



基于实测重力数据的秦岭地区均衡异常与垂向构造应力分析

袁华清¹ 吴云龙¹ 许 闯² 张 毅¹ 王振宇³

¹ 中国地震局地震研究所,湖北 武汉,430071

² 广东工业大学土木与交通工程学院,广东 广州,510006

³ 中国地震局地震预测研究所,北京,100036

摘要:确定秦岭地区准确的均衡异常与垂向构造应力对认识该地区深部构造特征、动力学机制等具有重要意义。目前,高精度重力数据是获取均衡异常与垂向构造应力的的重要手段之一。采用高精度重力/GPS联测数据,得到秦岭地区的自由空气重力异常与布格重力异常,反演均衡异常与垂向构造应力。研究结果表明,均衡面深度在40~49 km之间,莫霍面深度范围为39~48 km,垂向构造应力大小在-28~24 MPa之间。秦岭北侧的渭河盆地处于不均衡状态;四川盆地北部的均衡异常与垂向构造应力几乎为零,地壳处于均衡状态;在秦岭出现局部的负均衡异常,表明存在一定的地壳运动。

关键词:莫霍面深度;均衡面深度;垂向构造应力;秦岭地区;均衡异常

中图分类号:P223

文献标志码:A

秦岭及其邻域横贯中国大陆中部,呈近东西向展布,是中国地理上重要的南北分界线。它也是中国大陆中东部三大基本构造单元之一,经历了多期次构造演化运动,具有复杂的地质构造^[1]。研究其深部均衡异常与垂向构造应力对揭示秦岭造山带形成机制、中国大陆地质构造演化过程等动力学问题具有重要意义^[2-3]。

目前,研究均衡异常的方法主要包括地震波方法和重力方法。地震波方法首先采用地震波数据计算出研究区域莫霍面深度,然后利用均衡模型确定理论均衡面深度,最后将二者作差得到均衡异常,以分析构造运动特征^[4-5]。重力方法的原理与地震波方法类似,但具有数据获取成本低、空间分辨率高等优势,应用广泛,该方法在秦岭地区已有许多研究成果。文献[3]基于一条实测重力剖面数据研究了鄂尔多斯-中秦岭-四川东部的莫霍面深度,提出了鄂尔多斯盆地-中秦岭造山带-四川盆地的“盆-山-盆”型构造体系的新认识。文献[6]采用多条测线实测重力数据研究了秦岭附近六盘山的均衡异常,表明六盘山处于正均衡状态,并发现其东麓断裂处具有梯度值最大

的岩石圈承载量。文献[7]利用一条实测剖面重力数据分析了中秦岭地区的均衡异常,表明地壳在变厚。然而,上述研究仅对秦岭地区均衡异常进行分析,并没有给出地壳垂向构造应力。地壳垂向构造应力能够直接反映地壳构造运动状态。当前,已有部分学者采用重力数据给出了中国大陆部分地区的垂向构造应力,并进行了综合解释。文献[8]采用重力/GPS(global positioning system)联测数据提出了一种新的计算垂向构造应力的方法,并得到了巴颜喀拉块体东部及周边地区的垂向构造应力分布。文献[9]采用实测重力数据得到了鄂尔多斯西南缘与东北亚的垂向构造应力,结果显示六盘山地区具有最大的向下应力,达到-14 MPa,秦岭中断具有最大的向上应力,达到8 MPa。文献[10]利用重力/GPS联测数据进一步分析了巴颜喀拉块体东部的垂向构造应力,发现地震多发生在垂向构造应力梯度带上,在垂向构造应力为正的地区,易发生浅源地震,而在垂向构造应力为负的区域,易发生深源地震。总体来说,秦岭地区垂向构造应力的研究仍然不够充分,大部分地区没有给出相应结果。

收稿日期:2022-04-22

项目资助:国家自然科学基金(41974096,41974014,41931074);广东省自然科学基金(2022A1515010396)。

第一作者:袁华清,硕士生,主要研究方向为地球重力场反演。 yuanhuaqing20@mails.ucas.ac.cn

通讯作者:吴云龙,博士,研究员。 yunlongwu@gmail.com

本文基于重力/GPS联合观测获得的5条剖面沿线的高精度重力及高程数据,计算秦岭地区的均衡异常与垂向构造应力分布,并结合研究区域已有的地质构造成果,从重力学的角度探讨研究区域的均衡状态及其构造特性。

