

张季生,高 锐,曾令森等. 龙门山及邻区重、磁异常特征及与地震关系的研究. 地球物理学报, 2009, **52**(2):572~578
Zhang J S, Gao R, Zeng L S, et al. Relationship between characteristics of gravity and magnetic anomalies and the earthquakes in Longmenshan range and adjacent areas. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(2):572~578

龙门山及邻区重、磁异常特征及与地震关系的研究

张季生,高 锐*, 曾令森,李秋生,管 焱,贺日政,王海燕,卢占武

中国地质科学院地质研究所,北京 100037

摘 要 本文通过研究龙门山构造带及邻区的区域重、磁场特征,以及龙门山断裂带的产状等特征,探讨其与地震关系. 研究表明,龙门山断裂带是环绕青藏高原的重力梯度带的一部分. 其对应密度分界面向西北方向倾斜,向下延深数十公里,切穿莫霍面. 推测密度分界面分为两段,深部较陡的为岩石圈块体的边界,浅部较缓. 基底隆起与凹陷的界线大体与大地构造单元的界线一致. 由西部的岩石圈块体的边界至东部在地表的大地构造单元界线之间的距离约为 40~50 km. 隶属于中上地壳脆性变形层的地质体由岩石圈块体界线沿缓倾的密度界面推覆至地表的大地构造单元的界线处,在此过程中伴随岩层破碎,从而发生地震. 龙门山构造带主要部分位于负磁异常区,这种反磁化和退磁的现象,可能与逆冲推覆作用所引起的深部岩层倒转有关.

关键词 龙门山构造带,汶川地震,重力异常,重力梯度带,磁异常,岩石圈块体

文章编号 0001-5733(2009)02-0572-07

中图分类号 P315

收稿日期 2009-01-23,2009-02-16 收修定稿

Relationship between characteristics of gravity and magnetic anomalies and the earthquakes in Longmenshan range and adjacent areas

ZHANG Ji-Sheng, GAO Rui*, ZENG Ling-Sen, LI Qiu-Sheng, GUAN Ye,
HE Ri-Zheng, WANG Hai-Yan, LU Zhan-Wu

Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

Abstract The gravity gradient belt in the Longmenshan fault zone is part of the great gravity gradient belt surrounding the Tibetan plateau in the north and the east. The density boundary plane, corresponding to the gravity gradient belt, exists beneath the surface. Based on seismic data, the immense boundary plane of density distribution might be extended downward several ten kilometers across the Moho. According to analysis for the Wenchuan earthquake and aftershocks, most of the earthquakes occurred in the upper and middle crust.

Therefore, we suggest that the immense boundary plane of density distribution might be divided into two parts in depth. The deeper part in the westernmost of the Longmenshan fault zone is the boundary of lithosphere blocks, which dips steeply toward northwest. In contrast the shallower part located in the upper and middle crust and dips gently northwest. The boundary of the shallower part at the surface coincides roughly with the Anxian-Guanxian fault, the

基金项目 国家自然科学基金重点资助项目(40830316),国家自然科学基金项目(40774026,40704016,40774051),财政部科学专项(140102),中国地质调查局地质调查工作项目(1212010611809,1212010811033),国土资源部公益性科研专项经费项目(200811021),科技部国际合作重点项目(2006DFA21340)和基本科研业务费项目(J0803)联合资助.

作者简介 张季生,男,1950年生,研究员,长期从事重、磁异常处理与解释. E-mail:zhang_jisheng@sina.com

*** 通信作者** 高 锐,男,1950年生,研究员,1981年于长春地质学院获硕士学位,长期从事青藏高原岩石圈结构与动力学研究.
E-mail:gaorui@cags.net.cn

easternmost one of the Longmenshan fault system. The distance is about 40~50 km between the boundary of lithosphere block and the Anxian-Guanxian fault. When brittle part of the continental block move along the density boundary surfaces from boundary of lithosphere block to the tectonic boundary on the surface and rupture, earthquake will occur.

The area around the Qingchuan-Wenchuan-Dujiangyan exhibits negative magnetic anomalies. Thrust faulting resulted in the overturn of the strata, which in turn caused reversal magnetization.

