朱裕振^{1,2)},强建科³⁾,李强^{1,2)},沈立军^{1,2)},贾金荣³⁾

2)中国地球物理学会煤田地球物理重点实验室,济南,250104;3)中南大学,长沙,410083

内容提要: 沂沭断裂带为郯庐断裂带山东段的大断裂,其深度切穿莫霍面,把鲁中造山带与苏鲁造山带隔开,断 裂带的活动情况影响山东地区大地构造的稳定性。以往的工作多集中在地表或近地表地质要素的调查和研究,局 部也开展了一些地球物理探测工作,大多以剖面为主,对区内地质构造的认识比较局限。本文收集沂沭断裂带约 14600 km²范围的区域重力数据,并对其进行了定性解释和三维定量反演,获得了区内地下 30 km 内的相对密度分 布。综合研究了从诸葛镇到五连金矿的精测剖面,其中包括重力、磁法和大地电磁 3 种方法。由此得到以下几点结 果:①揭示了区内东部地下存在一条巨大的隐伏隆起构造,深度约 2 km 到 10 km,从南南西方向延伸到北北东,有 3 个局部核心区:分别是石桥子镇往西南约 30 km 范围、由桑园镇、五莲县金矿及许孟镇三者之间的区域、以湖头镇为 中心向北向南各延伸约 30 km 范围。②地表观察的断裂 F1 和 F2 比由反演的相对密度确定的断裂 F'1 和 F'2 向东 偏移,而且北部偏移比南部更大。③重力、磁法、大地电磁测深综合剖面 S1—S2 研究表明,沂沭断裂带北段内岩矿石 具有较低的相对密度、较低的磁性和较低的电阻率特征,意味着断裂带在北部具有张性特点。综上所述,研究区内 东部上地壳内存在隐伏隆起构造,昌邑—大店断裂和安丘—莒县断裂在北部具有张性断裂特征,在南部具有挤压特 征,莒县以南小地震方式释放部分应力。

关键词:重力三维反演;沂沭断裂带深部构造;活动断裂带;隐伏隆起构造

沂沭断裂属于郯庐断裂带的一部分,是山东境 内北北东走向的重要断裂,在地质历史时期活动频 繁,其地质构造主要由4条断裂构成"两堑夹一垒" 的构造带特征,但是对构造带的活动情况,不同学者 持有不同的观点。在 20 世纪 90 年代, Huang Wei (1993) 对沂述断裂带周边的 427 条冲沟和河流进 行统计分类,得出其中有约48.7%冲沟和河流无法 确定是否有同步转折和位错,有约37.7%具有右旋 位错,13.6%具有左旋位错倾向的结果,由此认为沂 沐断裂带具有右旋走滑的特征。Lin Aiming 等 (1998)的研究表明,沂沭断裂带东部的两个断裂在 第四纪具有明显的活动特征,而西部的两个断裂第 四纪以来没有明显活动特征。宋方敏等(2005)通 讨野外实地调查、探槽开挖以及岩矿石鉴年等勘探 手段确定安丘——莒县断裂小店子——茅埠段为全新世 早期活动的断裂(大约发生在 70000a;宋方敏等,

2005,有3次古地震发生在3500a、6500a、10000a;林 伟凡等,1987),其活动性质是以右旋走滑为主,兼 有挤压逆冲,断层东部抬升约2.0~3.8 m,水平位错 64~73 m。林爱明等(2013)认为沂沭断裂带的水系 分布和几何形态主要受断裂构造制约,沿沂沭断裂 带周边区域发育的水系不具有走滑断层的系统化转 折和位错的变形特征,但水系分布和实际考察确认 沂沭断裂带东部的两个断裂是活动断裂。

从中国东部早白垩世裂陷盆地的构造演化来看 (张岳桥等,2004;朱光等,2018),早白垩世早期引 张裂陷阶段沿郯庐断裂带发生右旋走滑活动,而早 白垩世晚期在区域 NW—SE 向挤压应力场作用下 出现反转,沿郯庐断裂发生强烈的左旋走滑运动。 严乐佳等(2014)通过对沂沭断裂带活断层的结构 与几何学特征、活动型式与时间、断层擦痕以及反演 应力场等多方面的综合分析表明,沂沭断裂带第四