1 秦岭地区的地质构造背景与重力/GPS数据

1.1 地质构造背景

本文研究区域位于中国中西部的陕西、四川、甘肃地带,在构造上北起渭河盆地,经过秦岭、大巴山到达四川盆地北部,如图1所示。渭河盆地地处鄂尔多斯块体以南、秦岭以北,呈现南深北浅、向南倾斜的分布趋势,盆地内部垂直差异运动明显、地震活动和活断层运动强烈,是中国华北地区第四纪下陷幅度和堆积厚度最大地区之一^[11]。以往研究表明,渭河盆地内部的区域构造应力场不均匀,在东部主要是拉张应力,西部主要是压应力^[12];渭河盆地与鄂尔多斯块体和秦岭进行比较,基底出现下凹现象,而莫霍面存在局部上升趋势。

秦岭呈东西走向,横贯中国大陆中部,是划分中国南北大陆的重要界限。已有的地质构造研究表明,秦岭地区以商丹缝合带和略阳-勉县缝合带为界,可以划分为3个板块,商丹缝合带北部是华北板块,略阳-勉县缝合带南部是扬子板块,中间是秦岭微板块^[13-14]。秦岭地区的岩石主要是花岗闪长质到石英闪长质,与世界陆地地壳的平均组分比较相近,中上地壳偏碱性,而中下地壳偏中酸性^[15]。大巴山地处四川盆地与秦岭之间,依据城口-房县断裂,将大巴山分为北大巴山和南大巴山两个部分。北大巴山主要由火山-沉积岩系和板岩-碳酸盐岩等组成;南大巴山以变质火山-沉积岩系和碳酸盐岩-砂岩-页岩为主^[16]。秦岭-大巴山总体的地壳厚度表现为自东向西逐渐增厚,平均厚度为 41.7 ± 1.7 km^[17]。

四川盆地处于大巴山南部,地处扬子板块西缘,盆地内部地形平坦为低山丘陵区,四周被高山所环绕,整体上是北东向分布,呈菱形。四川盆地中部的基底以变质岩和岩浆岩为主,硬化程度较高;盆地两侧隆起,其西北、东南方向是褶皱基底拗陷带,硬化程度较低,由浅变质岩组成^[18],属于地壳稳定区。文献[19]对四川盆地的均衡异常进行研究发现,地壳均衡深度与实际地壳深度差异约为零,地壳处于比较稳定的均衡状态。

1.2 重力/GPS数据采集与处理

2021年7月,笔者所在研究团队在秦岭地区开展了重力/GPS联合观测,测网跨渭河盆地、秦岭、大巴山和四川盆地,获得5条剖面沿线共265个观测点重力值和坐标,如图1所示。其中P1~P5表示5条观测剖面,红线表示断裂,WQF表示西秦岭北缘断裂,LBF表示陇县-宝鸡断裂,WF表示渭河断裂,NQF表示秦岭北麓断裂,LTF表示临潭-宕昌断裂,PQF表示平武-青川断裂,AKF表示安康断裂。为保证观测精度,观测点一般选取在地形平坦、开阔处以及土层或岩石坚硬处。流动重力观测采用A-B-C...C-B-A的方式进行观测,并联测了西安、安康、广元3个绝对重力站;各测站之间的距离一般在6~10 km之间,以减小流动重力观测的传递误差。观测结果使用中国地震局的LGADJ重力平差软件^[20]进行平差,并根据西安、安康和广元3点的绝对重力值推估各测点的绝对重力值,整体平差结果精度为0.025 mGal。

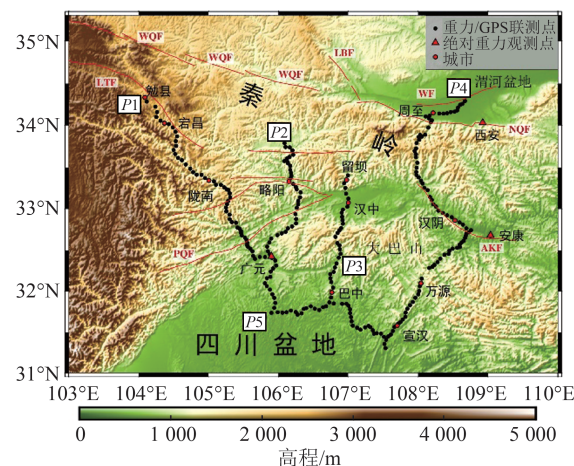


图1 秦岭地区重力/GPS联合观测网分布

Fig.1 Location of Gravity/GPS Stations in Qinling Area

数据处理步骤如下:首先,采用GPS高程数据对获取的重力数据进行自由空气异常改正(自由空气异常改正值 $g_F = 0.3086h_G$,其中 h_G 为GPS获取的高程数据),把各测点的重力值归算到大地水准面上,再扣除对应点正常重力值,即可得到265个观测点的自由空气重力异常(图2);然后,利用SRTM3高程数据^[21],根据FA2BOUG方法^[22]进行地形改正(远区、中区和近区范围分别设置为20~167 km、2~20 km和0~2 km),获得了测点的布格重力异常(图3)。

