

doi:10.3969/j.issn.0253-4967.2018.02.003

利用重震资料研究豫北及邻区 地壳结构特征与地震分布

姜 磊 徐志萍 方盛明 杨利普 李怡青 徐顺强

(中国地震局地球物理勘探中心, 郑州 450002)

摘 要 文中利用小波多尺度分解方法对豫北及邻区重力场进行了波场分离, 得到多阶重力小波细节及区域重力场信息。随后利用 Parker 法密度界面反演对该区 Moho 界面进行了反演分析。通过对不同阶次小波细节的分析研究, 并结合该区内已有 3 条地震测深剖面资料, 对该区地壳深部结构进行了深入研究。结果表明, 研究区壳内结构以隆坳相伴的密度非均匀分布为主, 其密度在横向和纵向上均存在明显的非均匀性。其中, 中上地壳重力场特征与地表地形地貌特征具有对应关系, 中下地壳以大尺度的高、低重力异常为主, 几个主要的凹陷盆地表现出低速低密的特征。同时 Moho 面埋深起伏变化较大, 形成了区域地壳厚度的分块构造格局。其中, 研究区内 Moho 面起伏比较大的区域位于盆地太行山过渡地带, 为 Moho 面陡变带。盆地区 Moho 面整体以上隆为主, 但存在局部起伏变化, 地壳厚度最小约 31km, 最大约 37km; 由于重力均衡作用, 西北部太行山区地壳厚度较大, 约 41km, 但地壳平均密度较低。研究区的地震多发生在局部存在 Moho 面上凸起附近密度变化的过渡带周缘, 孕震机制可能与上地幔物质上涌底侵、中下地壳存在低速低密结构以及深大断裂的贯通有一定关系。同时深大断裂也对区域地震分布起到了控制性作用。

关键词 小波多尺度分解 布格重力异常 壳幔结构 豫北及邻区

中图分类号: P315.72⁺6

文献标识码: A

文章编号: 0253-4967(2018)02-0323-14

0 引言

豫北及邻区位于华北盆地西南部, 地理上处于河南省黄河以北, 与晋、冀、鲁接壤。同时, 该区又处于太行山东麓的地壳陡变带、重磁异常梯级带上, 断裂构造极其发育。该区自西向东横跨太行山隆起东南部(山西台隆)、华北拗陷区南部、鲁西隆起西部 3 个构造单元, 地质构造复杂(图 1)。地质构造形态上, 以新乡-商丘断裂为界, 以北为一系列受太行山构造体系影响的 NNE 向的隆起与拗陷, 自西向东依次为太行山隆起、汤阴地堑、内黄隆起、东明拗陷及鲁西斜坡带(也称菏泽凸起); 以南为受秦岭大别构造体系影响的近 EW 向构造, 由北至南依次为济源-开封拗陷、太康隆起。隆起与断陷以断裂为界, 构造单元形态多为复杂的断块结构。区内有历史记载以来, 地震活动相当活跃, 现代地震也比较频繁, 中强震时有发生, 如汤阴地堑连续发生了多次 4 级以上地震, 相距不远的林县附近还发生了 5.1 级地震, 是中国地震重点监视防御区之一。

[收稿日期] 2016-08-17 收稿, 2016-11-15 改回。

[基金项目] 国家自然科学基金(41274113, 41474077)、中国地震局地震行业科研专项(201208009, 201508009-08)与中国地震局地球物理勘探中心青年基金项目(YFGEC2016008)共同资助。

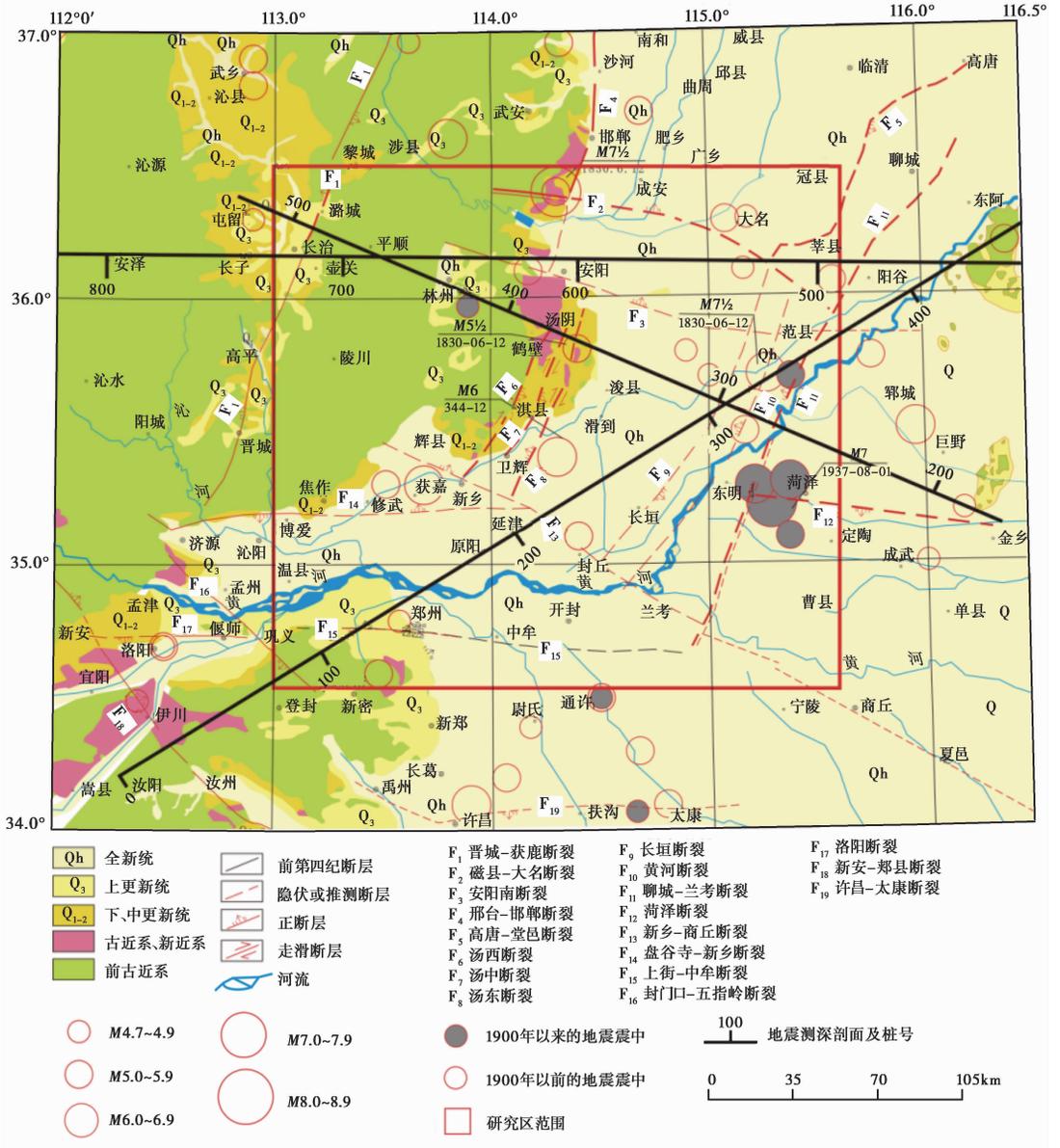


图1 研究区地质构造图(底图源于《中国岩石圈动力学图集》)

Fig. 1 Geologic map of study area(base map is from "Lithospheric Dynamics Atlas of China").