¹⁾山东省煤田地质规划勘察研究院,济南,250104;

注:本文为山东省自然科学基金面上资助项目(编号:ZR2020MD039)和山东省地质勘查项目(编号:鲁勘字(2019)13号)的成果。 收稿日期:2022-03-21;改回日期:2022-07-16;网络首发:2022-08-20;责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2022.08.031 作者简介:朱裕振,男,1985年生,硕士,高级工程师,从事综合地质与地球物理勘探;Email:277628696@qq.com。通讯作者:强建科,男, 1967年生,博士,教授,主要从事重磁电正演与反演研究;Email:qiangjianke@163.com。

纪以来呈现为大型的活动构造带,且各活断层主要 表现为逆右行平移。

要想搞清楚沂沭断裂的更多地质情况,仅限于 地表地质要素是不够的,徐建国等(2019)通过面积 性浅钻发现安丘—莒县断裂(F1)和昌邑—大店断 裂(F2)之间存在"潜凸起"(位于沂沭断裂北段), 宽度约500~1000 m,这个现象为人们解释沂沭断裂 演化中伸展、沉积、挤压、隆起等过程提供更多依据。

了解沂沭断裂带大深度地质情况必须依赖于大 深度的地球物理探测方法。燕乃玲等(2001)从流 动水准、流动重力和流动地磁测量的角度讨论了沂 沭断裂南北段与地震活动之间的关系,指出沂沭断 裂带北段地壳垂直变形较大,与附近地震活动密切 相关。大地电磁测深法是一种大深度物探方法,能 够获得深部岩矿石导电性特征,叶高峰等(2009)由 泰安— 莒县— 日照观测的 一条超低频大地电磁测深 剖面得出, 沂沭断裂带深度约 20~40 km 为低电阻 率,而深度约 40~140 km 为高电阻率,在断裂带西 侧岩石圈厚度约80 km,东侧岩石圈厚度约140 km, 具有明显电性差异。张继红等(2019)通过安放在 沂沭断裂带内的安丘、莒县电磁台和断裂带外的无 棣电磁台长期观测的地电场和地磁场,数据反演结 果表明,无棣台及其附近具有地块稳定的地壳深部 结构,而安丘和莒县电磁台及其附近中下地壳内存 在有较低电阻率的电性结构。深反射地震对具有层 状结构的地层或深大断裂效果较好,在宿迁一带开 展的深反射地震研究表明(刘保金等,2015;秦晶晶 等,2020),郯庐断裂带不仅是一个切割岩石圈的大 型断裂构造带,而且还是地壳和岩石圈厚度的突变 带,该区莫霍面和岩石圈底界均向西倾,其中,地壳 厚度约为 31~36 km, 岩石圈厚度约为 75~86 km。

重力勘探成本较低,覆盖面较大,对于地下大型 隐伏地质构造具有显著的反映。王鑫等(2015)对 沂沭断裂带的重力场进行了分离,定性讨论了上、 中、下地壳物质分布,可惜没有做进一步反演工作。 对重力数据进行三维反演才能真正获得地下岩矿石 的相对密度分布,进而推测构造分布。

综上所述,由地表残留地质要素评估大约70 ka 前或更早时期的地质运动存在一些不足,地球表面 各种地质作用强烈,地表残留地质要素有些可靠,有 些不可靠,致使有时候对同一地质问题出现不同的 认知。地质运动的时间以百万年计算,运动的形式 随深度不同变形程度也不同。因此,认识地球深部 构造问题还需要借助大深度地球物理观测数据,笔 者等以区域重力数据的三维反演结果为依据,研究 沂沭断裂带中段中深部的构造展布情况。

