

# 中国大陆造山带地壳密度结构特征

杨文采<sup>1)</sup>, 瞿辰<sup>2)</sup>, 侯遵泽<sup>3)</sup>, 颜苹<sup>1)</sup>, 于常青<sup>2)</sup>

1) 浙江大学地球科学学院, 杭州, 310027; 2) 中国地质科学院地质研究所, 北京, 100037;

3) 贵州恒昊软件科技有限公司, 贵阳, 550018

**内容提要:** 本文探讨中国大陆造山带地壳介质密度的变化特征和不同类型,并用大陆动力学机制解释这些特征产生的原因。根据重力场小波变换的尺度—源深度转换律,进行地面重力异常场多尺度分解,取得了反映中国地壳不同埋藏深度的小波细节,揭示了造山带地壳的密度结构。和克拉通地体不同,中国大陆的造山带下地壳密度都偏低,只有古生代块体弱碰撞形成的褶皱山脉是例外。这些造山带大都与古大洋封闭和俯冲碰撞作用有关。古大洋封闭后在地壳中留下的裂隙和海水,会造成地壳密度降低。中国大陆造山带地壳密度结构大致可以分四类。上中下地壳密度都偏低的属于第一类造山带。第二类造山带上中地壳密度偏低,而下地壳密度偏高。第三类造山带上中地壳密度偏高,而下地壳密度偏低。第四类造山带上中下地壳密度都偏高。通过板块构造原理和岩石物理规律对青藏高原造山带地壳密度结构分类的解释可见,青藏高原南部,中部和北部地壳密度结构分属三类不同的造山带,体现印度次大陆和欧亚板块碰撞不同阶段作用造成的结果。根据地壳密度变低和厚度是否加大,还可以识别板沿和板内造山带。

**关键词:** 大陆动力学; 中国大陆; 地壳构造; 造山带; 布格重力场; 小波多尺度分析; 三维密度扰动图像

众所周知,充分提取和利用地球物理信息来揭示地壳的结构和各种构造单元的空间分布与规模,可为开展大陆动力学作用研究提供深层的科学证据(杨文采, 2014e)。随着探测技术的发展,人们看到了地壳上地幔的三维整体结构,可以克服由地表观察推测深部结构的不准确性(James, 1989; Taylor and McLennan, 1995; Jolivet et al., 2001; Rogers, 2004; Yang Wencai, 2016)。由于区域布格重力异常由不同深度和不同尺度的密度异常源体产生,必需进行适当的分解,才能定量地反演出区域场源的三维密度结构。为了更加精准地认识中国大陆地壳的整体结构,多年来我们应用小波多尺度分析等区域重力场信息提取新方法,揭示了中国大陆地壳三维密度结构。小波多尺度分析等区域重力场信息提取方法已经发表,详见参考文献(侯遵泽等, 1997, 1998, 2011; 杨文采等, 2001, 2015b; 2016)。

中国大陆的大地构造具有与世界其它地区不同的特征,是显生宙全球陆—陆或陆—岛碰撞最密集最强烈的地区(程裕祺, 1994; Wang, 1995; Parfenov

et. al., 2009; 杨文采等, 2015a, 2016)。为了更加精准地认识中国大陆地壳精细结构,多年来我们应用小波多尺度分析等区域重力场信息提取新方法,定量地反演出中国大陆地壳三维密度结构,地壳上地幔的精细结构被不断地揭示出来,对大陆构造认识也不断更新。本文重点探讨中国大陆造山带地壳介质密度的变化特征和不同类型,并用板块运动的大陆动力学机制解释这些特征的产生原因。

## 1 方法技术与资料来源

用区域重力场反演地壳三维密度扰动的理论根据是布格重力异常场的尺度与场源埋藏深度呈现同步增大的关联。我们经过多年研究,把小波多尺度分析、位场频率域解释理论和密度扰动反演方法有机地结合起来,形成了应用区域重力场刻划地壳三维密度结构的数据处理、反演解释和信息提取的方法系统(侯遵泽等, 1997, 1998, 2011; 杨文采等, 2001, 2015b; 孙艳云和杨文采, 2014),此系统分为区域重力场按场源分层、小波变换多尺度分析、场源分

注: 本文为国家自然科学基金资助项目(编号: 41574111)的成果。

收稿日期: 2016-10-18; 改回日期: 2017-04-15; 责任编辑: 章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2017.03.001

作者简介: 杨文采,男,1942年生。1964年毕业于北京地质学院物探系,1984年在加拿大 McGill 大学取得博士学位;现为教授,博士生导师,中国科学院院士。主要从事固体地球物理学研究。Email: yangwencai@cashq.ac.cn。