许多研究者在这一区域开展了大量有意义的科研工作。杜广仁(1998)通过地震活动性的研究认为本区的地震活动性除与本区地震构造有关外,还与邻近地区地壳的牵动运动有关;一些学者对区内林县小震活动特征、发震环境以及孕震背景等进行了有意义的探索(漆家福,1985;吕梦麟等,1986;李清林等,1992);在地壳结构和深部孕震背景研究方面,人工地震测深方法和深地震反射方法都在研究区获得了很有意义的结果(张成科等,1994;任青芳等,1998;赵金仁等,1999;李松林等,2011;刘保金等,2012)。这些成果对理解该区的地质构造

环境、深部孕震背景,了解壳幔结构和深部动力学过程提供了大量的基础资料。但由于区内之前的 DSS 剖面产出年代不一、研究人员和计算方法均存在差异,而且处理和解释工作也主要是针对单一剖面、局部构造进行的,因此难以对区内各构造块体在空间分布上的结构特征进行对比分析。

重力异常是不同深度、不同规模和不同密度地质异常体的重力异常总效应(方盛明等, 2002),它不但体现了地壳物质的纵向分层,也能很好地反映地壳介质的横向密度非均匀性。然而,由于不同地区区域构造、岩性等存在较大差异,地质体重力异常在地表的叠加效应,趋肤效应,重力异常反演的多解性等诸多问题限制了人们利用重力异常对地壳结构、介质分布特征及其与构造块体运动关系等的研究。小波多尺度分解由于能够分离场源体的不同尺度细节,近年来在重力研究方面获得了大量关注(杨宇山等, 2003),在本区的深部断裂研究中也取得了很好的效果(徐志萍等, 2015)。同时,利用其他地球物理资料特别是地震资料进行约束是目前重力研究中 1 种常用的重要手段,可有效缓解密度界面反演的多解性问题(刘天佑, 2007)。作为在纵向上能够给出较为确定结果的人工地震测深方法,通常只能沿探测剖面给出结构;而重力场的特性是能给出横向空间的变化情况,但纵向分辨能力相对较弱;采用上述 2 种方法结合,可以互相取长补短,使解释结果更逼近实际地质体情况。综上,本文将研究区内的人工地震测深剖面(DSS)资料与平面布格重力异常数据有机的结合,充分发挥各自方法的优势,以实现对整个研究区深部壳幔结构特征的进一步认识。

本文首先采用小波多尺度分解方法对研究区(34.5°~36.5°N, 113°~115.6°E)大比例尺(1:20 万)的布格异常数据进行波场分离,分析研究区不同尺度块体的重力场空间分布特征和块体边界的空间展布特征,并以通过研究区的 3 条 DSS 剖面结构信息作为约束,利用 Park 法重力密度界面反演对研究区的地壳厚度起伏变化特征进行分析;在此基础上分析探讨区内不同块体构造单元的地壳结构特征及其与地震活动的相关性。这种以平面多尺度分析及重力界面反演的结果为基础,结合人工地震测深剖面成果共同分析研究的方法,对于加深对研究区深部构造特征的认识、提高地球物理解释精度、分析地震活动性以及为地震监测预报提供深部信息都是十分有益的。

1 方法原理与数据处理

1.1 小波多尺度分析方法

布格重力异常小波细节主要反映了不同深度地质体的密度差异引起的重力异常(秦前清等, 1994)。低阶细节代表浅源地质体异常,高阶细节则代表深源地质体异常,小波逼近成分是区域场的反映。

$$f(x, y) = A_j f(x, y) + \sum_{j=1}^J D_j f(x, y) \quad (1)$$

利用式(1),可以根据尺度 $j = J$ 时的逼近部分和 $j = 1, 2, \dots, J$ 的细节部分进行重构,得到不同尺度的小波分离结果。式(1)中, A_j 代表第 $j = J$ 阶的小波逼近系数, D_j 代表第 $j = 1, 2, \dots, J$ 阶的小波细节系数。

然后可以利用功率谱分析法将各阶细节成分代表的似场源深度计算出来,赋予小波细节具体的地质含义(李成立等, 1998)。

$$\ln R_0(s) \approx B - 2sh \quad (2)$$

式(2)中, $s = (u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}}$, u 、 v 分别为 X 、 Y 方向的圆率; $\ln R_0(s) \approx \ln P_0(s) + 2lns$, $\ln P_0(s)$ 是场源的功率谱对数; h 是似场源深度, B 是与地质体几何尺寸、物性有关的常数。由式(2)即可得到不同尺度小波结果所对应的似场源深度。

1.2 Parker 法密度界面反演

在密度界面反演中, 基于频率域的 Parker 迭代界面反演方法, 由于适应性强、计算速度快, 得到了广泛的应用。原理为:

假设界面的平均深度为 H , 而 h 是界面相对于平均深度 H 的距离, 设 Z 坐标轴向下为正, 则 H 以上的 h 为负。该起伏界面的重力异常的频谱为

$$\Delta \bar{g}(u, v) = -2\pi G\sigma \left[e^{-Hs} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-s)^{n-1}}{n!} \bar{h}^n \right] \quad (3)$$

式(3)中, σ 为密度, $s = (u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}}$, G 为万有引力常数, \bar{h} 为 h 的频谱, $\Delta \bar{g}$ 为重力异常 Δg 的频谱。式(3)是正演式, 稍作变化即可作为反演迭代式:

$$\bar{h}_{(i+1)} = \frac{e^{Hs}}{-2\pi G\sigma} \Delta \bar{g} + \sum_{n=2}^{\infty} (\bar{h}_{(i)}^n) \cdot \frac{(-s)^{n-1}}{n!} \quad (4)$$

式(4)中, $h_{(i)}$, $h_{(i+1)}$ 分别为第 i 次和第 $i+1$ 次界面起伏的近似值。

1.3 数据处理

采用的布格重力数据范围是: $34^\circ \sim 37^\circ \text{N}$, $112^\circ \sim 116.5^\circ \text{E}$, 由 1:20 万比例尺与 1:50 万比例尺的数据拼合; 此外, 在开封东南区域重力数据残缺, 故对拼合后的重力数据进行了网格化插值; 插值方法选用 Kriging 法(徐志萍等, 2015), 得到 $2\text{km} \times 2\text{km}$ 的网格化数据, 采用坐标系为 WGS84 坐标系; 数据处理使用中国地质大学(武汉)重磁数据处理系统 GMS4.0 完成。