1 研究区内地质概况

研究区位于山东省东南部,主要位于日照市、临 沂市内,少量区域属淄博市、潍坊市内。研究区处于 华北板块和秦岭—大别—苏鲁造山带两大构造单元 交汇部位,横跨鲁中隆起、胶辽隆起区、胶南—威海 隆起区3个II级单元。沂沭断裂4条主干断裂自东 向西依次为昌邑—大店断裂、安丘—莒县断裂、沂 水—汤头断裂、鄌郚—葛沟断裂。研究区隶属华北 地层大区,横跨两个地层分区,即鲁西地层分区和鲁 东地层分区,上述两个地层分区的界限以安丘—莒 县断裂为界。地层发育较为齐全(图1)。

区内位于中低丘陵区,地形总体上北高南低,海 拔40~1031 m。沂沭断裂带内汞丹山凸起为丘陵区 地形,两侧地堑为山间河谷地形,沂、沭河的冲洪积 作用造就了著名的临郯苍平原。根据海拔和地形切 割程度的差别分为弱切割剥蚀构造丘陵地貌、剥蚀 堆积山间平原地貌、堆积山间平原地貌。变质岩区 山顶平缓,局部切割为"V"字型,下游谷宽呈"U"字 型。堆积山间平原为流水搬运堆积形成,堆积物自 河谷上游至下游、自山前至滨海由薄变厚。图2展 示的立体地形高程比例尺很大,主要想突出盆地与 山地的区别,以便于与地下隐伏隆起构造对比。

2 重力异常三维反演及分析

2.1 重力异常定性特征

沂沭断裂带重力异常数据为山东省1:20万区 域重力数据,总体异常特征为东高西低,即东部和东 北方向重力异常较高,西部和东南方向重力异常较 低,中南部重力异常为次高(图3)。三部分之间以 两条 NNE 向的大型重力梯级带相隔,恰好与4条主 干断裂相对应。区域重力值变化特征反映了莫霍面 东浅西深的变化趋势和地壳密度在横向上的不均 匀性。

研究区内西部和西北方向为泰山隆起区,区域 重力场总体显示为大规模的低值重力异常,变化范 围约-30~0 mGal,主要岩石为古元古代二长花岗岩 类。部分呈 NW 向展布的相对重力高异常,重力值 为0~5 mGal,与泰山岩群分布有关。区内东部和东 北方向,有明显的重力高值,约0~16 mGal,但地面 相对平坦(图2),意味着地下有隐伏隆起构造或莫 霍面抬升。



Fig. 1 Sketch map of geological structure in southeastern Shandong

2.2 重力三维反演及分析

本次重力三维反演软件为中南大学课题组研制的地球物理资料综合处理解释一体化系统(GME_3DI)。该软件的最大特点是采用空间波数混合域算法,将三维微分方程转化为一系列不同波数的一维常微分方程进行计算,因此计算速度非常快,千万或亿节点的运算在微机上几分钟完成,拟合精度达到千分之一,在实际应用中取得较好的结果(朱裕振等,2019;李帝铨等,2021)。

将研究区进行三维剖分,水平方向节点为412, 深度方向节点为401(-30 km),总共获得地下单元

数为412×412×401=68067344个。三维反演共迭代 8次,拟合误差小于千分之一。反演出的最大相对 密度为0.16g/cm³,最小相对密度为-0.3g/cm³,图 4展示了4条南北和东西深度切片,密度异常明显。 图5是地下岩矿石相对密度大于0.02g/cm³的分 布情况,主体隐伏隆起构造由南南西延伸到北东东。 有3个主要相对密度异常:一个在东北位置,地面为 胶莱沉积盆地,但地下展显出隐伏隆起构造,中心埋 深约-7km;另一个在东部,属于苏鲁造山带地块; 第三个密度异常在南部,埋深较大。随着深度增加, 相对密度差异越小,在-30km 深度,从相对密度的



