

doi:10.3799/dqkx.2014.173

大震与重力异常突变带、活动断裂带 关系及其流变模型

周志鹏¹, 杜秋姣^{1,2,3,6*}, 梁青⁴, 王杰⁵, 曾佐勋^{1,2,3}, 王雄¹

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学教育部三峡库区地质灾害研究中心, 湖北武汉 430074

3. 华中构造力学研究中心, 湖北武汉 430074

4. 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 湖北武汉 430074

5. 中国地震局地震研究所, 湖北武汉 430071

6. 中国地质大学数理学院, 湖北武汉 430074

摘要: 为了研究大震($M_s \geq 7$)和巨震($M_s \geq 8$)与重力异常和活动断裂的关系, 利用 EIGEN-6C 重力模型计算了相关地区的自由空气重力异常, 查阅了相关地区的布格重力异常和活动断裂构造, 分析了重力异常突变带和活动断裂带与这些地震的空间分布, 发现大震和巨震常在重力异常突变带和活动断裂带交汇处发生, 结合前人对地球深部构造特征的研究, 提出了一种流变模型来解释大地震发生于重力异常突变带和活动断裂带交汇处的原因: 地壳深部流变层(体)流动受阻碍而引起重力异常和能量积累与释放。

关键词: 大地震; 重力异常突变带; 活动断裂带; 深部构造; 流变。

中图分类号: P315.2

文章编号: 1000-2383(2014)12-1887-09

收稿日期: 2014-09-01

Relationship among Steepest Gradient of Gravity Field, Active Fault Zone and Large Earthquake, and Its Rheological Model

Zhou Zhipeng¹, Du Qiujiao^{1,2,3,6*}, Liang Qing⁴, Wang Jie⁵, Zeng Zuoxun^{1,2,3}, Wang Xiong¹

1. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Three Gorges Research Center for Geo-hazard, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Huazhong Tectonomechanical Research Center, Wuhan 430074, China

4. Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

5. Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China

6. School of Mathematics and Physics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: In order to find the relationship among a large ($M_s \geq 7$) earthquake, or a giant earthquake ($M_s \geq 8$) and the steepest gradient of gravity field and active fault, the free air gravity anomaly map by EIGEN-6C gravity model was calculated, the bouguer gravity anomaly and active fault of the region trends to occur large or giant earthquake is consulted. The spatial distribution of large and giant earthquakes and active fault, gravity anomaly is analyzed. We come to a conclusion that a large or giant earthquake trends to occur at the intersection area of steepest gradient of gravity field and active fault. With the previous study of deep structures in those area, we propose a rheological model to interpret the regularity. It is that the flow of the rheological layer (body) blocked by the brittle rocks cause the gravity anomaly and energy accumulation and release.

Key words: large earthquake; steepest gradient of gravity field; active fault zone; deep structure; rheology.

基金项目: 理科基地人才培养基金项目(No.J1210043); 国家自然科学基金重点项目(No.41230206); 国家自然科学基金青年科学基金项目(No.41404041); 中国博士后科学基金面上项目(No.2014M562079); 国家“985”创新平台建设项目子方向课题(地震及其次生地质灾害研究)。

作者简介: 周志鹏(1993-), 男, 博士在读, 主要从事地震机理研究。E-mail: zhouzhipeng2010@qq.com

* 通讯作者: 杜秋姣, E-mail: dqjhhh@163.com

近几年来,中国相继发生了 2008 年汶川 $M_s 8.2$ 、2010 年玉树 $M_s 7.3$ 和 2013 年芦山 $M_s 7.0$ 大地震。这些地震震源浅,破坏力大,给人们带来了深重的灾难。过去对于地震与重力异常和活动断裂的研究很多,但是多偏向于临震前期的重力异常波动(张永仙等,2000;朱治国等,2012;邹正波等,2012;张克亮等,2013),或者研究地震与活动断裂的关系,及进行地震危险性评估和预测(李树德,1996;陈宇坤,2007;吴中海等,2012;李自红等,2013)。但是大地震发生的地区有其特殊的深部构造,重力异常可以作为其特殊深部构造的一种体现(费琪,2009),并且活动断裂往往能够控制大震的震源位置,所以对于重力异常和活动断裂与大震的关系很值得进行深入研究。作者研究了近年来发表的重力异常分布与大震相关的论文,利用重力模型,计算了研究区域自由空气重力异常,查阅了研究区域的布格重力异常,着重研究了昆仑、墨脱、汶川、芦山、花莲、日本宫城地区发生的大地震与重力异常的关系,并深入分析了这些区域的深部构造,发现多数大震是与重力异常突变带(重力异常突变带指重力异常等值线沿某个方向发生较大变化,一般大于 1 mGal/km) 和活动断裂带紧密联系的,并对这些联系进行了归纳、总结及成因分析,希望今后能在地震的中长期预测中引起重视。

1 数据来源

本文中有关的重力异常数据主要来自于 EIGEN-6C 重力场模型, EIGEN-6C 重力场模型是由 GFZ(GeoForschungs Zentrum Potsdam) 采用地面重力数据、卫星测高数据及卫星重力数据(SLR、GRACE 和 GOCE) 解算而成,最高阶次达 1 420 阶次(前 50 阶包含有时变参数)(姜元军和韩勇,2013)。本文计算的自由空气重力异常的高程为 10 km,阶数为 2-360 阶,重力异常的单位为 mGal ($1 \text{ mGal} = 10^{-5} \text{ m/s}^2$)。部分重力资料源自于其它论文(均已标注)。