2 地壳结构特征及 Moho 面特征分析

小波多尺度分解能够把重力场分解到不同的空间尺度, 不同阶次小波细节主要反映了不同深度地质体的密度差异引起的重力异常, 利用功率谱分析将之赋予地质含义后, 就可以用来分析壳内不同深度地质体的构造特征。

2.1 地壳结构特征

采用小波多尺度分析方法, 对收集范围内的布格重力异常数据进行处理, 得到研究区范围 ($34.5^\circ \sim 36.5^\circ \text{N}$, $113^\circ \sim 115.6^\circ \text{E}$) 内一到四阶小波细节(图 2a—d), 并对其似场源深度进行计算(表 1), 进而探讨各阶次小波细节所反应的不同深度地壳的结构特征。

表 1 小波分解及其各阶次对应的似场源深度

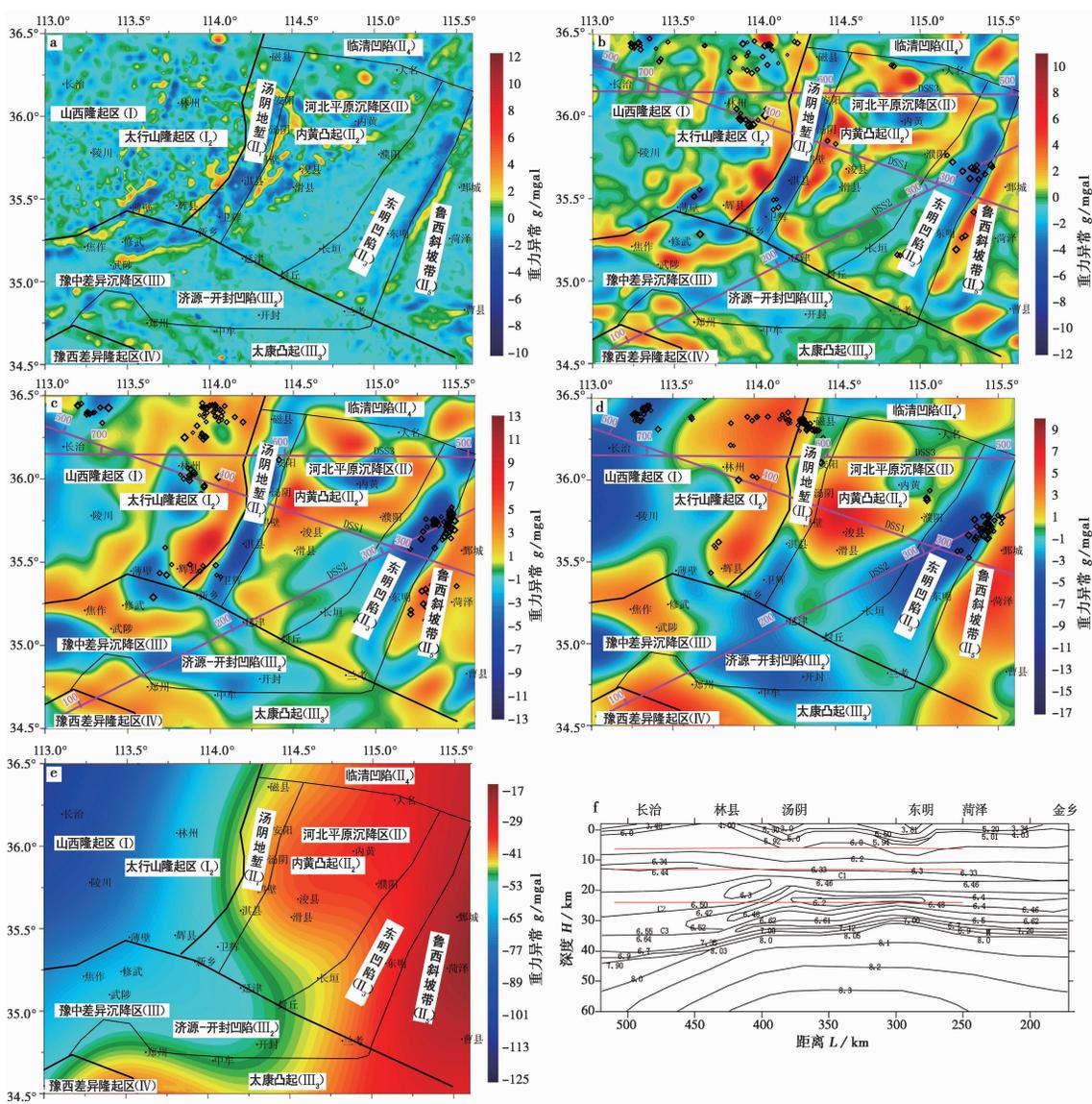
Table 1 Wavelet decomposition and quasi-source depth of its each order

小波多尺度分解阶次	一阶细节	二阶细节	三阶细节	四阶细节	四阶逼近
对应似场源深度/km	1.8	6.8	13	24	40
精定位震中深度范围/km	/	<8	8~16	16~30	/

图 2a 为布格重力异常一阶小波细节; 根据功率谱分析, 一阶小波细节反映了近地表至上地壳 1.8km 左右重力场的平均效应。一阶小波细节图中, 重力异常较为零星杂乱, 主要反映

了浅部密度不均匀体的分布状态。从图中可明显看到汤阴地堑引起的 NNE 向条带状低重力异常，其两侧为 2 条高重力异常条带；浚县隆起、薄壁凹陷、修武凹陷引起的局部重力异常也有清晰显示。此外，不同的一级构造单元内重力异常的形态存在差异。在河北平原沉降区重力异常呈 NNE 向条带状展布，在豫中差异沉降区呈近 EW 向展布，作为二者分界的新乡-商丘断裂显示为 1 条串珠状异常带。同时区内沿 NNE 向几个主要断隆边界的条带状重力高十分明显，体现了深大断裂对构造边界的控制作用。

图 2b 为布格重力异常二阶小波细节，反映的重力场源深度为 6.8km 左右，二阶小波细节上等值线圈闭变大，一些规模非常小的异常消失，进一步说明这些规模很小的异常是由浅部地质体引起的。此时，受构造控制的各块体在图上则呈清晰的方向性展布。图中，重力低带反映了中生代巨厚沉积的坳陷或地堑，重力高带则反映了中、新生代地层的隆起。如位于研究区



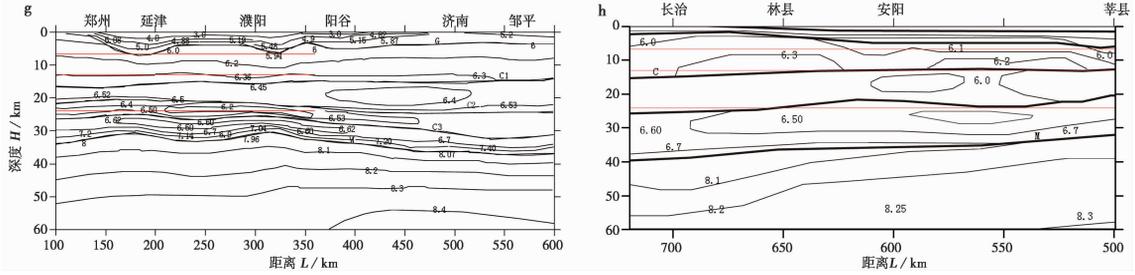


图2 研究区布格重力异常小波多尺度分解结果及小波细节在DSS剖面上的等效层投影

Fig. 2 The results of multi-scale wavelet decomposition of the Bouguer gravity anomalies in study region and the equivalent layer projection of the wavelet details on the DSS section.