Fig. 2 Three dimensional topographic map of southeastern Shandong

等值线来看,西部小一些,东部大一些,意味着莫霍 面西低东高,但异常微弱(图6中-30 km 切片)。

为了分析中下地壳岩矿石的分布情况,我们把 重力反演结果的水平切片上下叠放,以立体图的方 式展示(图6),明显可以看到,高密度岩体主要集中 在F1断裂以东区域,深度为-2km到-20km以内, 在-10km到-20km之间呈现"西低东高"的特点, 意味着中下地壳厚度"西薄东厚",或者说,中下地 壳表现出"西边下沉东边抬升"。从-30km深度的 相对密度差异来看,莫霍面水平方向差异性较小 (图6)。



Fig. 3 Three dimensional schematic diagram of gravity anomaly in southeastern Shandong (note: coordinates have been treated as pseudo coordinates)



图 4 山东东南部内重力三维反演相对密度 立体切片示意图

Fig. 4 Three dimensional slice map of relative density of three-dimensional inversion of internal gravity in southeastern Shandong

3 沂沭断裂带隐伏构造讨论

3.1 沂沭断裂带东部 F1 和 F2 断裂右旋证据

从重力三维反演的相对密度数据体中截取地下 -5000 m 深度处的相对密度水平切片(图7),一般 认为,凹陷或断层位置表现为相对密度低,图中红色 表示相对密度较高或隆起区域,而浅绿表示低密度 物质或断层位置。四条实线分别为地表地质观察主 断裂 F1(昌邑—大店断裂)、F2(安丘—莒县断裂)、 F3(沂水—汤头断裂)和 F4(鄌郚—葛沟断裂)对应 的位置(林爰明等,2013;刘保金等,2015)。虚线位 置 F'1、F'2、F'3、F'4 为重力三维反演推断断裂位置, 很明显,这4 组断层尽管趋势一致,但地表断裂位置 与由重力反演推断的断裂位置并不重合,而且北部



图 5 山东东南部重力异常三维反演结果 示意图(相对密度>0.02 g/cm³) Fig. 5 3D inversion results of gravity anomalies in southeastern Shandong (Relative density > 0.02 g/cm³)





比南部差异更大,即断裂 F1、F2 北端比 F'1、F'2 向 东偏移约 10 km,且断裂带内以低密度介质为主;而 在南部断裂 F1、F2 和 F'1、F'2 有差别,但比较小。

上述现象说明,断裂带 F1、F2 在东北部是张性 的,且整体向右移动,其中 F1 右移更多一些(与"右 旋走滑"的地质现象对应;(Huang Wei,1993;林伟 凡等,1987))。但断裂带 F1、F2 在西南部右移较 小,推测隐伏隆起构造 3 成为阻力,使莒县西南部成 为应力集中点,查询山东地震局的历史数据表明,在 最近 10 年内莒县附近发生 5 次 2~3 级地震(表 1),说明该地区应力积聚较大,以小地震方式能够 释放部分应力。

3.2 隐伏岩体分析

由地表地形(图2)可看出,断裂带 F1—F2 的东 北部和西南部浅表均为沉积水平地层,地形起伏很

表 1 2015 年以来山东莒县地震记录

Table 1 The earthquake records in Juxian County,

Shandong Province since 2015

震级	时间	震源深度(km)
2.3级地震	2020-10-08	12
2.5级地震	2019-02-23	10
2.0级地震	2018-02-21	11
2.3级地震	2015-03-15	7
2.1级地震	2015-03-12	7







and Yishu fault zone is in the southeastern Shandong

F1、F'1—昌邑—大店断裂; F2、F'2—安丘—莒县断裂; F3、F'3—沂水—汤头断裂; F4、F'4—鄌郚—葛沟断裂;

S1—S2—综合物探测线。实线为地表断层位置,虚线为-5000 m 深度重力反演推测断层位置

F1, F'1—Changyi—Dadian fault; F2, F'2—Anqiu—Juxian fault; F3, F'3—Yishui—Tangtou fault; F4, F'4—Tangwu—Gegou fault; S1—S2— comprehensive section. The solid line is the location of the surface fault, and the dotted line is the location of the fault inferred by gravity inversion