Keywords Longmenshan fault zone, Wenchuan earthquake, Gravity anomaly, Gravity gradient belt, Magnetic anomaly, Lithosphere block

1 引言

青藏高原东缘的龙门山构造带南起天全,北至广元,长近 500 km,宽约 40~50 km,北东走向。龙门山构造带位于松潘—甘孜印支造山带与扬子地台的中新生代(T_3 -Q)四川前陆盆地之间,以出露大面积的前震旦纪古老变质杂岩(700~800 Ma)、少量的新元古代变质火山岩及震旦纪-早、中三叠世海相沉积岩为特征。龙门山构造带的东缘发育一系列的逆冲断裂和飞来峰构造,逆冲作用使山体向东逆冲推覆在四川盆地之上^[1]。位于龙门山构造带东部的扬子地台盖层厚度大、分布广、基底出露局限和褶皱断裂较为发育。地表出露以第四系和早侏罗-晚白垩世沉积碎屑岩为主。位于龙门山构造带西部的松潘—甘孜造山带内上二叠统-三叠系厚度大,覆盖广;前震旦系-下二叠统出露甚少;古生界仅龙门山和一些重要断裂的混杂堆积层中呈外来岩块产出;侏罗纪-白垩系普遍缺失;新生界稳定地块和大型断裂断续分布。区内岩浆岩发育,尤以晚二叠世-早白垩世基性喷出岩和中酸性侵入岩分布最广^[2]。

前人曾对该研究区重、磁异常进行研究与分析^[3~6],在重、磁场的分区特征、地壳厚度分布及变形特征等方面取得了许多成果。本文在前人工作的基础上,研究重、磁异常的特征,并综合分析重、磁和地震等资料,探讨龙门山及邻区地球物理特征与地震的关系。

2 地球物理特征

2.1 岩石物性特征

研究各类地质体的物性参数是开展地球物理工作的前提,对于深部地质构造进行研究,没有比较全面的、系统的物性参数测试与研究就不可能进行较为合理的地质解释。自 1989 年以来,不同单位先后

在研究区进行了较为系统的岩石物性工作,为本文的研究奠定了基础。

2.1.1 岩石磁性特征

前人对研究区岩石磁性的研究结果表明^{[3]1)}:沉积岩磁性最弱,一般磁化率均在 $50 \times 10^{-6} \sim 4\pi SI$ 以下。三叠系下统飞仙关组具弱磁性。龙门山一带的安县—广元的线状异常,与飞仙关组褶皱隆起有关。变质岩的磁性极不均匀,变质程度深以及火山质或含火山质的岩石磁性相对要强,是本区引起磁异常的主要原因。浅-中等变质的褶皱基底一般具弱磁性,因此利用磁性研究褶皱基底是困难的。

2.1.2 岩石密度特征

作者收集了研究区的岩石密度值^{[3]1)},以龙门山断裂带为界分为东、西部,其密度值列于表 1。

表 1 研究区地层密度表
Table 1 Density of strata

地层	密度(10^3 kg/m^3)	
	西部	东部
第四系	1.90	1.90
第三系	2.18	2.18
白垩系	2.47	2.47
侏罗系	2.55	2.55
三叠系上统	2.68	2.52
三叠系中统	2.70	2.66
三叠系下统	2.72	2.66
石炭-二叠系	2.64	2.66
志留-泥盆系	2.66	2.68
寒武-奥陶系	2.68	2.70
震旦系	2.72	2.72
上元古界	2.74	2.76
中元古界	2.82	2.82
下元古-太古界	2.88	2.88

1) 四川省地质矿产局物探队,四川省重力航磁异常综合研究报告,1991

从地层密度表可以看出,前震旦纪的岩层与上覆地层有一定密度差,故可视为一个明显的密度界面。

花岗岩的密度值为 $2.66 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 闪长岩的密度值为 $2.76 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. 岩浆岩体一般规模较小,不会引起一定规模的重力异常. 因此在本区可以利用岩石密度性质来研究基底起伏。