a 布格重力异常一阶小波细节, b 布格重力异常二阶小波细节, c 布格重力异常三阶小波细节, d 布格重力异常四阶小波细节, e 布格重力异常四阶小波逼近, f DSS1 菏泽—长治人工地震测深剖面(据张成科, 1994, 有改动), g DSS2 郑州—济南人工地震测深剖面(据张成科, 1994, 有改动), h DSS3 诸城—宜川人工地震测深剖面(据李松林, 2011, 有改动); 黑线为构造分区线, b—d 中的紫红色线表示 DSS 测线在研究区的位置, 黑圈表示小震精定位的震中按深度范围(表1)在 2—4 阶小波细节上的投影, 3 条红色线从浅至深依次表示 2—4 阶小波细节在 DSS 剖面上的投影(f—h)

北部自西向东一系列 NNE 向展布的汤阴地堑、内黄凸起、东明凹陷、鲁西斜坡带等, 以及研究区南部的近 EW 向展布的济源—开封凹陷在图中均有反映。体现了豫北及邻区上地壳各块体单元横向上存在着较大的密度结构差异。另外在这些块体单元内部, 一些次级块体横向上的差异也得到充分体现, 在图中表现为一些小的、高、低重力异常圈闭体。这些小圈闭体的延展方向基本与各二级块体保持一致。如内黄凸起北部的元村次凹表现为 1 个 NNE 向延展的狭长低重力区; 东明凹陷内由于受聊兰、黄河及长垣 3 条断裂差异活动的作用形成了 3 个 NNE 向低、高、低分布的重力条带, 由西向东分别对应着西部次凹、中央隆起带、东部次凹, 体现了东明凹陷内部“两洼一隆”的构造格局; 而济源—开封凹陷因处于山西隆起区和秦岭造山带 2 大构造体系的交会地带, 受其影响和控制, 凹陷内次级构造十分发育, 并形成了近 EW 向和 NW 向高低重力异常相间的复杂格局, 即在近 EW 向展布的修武凹陷、武陟凸起、中牟凹陷形成的两低夹一高的重力圈闭形态下, 其内部又夹杂了 1 个由原阳次凹、中央隆起、延津次凹形成的 NWW 向展布的重力圈闭。另外, 这些次级块体形成的高、低异常圈闭体之间的过渡带存在一些小尺度的线性重力梯度带, 研究区内的小型断裂主要沿这些线性梯度带分布(徐志萍等, 2015), 并对这些次级块体的发育和运动起到了控制作用。

图 2c 为布格重力异常三阶小波细节, 对应的重力场源深度为 13km 左右, 大致反映了中上地壳在这个深度层次上各地质块体横向密度差异分布情况。图中可见等值线圈闭区进一步变大, 高、低重力异常与区域内二级构造单元的划分形成较好的对应。在研究区北部由西向东, 太行山隆起、汤阴地堑、东明凹陷、鲁西斜坡带等共同形成了三高二低的重力格局; 而在研究区南部由北向南, 依次排列着修武凹陷、武陟凸起、济源—开封凹陷、太康凸起等形成近 EW 向的二高二低的重力响应。值得指出的是, 此深度汤阴地堑的低重力异常明显受到其两侧线性边界的控制, 作者认同该线性边界为汤东、汤西断裂的体现(刘保金等, 2012; 徐志萍等, 2015); 另外通过对比 DSS 剖面(图 2f, h)发现与该深度处的相对低速区及其边界有较好的对应, 且其下方存在明显的低速结构, 推测在此深度下方可能存在滑脱构造, 该构造与汤东、汤

西断裂共同控制了汤阴地堑的复杂发育过程(刘保金等, 2012; 曹现志等, 2013)。

图 2d 为布格重力异常四阶小波细节, 图中等值线圈闭产生了更大范围的扩大, 对应的重力场源深度为 24km 左右, 主要反映研究区中下地壳的密度结构差异。图中, 重力异常场变得简单, 仅反映出一些规模较大的局部构造, 如太行山隆起、内黄凸起、东明凹陷、鲁西斜坡带、济源-开封凹陷等。此时, 一些块体内部次级块体的效应已经消失。值得注意的是, 汤阴地堑在这个深度层次上产生了分段效应, 由北至南大致分为 3 段, 其中北段基本处于 1 个密度相对均值区, 中段为 1 个高值区, 南段仍然是低值区, 作为其西边界的汤西断裂在此深度层次也表现出分段性, 其特征是北段的梯变条带变宽, 中段消失, 南段变为圆滑条带, 北段和南段的延展方向不变, 可能表明了汤阴地堑区中下地壳复杂的结构特征; 内黄凸起的高值区进一步缩小, 其东南部的斜坡带与东明凹陷共同形成 1 个 NNE 向的低值区; 济源-开封凹陷被武陟凸起和太康凸起的西部分割为 2 个低值区。作为东明凹陷和鲁西斜坡带的边界, 聊兰断裂体现出深大断裂对区块的控制作用, 断裂两侧的高低值差异和方向性延展都与中上地壳的特征相似, 同时断裂始终表现为 NNE 向重力梯变条带。

依次对比二、三、四阶小波细节(图 2b, c, d)与 3 条 DSS 剖面速度结构(图 2f, g, h), 对研究区纵向及横向上的结构差异分布及其范围得到更直观的认识。首先是对应于二阶细节的 6.8km 左右深度, 可以看出, 在此深度区间, 3 条速度剖面均显示属于上地壳, 部分凹陷区域在该深度为结晶基底面; 在重力二阶小波细节图上各次级构造的重力响应与速度分布有很好的 consistency。同时在次级构造内部, 重力二阶小波细节在横向上给出了更多的细结构特征; 利用小波细节所反映的隆坳与人工地震测深剖面所得到的结晶基底的起伏变化(张成科等, 1994; 任青芳等, 1998; 赵金仁等, 1999; 李松林等, 2011)之间良好的对应关系, 为界定研究区上地壳及结晶基底起伏变化剧烈的区域及其空间分布特征提供了重要依据。其次, 三阶细节所处的 13km 左右深度, 部分区域在速度剖面上触及中上地壳分界面, 各次级构造在速度和重力响应上表现出很好的一致性, 据此上地壳的隆起和下巴区域的空间展布在三阶细节上得到很好的展现; 而在垂向上依据速度剖面也可推断在该深度范围上地壳的起伏已不如结晶基底剧烈。第三、四阶细节所体现的 24km 左右深度范围, 该深度在速度剖面上均显示位于中下地壳, 在此深度上速度剖面显示存在低速结构或横向上的弱梯变结构, 这与地震剖面在四阶细节图上投影位置的重力响应形成了较好的对应, 低速对应的几个低重力异常区均位于次级凹陷内, 而弱梯变构造恰好对应了几个弱重力梯变区。