从图2可以看出,自由空气重力异常的变化范围为-180~50 mGal,在地形起伏较大的区域

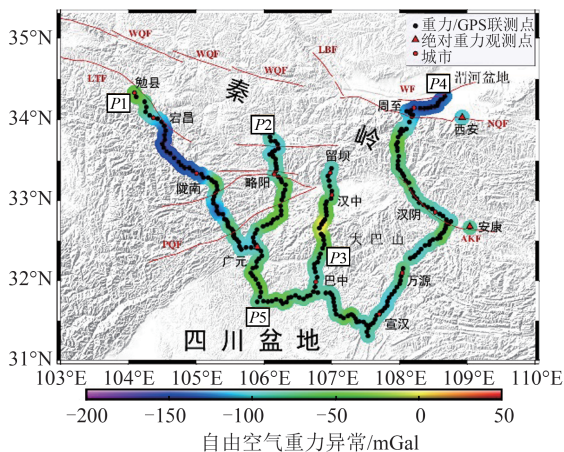


图2 秦岭地区自由空气重力异常

Fig.2 Free-Air Gravity Anomaly in Qinling Area

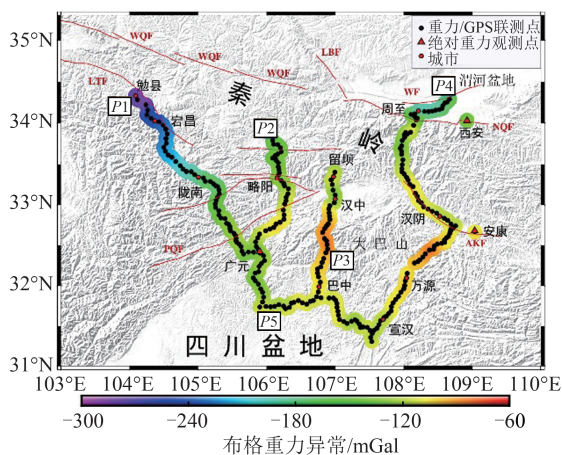


图3 秦岭地区布格重力异常

Fig.3 Bouguer Gravity Anomaly in Qinling Area

变化较为剧烈,在地形起伏平缓的四川盆地北部变化较为平缓,呈现出明显的依地形起伏变化特征。从图3可以看出,布格重力异常分布的总趋势是西北低东南高,整体上为负异常,变化范围为 $-300 \sim -70$ mGal;最西部的陇南到岷县地区为负异常高值区,异常值在 $-300 \sim -190$ mGal之间。布格重力异常的变化主要反映了深部构造的演变趋势,从西北往东南方向异常值逐渐升高,表明莫霍面深度在缓慢抬升。

2 计算方法

2.1 均衡异常

在假设研究区域地壳密度均匀的情况下,根据Airy均衡模型理论可以确定不同地形高度 h 下的均衡地壳厚度 $H^{[23]}$:

$$H = h + r + H_0 = (1 + \rho_i / \Delta \rho) h + H_0 \quad (1)$$

式中, r 是Airy均衡模型的山根; H_0 是平均地壳厚度; ρ_i 是地壳平均密度,取 2.67 g/cm^3 ; $\Delta \rho$ 是地壳

与地幔的密度差。依据前人的研究结果,本文研究区域的壳幔密度差 $\Delta \rho$ 与平均地壳厚度 H_0 分别为 0.690 g/cm^3 和 $39 \text{ km}^{[23]}$ 。确定 H 后,即可计算出均衡面深度 $H-h$ 。

莫霍面作为下地壳和上地幔之间的一个界面,往往是地壳与地幔物质相互作用的活跃地带。采用布格重力异常数据进行重力正反演计算,可以得到某地区的莫霍面深度的起伏变化^[24]。在假设研究区域地壳密度均匀的情况下,某地区的莫霍面深度变化可以近似地认为是地下密度层的变化。该密度层的密度是壳幔密度差,布格重力异常的变化可认为由地下莫霍面附近的密度层引起,因此可直接使用布格重力异常计算莫霍面深度,计算式为^[25]:

$$\Delta g = 2\pi G \Delta \rho \int_H^{H+\Delta h} dz = 2\pi G \Delta \rho \Delta h \quad (2)$$