2.2 重、磁场的特征

重、磁数据的比例尺为 1:100 万,点、线距均为 5 km,线数为 179,点数为 159。

2.2.1 磁场特征

以龙门山构造带为界,西部为弱负异常区,异常强度为 $-25 \sim -75 \text{ nT}$,异常弱且平稳(见图 1). 在龙门山构造带青川—汶川—都江堰为负异常区,走向为北东向,长约 200 km,异常最小值为 -280 nT 左右. 在都江堰附近出现局部正异常与彭灌变质杂岩体中基性岩脉有关. 都江堰以南—成都—邛崃为负异常区,该异常强度最小值为 -200 nT 左右. 天全附近的局部正异常与宝兴—雅斯德杂岩体中的变质中基性岩体有关。

龙门山构造带以东,万源—南充—乐山—武隆磁场区以高值正异常为主,异常强度达 550 nT ,呈带状或块状分布,其展布方向主要为北东向. 在其东北部出现走向为北东向的负异常,其最小值为 -280 nT ,推测为该高值正异常的伴生异常. 从卫星磁异常图可看出,该异常为全国最强的卫星磁异常. Frey^[7] 将 MAGSAT 卫星磁异常图与全球已知地质构造进行对比,发现一般地盾、地台、俯冲带以及海底高原与正异常对应. 因此推测四川盆地下方有古老的太古宙和下元古代结晶基底存在。

2.2.2 重力场特征

青藏高原为全国布格重力异常值最低的负异常区²⁾,青藏高原的东部和北部被一个巨大的重力梯度带所围限. 这一环绕青藏高原的重力梯度带经兰州到天水转向西南,沿龙门山向西南延伸. 贯穿四川省的龙门山重力梯度带只是上述巨大重力梯度带中的一部分,在天全以南分为两支,西支与青藏高原重力梯度带重合,向西南方向延伸;东支向东南方向伸展,至遵义附近. 研究区为负异常区,异常值由西向东逐渐增大,异常强度为 $-450 \sim -64 \text{ mGal}$. 由龙门山构造带向东西两侧,重力梯度带变化逐渐变缓。

龙门山重力梯度带东侧的内江—江津一带分布有具有一定规模的局部重力高,莫霍面隆起是引起该重力高的主要原因之一(见图 2)。

3 重、磁数据处理与分析

3.1 航磁异常的数据处理

由于受斜磁化的影响,航磁异常的特征位置将发生偏移,因此需要对航磁异常进行化到地磁极的计算. 研究区的地磁倾角为 51.88° ,地磁偏角为西偏 1.14° . 由化到地磁极的航磁异常图(图 3)可看出,磁异常的位置向北移动,尤其以分布在万源—南充磁异常位置向北移动最为明显. 龙门山构造带仍处于极小值为 -250 nT 的负异常区. 出现如此大范围负异常区是十分反常的现象. 王懋基^[5]曾解释引起负异常的原因,认为在绵阳—茂汶存在中基性杂岩的磁性体,可能是该磁性体的反磁化作用,也有可能是退磁作用的影响使其磁化倾角偏为 -20° . 当然也可能是其他的原因需要进行深入研究。

3.2 重力异常的数据处理与分析

3.2.1 重力异常的分离及其特征分析

重力异常是地下密度不均匀的综合反映,定性地讲,大尺度的重力异常与规模大、埋藏深的密度体的分布有关,小尺度的重力异常则相反. 作者用 Daubechies 小波变换计算了龙门山地区不同阶重力异常的小波细节,进而进行重力场的分离^[8]. 将 1~6 阶小波细节之和作为局部重力异常. 从龙门山地区局部布格重力异常图(图 4)可看出,龙门山重力梯度带反映得更为清晰,同时突出了一些局部重力异常,例如内江—江津一带的重力高、南江—广元以北的重力高、都江堰附近的重力高、以及山前盆地中的江油附近的重力低和邛崃附近的重力低等. 这些小尺度重力异常与浅层地质构造密切相关。

Hornby 等^[9]提出基于小波变换的多尺度边缘检测对重、磁场数据进行处理的方法. 作者用多尺度边缘检测技术对龙门山地区局部布格重力异常进行了处理,将计算得到的不同尺度边界线叠加在局部重力异常透视阴影图上,直观地显示了密度不均匀体边界的展布. 由图 4 可以看出,西部的重力异常边缘线表示深部密度体分界线,中部的重力异常边缘线大致圈出四川盆地块体的范围。