2.2 Moho 面特征

图 2e 为布格重力异常四阶小波逼近图, 功率谱分析结果得到其重力场源深度约为 40km, 反映了研究区下地壳至上地幔顶部的区域场信息。图中局部异常已经消失, 重力异常呈现西低东高的趋势, 主要体现了 Moho 面的起伏或地壳厚度的变化, 即西深东浅(东部 Moho 面上隆)的特征。故本文选用四阶小波逼近来反演 Moho 面。另外, 由于地壳密度随深度变化, 界面密度差也是变化的, 因此本文选用变密度模型的 Parker 密度界面反演法对区域 Moho 面进行反演。

计算中以该区已有的 3 条 DSS 剖面成果作为反演参数的约束条件(嘉世旭等, 1991; 张成科等, 1994; 赵金仁等, 1999; 李松林等, 2011), 利用冯锐等(1986)给出华北地区的速度-密度关系式, 获得研究区不同层位的介质密度。经过对比试验, 本次计算采用的壳幔剩余密度为

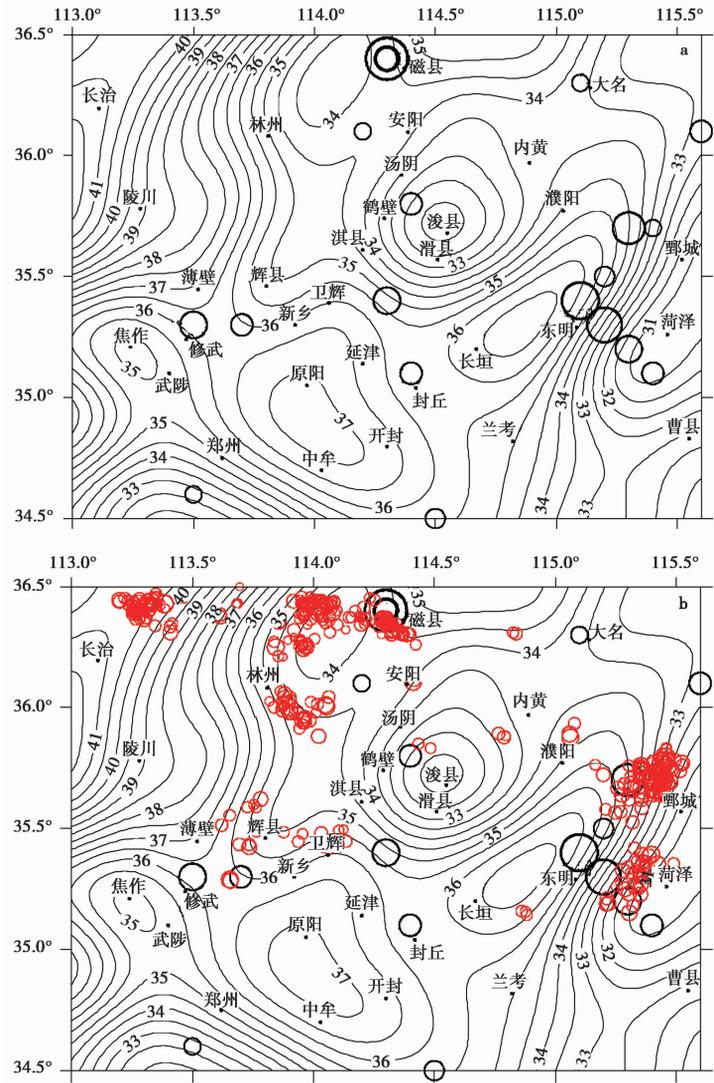


图 3 研究区 Moho 面埋深图

Fig. 3 Topography of Moho interface in study region.

a 5 级以上历史地震震中分布(公元前 519—1983 年, 据中国地震信息网 <http://www.csi.ac.cn/>, 用黑色圆圈标示);

b 小震精定位结果(1985—2008 年, 数据源于莘海亮, 用红色圆圈标示)与历史地震; 黑线为 Moho 面等深度线

$0.33\text{g}/\text{cm}^3$; 地壳平均厚度为 36km ; 变密度因子由式(5)根据地震测深结果获得, 数值为 0.049 ; 反演结果如图 3a 所示。

$$\Delta\rho(z) = \Delta\rho_0 \cdot e^{\beta Z} \quad (5)$$

式(5)中, $\Delta\rho_0$ 为地壳表层与地幔的密度差, β 为变密度因子, Z 为深度。

Moho 面深度的反演结果同时显示, 研究区 Moho 面深度变化差异较大 ($31 \sim 41.5\text{km}$), 自 SE 向 NW 形成 1 个先缓后陡的深度不断加深的变化特征, 这一特征与小波四阶逼近(图 2e)反映的密度分布基本一致。Moho 面最深的区域位于西北部, 达到 41.5km 左右, 在构造分区上

属于山西隆起区。Moho 面上凸变浅的区域有 3 个, 分别位于郑州以南、浚县附近以及鄆城至菏泽西一线以东, 深度为 31~32km 左右。

全区 Moho 面按埋深形成 3 个台阶状区块: 区块一最深, 位于研究区西北角, 地理上属于太行山隆起区, 深度 >37km; 区块二位于研究区中部, 是以开封凹陷为主体的“鼻状” Moho 面斜坡, 深度在 36~37km 之间; 其余 Moho 面埋深 <36km 的大范围区域为区块三。从图中可见, 区块一与区块三之间存在等值线高梯度带, 表现为陡坡下凹; 而区块一与区块二之间梯度变化幅度较缓, 为缓坡下凹。区块二内部近似为 1 个“鼻状”平台, 其与区块三之间为梯度缓变带。区块三内部存在多处 Moho 面上凸区, 并在上凸区周边形成规模不等、强弱不一的梯变带。