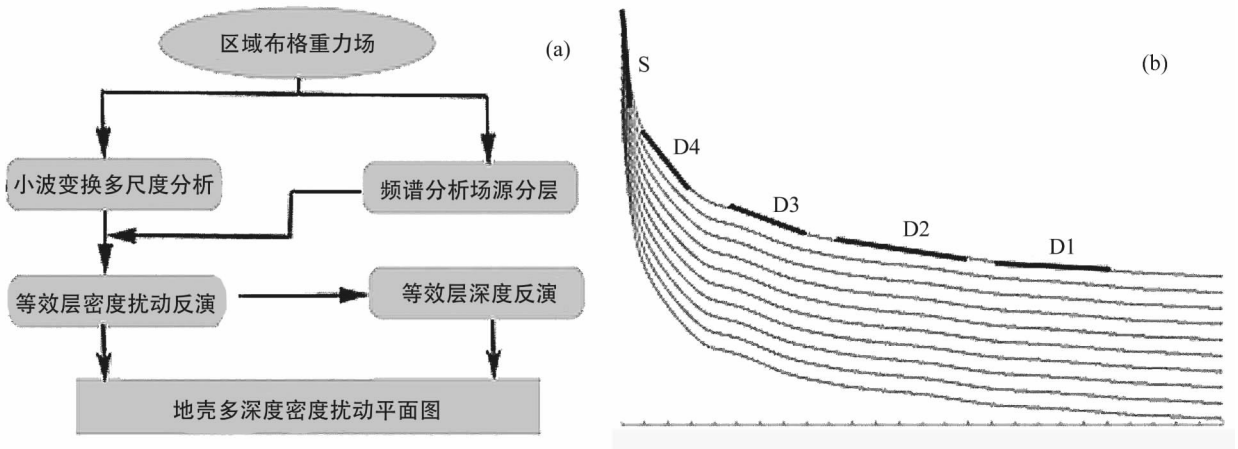


图1(a)用区域重力场反演地壳三维密度扰动方法框图；(b)中国及邻区布格重力异常二维功率谱曲线。

不同斜率段对应不同场源等效层

Fig. 1 (a) The Flow-chart for the Multi-Scale inversion of density disturbances from the Regional Gravity Field. (b) The Power spectral curves of the Bouguer gravity anomalies in the studied area; the different slopes are corresponding to different depths of the equivalent layers

层深度反演及密度扰动反演四个子系统, 详见图1a。

区域重力场小波多尺度分析方法的理论依据之一, 乃是布格重力异常场的尺度与场源埋藏深度同步增大。换言之, 场源埋藏深度越大, 观测平面上布格重力异常场的水平尺度就越大, 二者之间近似呈正比例(Telford, 1990; Yang, 2016)。当多个源体产生的重力异常叠加时, 叠加异常便不再具有特征尺度。小波多尺度分析方法利用小波基的特征尺度, 把地面叠加重力异常场按尺度分解, 使产生的异常集重新恢复了特征尺度(杨文采等, 2001, 2015; Yang Wencai and Sun Yanyun, 2016; Sun Yanyun and Yang Wencai, 2015, 2016)。因此, 小波多尺度分析方法便可用于刻划地壳三维密度结构。设均匀方格网重力异常场数据的网眼间距为  $\Delta$ , 进行小波多尺度分析时, 小波细节的尺度呈 2 的整数幂递增。记小波细节阶次为  $n$ , 重力异常源体埋深  $h$  与小波细节阶次  $n$  的关系式为

$$h = \alpha \cdot \Delta \cdot 2^{n-1} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

此式称为重力场小波变换的尺度—源深度转换律, 系数  $\alpha$  为 0.5 ~ 0.8 之间的实数。

小波多尺度分析之后, 区域重力场分解为  $n$  个小波细节  $\{D_j, j = 1, \dots, n\}$ , 对应多个深度场源等效层的密度扰动。等效层的平均埋藏深度要通过小波细节的功率谱斜率来计算, 图 1b 显示中国大陆布格重力异常小波细节组合的二维功率谱曲线; 不同斜

率段对应不同场源等效层, 等效层埋藏深度与其对应斜率呈反比(Bhimasankam et al., 1977)。小波细节和分层的深度反映地壳不同场源分层的密度扰动。

小波多尺度分析之后, 区域重力场分解为  $n$  个小波细节  $\{D_j, j = 1 \dots n\}$ , 对应多个深度场源等效层的密度扰动。等效层的平均埋藏深度要通过小波细节的功率谱斜率来计算, 图 1(b) 显示中国及邻区布格重力异常小波细节组合的二维功率谱曲线; 不同斜率段对应不同场源等效层, 等效层埋藏深度与其对应斜率呈反比(杨文采等, 1978)。然后用小波细节和分层的深度反演各个场源分层的密度扰动(杨文采等, 1997, 2015b, 2016), 最终得到地壳多个深度等效层的密度扰动平面图。