2 中国及邻区近年来与大震和巨震相关的重力异常和活动断裂分布

中国近年来发生的大震和巨震较多(表 1),其多数分布于重力异常突变带(图 1)。同时,大地震还

表 1 中国近年来大震和巨震目录

Table 1 Large and giant earthquake catalogue of China in recent years

震中	震级 M_s	纬度	经度	深度(km)	时间
于田	7.3	36.14°	82.51°	10	2014-02-12
芦山	7.0	30.30°	102.99°	17	2013-04-20
玉树	7.3	33.22°	96.59°	14	2010-04-14
汶川	8.2	31.01°	103.42°	14	2008-05-12
于田	7.3	35.64°	81.54°	21	2008-03-21
台湾	7.1	21.87°	120.73°	10	2006-12-26
台湾	7.4	21.86°	120.60°	10	2006-12-26
昆仑	8.2	39.92°	90.53°	11	2001-11-14

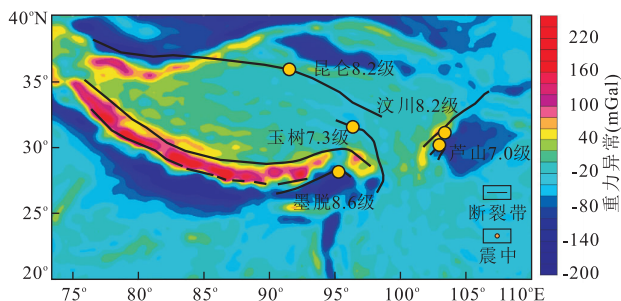


图 1 部分大震震中与 2-360 阶自由空气重力异常的对应关系(据 EIGEN-6C 重力模型)

Fig.1 The relationship of partial major earthquakes and free air gravity anomaly of 2-360 order

受活动断裂带的控制,作者还统计了 1950 年以来中国发生的大地震,发现也是多数分布于重力异常突变带和活动断裂带交汇处。我国近年来大地震主要发生在青藏地区,新疆地区,台湾地区。受篇幅所限,本文主要分析了中国青藏地区,台湾地区,及周边日本地区发生大地震地区的重力异常和活动断裂资料。

2.1 昆仑山巨震 ($M_s 8.2$)

由图 2a 可以清晰看到昆仑山大地震位于昆仑山断裂带上,同时又处于重力异常突变地带。昆仑山断裂北部柴达木盆地区域为 -140 mGal 地块。在其西南方向,可以看到 $10 \sim 30 \text{ mGal}$ 的椭圆状异常,昆仑山断裂南端重力异常为 $20 \sim 30 \text{ mGal}$,昆仑山断裂位于这两个异常之间的 -20 mGal 区域内。其北端负异常区域内可见异常变化的方向。昆仑山大地震震源在图 2a 上是处于由 -110 mGal 到 10 mGal 的重力异常突变段,在 -110 mGal 到 10 mGal 这段重力异常变化的等值线上,一个重力异常变化较快的方向即蓝色线方向(较大变化梯度:约 1.6 mGal/km),与昆仑山大断裂交汇于震源处。

2.2 墨脱巨震 ($M_L 8.6$)

在图 2b 中,震源北东向和北西向均有幅值为

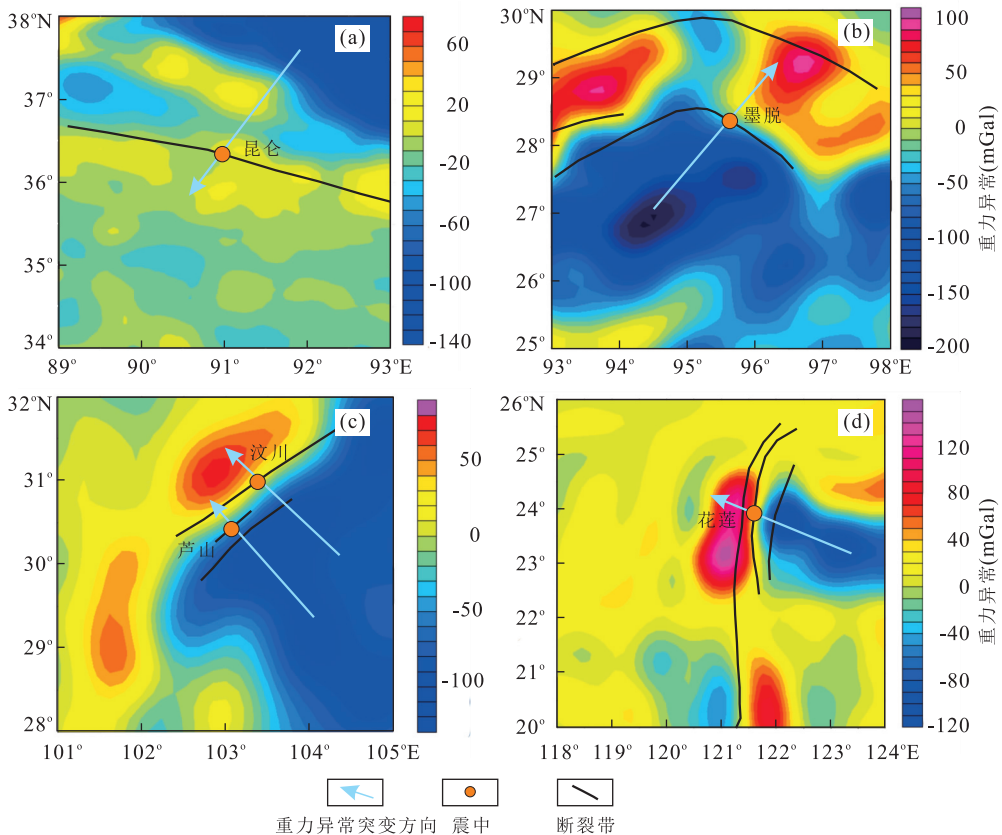


图 2 大地震与自由空气重力异常和活动断裂的细节(据 EIGEN-6C 重力模型,突变方向通过 surfer 软件网格工具获取)

Fig.2 The relationship of major earthquakes and free air gravity anomaly and active fault in detail