3 地震活动分析

已有研究(杜广仁, 1998)和地震精定位结果(莘海亮等, 2011)将豫北及邻区分为 3 个地震带: 西部有长治断裂、林县断裂、磁县-大名断裂的西段、薄壁断裂等; 其中长治附近区域本文不做重点分析。中部在山区与平原交界处, 有汤西断裂及汤东断裂, 凤凰岭断裂及朱村断裂, 以及由此构成的汤阴地堑和修武凹陷。东部主要为聊兰断裂、黄河断裂和长垣断裂, 以及由此控制的东明凹陷。根据研究区精定位结果, 宏观上, 震中位置明显地从集于地震断裂附近; 微观上, 震中深度分布主要位于 10~20km 之间, 因此将 1985—2008 年的地震定位结果($M_s 1 \sim 4.5$)分别按震中深度投影(表 1)到 2—4 阶重力小波细节图中(图 2b—d)。同时将研究区历史地震震中及精定位结果投影到 Moho 面反演结果图上(图 3)。结果显示, 在 2 阶小波细节图上(图 2b), 地震数量相对较少, 西部和中部带小震分布主要沿高、低重力异常的梯度带长轴展布, 而该梯度带基本是地震断裂的重力响应; 东部带震中分布在高梯度带两侧。在 3 阶小波细节图中(图 2c), 地震数量明显增多, 西部和中部带震中主要分布在高、低重力梯度带靠近高重力响应边界的区域; 东部带震中分布更加集中, 有明显向高、低重力响应边界靠拢的趋势。4 阶小波细节图上(图 2d), 地震数量显著减小, 集中度和带状分布更加明显, 西部和中部带震中多位于高重力区及其边界; 东部带小震集中于聊兰断裂鄆城西的高低重力异常梯度带低重力响应一侧。在 Moho 面埋深图中(图 3), 地震震中明显分布于研究区 Moho 面相对上凸区周边的梯度带上或 Moho 面相对上凸区与相对下凹区之间等深线发生较大弯曲的部位。从以上分析可以看出, 研究区在震中分布上 EW 方向有明显差异, 由西向东加深。依据已有研究和本文研究表明, 东、西部地震断裂切割深度等级不同, 而且断裂的规模和复杂程度也不尽相同, 震中分布受地震断裂规模及其主断裂切割地壳深度附近的孕震机制控制。

具体分析磁县西、林州南、聊兰断裂两侧 3 处地震集中区。首先, 可以看到磁县-大名断裂西段的小震在深度 8km 以内并不十分集中, 大致呈 3 条线状展布; 这 3 条线基本上是高、低重力异常的梯度带, 可能意味着在此深度内上地壳存在规模较小的分支断裂? 而在 8~16km 深度范围, 地震数增多, 密集度加强, 震中分布表现为剪切向分布, 且分布在靠近中间呈梯度圈闭的微低重力响应区; 同时地震测深结果(图 2h)显示该深度接近中、上地壳边界, 且在此区域附近存在 1 个速度稍高的构造, 结合重力小波 3 阶细节, 可能表明这些小震易发生在相对高密(高速)构造向相对低密(低速)构造过渡区的高密体一侧。在深度 16~30km 范围, 地震数目有所减少, 但是其沿断裂西段呈线性空间展布的形态更为直观, 同样的震中也更集中于

高、低重力响应的边界区偏向高密结构一侧。根据 DSS3 剖面(图 2h),该深度主要为中地壳至下地壳顶部,在此区域下地壳存在明显的低速构造,同时此区域又处于 Moho 面相对上隆区,推测此低速构造为地震的孕育提供了很好的物理背景,而近 SN 向的邢台-邯郸断裂(F_8)与近 EW 向的磁县-大名断裂(F_6)这种共轭剪切构造的存在也对这一区域的孕震和控震起到重要作用(张四昌等,1995)。

其次,林州南小震的分布特点是,8km 深度以上地震较多,且分别沿 NW 和 NE 向近正交分布,平面上主要分布在高低重力响应边界上并偏向高密度结构一侧(图 2b);8~16km 深度范围地震数量减少,并主要沿 NW 向高、低重力响应边界分布(图 2c);16~30km 深度范围地震数量锐减,零星分布于高密体内靠近边界的区域(图 2d)。重力小波结果显示,NW 向高低重力线性边界可能为 1 条隐伏断裂的体现,结合小震定位结果(莘海亮等,2011)共同推测其深度可能在 16~17km 左右,与林县断裂深度大体相当(杜广仁,1998);另外地震测深结果(DSS1 剖面,图 2f)在此处也存在速度等值线弯曲不连续现象,支持存在断裂的推断。结合 DSS1 剖面和 Moho 面反演(图 3)结果,此区域位于 Moho 面上凸区附近,并在中、下地壳存在低速构造和高、低速互层结构,非常有利于地震的孕育,隐伏断裂在此区域具有很好的控震作用。

第三,聊兰断裂两侧小震在 8km 深度范围内较少,且呈明显的线性正交分布,东侧以 NNE 向沿聊兰断裂线性分布,且呈两段式分布在以聊兰断裂为中线的高、低异常边界两侧(图 2b),而沿 NW 向分布的小震不多且相对分散,基本处于低重力响应区,可能是受到黄河断裂和长垣断裂的影响;8~16km 深度范围小震最多,并主要以 NNE 向沿聊兰断裂两侧的高、低重力响应边界附近区域分布,且表现出同样的两段式分布,分段位置与之上相同;16~30km 深度范围北段小震有所减少,且更加向聊兰断裂高、低重力响应边界集中,大多数位于低重力响应区,而南段没有小震发生。人工地震剖面(DSS1, DSS2)显示在此区域下方中下地壳存在低速体和高、低速互层, Moho 面反演结果(图 3b)显示此区域地震基本分布在 Moho 面相对上凸区与下凹区之间的强梯度带上,这些因素为地震的孕育提供了很好的构造背景。另外历史地震震中在此处显示出同样的分段性,这种现象的产生原因有待进一步研究。

4 讨论与结论

(1)高精度布格重力异常数据经过小波多尺度分解后能够很好地反映研究区横向上介质的差异分布,并与地震剖面形成很好的对应关系,从而更有利于加深对区域地壳深部介质纵向及横向差异分布的认识。

(2)豫北及邻区处于 NNE 向太行山隆起和近 EW 向的秦岭-大别山构造带的交会部位,区域重力场及其反映的深部构造格局比较复杂。研究区北部受到聊兰断裂和太行山东麓断裂等 NNE 向深大断裂体系的控制,形成该走向上的局部重力异常带,在地壳上部表现为以隆起为主,拗陷狭窄,主要有东明凹陷和汤阴地堑;在地壳底部, Moho 面的局部上隆和下拗也基本沿该方向展布。南部,受到秦岭-大别山构造带的长期演化与后期活化的影响,主要表现为近 EW 向展布的重力异常带,同样该区域上地幔局部隆起和拗陷也主要是沿该方向展布的。这种横向密度结构的明显变化,体现了不同构造单元存在较大的构造演化差异。

(3)研究区几条 NNE 向深大断裂带,可能是 1 组古老的构造线。在中生代前其活动剧烈,

在区域应力场作用下上地幔物质上涌, 地壳运动强烈, 同时基底断裂再次活动。陈斌等(2005)认为这时期岩浆活动十分活跃, 除在局部区域造成基性岩浆喷溢, 还有大量中酸性火成岩出现, 随后在复杂的分离结晶作用下形成了豫北及邻区中下地壳的格局。而中生代以来, 由于华北地区强烈的断陷作用, 不同次级断块之间存在明显的差异性升降运动和沉积作用, 造成了研究区中上地壳的密度差异分布。如前所述, 小波细节图上中上地壳(二、三阶细节)与中下地壳(四阶细节)的密度结构呈现出的不一致变化的特征应该是这种差异演化的体现。