综上所述, 对于适当比例尺的区域重力数据而言, 密度扰动源埋藏深度和地面重力异常场的水平尺度近似呈正比关系, 这就是重力场小波变换的尺度—源深度转换律。因此, 进行地面重力异常场多尺度分解以后, 小尺度的小波细节反映埋藏深度小的场源分布, 而大尺度的小波细节反映埋藏深度大的场源分布。自上世纪 90 年代侯遵泽和杨文采提出小波多尺度分析方法进行重力场多尺度分解以来, 重力异常的多尺度分析方法技术取得了良好的效果(侯遵泽等, 1997, 1998, 2011; 杨文采等, 2001, 2005, 2014, 2015b—d, 2016; Yang Wencai and Sun Yanyun, 2016)。究其原因, 正是由于小波细节反映

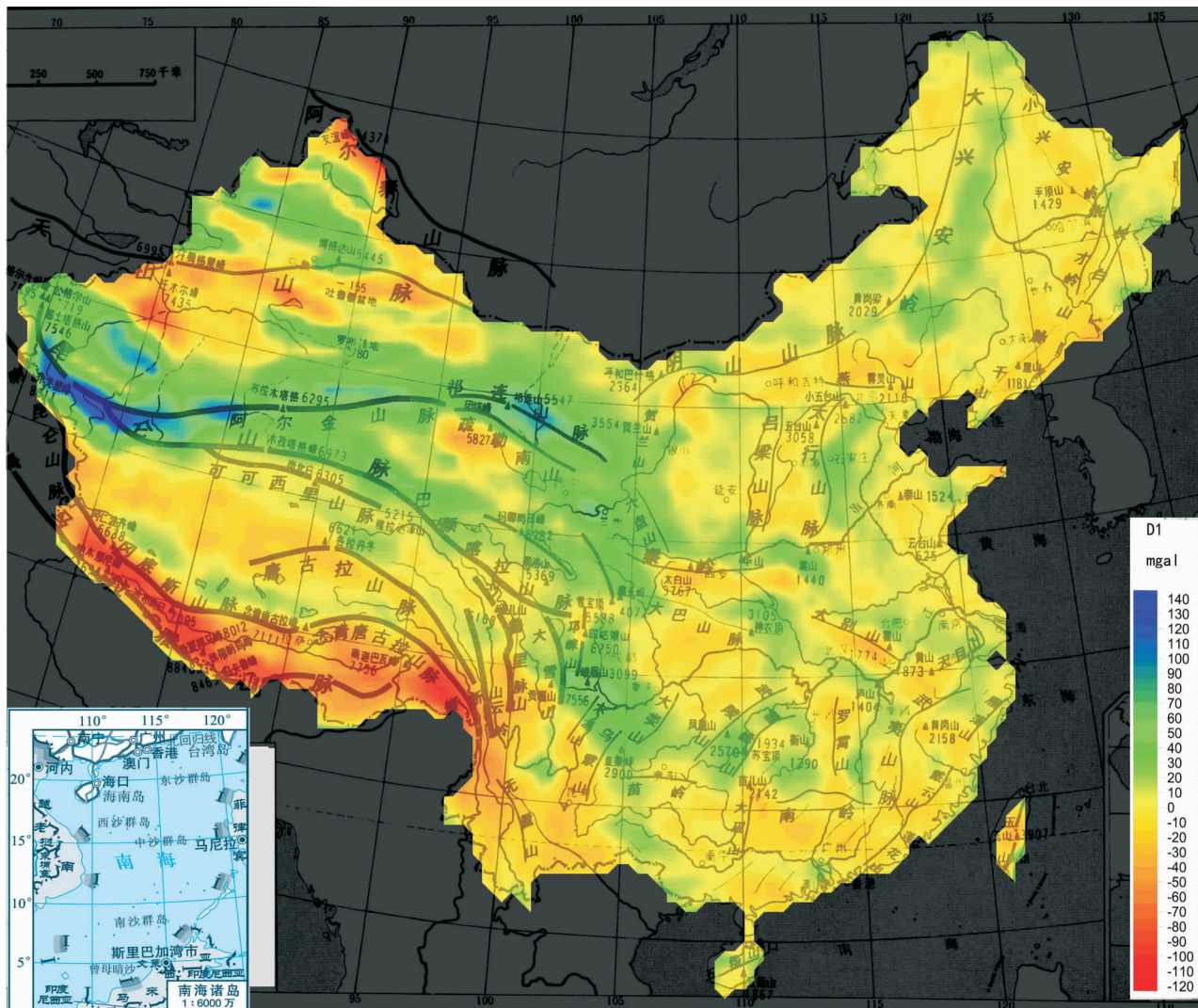


图2 中国大陆重力一阶小波细节与主要山脉对比图,对应等效层深度 5.5km

Fig. 2 Comparison of the first-order wavelet detail of Bouguer gravity field with the main mountain ranges in Chinese continent