10~90 mGal 的正重力异常区域,最南端的断裂顺着重力变化展布,该断裂带以南为 -200~-10 mGal 的异常突变区域,墨脱位于一个重力加速度从 -150 mGal 到 100 mGal 的加速度梯度带与活动断裂构造的交汇处(较大变化梯度:约 1.8 mGal/km)。

2.3 汶川巨震($M_s 8.2$)和芦山大震($M_s 7.0$)

在图 2c 中,芦山、汶川地区西北方为 50~80 mGal 的正异常地区,东南方向为 -110~-30 mGal 的异常突变方向,汶川地震位于龙门山断裂带后断裂带与重力异常由 -100 mGal 到 30 mGal 的突变带上,同样的做出重力异常变化最大的方向,可见与龙门山后断裂带相汇于汶川大地震震源处(较大变化梯度:约 2.0 mGal/km)。雅安大地震同样也是处于一条活动断裂带与重力异常变化较快的方向的交汇处,重力异常计算结果和费琪利用宁津生的 WDM-89 重力模型计算的 2-360 阶结果较为一致(费琪,2008)。

2.4 花莲大震区

宜兰—花莲—富里一带是台湾地区地震最为活

跃的地区(张裕明,1979),在图 2d 中,台湾花莲地区位于东部重力异常 -80 mGal 地区与西部 120 mGal 地区之间,可以很清晰地见到强震位于重力异常变化剧烈的地方(较大变化梯度:约 2.1 mGal/km)。花莲是异常变化最剧烈的地方,在重力异常变化最快方向与断裂带交汇处曾经发生过 3 次大地震,而在其它点则没有如此之多的大地震发生。

2.5 日本宫城巨震($M_w 9.0$)

日本宫城大地震震源深度 10 km。通过图 3(据 Zhang *et al.*, 2011; 邹正波等, 2012 绘制)可以看到日本宫城大地震震中位于一条近南北走向的断裂带与近东西方向的重力异常突变带交汇的地方。

根据地震的重力异常和活动断裂带分布的位置关系图,我们得出结论:重力异常变化最快的方向与活动断裂带的交汇点是大震和巨震最容易发生的地方。

曾佐勋和王杰(2013)也正是用这种方法于 2012 年 11 月 25 日上午,在中国地球物理学会天灾预测专业委员会上成功预测四川省下一个大震位于雅安与康定连线中间位置,与 2013 年 4 月 20 日雅

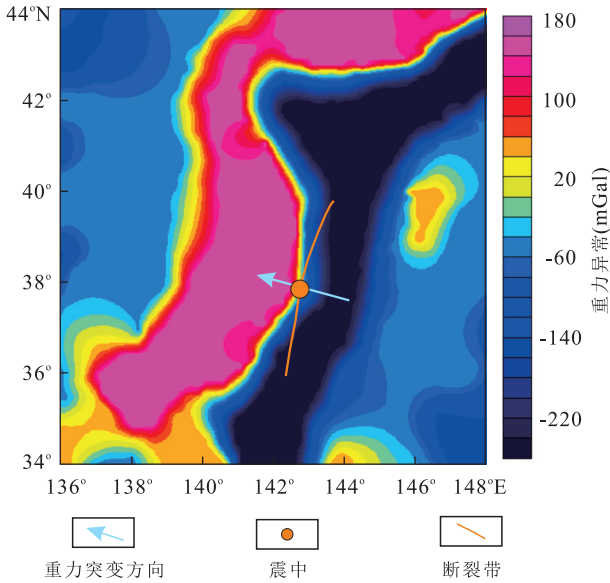


图 3 日本地区重力异常与巨震的关系 (据 Zhang *et al.*, 2011; 邹正波等, 2012 修改)

Fig.3 Relationship of giant earthquake and gravity anomaly in Japan

安芦山地震震中仅相距 80 km.

2.6 EIGEN-6C 重力模型计算结果与对比

本文还查阅了相关的重力资料,将本文计算的自由空气重力异常和前人得到的布格重力异常资料进行了对比,发现二者的共同规律是重力梯度带相同,但是变化相反(图 4).对比图 2,在图 4a 中,布格重力异常是西南低、北东高;而图 2 中是西南高、北东低.对比其余各图得出对比结果规律一致.这是由于计算布格重力异常时,消去了地形物质的影响导致的结果.以青藏高原为例,由于青藏高原地壳厚度约 60 km,而周围地块地壳厚度约 30 km,由于青藏高原地壳的厚度大于其它地块,导致青藏地区下的密度较高的地幔物质就少一些,其对重力异常的贡献就少.对布格重力异常产生影响的主要因素是地壳的厚度,所以对青藏高原地区进行布格重力异常计算时,由于地壳物质密度比地幔密度小,而且青藏高原地壳厚度大于周围地块,所以造成布格重力异常值偏低.

