱的作用, 造成华北地区主要受到西侧近 EW 向挤压作用, 苏北区受到 NE 向推挤作用较大, 苏南区位于华南 NW 向应力场与华北东向应力场交汇处, 呈现 EW 向挤压作用的状态。

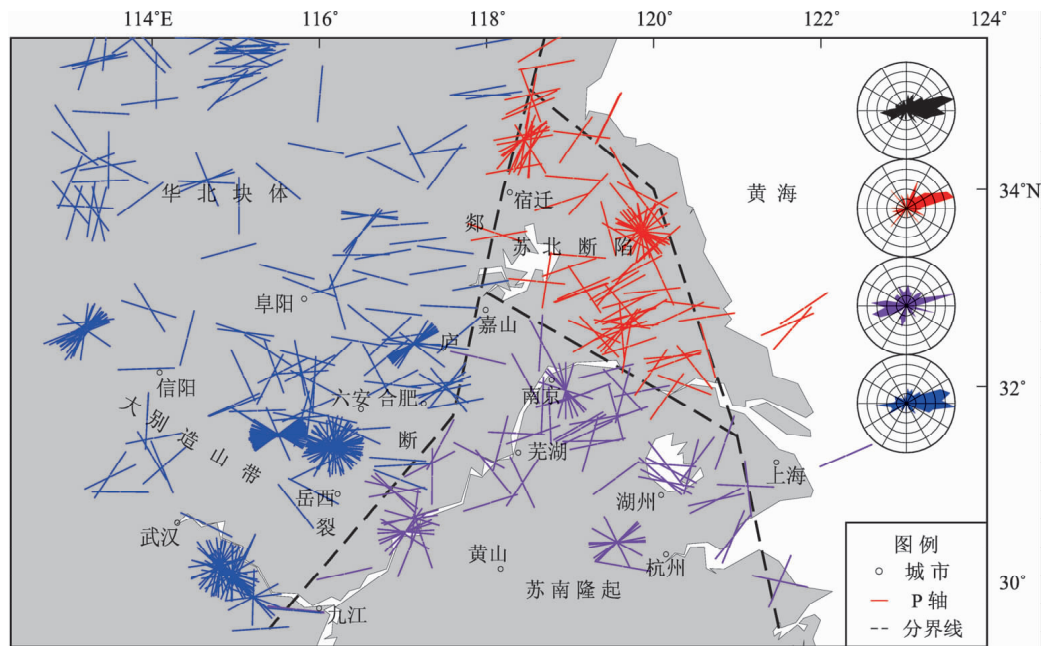


图 3 水平最大主应力轴分布图

Fig. 3 The distribution map of maximum horizontal principal stress

2.3 分区应力场反演

双力偶点源模型下, 单次地震的震源机制 P, B, T 轴方向不能当作地壳实际作用的构造应力场方向, 需多个地震的 P, T, B 轴方向才能反映区域构造应力场的最大、最小和中间主压应力方向 (许忠淮, 1985)。本文选取 HASH 方法解算得到的区域中

小地震震源机制解和收集到的震源机制解数据, 基于划分的应力分区, 利用 MSATSI (Martínez-Garzón, 2014) 程序对 3 个分区分别进行阻尼法向应力反演计算, 不确定性的评估是由 2 000 次输入数据的重新采样完成, 不确定度假定为 95% 置信水平的置信区间, 经过反演得到图 4 应力场反演结果。