式中, G 是万有引力常数; Δh 是密度层厚度。代入数值后,式(2)可以写成:

$$\Delta g = 0.029 \Delta h \quad (3)$$

在已知一个测站的莫霍面深度 M_0 与布格重力异常 Δg_0 的情况下,进而可以根据已知的布格重力异常,得到重力观测网内所有测站的莫霍面深度 M ,计算式为:

$$M = M_0 + (\Delta g_i - \Delta g_0) / 0.029 \quad (4)$$

将 M 与 $H-h$ 作差,即可得到均衡异常 $\Delta M = M - H + h$ 。

2.2 垂向构造应力

文献[8]采用重力/GPS联测数据提出了一种新的计算垂向构造应力的方法,具体计算如下:(1)采用重力/GPS联测数据得到布格重力异常,得到莫霍面深度;(2)根据Airy均衡理论,得到不同高程下的均衡面深度;(3)根据莫霍面与均衡面之间剩余物质所承受的附加浮力,得到垂向构造应力。因此,根据均衡异常 ΔM 以及壳幔密度差 $\Delta \rho$ 便可得到垂向构造应力 P ,计算式为:

$$P = \Delta M \Delta \rho g \quad (5)$$

式中, g 是地表重力加速度。

3 结果分析

3.1 均衡异常分析

根据式(1)计算出研究区域的均衡面深度,如图4所示。由图4可以看出,均衡面深度受地形变化影响较大,整体范围在 $40 \sim 49 \text{ km}$ 之间变化,最大深度位于秦岭地区的岷县附近。

为了对比分析莫霍面深度与均衡面深度,进一步基于布格重力异常数据,根据式(4)反演研究区域内所有测站的莫霍面深度,如图 5 所示。由图 5 可以看出,莫霍面深度为 39~48 km,自东南向西北逐渐加深,且变化趋势比较平缓。

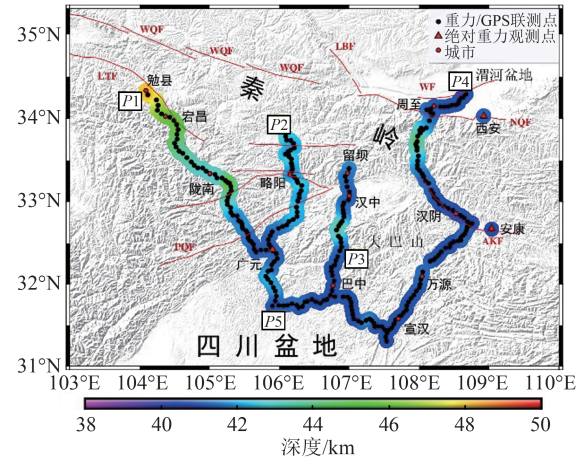


图 4 秦岭地区均衡面深度
Fig.4 Isostatic Depth in Qinling Area

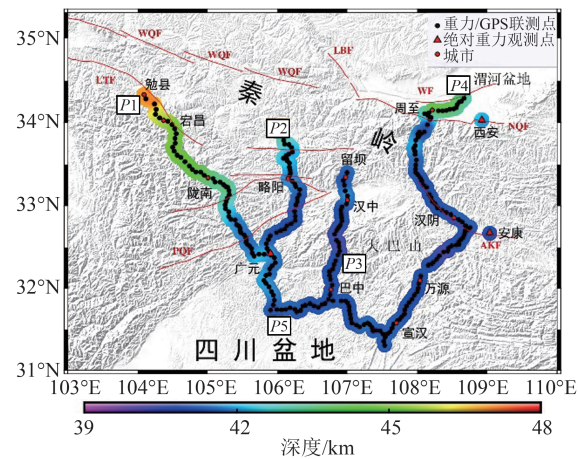


图 5 秦岭地区莫霍面深度
Fig.5 Moho Depth in Qinling Area

表 1 为获取的莫霍面深度统计结果。由表 1 可知,本文计算的 265 个测点的莫霍面深度平均值是 41.862 km,与文献[26]的 37~45 km、文献[27]的 40~50 km 研究成果吻合。 $P1\sim P5$ 剖面莫霍面深度的标准差分别是 1.656 km、0.592 km、0.581 km、1.069 km、0.263 km,其变化与研究区域地形变化相关。 $P1$ 剖面从广元到岷县,经四川盆地北部到达秦岭西部,地形起伏变化大,故莫霍面深度标准差最大,为 1.656 km; $P5$ 剖面位于四川盆地,所在地形比较平坦,没有经过山脉地区,其莫霍面深度的标准差最小,为 0.263 km。