本文计算的自由空气重力异常结果与费琪利用

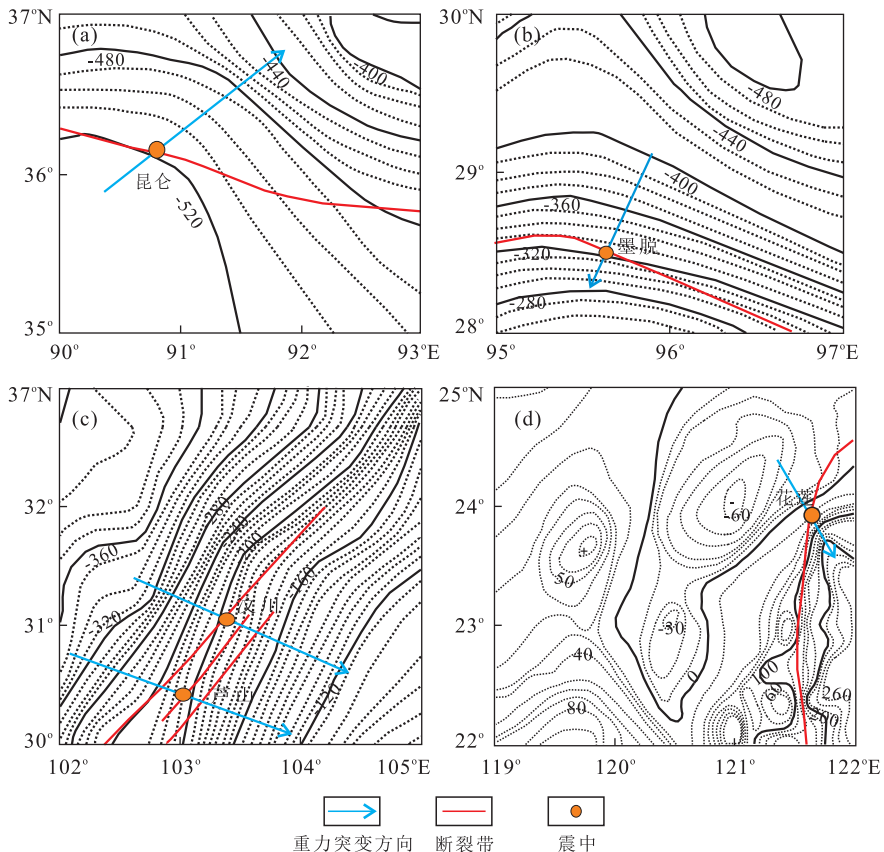


图 4 大地震处布格重力异常和活动断裂带分布

Fig.4 The bouguer gravity anomaly and distribution of active fault zone at the epicenter of major earthquake

图 4 重力单位均为 mGal,图 4a,4b,4c 据地质矿产部,1 : 400 万中国布格重力异常图;图 4d 据张赤军和方剑,2001

宁津生的 WDM-89 重力模型计算的 2-360 阶结果较为一致. 费琪(2009)认为 2-360 阶卫星重力异常反映深度为 18~6 400 km 的物质密度. 那么造成重力模型计算出的 2-360 阶自由空气重力异常和布格重力异常变化相反的原因也部分归结于下地壳以下, 断裂带两边物质密度产生了变化. 据冯锐(1985)的研究结果也证明了这一点: 青藏高原上地幔密度总体偏高, 一般为 $3.40\sim 3.65\text{ g/cm}^3$, 东部广大区域为 $3.23\sim 3.30\text{ g/cm}^3$.

3 产生这种现象可能的原因

3.1 深部物质突变、板块碰撞

地震的分布具有一定规律, 地震往往孕育于特殊的构造环境, 震源往往处于特殊的地球物理场分布带, 尤其是中国内陆地震. 重力异常与地下物质密度具有直接联系, 而密度可以根据重力分布进行反演(明圆圆, 2012), 即重力异常的产生与地下物质的变化有关, 重力异常突变带就是地下物质发生剧烈改变的区域. 此外, 重力异常突变带的产生也与板块碰撞运动产生挤压是有关的, 周国藩等(1996)在研究青藏高原卫星重力场及壳幔结构和深部构造时就指出: 藏西南喜马拉雅山脉和冈底斯山脉地区北西西向巨型重力高带及与其西北端相连的昆仑山系的重力高带就是由于印度板块向欧亚板块俯冲挤压, 使得壳下层物质密度增高产生的. 一般来说, 低阶重力异常、应力场能反应深部大范围的异常源体, 例如规模较大的地幔对流, 而地幔对流是板块运动驱动力的主要来源. 高阶重力异常、应力场能反应浅部小范围的异常源体, 常常局限于板块的内部, 在一定程度上决定着板块内部的构造格局(吴建平和刘元龙, 1992). 本文计算的阶次为 2-360 阶, 能够反应深部的地幔对流趋势, 即重力异常突变方向可以间接地反应板块运动方向.

3.2 活动断裂带对地震震源的制约

从现有记录来看, 大部分大地震的发生与活动断裂相关. 活动断裂能够反应这个地区具有发生大地震的条件, 包括深部动力学条件和浅部岩石的破裂条件. 图 2、图 3 中, 都可以发现重力异常突变梯度与断裂带近乎成垂直接触关系. 断裂带与重力异常具有协同关系, 即断裂带走向沿重力异常突变方向的垂向分布. 这说明断裂带和重力异常突变带是受同一深部动力学因素控制的. 所以, 两种特征都很突

出的区域, 即两带交汇处, 或是地震发生的首要区.

3.3 龙门山地区的地球物理性质和深部构造特征

深部构造环境来看, 龙门山断裂带的两侧是壳幔结构横向差异突变区. 四川盆地地壳厚度为 40~45 km, 青藏高原东缘地壳厚度为 60 km(张国民等, 2009). 根据刘启元等(2008)的研究, 在汶川地震震源区地壳 20 km 以上具有地震波的高速结构, 汶川地震震源应该在中上地壳的高速介质区内. 而在中下地壳则具有地震波的低速结构. 据此, 在横向上将汶川地震的震源构造模型划为左右两块(以龙门山为界), 并且上下分层, 右(东)侧的四川盆地具有刚性特性. 在纵向上, 龙门山地区上部地壳为高速层, 强度较高且具脆性; 而中下地壳为低速层, 在漫长的地质过程中, 可视为塑性流动变形层(王二七和孟庆任, 2008; 张国民等, 2009). 费琪(2009)也根据不同阶数的卫星重力异常得出结论: 在地下 0~10 km 深度范围内, 龙门山为高速体(高密度、高波速的冷物质), 扬子陆块(四川盆地)为低速体(低密度、低波速的热物质); 在 30~65 km 深度, 龙门山为低速体, 扬子陆块为高速体. 龙门山地区构造特征可以概括为: (1) 在深部, 龙门山断裂以西青藏高原地区壳幔具有流变性质, 龙门山以东四川盆地区域为能干性较高的高速体; (2) 在浅部, 龙门山断裂两侧的物质都为弹性变形体. 在重力异常突变带两侧岩石的流变性质发生了改变, 在这个转折点会引起流体压力横向上的改变(张培震, 2008), 位于流体上部的脆性地壳被拖曳, 发生位移. 当上部脆性地壳位移后便与东侧脆性地壳挤压产生变形和应力积累, 当应力达到岩石破裂极限后, 就会产生地震. 杨巍然等(2009)的三层次构造模式以华北地区为例, 对于板