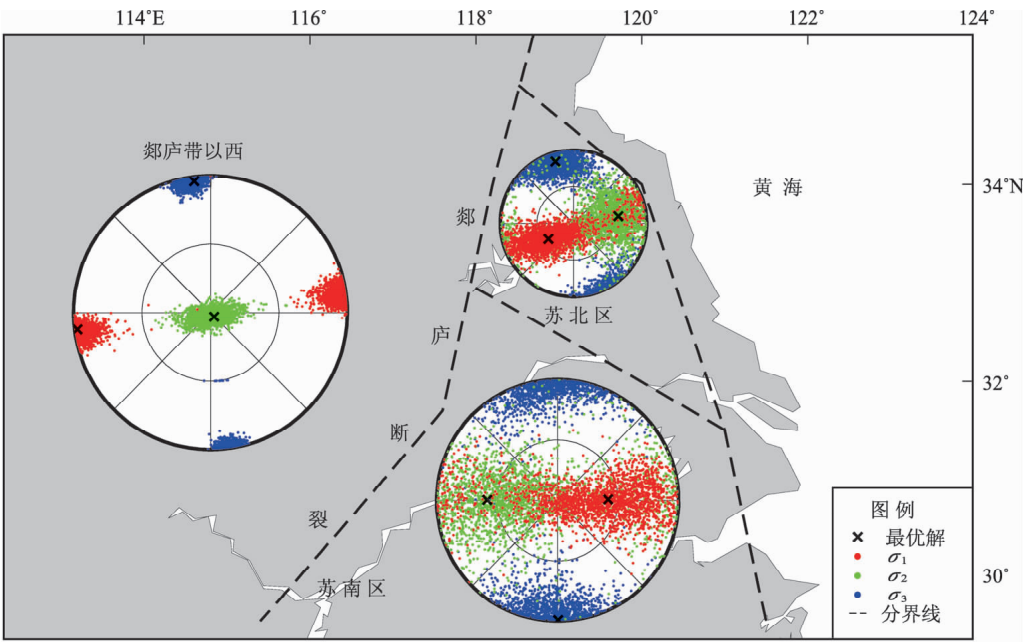


图 4 应力场球面投影图
Fig. 4 The stereograph of stress field

Anderson (1951) 提出因为地面与空间无剪切力作用，所以形成断层的三轴应力状态中的一个主应力轴趋于垂直地面，以此为依据提出形成正断层、逆断层和走滑断层的 3 种应力状态的分析方法。据此可以判断该区域反演的断层机制：郯庐带以西区中间主应力轴近乎垂直地表，最大和最小主应力轴平行于地表，为典型的走滑断层机制，且反演结果得到的主应力轴较为集中，可信度较高，区域水平方向最大主应力轴的方向为 NEE 向；苏北区和苏南区反演得到的结果都为带有一定走滑分量的正断层机制，苏北区及苏南区水平方向最大主压应力轴方向分别为 NEE 向和 EW 向；郯庐带以西区水平方向最大主应力轴方向介于苏北

区与苏南区之间，区域整体的应力场分布呈现一个自西向东的发散状态。

图 5 和表 4 给出了 3 个应力分区的反演结果，郯庐带以西区、苏北区及苏南区水平方向最大主应力方向分别为 263°、238°和 89°。

表 4 应力张量结果 (单位:°)						
Tab. 4 The results of the stress tensors (unit:°)						
分区	σ_1		σ_2		σ_3	
	方位角	倾角	方位角	倾角	方位角	倾角
郯庐带以西区	262.8	2.0	139.2	86.4	352.9	3.0
苏北区	238.2	53.7	81.0	34.1	343.5	10.6
苏南区	88.7	52.4	-89.6	37.6	179.8	0.8

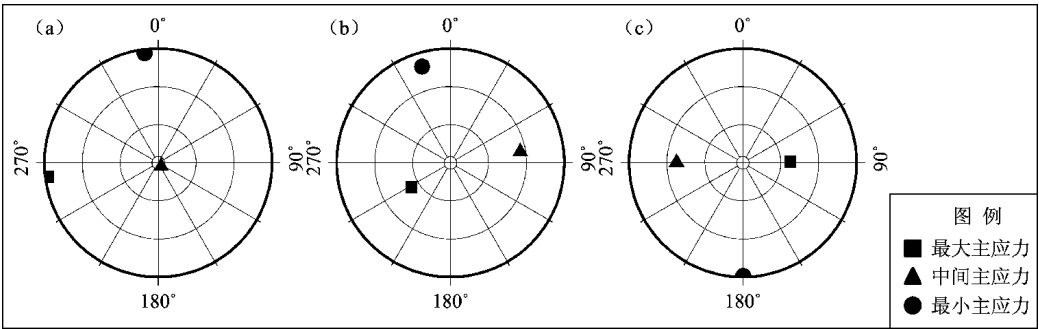


图 5 郯庐带以西区 (a)、苏北区 (b) 及苏南区 (c) 应力区应力张量
Fig. 5 The stress tensor of partitions of the stress areas in the west of Tanlu (a), Subei (b) and Sunan (c) area

倪红玉等 (2013) 反演安徽地区的震源机制解发现, 郯庐断裂带安徽区域受到近 EW 向的水平挤压作用; 刘泽民等 (2011) 利用东大别地区 219 次地震的震源机制解资料计算得到, 东大别地区最大主压应力轴的方位角为 267° , 倾角为 5° , 水平最大主应力方向为近 EW 向; 吴少武等 (1990) 早期对苏北断拗带的钻孔崩落测量中所测得的水平最大主应力方向为 $N76^\circ E$; 盛书中等 (2013) 采用综合震源机制解法对南通及周边地区的 1 391 个 P 波初动资料计算得到南通市地壳主压应力方位介于华北地区 NEE—EW 向主压应力和华南 NWW 向主压应力之间, 而我们得到的结果为接近 EW 向; 孙业君等 (2015) 在对郯庐断裂带鲁苏皖段平均应力场的分区研究中发现, 从西向东最大主压应力轴有逆时针偏转的趋势, 郯庐断裂带西侧最大主压应力轴方向为近 EW 向。本文计算结果与前人对该区域构造应力场研究结果较为一致。