(4) 豫北及邻区 Moho 面埋深总体为西深东浅, 大趋势上与地表高程变化呈镜像关系, 推测是重力均衡补偿的大尺度表现。但盆地区微地形地貌并不与 Moho 面简单呈镜像关系, 显示出上地壳断块的差异升降才是对浅层构造乃至地形的更为直接的控制因素。比较突出的是区域中部以开封坳陷为主体的区域, 由于受 NNE 向和 NW 向 2 组断裂相互牵制和影响, 形成一个近 NW 向“鼻状”斜坡, 其上地幔隆起幅度较小且不太连续。地热研究也表明该区域热流值低(刘丽等, 2007), 推测可能是由于其在西侧和南侧分别受到太行山隆起和秦岭-大别造山带的限制作用, 地壳的伸展系数较小, 只能向 SEE 向小规模伸展。

根据研究区人工地震测深剖面的成果, 区内 Moho 界面不是 1 个简单的一级间断面, 可能是 1 个复杂的速度梯度带; 而本文计算 Moho 面深度时选用的壳幔密度差为 0.33g/cm^3 , 对应的纵波速度大约为 6.7km/s , 可能获得的 Moho 面深度及起伏特征在局部区域会与人工地震测深剖面结果有一些差异; 这一方面说明不同物性参数对 Moho 面埋深的界定存在一些差异, 同时也更说明研究区 Moho 面不是 1 个简单的分界面, 表明了华北克拉通破坏地幔上涌底侵对研究区壳幔边界改造的复杂性。

(5) 地震空间分布表明, 研究区地震活动主要与区域地壳块体属性和深部主断裂的直接或间接贯通有关。区内 Moho 面上凸区附近, 中、下地壳存在低速构造和高、低速互层结构, 以及 NNE 向深大断裂存在等因素可能为地震孕育提供了有利条件, 中上地壳沿深大断裂两侧的高低密度结构边界成为发震的集中区, 也体现出深大断裂的控震作用。

地震的孕震、发震是个复杂的物理过程, 本文对地震分布与密度结构关系的分析主要依据小震精定位结果和历史地震结果, 得到的推断可能会受到这 2 种结果精度的影响。另外, 聊兰断裂两侧出现的地震分段分布特征还需要进一步深入研究。

致谢 中国地震局地球物理勘探中心莘海亮博士提供了研究区小震精定位结果, 赵金仁研究员、刘明军研究员、刘宝峰高级工程师、林吉焱工程师在本文研究中提供了相关的基础资料, 田晓峰博士对文章撰写给出了很多有益的建议; 审稿人对本文提出了建设性的修改意见; 文中使用的数据处理软件为中国地质大学(武汉)开发的 GMS4.0 重磁数据处理系统; 图件绘制主要由 SURFER、CORELDRAW 完成; 在此一并感谢。

参 考 文 献

曹现志, 李三忠, 刘鑫, 等. 2013. 太行山东麓断裂带板内构造地貌反转与机制 [J]. 地学前缘, 20(4): 88—103.

CAO Xian-zhi, LI San-zhong, LIU Xin, *et al.* 2013. The intraplate morphotectonic inversion along the Eastern Taihang

- Mountain Fault Zone, North China and its mechanism [J]. *Earth Science Frontiers*, 20(4): 88—103 (in Chinese).
- 陈斌, 田伟, 翟明国, 等. 2005. 太行山和华北其他地区中生代岩浆作用的锆石 U-Pb 年代学和地球化学特征及其岩浆成因和地球动力学意义 [J]. *岩石学报*, 21(1): 13—24.
- CHEN Bin, TIAN Wei, ZHAI Ming-guo, *et al.* 2005. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of the Mesozoic magmatism in the Taihang mountains and other places of the North China Craton, with implications for petrogenesis and geodynamic setting [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 13—24 (in Chinese).
- 杜广仁. 1998. 豫北地区地震活动性及其与区域地壳运动的关系 [J]. *地震研究*, 21(1): 82—87.
- DU Guang-ren. 1998. The seismicity and the relation between it and regional crustal movement in North Henan region [J]. *Journal of Seismological Research*, 21(1): 82—87 (in Chinese).
- 方盛明, 张先康, 嘉世旭, 等. 2002. 华北地区布格重力异常的多尺度分解特征与地震活动性 [J]. *大地测量与地球动力学*, 22(1): 34—39.
- FANG Sheng-ming, ZHANG Xian-kang, JIA Shi-xu, *et al.* 2002. Multis-scale decomposition of Bouguer gravity anomaly and seismic activity in North China [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 22(1): 34—39 (in Chinese).
- 冯锐, 严惠芬, 张若水. 1986. 三维位场的快速反演方法及程序设计 [J]. *地质学报*, 60(4): 390—403.
- FENG Rui, YAN Hui-fen, ZHANG Ruo-shui. 1986. The rapid inversion of 3-D potential field and program design [J]. *Acta Geologica Sinica*, 60(4): 390—403 (in Chinese).
- 嘉世旭, 刘昌铨. 1991. 华北裂谷盆地南部菏泽—长治地震测深剖面结果解释 [J]. *华北地震科学*, 9(2): 11—20.
- JIA Shi-xu, LIU Chang-quan. 1991. Interpretation of Heze-Changzhi DSS profile in south of the basin in North China [J]. *North China Earthquake Sciences*, 9(2): 11—20 (in Chinese).
- 李成立, 谢春临, 吕庆田. 1998. 利用位场功率谱计算地质体顶底深度效果 [J]. *大庆石油地质与开发*, 17(5): 45—48.
- LI Cheng-li, XIE Chun-lin, LÜ Qing-tian. 1998. Calculating top and bottom depth effect of geological body by applying potential field power spectrum [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 17(5): 45—48 (in Chinese).
- 李清林, 栗文山, 黄邦武, 等. 1992. 林县深浅构造与小震活动的关系 [J]. *山西地震*, (1): 37—40.
- LI Qing-lin, LI Wen-shan, HUANG Bang-wu, *et al.* 1992. The relation between infra-epigenetic structures and minor seismic activities in Lin County [J]. *Earthquake Research in Shanxi*, (1): 37—40 (in Chinese).
- 李松林, 赖晓玲, 刘宝峰, 等. 2011. 由诸城—宜川人工地震剖面反演结果看太行山两侧岩石圈结构的差异 [J]. *中国科学(D辑)*, 41(5): 668—677.
- LI Song-lin, LAI Xiao-ling, LIU Bao-feng, *et al.* 2011. Differences in lithospheric structures between two sides of Taihang Mountain obtained from the Zhucheng-Yichuan deep seismic sounding profile [J]. *Science China (Ser D)*, 54(6): 871—880.
- 刘保金, 何宏林, 石金虎, 等. 2012. 太行山东缘汤阴地堑地壳结构和活动断裂探测 [J]. *地球物理学报*, 55(10): 3266—3276.
- LIU Bao-jin, HE Hong-lin, SHI Jin-hu, *et al.* 2012. Crustal structure and active faults of the Tangyin graben in the eastern margin of Taihang mountain [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(10): 3266—3276 (in Chinese).
- 刘丽, 任战利. 2007. 济源—中牟—黄口坳陷带热演化史与油气的关系 [J]. *石油与天然气地质*, 28(3): 355—361.
- LIU Li, REN Zhan-li. 2007. Relations between geothermal history and hydrocarbon generation in Jiyuan-Zhongmou-