3.2.2 局部重力异常水平梯度的特征

重力异常水平梯度是反映重力场沿水平方向变化大小的物理量. 从龙门山地区局部重力异常水平

2) 孙文珂,涂承林,金宜声. 中国及毗邻海区布格重力异常图(1:500 万). 1999

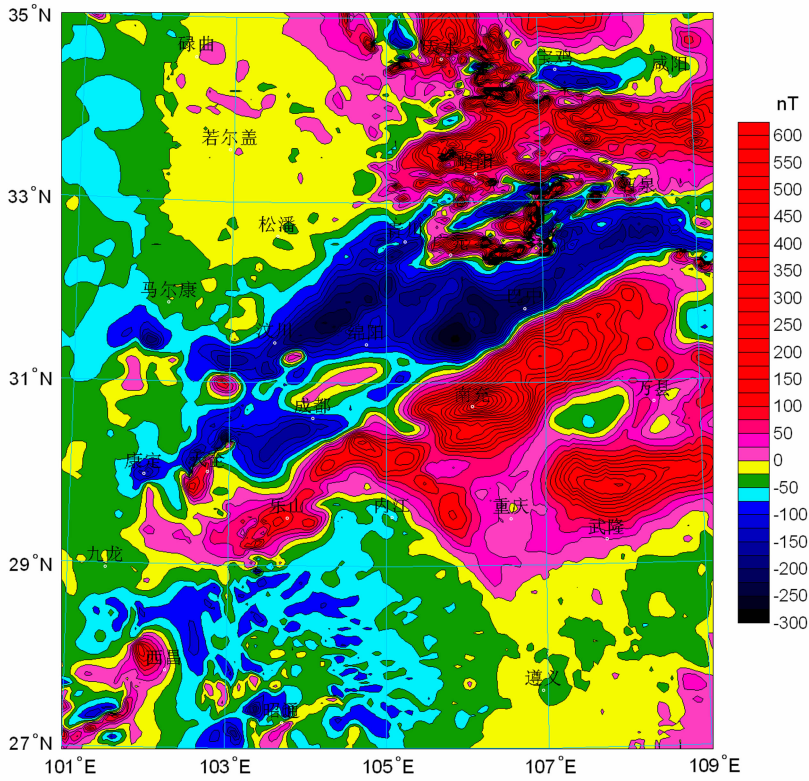


图 1 龙门山及邻区航空磁力异常图

Fig. 1 Aeromagnetic anomaly in Longmenshan and adjacent area

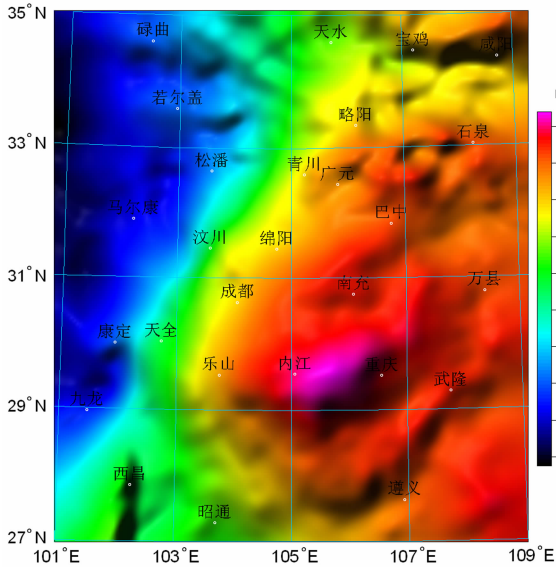


图 2 龙门山及邻区布格重力异常图

Fig. 2 Bouguer gravity anomaly in Longmenshan and adjacent area

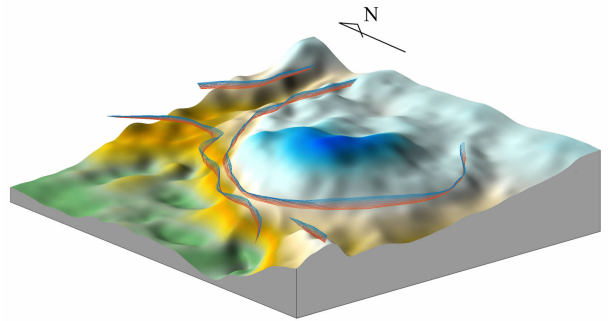


图 4 龙门山及邻区局部布格重力异常图

图中背景为局部布格重力异常的三维立体图,彩色线为不同尺度异常的边缘线,浅蓝色为小尺度异常的边缘线,红色线为大尺度异常的边缘线.其他过渡颜色线表示小尺度到大尺度逐渐变化的边缘线.

Fig. 4 Residual Bouguer gravity anomaly in Longmenshan and adjacent area