不同埋藏深度的场源分布,可用于揭示地壳三维密度扰动的缘故。

本研究的主要数据来自原地质矿产部在1980年代的地面实测资料,数据按四百万分之一的比例尺进行各项改正,换算为中国大陆布格重力异常,它的小波多尺度分解曾发表过论文(侯遵泽等,1997,1998)。由于数据由作者自己处理而来,没有经过圆滑,可信度高。根据布格重力异常的功率谱特征决定重力异常分解成5个层次,计算出小波细节 $D_1$ — $D_4$ 和 $S_4$ 。由平均功率谱(图1b)可计算出各小波细节的场源平均埋藏深度,最浅等效层异常 $D_1$ 为5.5km,浅等效层异常 $D_2$ 为15km,中等效层异常 $D_3$ 为32.5km;深等效层异常 $D_4$ 为68km,最深等效层异常 $S_4 > 86$ km。最浅等效层对应上地壳表

层和结晶基底;浅等效层在中国东部对应中地壳;在中国西部对应上地壳(杨文采,2015a)。中等效层在中国东部对应下地壳;在中国西部对应中地壳。深等效层在中国东部对应上地幔顶部,在青藏区可能反映莫霍面上方地层。由于本文只研究地壳内部密度成像,最深等效层不予讨论。

## 2 中国造山带地壳密度结构的分类特征

中国大陆重力小波多尺度分解计算出各阶小波细节后,把它们与主要山脉对比,示如图2~图5。图中的底图为中国主要山脉分布图,取自《中国大百科全书·地理篇》。中国大陆重力小波多尺度分解计算出的各阶小波细节,使我们看到华北、扬子、