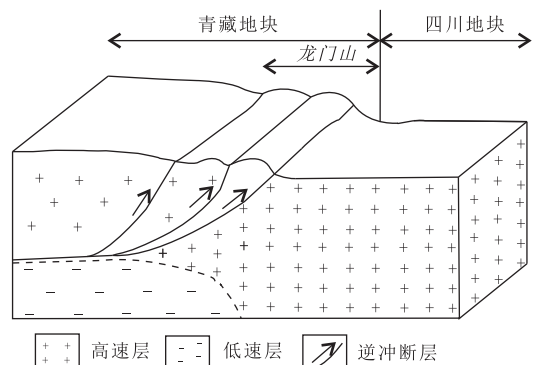


图 5 汶川地震震源构造模型示意(据张国民等, 2009)

Fig.5 A 3D section showing the tectonic features of the epicenter of Wenchuan earthquake

内地震成因机制进行了合理的解释。

3.4 其它地区深部构造特点

昆仑、墨脱地区均位于青藏高原上,该地区总的构造特征就是印度板块向南俯冲到青藏高原北部之下(Kind *et al.*, 2002).和汶川、芦山地区一样,在昆仑地震发生的东昆仑地区地壳和上地幔密度分布也具有不均匀性(纵向分层,横向分块)(董英君等, 2005),其深部(下地壳)速度较低(6.6~6.7 km/s),上地幔速度为 7.6 km/s(李秋生等, 2004),具有深大断裂(陈毓川等, 1999).在墨脱地区壳内和幔内物性变化都较大(刘福田等, 1989),在下地壳上部存在一个低速层(滕吉文等, 2012),可以作为上地壳的滑移面.在台湾地区,壳幔内也具有低速层:中央山脉下方的上地幔顶部为明显低速异常,而东部平原地区表现为 Pn 波速度偏高,反映了部分熔融和流体活动对壳幔深部结构具有影响(李志伟等, 2009).在宫城大地震地下两侧物质也具有不同流变性质,西侧为 P 波具有负 Q 值的块体,而东侧具为正 Q 值的块体(刘鑫, 2013).

3.5 深部构造特征总结

- (1)重力异常突变带地区地壳上部为脆性层;
- (2)这些区域壳内或壳幔间存在低速层(体);
- (3)重力异常突变地区低速层内流变作用强烈,能够作为上部脆性块体的滑移面;
- (4)昆仑、墨脱、汶川、芦山、花莲、宫城地区纵向具有分层性,横向具有分块性.

3.6 不同的解释

重力异常地区壳内或壳幔间存在低速层;重力

异常地区低速层内流变作用强烈,且具有丰富的断裂作为流变通道;是费琪(2009)提出的“壳幔物质流的底辟作用孕育大地震”这一观点的基础,即壳幔物质选择岩石圈断裂、壳层深大断裂及多层次滑脱层,作为优势通道,缓慢地进行塑性流变上隆的底辟作用在上地壳脆性岩层中的薄弱地段,随着势能积累到一定的临界状态,就可能产生突发性的断裂活动而引起地震.

也有人认为青藏高原地区的地壳处于变化剧烈的失衡状态.该区大部分地震发生在均衡异常梯度带或均衡状态发生明显变化的地区附近,并不在正、负均衡异常最大的块体内,据此认为地震最容易在这种部位上发生的原因是:大的正负均衡异常是重力的强烈调整作用使之向均衡状态发展而形成的,而梯度带正是这种调整作用的最具体最敏感的部位(邢乐林等, 2007).

3.7 看法及讨论

在断裂带分布地区的地壳上部岩石具有脆性特征,受应力大于破裂极限后,会释放能量,产生地震.而在重力异常突变带地区,壳幔在高温和高压下受差异应力发生塑性流变,产生变形(不同地震地区流变层位并不相同),并且在具有不同流变性质的块体接触端流变方向改变(图 6).向下流变的物质插入其下密度更高的地质体内,主要产生布格重力异常.向上流变的物质受到地壳上部脆性地体的抵挡,开始积累应力,并造成地壳上部物质形变,主要产生自