The background in the map is a three-dimensional shaded rendering map of residual gravity field. The color lines denote the multiscale edge lines of residual gravity field. The red line denotes the edge line of biggest scale, and the light-blue line denotes the edge line of smallest scale.

梯度图(图 5)可看出,龙门山重力梯度带主体走向为北东 35°,在天全南分为两个分支.不同地段的重力变化大小不同,在都江堰附近,重力梯度带宽度最大为 80 km(以大于 1.0 mGal/km 来计算),重力水平梯度变化最大,达到 2.4 mGal/km.而在邛崃—

康定之间和平武以南,重力梯度带宽度只有 30~40 km左右,重力水平梯度变化最大只有 1.0~1.2 mGal/km.龙门山重力梯度带平面特征较为复杂,说明龙门山构造带的深部结构比较复杂,在主干断裂附近存在一些局部断裂.

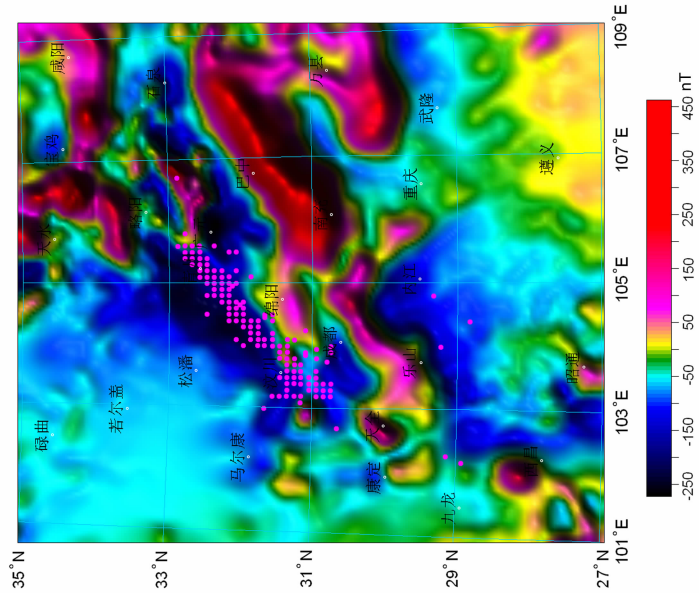


图 3 龙门山及邻区航空磁化力极异常图

图中粉色的圆表示地震震中在地面的投影。

Fig.3 Arcomagnetic anomaly reduced to pole in Longmenshan and adjacent area

Pink circles show epicenters.