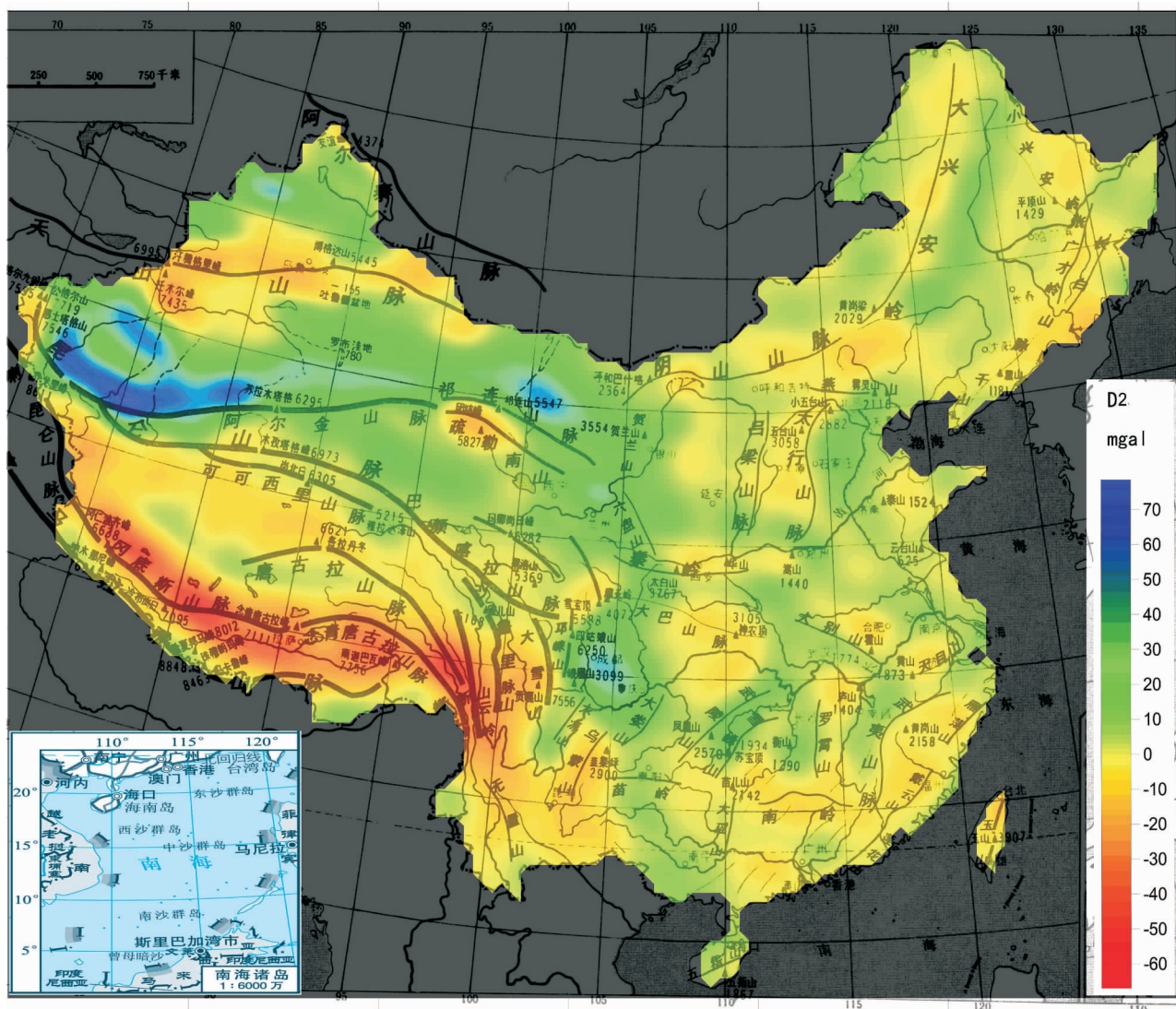


图3 中国大陆重力二阶小波细节与主要山脉对比图,对应等效层深度 15km

Fig. 3 Comparison of the second-order wavelet detail of Bouguer gravity field with the main mountain ranges in Chinese continent

塔里木和阿拉善等克拉通地体,在中国大陆重力一阶小波图上反映为高密度区(见图2);而因为盆地内的沉积岩石密度相对低,沉积盆地在二阶小波图上可反映为低密度区。图3~5为中国大陆重力2~4阶小波细节,地壳密度结构分析必须看这些深层的密度图,方能全面识别地壳构造的总体特征。

中国大陆重力小波多尺度分解计算出的各阶小波细节(图3~图5),使我们看到各造山带地壳密度从上到下的变化特征,可按这些变化特征对造山带地壳密度结构进行分类。由于不同地区上中下地壳的深度不同,中地壳的厚度常常减薄,地壳密度结构分类不可能太细,大致可以分为上中下都低,上高下低,上低下高,上中下都高四种。对上中下地壳

密度都偏低的属于第一类造山带。第二类造山带上中地壳密度偏低,而下地壳密度偏高。第三类造山带上中地壳密度偏高,而下地壳密度偏低。上中下地壳密度都偏高的属于第四类造山带。

很多造山带都属于上中下地壳密度都偏低的造山带第一类,如唐古拉和念青唐古拉山脉、可可西里山脉、大兴安岭、长白山脉、燕山—阴山山脉、武夷山脉、南岭,等等。这一类山脉大多数属于板沿和板内造山带。图6a示出安第斯俯冲带构造模式,属于这种类型。安第斯俯冲带上方的大陆侧岩浆和流体活动活跃,使上中地壳密度都偏低(杨文采等,2014a—d)。属于这一类的山脉也可能对应板内造山带,例如大兴安岭—太行山一线,有关的板内造山