小,但从重力三维反演的相对密度分布(图6、图7) 来看,地下-2000到-10000m之间存在隐伏地层隆 起构造或侵入火成岩体(需要同时满足磁性异常), 有3个明显的"相对高密度异常"(图中白色虚线 内):可以解释为地层隆起产生的密度异常,即东北 部的隐伏隆起构造-1、东部的隐伏隆起构造-2和南 部隐伏隆起构造-3。

3.3 精测地球物理剖面:磁法、大地电磁测深反演 结果与重力反演结果对比

地下介质是非常复杂的,常常具有不同的物理 性质,每种物探方法只能获得一种岩矿石物理性质, 为了获得岩矿石不同的物性参数,开展综合地球物 理研究非常有必要。图7中蓝色测线 S1—S2 为综 合物探剖面线,开展了大地电磁测深法、重力和磁法 3种探测方法和数据反演,展示了综合剖面下岩矿 石的导电性、密度和导磁性特征。图 8 和图 9 是从 三维重磁反演数据体中进行三维插值出来的(剖面 长度为斜距 $r=\sqrt{x^2+y^2}$, x 和 y 为北向坐标和东向坐 标)。由图 8 看出,以 F1 和 F2 为界线,两边为不同 构造单元,密度异常特征明显;左边为沂沭断裂带和 鲁中隆起带,表现为大范围低密度异常,依据经验判 断该区域莫霍面埋深较大导致其地表重力异常变 低,或者也可以认为在同一深度上西部相对东部而 言,岩矿石密度相对较低。断裂带右边为胶莱盆地, 具有相对密度高异常,可以解释为莫霍面抬升或盆 地下方有局部隐伏隆起构造,该异常水平方向延伸



图 8 山东诸葛镇至五莲县金矿综合剖面重力反演的相对密度分布 Fig. 8 Relative density distribution of gravity inversion in the comprehensive profile of gold deposits from Zhuge Town to Wulian County, Shandong Province



图 9 山东诸葛镇至五莲县金矿综合剖面航磁反演的相对磁化率分布

Fig. 9 Relative magnetic susceptibility distribution of aeromagnetic inversion of comprehensive profile of gold deposits from Zhuge Town to Wulian County, Shandong Province

约 20 km,异常中心深度大约-7~-9 km,异常向下 延伸到约-25 km 处。断层 F3 和 F4 之间浅部显示 为相对密度高异常,东西方向延伸和深度方向分别 约5 km 的规模,意味着在白垩系下面有隐伏"隆起构造"。

图 9 是综合剖面磁化率分布图,可看出有两个



图 10 山东诸葛镇至五莲县金矿综合剖面大地电磁测深反演的电阻率分布 Fig. 10 Resistivity distribution of magnetotelluric sounding inversion of comprehensive profile of gold deposits from Zhuge Town to Wulian County, Shandong Province

明显的磁性体,一个在 F1 断层以东的五莲县金矿, 这里是一个已知的火山机构,东西方向延伸约 3~4 km,深度方向延伸约-6 km;另一个磁性体在断裂 F3 和 F4 之间,与相对密度高异常对应,顶部靠近 F4 断裂,上小下大,比东部火山机构规模要大一些, 向下延伸约-7 km。

上述重磁反演结果表明,同时具备相对密度高 和磁化率高特征的岩体只能是火成岩体或铁磁性矿 体。

在相同剖面上布置了 60 个长周期大地电磁测 深点,反演结果如图 10 所示,沂沭断裂带整体表现 为中低电阻率特征,其中东部断裂 F1 和 F2 电阻率 更低一些,表明这两个断裂为深大断裂,由于断层内 岩矿石破碎且含水、以及温度作用下导致电阻率较 低。断裂带西部的鲁中隆起中深部和东部胶莱盆地 中深部表现出高电阻率,说明其岩矿石相对完整。