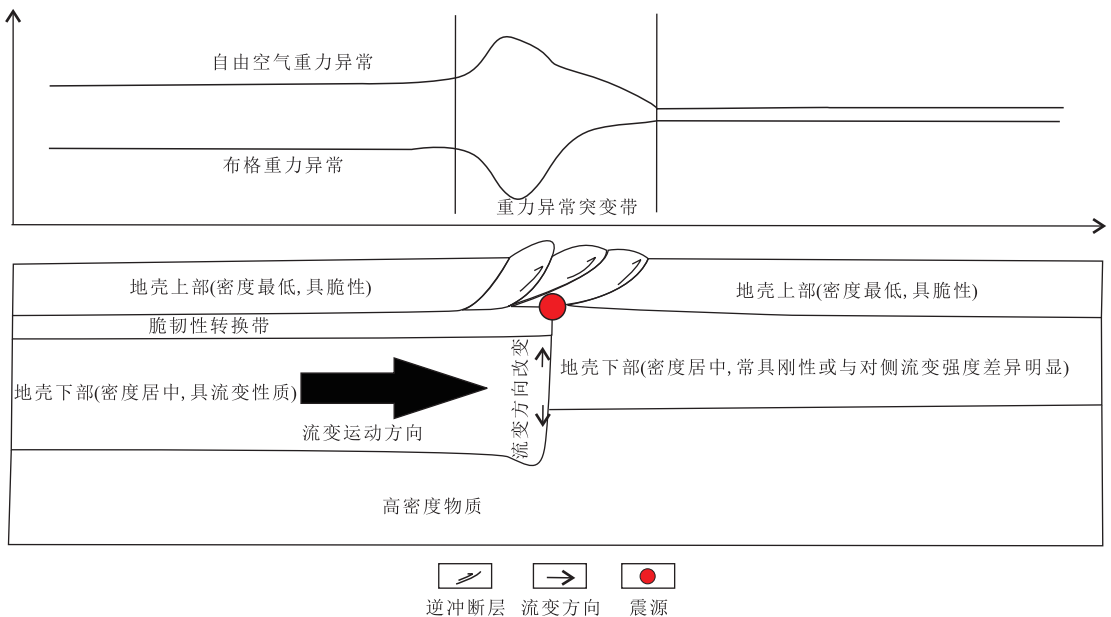


图 6 重力突变带地区构造模型(模型由 3.4 中引用文献数据支持)

Fig.6 A structure model in the region of steepest gradient of gravity field

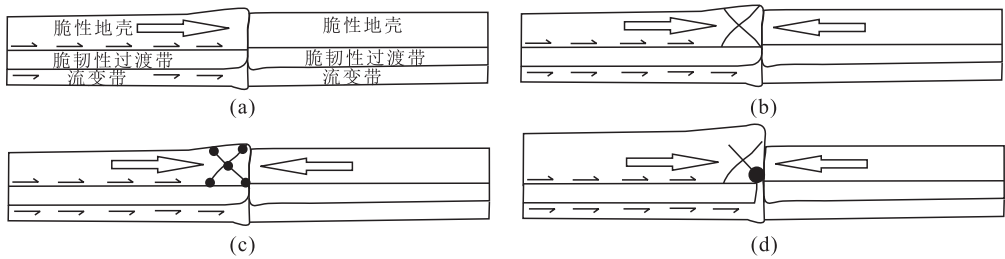


图 7 重力异常突变区成震模型

Fig.7 A model of formation of the earthquake in the region of steepest gradient of gravity field

a.流变物质的拖曳;b.脆性体对撞;c.破裂产生的地震;d.流变受阻成大震

由空气重力异常,因而重力异常突变带的产生可以指示该地区地壳上部受到来自地壳下部物质流变的应力,并且断裂带可以指示该地区地壳上部岩石具有脆性性质,不易发生塑形变形,那么在该地区积累的应力就会以地震的形式释放出来。

流变方向的改变可以是两侧都具流变性质的块体同时改变,也可以是一侧具有流变性质的块体受到阻挡,单侧流变方向改变(图 6),汶川大地震地区就属于上地幔软流层受四川深部刚性体阻挡(滕吉文等,2008),具体的成震过程如图 7。由于流变物质的拖曳,流变层上部脆性体与对侧脆性体碰撞,产生破裂,流变物质沿着破裂面上升,然而破裂面并不是完全通畅的,在破裂面不连续的地方,流变物质积累应力。当应力超过一定阈值时,就会产生大震和巨震。流变物质在向上运动时,由于温压条件的变化,会逐渐冷却,堵塞破裂面。当有后期的流变物质上升,在堵塞的地方又会积累应力,产生地震。

当然地震具有多种成因,本文的解释仅适用于部分大地震。以日本地区为例,日本地区的地震就具有多种成因,位于贝尼奥夫带的地震或与俯冲板块脱水作用有关,而位于贝尼奥夫带上部,地下 10~20 km 处的地区具有本文所提模型的特征。此外还有一些火山地震和水库诱发地震等类型,不在本文讨论范围之内。

4 启示与总结

(1)综合前面的例子来看,在活动断裂带和重力异常突变带的交汇地区是大震和巨震的易发地点,我们在进行中长期地震危险性评估时要重点考察这些位于活动断裂带和重力异常突变带交汇的地区,在进行地震区划和重大工程选址时,需要予以考虑。

(2)利用地质与地球物理资料综合分析,能够提

供大震和巨震中长期预测的空间位置。

(3)部分大地震的发生与壳幔物质流变有关,由于流变受到阻挡,方向的改变为向下和向上,向下的流变物质和重力异常突变带的产生有关,向上的流变物质聚集应力,产生地震。

References

- Chen, Y. C., Ye, T. Z., Zhang, H. T., et al., 1999. The Prospective Evaluation of Chinese Major Metallogenic Belt. Geological Publishing House, Beijing, 31-153 (in Chinese).
- Chen, Y. K., 2007. Tectonic Activity Features and Segmentation of Seismic Risk of the Buried Haihe Fault in Tianjin (Dissertation). Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Dong, Y. J., Zhang, D. Q., Xu, W. Y., et al., 2005. Geophysical Features and Distribution of Ore Resources in East Kunlun Area. *Mineral Deposits*, 24(2): 179-184 (in Chinese with English abstract).
- Fei, Q., 2008. Characters of Deep Structure for Wenchuan Earthquake. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 5(4): 387-395 (in Chinese with English abstract).
- Fei, Q., 2009. Major Earthquakes by Rheological Diapirism of Crust-Mantle Material—Evidence from Satellite Gravity Data. *Earth Science Frontiers*, 16(3): 282-293 (in Chinese with English abstract).
- Feng, R., 1985. Crustal Thickness and Densities in the Upper Mantle beneath China—The Results of Three Dimensional Gravity Inversion. *Acta Seismologica Sinica*, 7(2): 143-157 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, Y. J., Han, Y., 2013. Accuracy Validation of EIGEN-6C Model Using China GPS /Leveling Data. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (9): 45-46, 65 (in Chinese).
- Kind, R., Yuan, X., Saul, J., et al., 2002. Seismic Images of Crust and Upper Mantle beneath Tibet: Evidence for Eurasian Plate Subduction. *Science*, 298(5596): 1219-1221.