将研究区域莫霍面深度与均衡面深度作差得到均衡异常,如图 6 所示。根据 Airy 均衡模型

理论,如果某个区域的莫霍面深度与均衡面深度之差很小或接近于零,说明该地区已基本处于均衡状态,内部物质和能量的交换、运移和调整比较少,构造运动相对稳定;当莫霍面深度与均衡面深度的差异较大时,则处于不均衡状态,二者之间差异值越大,地壳越不均衡,地下深处物质、能量的交换、运移与调整也更为强烈^[28]。

表 1 莫霍面深度统计结果 /km
Tab.1 Statistics of Moho Depths /km

类型	最大值	最小值	平均值	标准差
所有测点	47.448	39.774	41.862	1.373
$P1$ 剖面	47.448	41.408	43.529	1.656
$P2$ 剖面	43.064	40.611	41.725	0.592
$P3$ 剖面	42.254	39.838	40.798	0.581
$P4$ 剖面	44.176	39.774	41.517	1.069
$P5$ 剖面	41.857	40.789	41.250	0.263

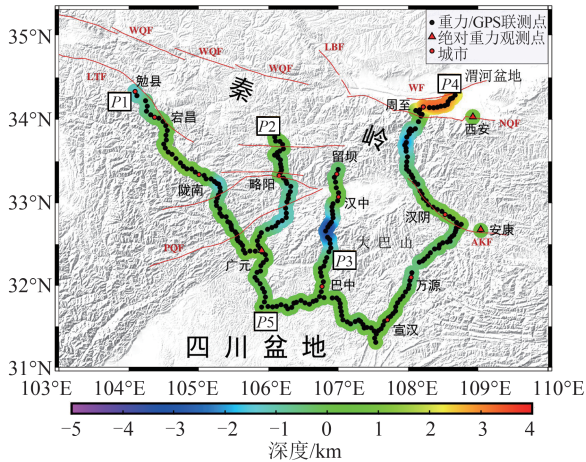


图 6 秦岭地区均衡异常
Fig.6 Isostatic Anomaly in Qinling Area

当莫霍面深度大于均衡面深度时,为了达到均衡状态,莫霍面具有深度减小趋势,或者地表高程表现为上升运动。由图 6 可知,渭河盆地处于均衡正异常状态,与实测水准测量资料^[29]显示的该区域地表呈抬升趋势一致。渭河盆地的均衡异常结果表明该地区处于不均衡状态,存在着地下物质的交换、运移与调整现象,从重力学的角度印证了文献[30]关于渭河盆地地壳活动性很强的观点。在四川盆地北部及其附近区域,均衡异常几乎为零,说明地壳处于相对比较均衡的状态。秦岭西部地区为负均衡状态,即莫霍面深度小于均衡面深度,为达到地壳均衡状态,地表具有下沉趋势。

3.2 垂向构造应力的分析

利用式(5)计算研究区域的垂向构造应力,如图 7 所示。需要说明的是,莫霍面深度大于均

衡面深度,将产生向上的正垂向构造应力;莫霍面深度小于均衡面深度,为保持平衡,将产生向下的负垂向构造应力。由图7可知,研究区域的垂向构造应力大约为 $-28\sim 24$ MPa,分布特征与均衡异常的分布(图6)比较相似。在 32.5°N 以南的区域,垂向构造应力几乎为零,在大巴山和秦岭地区出现负的垂向构造应力区域;秦岭北麓断裂两侧的垂向构造应力梯度变化剧烈,以北的渭河盆地存在较大的正垂向构造应力,约为20 MPa,以南的秦岭地区存在负垂向构造应力,这可能与该地区的地形起伏较大相关。此外,P1剖面从东南到西北呈“零-负-零-负”的垂向构造应力分布形态,P2剖面 and P3剖面从南向北形成“零-负-零”的交替分布,P4从南到北呈现“零-负-正-零-正”的分布趋势,P5剖面的垂向构造应力基本为零,可认为该地区内部结构比较稳定。