4 结论

通过三维重力反演结果和精测综合物探剖面的

研究,我们对沂沭断裂带中段周围约一万多平方千 米内深部岩石分布和构造展布有了更深刻的理解和 认识,为今后深入研究郯庐断裂带的活动性提供依 据。

(1)研究区内地下存在一条巨大的隐伏隆起构 造(对比图 2 和图 5),从南南西方向延伸到北东东, 有 3 个局部核心区:东北角集中在胶莱盆地内的石 桥子镇附近,埋深约 4 km;东部集中在苏鲁造山带 内的五莲县金矿、许孟镇和桑园镇范围内,埋深约 1 ~3 km;南部集中在鲁中造山带南部的湖头镇及其 以南约 30 km 范围内的地区,埋深约 7 km。

(2)由沂沭断裂带东部 F1 和 F2 断裂地表位置 和地下-5000 m 位置推测得出,该组断裂曾经历过 "右旋走滑"的构造运动,与由地表各断层要素推断 结果一致。

(3) 沂沭大断裂带南部存在不稳定特点, 从图 3、图 7 和图 8 上可看出, 莒县南部约-5 km 以下西 边和东边的侵入岩体连在一起, 也是 F1 和 F2 断裂 经过之处, 意味着莒县南部可能成为应力集中点, 最 近 10 年发生 5 次 2~3 级地震说明该地区积聚的应 力以小地震方式释放。

参考文献 / References

- (The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)
- 李帝铨,何继善. 2021. 基于差分广域电磁法的三元复合驱监测方法. 石油勘探与开发,48(3):595~602.
- 林爱明, 饶刚, 闫兵. 2013. 从水系的分布形态探讨沂沭断裂带的 运动特征. 地学前缘, 20(4): 125~136.
- 林伟凡,高维明. 1987. 沂沭断裂带大地震复发周期. 中国地震,3: 34~40.
- 刘保金,酆少英,姬计法,石金虎,谭雅丽,李怡青. 2015. 郯庐断 裂带中南段的岩石圈精细结构. 地球物理学报,58(5):1610~1621.
- 秦晶晶,刘保金,许汉刚,石金虎,谭雅丽,何银娟,郭新景.2020. 地震折射和反射方法研究郯庐断裂带宿迁段的浅部构造特征. 地球物理学报,63(2);505~516.
- 宋方敏,杨晓平,何宏林,李传友,张兰凤. 2005. 山东安丘—莒县 断裂小店子—茅埠段新活动及其定量研究. 地震地质,27(2): 200~211.
- 王鑫,张景发,付萍杰,高敏. 2015. 沂沭断裂带重力场及地壳结构 特征. 地震地质, 37(3): 731~747.
- 徐建国,徐华,张涛,张卓,祁晓凡,侯建华,纪汶龙,刘宏伟. 2019. 沂沭断裂带北段东支断裂的浅部构造特征及活动性.地 质学报,93(4):776~790.
- 燕乃玲,潘纪顺,郭玉莲,李建奎,唐廷梅. 2001. 沂沭带形变、重 磁场时空变化特征与地震活动. 地震研究, (2): 126~130.
- 严乐佳,朱光,林少泽,赵田. 2014. 沂沭断裂带新构造活动规律与 机制. 中国科学:地球科学,44(7):1452~1467.
- 叶高峰,魏文博,金胜,景建恩. 2009. 郯庐断裂带中段电性结构及 其地学意义研究. 地球物理学报,52(11):2818~2825.
- 张继红,赵国泽,董泽义,王立凤,韩冰,王庆林,唐廷梅,王梅. 2019. 郯庐断裂带安丘、莒县电磁台地壳电性结构研究. 地震地 质,41(5):1239~1253.
- 张岳桥,赵越,董树文,扬农. 2004. 中国东部及邻区早白垩世裂陷 盆地构造演化阶段. 地学前缘,(3):123~133.
- 朱光,刘程,顾承串,张帅,李云剑,苏楠,肖世椰. 2018. 郑庐断 裂带晚中生代演化对西太平洋俯冲历史的指示.中国科学:地 球科学,48:415~435.
- 朱裕振,强建科,王林飞,张文艳,戴世坤. 2019. 深埋铁矿磁测数 据三维反演分析与找矿靶区预测.物探与化探,43(6):1182~ 1190.
- Huang Wei. 1993. Morphologic patterns of stream channels on the active Yishu Fault, southern Shandong Province, Eastern China: Implications for repeated great earthquakes in the Holocene. Tectonophysics, 219(4): 283~304.
- Li Diquan, He Jishan. 2021&. Monitoring method of ASP flooding based on differential wide area electromagnetic method. Petroleum exploration and development, 48 (3): 595~602.
- Lin Aiming, Miyata T, Wan Tianfeng. 1998. Tectonic characteristics of the central segment of the Tancheng— Lujiang fault zone in the central segment, Shandong Peninsula, Eastern China. Tectono-Physics, 293: 85~104.