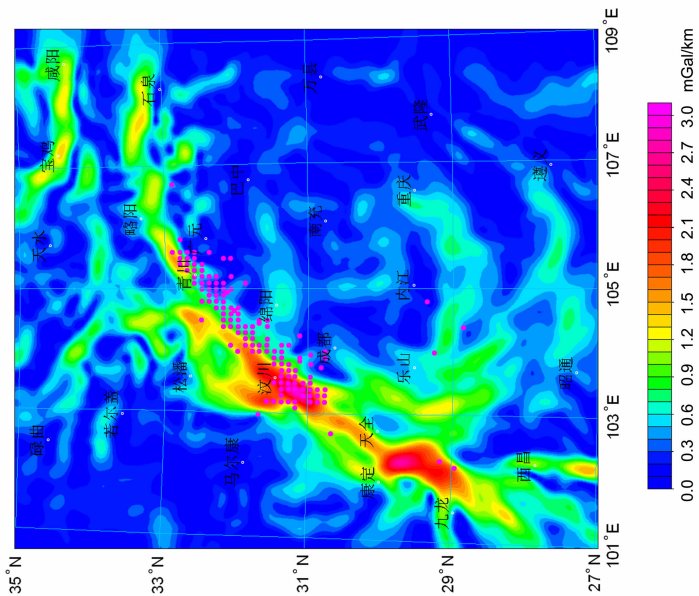


图 5 龙门山及邻区局部重力异常水平梯度图

图中粉色的圆表示地震震中在地面的投影。

Fig.5 Horizontal gradient of residual Bouguer gravity anomaly in Longmenshan and adjacent area

Pink circles show epicenters.

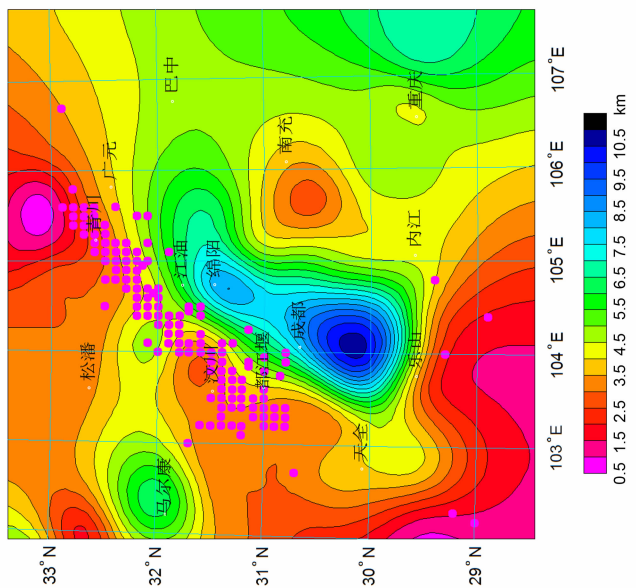


图 6 龙门山及邻区基底深度图

图中粉色的圆表示地震震中在地面的投影。

Fig.6 Depth of basement in Longmenshan and adjacent area

Pink circles show epicenters.

3.2.3 基底起伏特征

岩石密度研究结果表明,前震旦纪基底与上覆岩层具有显著的密度差,是计算研究区基底起伏的前提。用前人所做的深地震测深结果^[10~13],对密度界面进行约束,深部岩石密度的初值参照高温、高压下岩石物理性质的研究成果^[14],计算了深部各密度层的重力异常^[15]。受资料的限制,计算基底的范围比重、磁异常图的范围要小,仅限于龙门山断裂带附近的区域。作者利用重力资料计算的结果绘制了龙门山地区基底深度图(图 6)。

从基底深度图(图 6)可以看出,龙门山重力梯度带以东的山前盆地为基底凹陷区。在成都以南的凹陷区,基底深度超过 10 km;而在绵阳一带,基底深度最大为 7 km 左右,向东为基底隆起区,基底最浅处在南充一带,基底深度不超过 4 km。龙门山重力梯度带以西为基底隆起区,基底深度一般小于 4 km。

4 重、磁场特征与地震关系的研究

将中国地震台网中心 2008 年 5 月 12 日汶川地震以来近 6 个月的地震震中位置,投影到龙门山地区局部重力异常的水平梯度图及其他图上。从局部重力异常的水平梯度图(图 5)可以看出,地震绝大部分发生在龙门山断裂带的中、北段。在龙门山断裂带的南段很少出现地震震中。

重力梯度带最大值分布的地方,即重力场变化最大的地方,通常解释为密度间断面。在龙门山构造带中段,汶川和都江堰附近,地震发生在重力梯度带最大值处及其以东的地方,即地震发生在密度间断面及其东部。但是在龙门山构造带北段,北川一带,地震发生在重力梯度带最大值以东的地方,即地震发生在密度间断面以东。在龙门山构造带南段,成都一线以南,地震很少发生。