- Huangkou depression belt [J]. *Oil & Gas Geology*, 28(3): 355—361 (in Chinese).
- 刘天佑. 2007. 地球物理勘探概论 [M]. 北京: 地质出版社: 27—93.
- LIU Tian-you. 2007. *Conspectus of Geophysical Exploration* [M]. Geological Publishing House, Beijing: 27—93 (in Chinese).
- 吕梦麟, 商宏宽. 1986. 林县小震活动特征及与邢台地震活动的关系 [J]. *华北地震科学*, 4(2): 33—44.
- LÜ Meng-lin, SHANG Hong-kuan. 1986. The characteristics of the activity of minor earthquake of Linxian and its relation to the activity of Xingtai earthquake [J]. *North China Earthquake Sciences*, 4(2): 33—44 (in Chinese).
- 漆家福. 1985. 林县盆地新生代伸展构造 [M] // 国家地震局地质研究所. 现代地壳运动研究. 北京: 地震出版社: 107—117.
- QI Jia-fu. 1985. Cenozoic extensional tectonics of Linxian Basin [M] // Institute of Geology, China Earthquake Administration. *Research of Modern Crust Movement*. Seismological Press, Beijing: 107—117 (in Chinese).
- 秦前清, 杨宗凯. 1994. 实用小波分析 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社: 29—41.
- QIN Qian-qing, YANG Zong-kai. 1994. *Practical Wavelet Analysis* [M]. Xidian University Press, Xi'an: 29—41 (in Chinese).
- 任青芳, 张先康, 张成科, 等. 1998. 汤阴地堑及邻区的壳幔结构与地震危险性 [J]. *中国地震*, 14(2): 157—166.
- REN Qing-fang, ZHANG Xian-kang, ZHANG Cheng-ke, *et al.* 1998. The crust-mantle structure and seismic risk in Tangyin graben and its adjacent area [J]. *Earthquake Research in China*, 14(2): 157—166 (in Chinese).
- 莘海亮, 方盛明, 李稳. 2011. 豫北及邻区地震双差法重新定位研究 [J]. *大地测量与地球动力学*, 31(6): 63—68.
- XIN Hai-liang, FANG Sheng-ming, LI wen. 2011. Relocation of earthquakes of Yubei area and adjacent region with double difference location algorithm [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 31(6): 63—68 (in Chinese).
- 徐志萍, 姜磊, 杨利普, 等. 2015. 利用布格重力资料研究太行山东南缘断裂构造特征 [J]. *大地测量与地球动力学*, 35(3): 503—507.
- XU Zhi-ping, JIANG Lei, YANG Li-pu, *et al.* 2015. Structure characteristics of faults in the southeast segment of Taihang Mountain using Bouguer gravity data [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 35(3): 503—507 (in Chinese).
- 杨宇山, 李媛媛, 刘天佑, 等. 2003. 小波细节的微分特征及其在重力场断裂分析中的应用 [J]. *地质与勘探*, 39(1): 41—44.
- YANG Yu-shan, LI Yuan-yuan, LIU Tian-you, *et al.* 2003. The differential characteristic of the wavelet details and its application in fault analysis of gravity field [J]. *Geology and Prospecting*, 39(1): 41—44 (in Chinese).
- 张成科, 赵金仁, 任青芳, 等. 1994. 豫北及其外围地区地壳上地幔结构研究 [J]. *地震地质*, 16(3): 243—253.
- ZHANG Cheng-ke, ZHAO Jin-ren, REN Qing-fang, *et al.* 1994. Study on crust and upper mantle structure in North Henan and its surroundings [J]. *Seismology and Geology*, 16(3): 243—253 (in Chinese).
- 张四昌, 刁桂苓. 1995. 华北地区的共轭地震构造带 [J]. *华北地震科学*, 13(4): 1—8.
- ZHANG Si-chang, DIAO Gui-ling. 1995. Conjugate seismotectonic zone in north China Area [J]. *North China Earthquake Sciences*, 13(4): 1—8 (in Chinese).
- 赵金仁, 张先康, 张成科, 等. 1999. 河南林县地震区地壳深部构造背景探讨 [J]. *中国地震*, 15(3): 229—236.
- ZHAO Jin-ren, ZHANG Xian-kang, ZHANG Cheng-ke, *et al.* 1999. The structure features of deep crustal structure in seismic area of Linxian, Henan Province [J]. *Earthquake Research in China*, 15(3): 229—236 (in Chinese).

DEEP STRUCTURE OF NORTHERN HENAN PROVINCE AND ADJACENT AREAS DERIVED FROM GRAVITY AND SEISMIC SOUNDING DATA IN RELATION TO DISTRIBUTION OF EARTHQUAKES

JIANG Lei XU Zhi-ping FANG Sheng-ming

YANG Li-pu LI Yi-qing XU Shun-qiang

(*Geophysics Exploration Center, China Earthquake Administration, Zhengzhou 450002, China*)

Abstract

We conduct the wave field separation of the gravity field for northern Henan Province and adjacent areas by the wavelet multi-scale decomposition method, and obtain multi-order gravity wavelet details and regional gravity field information. Then the Parker density surface inversion is used to invert the Moho interface. Based on the analysis of wavelet details in different orders and results of three seismic sounding profiles available in this area, we attempt to reveal the deep crustal structure of the study area. Research results show that the crustal structure is dominated by uneven density distribution accompanied by uplifts and depressions in the region with obvious heterogeneities of the density in horizontal and vertical directions. The gravity field characteristics in the middle-upper crust correspond to the surface topography, the lower crust is dominated by the large-scale high-low gravity anomalies, and several major depression basins show the characteristics of low velocity and low density. At the same time, the depth of the Moho interface changes greatly, which forms the block structure pattern of the regional crustal thickness. Among these features, the area with relatively large variations of the Moho is located in the transition zone of the basin to the Taihang Mountains, or exactly the Moho mutation belt. The Moho interface of the basin area as a whole is dominated by the uplift intertwined with local variations, of which the least and largest depths are 31km and 37km, respectively. Due to the gravity isostasy, the crustal thickness is larger (about 41km) in the northwest of the Taihang Mountains, with less average crustal density. In the study area, earthquakes tend to occur around the transition zone with density changes where the Moho is locally convex. The seismogenic mechanism may be associated with upwelling of upper mantle materials, low-velocity and low-density structures in the middle-lower crust and connection of deep large faults. Moreover, the deep large faults play a controlling role in the distribution of regional earthquakes.

Key words Multi-scale wavelet decomposition, Bouguer gravity anomaly, Crust-mantle structure, Northern Henan and adjacent areas

[作者简介] 姜磊, 男, 1979年生, 2007年于中国科学技术大学获固体地球物理专业硕士学位, 高级工程师, 现主要研究方向为重磁电方法与深部结构构造, 电话: 0371-63757378, E-mail: jianglai3961@126.com。