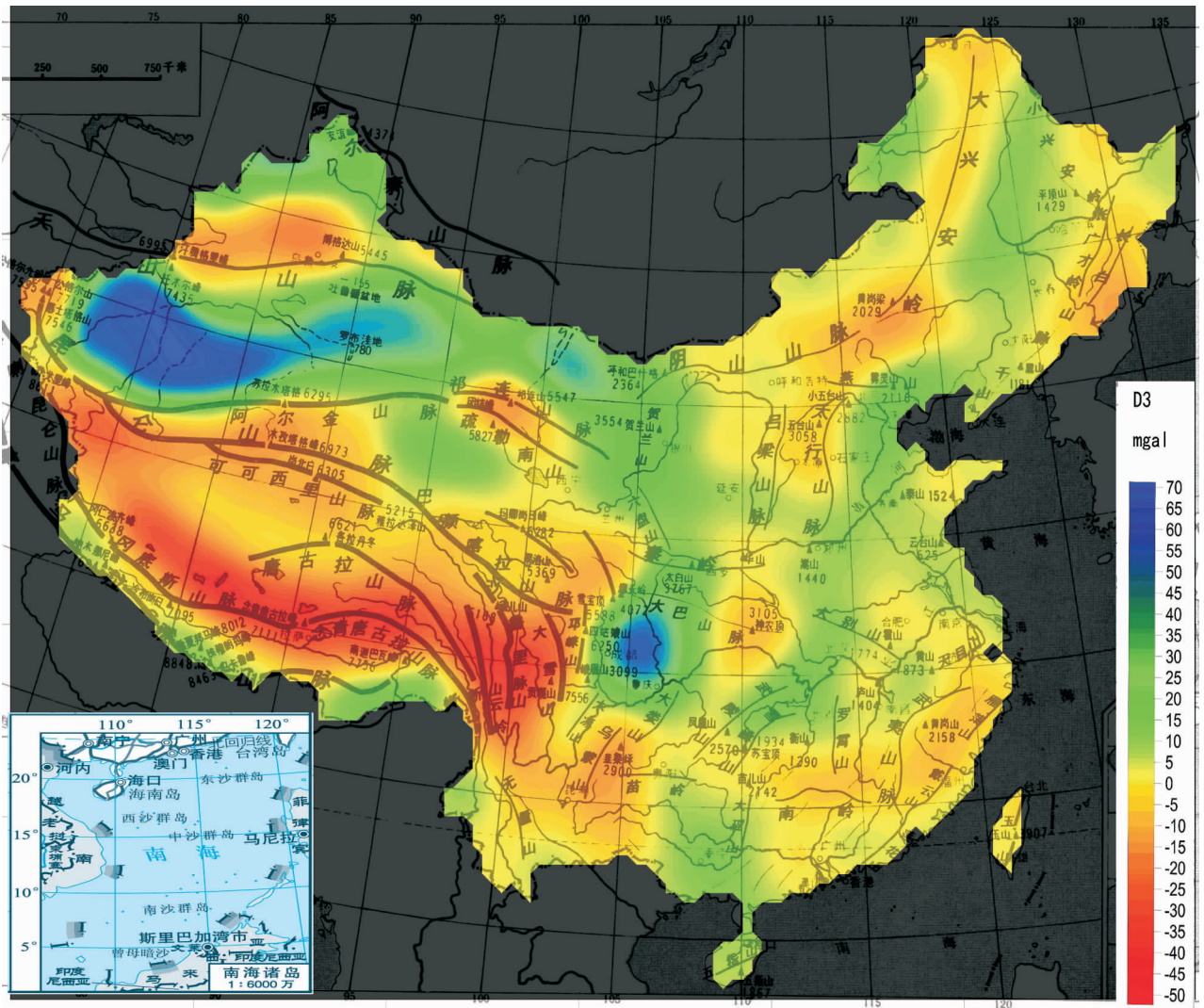


图4 中国大陆重力三阶小波细节与主要山脉对比图,对应等效层深度32.5km

Fig. 4 Comparison of the third-order wavelet detail of Bouguer gravity field with the main mountain ranges in Chinese continent

作用与发生在中新世的西太平洋俯冲的远程效应可能有关联。东昆仑和可可西里山脉上中下地壳密度都偏低,可能是碰撞造山作用不太强烈,偏重于与安第斯型俯冲作用有关。

第二类造山带上中地壳密度偏低,而下地壳密度偏高。也有很多碰撞造山带都属于这一类,如喜马拉雅山脉、冈底斯山脉、天山山脉、秦岭—大别造山带、小兴安岭、阿尔泰山脉,等等。这一类山脉大多数与板块俯冲碰撞作用有直接关系(杨文采等, 2014a—c)。图6b示出喜马拉雅造山带的反射地震剖面,它属于这种类型。上中地壳密度偏低与上中地壳地层受挤压变形和破裂,形成的大陆碰撞增生楔有紧密关联,而下地壳密度偏高与下方印度克拉通板块陆—陆俯冲有关。图6b的反射地震剖面在

下地壳可见有的楔形反射,可能反映高密度特提斯洋壳的仰冲物质。

第三类造山带上中地壳密度偏高,而下地壳密度偏低。也有一些造山带属于这一类,如昆仑山脉、阿尔金山脉、祁连山脉、六盘山脉等。图6c示出北苏格兰加里东造山带的反射地震剖面,它也属于这种类型。位于青藏高原北沿的这些山脉的中下地壳受碰撞影响常仰冲在北侧的克拉通块体之上,而后上地壳被严重剥触,使中地壳密度偏高的结晶基底出露于山顶。而下地壳密度偏低可能与地壳增厚有关。