- Li, Q. S., Peng, S. P., Gao, R., et al., 2004. Deep Tectonic Background of the 8.1 M_s Earthquake in the East Kunlun. *Acta Geoscientica Sinica*, 25(1): 11–16 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. D., 1996. Engineering Geologic Environment and Sustainable Development II The Relationships between Active Fault and Earthquake Origin. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 32(6): 719–723 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. H., Liu, H. F., Zhang, M., et al., 2013. 3D Visualization and Modeling of Spatial Relationship between Earthquakes and Active Faults. *Seismology and Geology*, 35(3): 565–575 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2013.03.010
- Li, Z. W., Xu, Y., Hao, T. Y., et al., 2009. Seismic Velocity Structure and Anisotropic Character of the Crust and Upper Mantle beneath Taiwan Region. In: Chinese Geophysical Society, ed., The Chinese Geophysical Society 2009, University of Science & Technology China Press, Anhui, 616 (in Chinese).
- Liu, F. T., Qu, K. X., Wu, H., et al., 1989. Seismic Tomography of the Chinese Continent and Adjacent Region. *Acta Geophysica Sinica*, 32(3): 281–291 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Q. Y., Chen, J. H., Li, S. C., et al., 2008. The M_s 8.0 Wenchuan Earthquake: Preliminary Results from the Western Sichuan Mobile Seismic Array Observations. *Seismology and Geology*, 30(3): 584–596 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X., 2013. Structural Heterogeneity of Northwest Pacific Subduction Zones and Its Implications for Interplate Megathrust Earthquakes (Dissertation). Ocean University of China, Qingdao, 70–73 (in Chinese with English abstract).
- Ming, Y. Y., Fan, M. N., 2012. Fish Swarm Algorithm and Its Application in Gravity Density Inversion. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 34(6): 666–670 (in Chinese with English abstract).
- Teng, J. W., Bai, D. H., Yang, H., et al., 2008. Deep Processes and Dynamic Responses Associated with the Wenchuan M_s 8.0 Earthquake of 2008. *Chinese J. Geophys.*, 51(5): 1385–1402 (in Chinese with English abstract).
- Teng, J. W., Ruan, X. M., Zhang, Y. Q., et al., 2012. The Stratificational Velocity Structure of Crust and Covering Strata of Upper Mantle and the Orbit of Deep Inter-aquifer Substance Locus of Movement for Tibetan Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 28(12): 4077–4100 (in Chinese with English abstract).
- Wang, E. Q., Meng, Q. R., 2008. The Discussion of the Longmen Mountain's Mesozoic and Cenozoic Tectonic Evolution. *Science in China (Ser. D)*, 38(10): 1221–1233 (in Chinese).
- Wu, J. P., Liu, Y. L., 1992. A Study on the Relation between Satellite Gravity Anomalies Mantle Convection Stress and Modern Plates Movement. *Acta Geophysica Sinica*, 35(5): 604–612 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Z. H., Zhao, X. T., Fan, T. Y., et al., 2012. Active Faults and Seismologic Characteristics along the Dali-Ruili Railway in Western Yunnan Province. *Geological Bulletin of China*, 31(2–3): 191–217 (in Chinese with English abstract).
- Xing, L. L., Li, J. C., Li, H., et al., 2007. Study on Seismo-Tectonic Dynamics of Qinghai-Tibet Plateau from Isostatic Gravity Anomalies. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 27(6): 33–37 (in Chinese with English abstract).
- Yang, W. R., Zeng, Z. X., Li, D. W., et al., 2009. Three-Level Tectonic Model for Intraplate Earthquake. *Earth Science Frontiers*, 16(1): 206–217 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, Z. X., Wang, J., 2013. Lushan Earthquake: A Successful Case for Medium-Term Prediction. *Earth Science Frontiers*, 20(3): 21–24 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, C. J., Fang, J., 2001. Relation between Gravity Field Feature and Tectonics and Earthquakes in Taiwan and Its Adjacent Regions. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 20(1): 101–109 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. M., Shao, Z. G., Liu, G. P., et al., 2009. Analysis on the Geodynamic Cause of the Wenchuan 8.0 Earthquake. *Earthquake*, 29(1): 164–173 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, K. L., Ma, J., Wei, D. P., 2013. Detection of Gravity Anomalies before the 2011 M_w 9.0 Tohoku-Oki Earthquake Using Superconducting Gravimeters. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(7): 2292–2302 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, P. Z., 2008. The Tectonic Deformation, Strain Distributions and Deep Dynamics Process of Western Sichuan Areas in Eastern of Tibet. *Science in China (Ser. D)*, 38(9): 1041–1056 (in Chinese).
- Zhang, Y. M., 1979. The Characteristics of Seismotectonics of Taiwan Island, China. *Seismology and Geology*, 1(4): 79–92 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. X., Shi, Y. L., Liu, G. P., 2000. Preliminary Study on the Relationship between Upwelling of Hot Material and Gravity Anomaly before Earthquake. *Earthquake*, 20(Suppl.): 135–142 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. Z., Xu, H. J., Wang, W. D., et al., 2011. Gravity