- Lin Aiming, Rao Gang, Yan Bing. 2013&. Dynamic characteristics of the Yishu fault zone, central segment of the Tan-Lu fault zone, Shandong Province, China; Inferred from the distribution patterns of drainages. Earth Science Frontiers, 20(4): 125~136.
- Lin Weifan, Gao Weiming. 1987&. Recurrence period of large earthquakes in Yishu Fault Zone. China Earthquake, 3: 34~40.
- Liu Baojin, Feng Shaoying, Ji Jifa, Shi Jinhu, Tan Yali, Li Yiqing. 2015&. Fine lithosphere structure beneath the middle—southern segment of the Tan-Lu fault zone. Chinese J. Geophys, 58(5): 1610~1621.
- Qin Jingjing, Liu Baojin, Xu Hangang, Shi Jinhu, Tan Yali, He Yinjuan, Guo Xinjing. 2020&. Exploration of shallow structural characteristics in the Suqian segment of the Tanlu fault zone based on seismic refraction and reflection method. Chinese J. Geophys, 63 (2): 505~516.
- Song Fangmin, Yang Xiaoping, HE Honglin, Li Chuanyou, Zhang Lanfeng. 2005&. Quantitative analysis of recent activity of the Xiao Dian Zi — Mao Bu segment of the Anqiu — Juxian fault, Shandong provice. Seismology and Geology, 27(2): 200~211.
- Wang Xin, Zhang Jingfa, Fu Pingjie, Gao Min. 2015&. Deep structures of Yishu fault zone derived from gravity data. Seismology and Geology, 37(3): 731~747.
- Xu Jianguo, Xu Hua, Zhang Tao, Zhang Zhuo, Qi Xiaofan, Hou Jianhua, Ji Wenlong, Liu Hongwei. 2019&. Shallow tectonic— characteristics and activity of the east branch faults of the northern segment of the Yishu fault zone. Acta Geologic Sinica, 93(4): 776 ~790.
- Yan Nailing, Pan Jishun, Guo Yulian, Li Jiankui, Tang Tinmei. 2001&. The characteristics of geophysical field and its relations with seismological activities on the Yishu fault zone. Journal of Seismological Research, (2): 126~130.
- Yan Lejia, Zhu Guang, Lin Shaoze, Zhao Tian. 2014#. Neotectonic activity and formation mechanism of the Yishu fault zone. Science China: Earth Sciences, 57: 614~629.
- Ye Gaofeng, Wei Wenbo, Jin Sheng, Jing Jianen. 2009&. Study of the electrical structure and its geological meanings of the middle part of Tancheng — Lujiang fault zone. Chinese Geophys, 52(11): 2818 ~2825.
- Zhang Jihong, Zhao Guoze, Dong Zeyi, Wang Lifeng, Han Bing, Wang Qinglin, Tang Tingmei, Wang mei. 2019 &. Study on the electrical structure of the Anqiu — Juxian electromagnetic stations in the Tanlu fault zone. Seismology and Geology, 41(5): 1239~1253.
- Zhang Yueqiao, Zhao Yue, Dong Shuwen, Yang Nong. 2004&. Tectonic evolution stages of the Early Cretaceous rift basins in eastern China and adjacent areas and their geodynamic background. Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing), (3): 123~133.
- Zhu Guang, Liu Cheng, Gu Chengchuan, Zhang Shuai, Li Yunjian, Su Nan, Xiao Shiye. 2018#. Oceanic plate subduction history in the western Pacific Ocean: Constraint from late Mesozoic evolution of the Tan-Lu Fault Zone. Science China Earth Sciences, 61: 386~405.
- Zhu Yuzhen, Qiang Jianke, Wang Linfei, Zhang Wenyan, Dai Shikun. 2019&. 3D inversion analysis of magnetic survey data of deep buried iron ore and prediction of prospecting target area Geophysical and geochemical exploration, 43 (6): 1182~1190.