3 讨论与结论

根据区域构造特征和压应力轴统计分布特征将郯庐断裂带南段及周边地区分为 3 个区域: 郯庐带以西区、苏北区和苏南区, 在此基础上利用震源机制解对 3 个分区进行构造应力场反演, 并对计算结果进行探讨与分析。

(1) 从压应力轴统计结果来看, 郯庐带以西区主要有近 EW 向和 NEE 向 2 个压应力作用, 苏北区压应力轴优势方向为 NEE 向, 苏南区压应力统计结果分布优势方向不明显, 汪素云与许忠淮 (1985) 利用小震的 P 波初动方向数据对中国东部大陆地区 ($105^\circ E$ 以东) 构造应力场的方向特征做了归纳和分析, 得到中国东部大陆地区的 P 轴水平方向轨迹线, 结合该轨迹线来看苏南区正处于近东西向应力向东部扩散的弧形中心, 即该区域位于华南与华北应力场的过渡区, 可能同时受到 2 个应力区的影响。

(2) 分区反演结果表明郯庐带以西区、苏北区及苏南区水平最大主压应力分别为 NEE 向、NEE 向及 EW 向, 但郯庐带以西区水平最大主应力方向介于苏北区与苏南区之间, 研究区域整体构造应力场呈现自西向东发散的形态。目前研究结果认为印度洋板块向北碰撞欧亚大陆板块促使地壳隆升并产生了环形放射状的侧向挤压力, 该

区域受到近 EW 向的侧向挤压作用, 还受到太平洋板块 SW 向和菲律宾板块的 NW 向阻挡, 整体表现为一个由西向东发散的应力场结构 (张东宁, 高龙生, 1989; 王晓山等, 2015; 汪素云, 许忠淮, 1985), 本文的 P 轴统计结果和构造应力场反演都得到了自西向东发散的应力场分布形态, 证明本研究中分区的科学性和可行性。

(3) 构造应力场反演结果显示, 郯庐以西区为走滑的断层机制, 而苏北区和苏南区为正断兼有走滑分量的断层机制, 认为郯庐断裂带南段东西两侧是 2 个具有不同应力特征的构造块体。郯庐以西区域主要受到青藏高原侧向挤压力作用, 但是随着距离增大以及区域构造条件的变化, 挤压应力的强度会有所变化 (徐纪人, 赵志新, 2006), 同时郯庐断裂带切割地壳深达岩石圈, 在一定程度上对其西部的侧向挤压力有一定的阻挡作用, 因此其东侧可能受到菲律宾板块和太平洋板块的影响更大一些。

本文中的 HASH 震源机制解由蒋长胜研究员提供, 在此表示衷心感谢。

参考文献:

- 陈连旺, 詹自敏. 2011. 华北地区构造应力场年动态变化特征的数值模拟[J]. 大地测量与地球动力学, 31(6): 1-10.
- 崔效锋, 谢富仁, 赵建涛. 2005. 中国及邻区震源机制解的分区特征[J]. 地震地质, 27(2): 298-307.
- 高龙生. 1973. 利用钻孔形变测量介质中应力场——有关地应力测定中的元件和测量数据处理的讨论[J]. 地球物理学报, 16(1): 25-42.
- 李传友, 曾新福, 张剑玺. 2008. 2005 年江西九江 5.7 级地震构造背景与发震构造[J]. 中国科学: 地球科学, 38(3): 343-354.
- 李方全, 王连捷. 1979. 华北地区地应力测量[J]. 地球物理学报, 22(1): 1-8.
- 刘红桂, 缪发军, 徐戈, 等. 2004. 小震震源机制 P 轴取向的预报应用[J]. 防灾减灾工程学报, 14(3): 306-312.
- 刘峡, 傅容珊, 杨国华, 等. 2006. 用 GPS 资料研究华北地区形变场和构造应力场[J]. 大地测量与地球动力学, 26(3): 33-39.
- 刘泽民, 刘东旺, 李玲利, 等. 2011. 利用多个震源机制解求东大别地区平均应力场[J]. 地震学报, 33(5): 605-613.
- 六省震源机制小组, United Group of Focal Mechanism. 1981. 由震源机制解推断苏鲁皖豫地区的现代构造应力场[J]. 地震地质, 3(1): 19-28.
- 倪红玉, 刘泽民, 何康. 2013. 郯庐断裂带安徽段中小地震震源机制及现代应力场特征[J]. 地震工程学报, 35(3): 677-683.
- 牛漫兰, 朱光, 宋传中, 等. 2000. 郯庐断裂带火山活动与深部地质过程的新认识[J]. 地质科技情报, 19(3): 21-26.