- Anomaly from Satellite Gravity Gradiometry Data by GOCE in Japan M_s 9.0 Strong Earthquake Region. *Proceedia Environmental Sciences*, (10): 529—534. doi: 10.1016/j.proenv.2011.09.086
- Zhou, G.F., Chen, J.G., Zhang, J., 1996. Characters of Crust-Mantle Construction and Deep Structure in Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 21(2): 191—197 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Z.G., Liu, D.Q., Li, J., et al., 2012. Precursory Anomaly Features of Gravity Field before Jiashi M_s 5.8 Earthquake, in Xinjiang in 2011. *Journal of Seismological Research*, 35(2): 201—206 (in Chinese with English abstract).
- Zou, Z.B., Luo, Z.C., Wu, H.B., et al., 2012. Gravity Changes Observed by GRACE before the Japan M_w 9.0 Earthquake. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 41(2): 171—176 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈毓川, 叶天竺, 张洪涛, 等, 1999. 中国主要成矿区带矿产资源远景评价. 北京: 地质出版社, 31—153.
- 陈宇坤, 2007. 天津海河隐伏断裂构造活动特征与地震危险区段划分 (博士学位论文). 北京: 中国地震局地质研究所.
- 董英君, 张德全, 徐文艺, 等, 2005. 东昆仑地区地球物理特征与矿产资源分布. 矿床地质, 24(2): 179—184.
- 费琪, 2008. 汶川大地震的深部构造特征. 工程地球物理学报, 5(4): 387—395.
- 费琪, 2009. 壳幔物质流变的底辟作用孕育大地震—卫星重力资料的证据. 地学前缘, 16(3): 282—293.
- 冯锐, 1985. 中国地壳厚度及上地幔密度分布 (三维重力反演结果). 地震学报, 7(2): 143—157.
- 姜元军, 韩勇, 2013. EIGEN-6C 重力场模型在中国地区的 GPS 水准验证. 测绘通报, (9): 45—46, 65.
- 李秋生, 彭苏萍, 高锐, 等, 2004. 东昆仑大地震的深部构造背景. 地球学报, 25(1): 11—16.
- 李树德, 1996. 工程地质环境与可持续发展 II 活动断裂与地震的关系. 北京大学学报 (自然科学版), 32(6): 719—723.
- 李自红, 刘鸿福, 张敏, 等, 2013. 地震与活动断裂空间关系的三维可视化建模. 地震地质, 35(3): 565—575.
- 李志伟, 胥颐, 郝天姚, 等, 2009. 台湾地区地壳上地幔的波速结构与各向异性特征. 见: 中国地球物理学会编, 2009—中国地球物理. 安徽: 中国科学技术大学出版社, 616.
- 刘福田, 曲克信, 吴华, 等, 1989. 中国大陆及其邻近地区的地震层析成像. 地球物理学报, 32(3): 281—291.
- 刘启元, 陈九辉, 李顺成, 等, 2008. 汶川 8.0 级地震: 川西流动地震台阵观测数据的初步分析. 地震地质, 30(3): 584—596.
- 刘鑫, 2013. 西北太平洋俯冲带构造特征及其对弧前大地震成因的影响 (博士学位论文). 青岛: 中国海洋大学, 70—73.
- 明圆圆, 范美宁, 2012. 鱼群算法的重力密度异常反演方法. 物探化探计算技术, 34(6): 666—670.
- 滕吉文, 白登海, 杨辉, 等, 2008. 2008 汶川 M_s 8.0 地震发生的深层过程和动力学响应. 地球物理学报, 51(5): 1385—1402.
- 滕吉文, 阮小敏, 张永谦, 等, 2012. 青藏高原地壳与上地幔成层速度结构与深部层间物质的运移轨迹. 岩石学报, 28(12): 4077—4100.
- 王二七, 孟庆任, 2008. 对龙门山中生代和新生代构造演化的讨论. 中国科学, 38(10): 1221—1233.
- 吴建平, 刘元龙, 1992. 卫星重力场、地幔对流应力场与板块运动关系的探讨. 地球物理学报, 35(5): 604—612.
- 吴中海, 赵希涛, 范桃园, 等, 2012. 泛亚铁路滇西大理至瑞丽沿线主要活动断裂与地震地质特征. 地质通报, 31(2—3): 191—217.
- 邢乐林, 李建成, 李辉, 等, 2007. 青藏高原均衡重力异常的地震构造动力学研究. 大地测量与地球动力学, 27(6): 33—37.
- 杨巍然, 曾佐勋, 李德威, 等, 2009. 板内地震过程的三层次构造模式. 地学前缘, 16(01): 206—217.
- 曾佐勋, 王杰, 2013. 芦山地震: 一个成功的中期预测案例. 地学前缘, 20(3): 21—24.
- 张赤军, 方剑, 2001. 台湾及其邻海的重力特征与构造、地震的关系. 台湾海峡, 20(1): 101—109.
- 张国民, 邵志刚, 刘桂萍, 等, 2009. 汶川 8.0 级地震构造动力学成因分析. 地震, 29(1): 164—173.
- 张克亮, 马谨, 魏东平, 2013. 超导重力仪检测 2011 年日本东北 M_w 9.0 级地震前的重力扰动信号. 地球物理学报, 56(7): 2292—2302.
- 张培震, 2008. 青藏高原东缘川西地区的现今构造变形、应变分配与深部动力过程. 中国科学 D 辑: 地球科学, 38(9): 1041—1056.
- 张裕明, 1979. 我国台湾岛的地震构造特征. 地震地质, 1(4): 79—92.
- 张永仙, 石耀霖, 刘桂萍, 2000. 热物质上涌与震前重力异常关系初探. 地震, 20(增刊): 135—142.
- 周国藩, 陈建国, 张健, 1996. 青藏高原卫星重力场及所反映的壳幔结构和深部构造特征. 地球科学——中国地质大学学报, 21(2): 191—197.
- 朱治国, 刘代芹, 李杰, 等, 2012. 2011 年新疆伽师 M_s 5.8 地震重力场前兆异常特征. 地震研究, 35(2): 201—206.
- 邹正波, 罗志才, 吴海波, 等, 2012. 日本 M_w 9.0 地震前 GRACE 卫星重力变化. 测绘学报, 41(2): 171—176.