第四类造山带上中下地壳密度都偏高。这一类山脉比较少见,贺兰山、雪峰山属于这一类。贺兰山是位于华北和阿拉善两个古老克拉通块体之间的

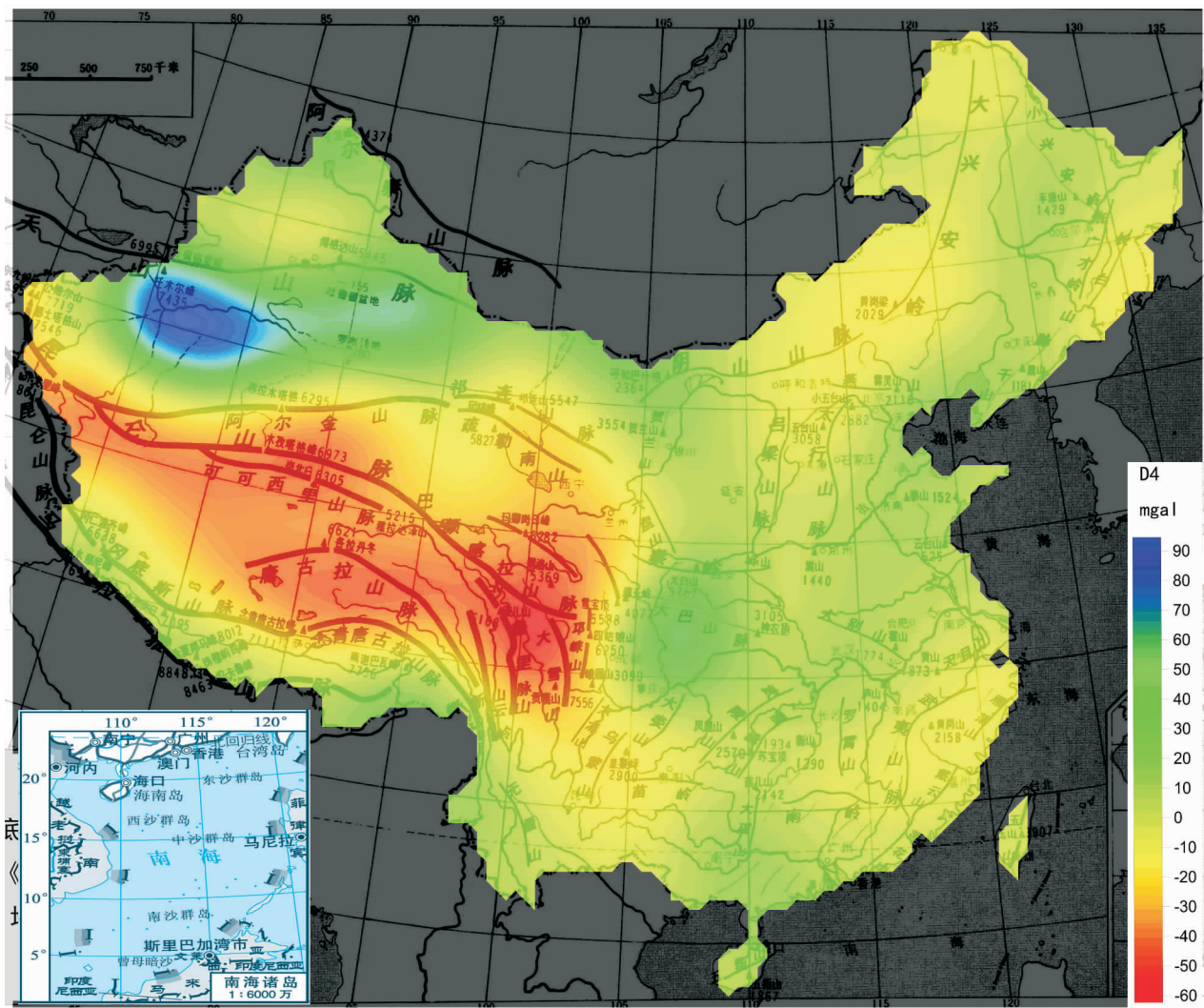


图5 中国大陆重力四阶小波细节与主要山脉对比图,对应等效层深度 68km

Fig. 5 Comparison of the fourth-order wavelet detail of Bouguer gravity field with the main mountain ranges in Chinese continent

褶皱山脉,雪峰山是位于扬子和华夏两个古老克拉通块体之间,它也属于古生代古克拉通块体碰撞形成的褶皱山脉。图 6d 示出雪峰山造山带的构造模式,上地壳见到强烈的冲断和褶皱变形,中下地壳见的变形不明显,表明这个山脉可能是由弱碰撞形成,碰撞发生在中生代以前,现在地壳可能已经部分克拉通化了(杨文采等,2014d)。此外,现今雪峰山地壳厚度没有明显增加,山根也已经磨平了。

### 3 造山带地壳密度结构与板块碰撞作用的关系

由上述讨论可见,和克拉通地体不同,中国大陆的造山带下地壳密度都偏低,只有古生代块体弱碰撞形成的褶皱山脉是例外。这些造山带包括大陆碰

撞造山带,板沿和许多种板内造山带。这些造山带大都与古大洋封闭和俯冲碰撞作用有关。例如,天山—阴山造山带与古亚洲洋封闭有关,昆仑—秦岭造山带与古特提斯洋封闭有关,喜马拉雅和冈底斯山脉与特提斯洋封闭有关。古大洋封闭时海水渗入地壳裂隙中,会降低地壳岩石的密度。