整个环绕青藏高原的重力梯度带规模巨大,反映在深部存在规模巨大的密度间断面。深地震测深的成果表明,松潘—甘孜地块地壳厚度达 60~62 km,四川盆地为 42~44 km,二者相差约 16~20 km。龙门山推覆体以下的莫霍界面为一较陡的斜坡带,在宽约 100~150 km 的龙门山构造带,莫霍界面从东部深 44 km 处下降到西部 60 km 处,相差约 16 km^[10,11]。因此作者推断密度分界面向下延深数十公里,切穿莫霍面。另外,密度界面向西北方向倾斜。

本文的研究(图 6)表明,地震震中绝大多数分布在基底的隆起区,只有少数分布在由隆起向凹陷

变换的过渡区。许多学者从深部研究龙门山的逆冲推覆作用^[10~14],本文计算基底起伏,可以使人们从平面上认识和理解龙门山的逆冲推覆作用。

由龙门山及邻区航空磁力化极异常图(图 3)可以看出,地震主要发生在青川—汶川—都江堰一带的负异常区。在都江堰以南—成都—邛崃一带的负异常区,没有地震发生。

作者对发生的地震震中的深度的统计结果表明,震中深度的平均值为 15.7 km,以两倍均方差计算震中深度的变化范围为 4.6~26.9 km。这说明绝大多数地震发生在具有脆性特征的中、上地壳。

5 结论与讨论

龙门山断裂带所在的重力梯度带,既是环绕青藏高原的边界,又是南北地震带的一部分。根据地震研究成果及重力研究的结果,密度突变的分界面是重力场急剧变化的主要原因。这一密度分界面向西北方向倾斜,向下延深数十公里,切穿莫霍面。

在龙门山重力梯度带以东的山前盆地为基底凹陷区。在成都以南的凹陷区,基底深度超过 10 km;龙门山重力梯度带以西为基底隆起区,基底深度一般小于 4 km。地震震中绝大多数分布在基底的隆起区。

作者推测密度分界面分为两段,深部较陡的为岩石圈块体的边界,浅部较缓。由西部的岩石圈块体的边界至东部的大地构造单元的界线之间的距离约为 40~50 km。基底隆起与凹陷的界线大体与大地构造单元的界线一致。由大地构造单元的界线往深部密度界面缓倾^[11,16],与深部岩石圈块体的边界相连接。隶属于中上地壳脆性变形层的地质体由岩石圈块体界线沿缓倾的密度界面推覆至地表的大地构造单元的界线处,在此过程中伴随岩层破碎,从而发生地震。

龙门山构造带中的青川—汶川—都江堰段位于强度较大的负磁异常区,前人解释为反磁化和退磁作用的结果。为什么会在龙门山构造带出现反磁化和退磁作用,作者推断与逆冲推覆作用所引起的深部岩层倒转有关。

为什么在龙门山构造带南段,都江堰以南—成都—邛崃一带的负磁异常区没有地震发生? 还需要进行深入的研究。

致 谢 本文得到姜春发研究员的指导和帮助,在此表示衷心的感谢。

参考文献(References)