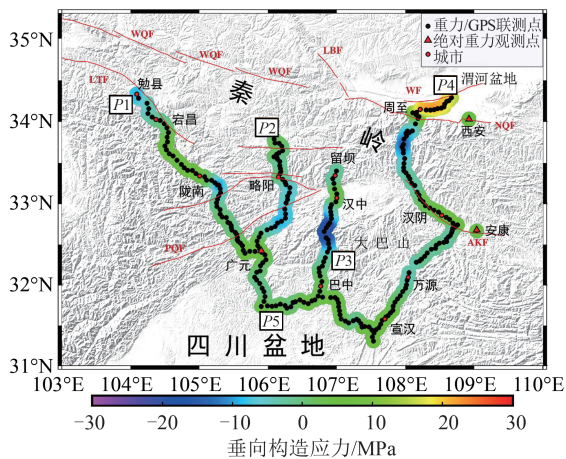


图7 秦岭地区的垂向构造应力分布

Fig.7 Distribution of Vertical Tectonic Stress in Qinling Area

4 结 语

本文采用秦岭地区重力/GPS联测数据,得到该区域的自由空气重力异常和布格重力异常。利用布格重力数据和高程数据,基于Airy均衡理论得到均衡异常,探讨该区域的地壳均衡状态。根据莫霍面与均衡面之间存在的剩余物质产生的附加浮力反演垂向构造应力。研究结果表明:

1)莫霍面深度自东南向西北从39 km到48 km变化,平均莫霍面深度为41.862 km,变化趋势与布格重力异常变化基本呈负相关;

2)大部分地区处于相对比较均衡的状态,在渭河盆地以及秦岭西部地区处于不均衡状态,存在相应的地壳活动;

3)垂向构造应力为 $-28\sim 24$ MPa。秦岭北

麓断裂北部的渭河盆地存在20 MPa左右的垂向构造应力,且两侧的垂向构造应力梯度变化剧烈;在大巴山和秦岭地区存在负的垂向构造应力区域,四川盆地北部的垂向构造应力基本为零。

参 考 文 献

- [1] Si Xiang, Teng Jiwen, Liu Youshan, et al. Crust Structure of the Qinling Orogenic and the Region on Its North and South Margins from Teleseismic Receiver Function[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(4): 1321-1334 (司芴, 滕吉文, 刘有山, 等. 秦岭造山带与南北相邻地带远震接收函数与地壳结构[J]. 地球物理学报, 2016, 59(4): 1321-1334)
- [2] Zhang Guowei, Meng Qingren, Lai Shaocong. Structure and Structure of Qinling Orogenic Belt [J]. *Science in China, (Ser. B)*, 1995, 25(9): 994-1003 (张国伟, 孟庆任, 赖绍聪. 秦岭造山带的结构构造[J]. 中国科学(B辑), 1995, 25(9): 994-1003)
- [3] Wang Qianshen, Teng Jiwen, Zhang Yongqian, et al. Gravity Anomalies and Deep Crustal Structure of the Ordos Basin—Middle Qinling Orogen—Eastern Sichuan Basin [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(2): 532-541 (王谦身, 滕吉文, 张永谦, 等. 鄂尔多斯—中秦岭—四川东部的重力异常场与深部地壳结构[J]. 地球物理学报, 2015, 58(2): 532-541)
- [4] Zhang Yongqian, Wang Qianshen, Teng Jiwen. Crustal Isostatic State in Western Sichuan and Its Dynamical Mechanism [J]. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(4): 662-669 (张永谦, 王谦身, 滕吉文. 川西地区的地壳均衡状态及其动力学机制[J]. 第四纪研究, 2010, 30(4): 662-669)
- [5] Zhang Y Q, Teng J W, Wang Q S, et al. Density Structure and Isostatic State of the Crust in the Longmenshan and Adjacent Areas [J]. *Tectonophysics*, 2014, 619/620: 51-57
- [6] She Yawen. Isostasy and Density Structure of the Crust in Longmen Shan and Liupan Shan [D]. Beijing: Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, 2016 (余雅文. 龙门山和六盘山地区地壳密度结构与重力均衡研究[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所, 2016)
- [7] Zhang Y Q, Teng J W, Wang Q S, et al. A Gravity Study Along a Profile Across the Sichuan Basin, the Qinling Mountains and the Ordos Basin (Central China): Density, Isostasy and Dynamics [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017, 147: 310-321
- [8] Gao Shanghua, She Yawen, Fu Guangyu. A New Method for Computing the Vertical Tectonic Stress of the Crust by Use of Hybrid Gravity and GPS Data