- 任希飞,王连捷. 1980. 深部地应力测量方法——水力压裂法[J]. 水文地质工程地质, (2): 46–49.
- 盛书中,万永革,李红光,等. 2013. 应用综合震源机制解法推断南通市地壳应力场方向[J]. 地球物理学进展, 28(3): 1297–1303.
- 孙业君,刘红桂,江昊琳,等. 2015. 江苏南部地区现今震源机制和应力场特征[J]. 地震研究, 38(2): 203–210.
- 汪素云,许忠淮. 1985. 中国东部大陆的地震构造应力场[J]. 地震学报, 7(1): 17–32.
- 王琤琤,徐戈,杨彩霞,等. 2001. 常熟—太仓 M5.1 地震精定位及震源机制解[J]. 防灾减灾工程学报, 21(1): 1–3.
- 王洪涛,曾建民. 2007. 江西九江(瑞昌)5.7 级地震的地震地质构造环境与发震构造之研究[J]. 福建地震, 23(1–2): 2–29.
- 王晓山,吕坚,谢祖军,等. 2015. 南北地震带震源机制解与构造应力场特征[J]. 地球物理学报, 58(11): 4149–4162.
- 吴晶,高原,石玉涛,等. 2010. 基于地壳介质各向异性分析江苏及邻区构造应力特征[J]. 地球物理学报, 53(7): 1622–1630.
- 吴少武,张绍治,许忠淮,等. 1990. 根据钻孔崩落资料确定江苏地区深部地壳应力方向[C]//第二届全国岩石动力学学术会议论文选集. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 276–287.
- 谢富仁,崔效锋,赵建涛,等. 2004. 中国大陆及邻区现代构造应力场分区[J]. 地球物理学报, 47(4): 654–662.
- 谢智,刘尧兴,胡卫建,等. 2002. 河南及邻区地震的震源机制[J]. 西北地震学报, 24(3): 283–286.
- 徐纪人,赵志新,石川有三. 2008. 中国大陆地壳应力场与构造运动区域特征研究[J]. 地球物理学报, 51(3): 770–781.
- 徐纪人,赵志新. 2006. 中国岩石圈应力场与构造运动区域特征[J]. 中国地质, 33(4): 782–792.
- 许忠淮. 1985. 用滑动方向拟合法反演唐山余震区的平均应力场[J]. 地震学报, 7(4): 349–362.
- 张东宁,高龙生. 1989. 东亚地区应力场的三维数值模拟[J]. 中国地震, 5(4): 24–33.
- 郑先进,刘东旺,刘泽民,等. 2010. 安徽地区应力场分区特征及中强震前震源机制的一致性研究[J]. 华北地震科学, 28(1): 16–20, 30.
- 郑月军,张世民,崔效锋,等. 2006. 地震震源机制解在华南及邻区潜源区长轴方向判定中的应用[J]. 中国地震, 22(1): 24–33.
- 周春喜. 1990. 舟山群岛 3.2 级地震的震源机制及与海域地质构造的关系[J]. 浙江地质, 6(2): 52–56.
- Anderson B E M. 1951. The dynamics of faulting and dike formation with application to Britain[M]. Edinburgh: Oliver and Boyd, 2nd Edition.
- Martínez – Garzón P. 2014. MSATSI: A MATLAB Package for Stress Inversion Combining Solid Classic Methodology, a New Simplified User – Handling, and a Visualization Tool[J]. Seismological Research Letters, 85(4): 896–904.
- Zoback M L. 1992. First – and second – order patterns of stress in the lithosphere: the world stress map project[J]. J Geophys Res, 97(B9): 11703–11728.

The Stress Field Inversion and Stress Field Partition of the Southern Tanlu Fault and Surrounding Areas

SONG Shangwu, WANG Qingliang, ZHANG Pei, LI Yuhang, ZHOU Lin

(The Second Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract

Based on collection of focal mechanisms and in – situ stress measurements, we analyze the distribution feature of the stress field of the southern Tanlu fault and surrounding areas. Combined with the tectonic characters, we divided the study regions into three stress areas, i. e. the Tanlu fault west zone, the Subei rift zone and the Sunan uplift zone. Inverting the tectonic stress tensor of the three areas and analyzing the characters of each stress division, the results are as follows: (1) The west of Tanlu fault area and northern Jiangsu faulted area are extruded by the NEE stress in horizontal. The uplift area in the southern Jiangsu in horizontal is squeezing with the ~ EW stress. (2) The Tanlu west area is extruded in horizontal by the stress whose direction is between the NEE direction of the stress field in the northern Jiangsu and the ~ EW direction of the stress field in uplift area of southern Jiangsu. (3) The stress field in the east area of the Tanlu fault is controlled by the mechanism of normal fault with strike – slip component, and the stress field in the west area is controlled by the mechanism of normal strike – slip fault. (4) The direction of horizontal compressive stress in the entire study area distributes radially from west to east.

Keywords: the focal mechanisms; the stress field; the divisional inversion; the southern Tanlu fault