- [1] 许志琴, 李化启, 侯立炜等. 青藏高原东缘龙门—锦屏造山带的崛起——大型拆离断层和挤出机制. 地质通报, 2007, **26**(10): 1262~1267
Xu Z Q, Li H Q, Hou L W, et al. Uplift of the Longmen-Jinping orogenic belt along the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau: Large-scale detachment faulting and extrusion mechanism. *Geological Bulletin of China* (in Chinese), 2007, **26**(10): 1262~1276
- [2] 四川省地质矿产局. 四川省区域地质志. 中华人民共和国地质矿产部地质专报, 一 区域地质, 第 23 号. 北京: 地质出版社, 1982
Bureau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province. Regional geology of Sichuan province, People's Republic of China, Ministry of Geology and Mineral Resources, Geological Memoirs, Series 1, Number 23 (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1982
- [3] 宋鸿彪, 刘树根. 龙门山中北段重磁场特征与深部构造关系. 成都地质学院学报, 1991, **18**(1): 74~82
Song H B, Liu S G. The relation of gravity and aeromagnetic field and deep structure in middle-northern Longmenshan mountains. *Journal of Chengdu College of Geology* (in Chinese), 1991, **18**(1): 74~82
- [4] 宋鸿彪. 龙门山造山带地质和地球物理资料的综合解释. 成都地质学院学报, 1994, **21**(2): 79~87
Song H B. The comprehensive interpretation of geological and geophysical data in the orogenic belt of Longmen mountains. *Journal of Chengdu College of Geology* (in Chinese), 1994, **21**(2): 79~87
- [5] 王懋基. 黑水—泉州地质断面的重磁解释. 地球物理学报, 1994, **37**(3): 321~329
Wang M J. Gravity and magnetic interpretation of Heishui-Quanzhou geoscience transect. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1994, **37**(3): 321~329
- [6] 钟 锴, 徐鸣洁, 王良书等. 川滇地区重力场特征与地壳变形研究. 高校地质学报, 2005, **11**(1): 111~117
Zhong K, Xu M J, Wang L S, et al. Study on characteristics of gravity field and crustal deformation in Sichuan-Yunnan region. *Geological Journal of China Universities* (in Chinese), 2005, **11**(1): 111~117
- [7] Frey H. MAGSAT scale anomaly distribution: the global perspective. *Geophys. Res. Lett.*, 1982, **9**(6): 277~280
- [8] Press W H, Teukolsky S A, Vetterling W T, et al. Numerical Recipes in Fortran 77. The Art of Scientific Computing, Second Edition. Cambridge University Press, 1992
- [9] Hornby P, Boschetti F, Horowitz F G. Analysis of potential field data in the wavelet domain. *Geophys. J. Int.*, 1999, **137**: 175~196
- [10] 崔作舟, 陈纪平, 吴 苓. 花石峡—邵阳深部地壳结构和构造. 中华人民共和国地质矿产部地质专报, 五构造地质、地质力学, 第 21 号. 北京: 地质出版社, 1996
Cui Z Z, Chen J P, Wu L. Texture and structure of Huashixia-Shaoyang deep crust, People's Republic of China, Ministry of Geology and Mineral Resources, Geological Memoirs, Series 5, Number 21 (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1996
- [11] 朱介寿. 汶川地震的岩石圈深部结构与动力学背景. 成都理工大学学报(自然科学版), 2008, **35**(4): 348~356
Zhu J S. The Wenchuan earthquake occurrence background in deep structure and dynamics of lithosphere. *Journal of Chengdu University of Technology* (in Chinese), 2008, **35**(4): 348~356
- [12] 贾 东, 陈竹新, 贾承造等. 龙门山前陆褶皱冲断带构造解析与川西前陆盆地的发育. 高校地质学报, 2003, **9**: 402~410
Jia D, Chen Z X, Jia C Z, et al. Structural features of the Longmen Shan fold and thrust belt and development of the western Sichuan foreland basin, central China. *Geological Journal of China Universities* (in Chinese), 2003, **9**: 402~410
- [13] 王有学, Mooney W D, 韩国花等. 台湾—阿尔泰地质断面阿尔金—龙门山剖面的地壳纵波速度结构. 地球物理学报, 2005, **48**(1): 98~106
Wang Y X, Mooney W D, Han G H, et al. Crustal P-wave velocity structure from Altay Tagh to Longmen mountains along the Taiwan-Altay geoscience transect. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, **48**(1): 98~106
- [14] Holbrook W H, Mooney W D, Christensen N I. The seismic velocity structure of the deep continental crust. In: Fountain D M eds. Continental Lower Crust, Developments in Geotectonics 23. 1992. 1~43
- [15] Parker R L. The rapid calculation of potential anomalies. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 1973, **31**: 447~455
- [16] 朱迎堂, 王绪本, 余 年等. 龙门山大地电磁深部结构及汶川地震($M_s 8.0$). 地质学报, 2008, **82**(12): 1769~1777
Zhu Y T, Wang X B, Yu N, et al. Deep structure of magnetotelluric profile on Longmen Mts. and its relation to the $M_s 8.0$ Wenchuan earthquake. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 2008, **82**(12): 1769~1777

(本文编辑 何 燕)