- [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(6): 2006-2013 (高尚华, 余雅文, 付广裕. 利用重力/GPS 联合观测数据计算地壳垂向构造应力的新方法[J]. 地球物理学报, 2016, 59(6): 2006-2013)
- [9] Wang Zhenyu. Isostatic Features of the Crust in the Southwest Ordos Block and Northeast Asia [D]. Beijing: Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, 2018 (王振宇. 鄂尔多斯西南缘与东北亚地壳均衡特征研究[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所, 2018)
- [10] She Yawen, Fu Guangyu, Wang Zhuohua, et al. Vertical Tectonic Stress in Eastern Margin of Bayan Har Block Revealed by Gravity and Terrain Data [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(6): 2480-2492 (余雅文, 付广裕, 王灼华, 等. 重力与地形数据揭示的巴颜喀拉块体东缘垂向构造应力场[J]. 地球物理学报, 2017, 60(6): 2480-2492)
- [11] Han Hengyue, Zhang Yi, Yuan Zhixiang. The Evolution of Weihe Down-Faulted Basin and the Movement of the Fault Blocks [J]. *Journal of Seismological Research*, 2002, 25(4): 362-368 (韩恒悦, 张逸, 袁志祥. 渭河断陷盆地带的形成演化及断块运动[J]. 地震研究, 2002, 25(4): 362-368)
- [12] Zhang Qin, Qu Wei, Peng Jianbing, et al. Research on Tectonic Causes of Numerous Ground Fissures Development Mechanism and Its Unbalance Distribution Between Eastern and Western of Weihe Basin [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(8): 2589-2597 (张勤, 瞿伟, 彭建兵, 等. 渭河盆地地裂缝群发机理及东、西部地裂缝分布不平衡构造成因研究[J]. 地球物理学报, 2012, 55(8): 2589-2597)
- [13] Zhou Wenge, Song Mianxin, Zhang Benren, et al. Chemical Characteristics of Syn-and Post-Collisional Plutons in Qinling Orogen [J]. *Geology-Geochemistry*, 1999, 27(1): 27-32 (周文戈, 宋绵新, 张本仁, 等. 秦岭造山带碰撞及碰撞后侵入岩地球化学特征[J]. 地质地球化学, 1999, 27(1): 27-32)
- [14] Zhang Guowei, Dong Yunpeng, Yao Anping. The Crustal Compositions, Structures and Tectonic Evolution of the Qinling Orogenic Belt [J]. *Geology of Shaanxi*, 1997, 15(2): 1-14 (张国伟, 董云鹏, 姚安平. 秦岭造山带基本组成与结构及其构造演化[J]. 陕西地质, 1997, 15(2): 1-14)
- [15] Zhang Guowei, Guo Anlin, Liu Futian, et al. Three Dimensional Structure and Dynamics Analysis of Qinling Orogenic Belt [J]. *Science in China (Ser. D)*, 1996, 26(S1): 1-6 (张国伟, 郭安林, 刘福田, 等. 秦岭造山带三维结构及其动力学分析[J]. 中国科学(D辑), 1996, 26(S1): 1-6)
- [16] Dong Yunpeng, Zha Xianfeng, Fu Mingqing, et al. Characteristics of the Dabashan Fold-Thrust Nappe Structure at the Southern Margin of the Qinling, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(9): 1493-1508 (董云鹏, 查显峰, 付明庆, 等. 秦岭南缘大巴山褶皱-冲断推覆构造的特征[J]. 地质通报, 2008, 27(9): 1493-1508)
- [17] Xu X M, Ding Z F, Shi D N, et al. Receiver Function Analysis of Crustal Structure Beneath the Eastern Tibetan Plateau [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 73: 121-127
- [18] Jiang Weiwei, Liu Yike, Hao Tianyao, et al. Comprehensive Study of Geology and Geophysics of Sichuan Basin [J]. *Progress in Geophysics*, 2001, 16(1): 11-23 (江为为, 刘伊克, 郝天珢, 等. 四川盆地综合地质、地球物理研究[J]. 地球物理学进展, 2001, 16(1): 11-23)
- [19] Jiang Yongtao. Study on Crustal Movement and Gravity Variation in Sichuan-Yunnan Region and Their Relationship with Regional Strong Earthquakes [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015 (姜永涛. 川滇地区地壳运动和重力场变化与强震活动的关系研究[D]. 西安: 长安大学, 2015)
- [20] Zhu Yiqing, Shen Chongyang, Zhang Guoqing, et al. Rethinking the Development of Earthquake Monitoring and Prediction in Mobile Gravity [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2018, 38(5): 441-446 (祝意青, 申重阳, 张国庆, 等. 我国流动重力监测预报发展之再思考[J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38(5): 441-446)
- [21] Zhang Quan, Yang Qinke, Cheng Jie, et al. Characteristics of 3" SRTM Errors in China [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(5): 684-690 (张泉, 杨勤科, 程洁, 等. 中国地区 3" SRTM 高程误差特征[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(5): 684-690)
- [22] Fulla J, Fernández M, Zeyen H. FA2BOUG—A FORTRAN 90 Code to Compute Bouguer Gravity Anomalies from Gridded Free-Air Anomalies: Application to the Atlantic-Mediterranean Transition Zone [J]. *Computers & Geosciences*, 2008, 34(12): 1665-1681
- [23] Wang C Y, Sandvol E, Zhu L, et al. Lateral Variation of Crustal Structure in the Ordos Block and Surrounding Regions, North China, and Its Tectonic Implications [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 387: 198-211
- [24] Wang Qianshen, Teng Jiwen, Zhang Yongqian, et al. The Crustal Structure and Gravity Isostasy in the Middle Western Sichuan Area [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(2): 579-583 (王谦身, 滕吉