Understanding of deep structure of Yishu fault zone based on three-dimensional gravity inversion model

ZHU Yuzhen^{1, 2)}, QIANG Jianke³⁾, LI Qiang^{1, 2)}, SHEN Lijun^{1, 2)}, JIA Jinrong³⁾

1) Shandong Provincial Research Institute of Coal Geology Planning and Exploration, Jinan, 250104;

2) Key Laboratory of Coal Geophysics, Chinese Geophysical Society, Jinan, 250104;

3) Central South University, Changsha, 410083

Abstract: Yishu Fault Zone is part of Tanlu Fault Zone in the Shandong Province. It cuts through the Moho surface and separates the central Shandong orogenic belt from the Sulu orogenic belt. The activity of the fault zone determines the tectonic stability of Shandong area. In the past, most of the work focused on the investigation and research of surface or near surface geological elements, and some geophysical exploration work was also carried out in some parts, mostly focusing on sections, and the understanding of the geological structure in the area is relatively limited. In this paper, the regional gravity data of about 14600 square kilometers in the Yishu Fault Zone are collected, and the three-dimensional inversion is carried out. The relative density distribution within 0 ~ 30 km underground in the area is obtained. The precise survey sections from Zhuge Town to Wulian gold deposit are comprehensively studied, including gravity, magnetic method and magnetotelluric method. The following results are obtained: ① It is revealed that there is a huge hidden uplift structure underground in the east of the area, with a depth of about 2 km to 10 km, extending from south-west to north-east, and there are three local core areas: about 30 km from Shiqiaozi Town to southwest, between Sangyuan Town, Wulian gold deposit and Xumeng Town, and about 30 km from north to south centered on Hutou Town. 2 Faults F1 and F2 observed on the surface are shifted to the right than faults F'_1 and F'_2 determined by the inverted relative density, and the migration in the north area is greater than that in the south area. ③ The comprehensive profile study of gravity, magnetic method and magnetotelluric sounding shows that the rocks and ores in the north section of Yishu Fault Zone have the characteristics of low relative density, low magnetism and low resistivity, which means that the fault zone has tensile characteristics in the north. To sum up, there are concealed uplift structures in the eastern upper crust of the study area. Changyi-Dadian fault and Anqiu-Juxian fault have tensile fault characteristics in the north and compressive characteristics in the south. Small earthquakes occur frequently in the south of Juxian.

Keywords: gravity 3D inversion; deep structure of Yishu Fault Zone; active fault zone; concealed uplift structure

Acknowledgements: This study is supported by the general program of Shandong Natural Science Foundation (No. zr2020md039) and Shandong Geological Exploration Project [No. LKZ (2019) No. 13]. Thank the review experts and editors for their detailed modifications

First author: ZHU Yuzhen, male, bom in 1985, master degree, senior engineer, majoring in comprehensive study of geology and geophysics; Email: zhuyuzhen2008@163.com

Corresponding author: QIANG Jianke, male, born in 1967, doctor degree, professor, majoring in forward modeling and inversion of gravity, magnetism and electricity; Email: qiangjianke@163.com

Manuscript received on: 2022-03-21; Accepted on: 2022-07-16; Network published on: 2022-08-20Doi: 10.16509/j.georeview. 2022. 08. 031Edited by: LIU Zhiqiang