- 文, 张永谦, 等. 四川中西部地区地壳结构与重力均衡[J]. 地球物理学报, 2009, 52(2): 579-583
- [25] Fu G Y, Gao S H, Freymueller J T, et al. Bouguer Gravity Anomaly and Isostasy at Western Sichuan Basin Revealed by New Gravity Surveys[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2014, 119(4): 3925-3938
- [26] Li Y H, Gao M T, Wu Q J. Crustal Thickness Map of the Chinese Mainland from Teleseismic Receiver Functions[J]. *Tectonophysics*, 2014, 611: 51-60
- [27] Song P H, Teng J W, Zhang X M, et al. Flyover Crustal Structures Beneath the Qinling Orogenic Belt and Its Tectonic Implications[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, 123(8): 6703-6718
- [28] Zhang Yongqian, Wang Qianshen, Teng Jiwen. The Crustal Isostatic Anomaly Beneath Eastern Tibet and Western Sichuan and Its Relationship with the Distribution of Earthquakes[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(11): 2631-2638 (张永谦, 王谦身, 滕吉文. 川西藏东地区的地壳均衡异常及其与地震分布的关系[J]. 地球物理学报, 2010, 53(11): 2631-2638)
- [29] Hao M, Wang Q L, Shen Z K, et al. Present Day Crustal Vertical Movement Inferred from Precise Leveling Data in Eastern Margin of Tibetan Plateau[J]. *Tectonophysics*, 2014, 632: 281-292
- [30] Ren Jun, Feng Xijie, Wang Fuyun, et al. Fine Crust Structures of Xi'an Sag in the Weihe Basin Revealed by a Deep Seismic Reflection Profile[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(2): 513-521 (任隽, 冯希杰, 王夫运, 等. 深地震反射剖面揭示的渭河盆地西安拗陷的地壳精细结构[J]. 地球物理学报, 2013, 56(2): 513-521)

Isostatic Anomaly and Vertical Tectonic Stress Analysis by Gravity Observations in Qinling Area

YUAN Huaqing¹ WU Yunlong¹ XU Chuang² ZHANG Yi¹ WANG Zhenyu³

¹ Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China

² School of Civil and Transportation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China

³ Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

Abstract: Objectives: It is important to determine the isostasy anomaly and the vertical tectonic stress for understanding the deep tectonic features and dynamics in Qinling area. At present, high-precision observation gravity data is one of the important means to obtain the isostasy anomaly and the vertical tectonic stress. **Methods:** The free-air gravity anomaly and the Bouguer gravity anomaly are computed by using gravity and GPS data, and the isostasy anomaly and the vertical tectonic stress are further inferred. **Results:** The results show that the isostasy depth is 40—49 km, the Moho depth is 39—48 km and the vertical tectonic stress carried by the crust is —28—24 MPa. **Conclusions:** The Weihe Basin on the northern of Qinling area is in a non-isostatic state. The isostasy anomaly and the vertical tectonic stress are approximately zero in the Northern Sichuan Basin, which indicates the basin is in an isostatic state. The local negative isostasy anomaly in Qinling indicates that there is existence crustal movement.

Key words: the Moho depth; the isostatic depth; vertical tectonic stress; Qinling area; isostatic anomaly

First author: YUAN Huaqing, postgraduate, specializes in inversion of earth gravity field. E-mail: yuanhuaqing20@mailsucas.ac.cn

Corresponding author: WU Yunlong, PhD, professor. E-mail: yunlongwu@gmail.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (41974096, 41974014, 41931074); the Natural Science Foundation of Guangdong Province (2022A151010396).

引文格式: YUAN Huaqing, WU Yunlong, XU Chuang, et al. Isostatic Anomaly and Vertical Tectonic Stress Analysis by Gravity Observations in Qinling Area[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(6): 972-978. DOI:10.13203/j.whugis20220198 (袁华清, 吴云龙, 许闯, 等. 基于实测重力数据的秦岭地区均衡异常与垂向构造应力分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(6): 972-978. DOI:10.13203/j.whugis20220198)