青藏高原是印度次大陆和欧亚板块碰撞作用的产物,整个高原布满了各种类型的造山带,为研究地壳结构和板块碰撞作用提供了最佳的场所(杨文采等,2015d)。通过上述造山带地壳密度结构分类可见,青藏高原造山带地壳密度分类体现了明显的规律性:南部的喜马拉雅山脉、冈底斯山脉等属于第二类造山带,中部的唐古拉和念青唐古拉山脉、可可西里山脉等属于第一类造山带,而西北部的昆仑山脉、

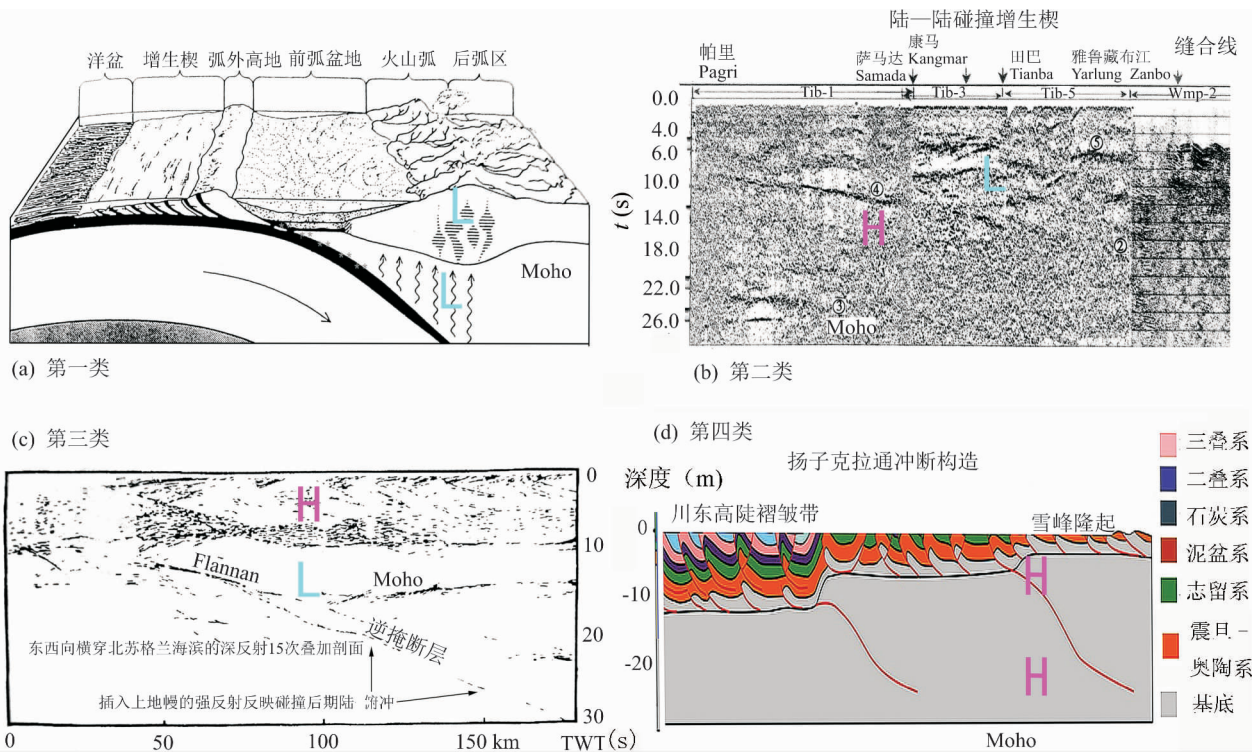


图 6 地壳密度结构分类例示：(a) 安第斯俯冲带构造模式，类型一：地壳密度上下都低；(b) 喜马拉雅造山带反射地震剖面，类型二：地壳密度上低下高，上高下低；(c) 苏格兰加里东造山带反射地震剖面，类型三：地壳密度上高下低；(d) 类型四：雪峰山构造模式，地壳密度上下都高。字母“L”指示低密度，字母“H”指示高密度

Fig. 6 Typical examples of structural modes correlated with four types of crustal density structures: (a) Andes subduction zone as type I: low density in whole crust; (b) deep reflection profile cross Himalaya orogenic belt as type II: low density in the upper and middle crust but high in the lower; (c) deep reflection profile cross northern Scotland orogenic belt as type III: low density in the lower crust but high in the upper and middle; (d) Xuefangshan as type IV: high density in whole crust. The letter “L” indicates low density, “H” indicates high density

阿尔金山脉、祁连山脉等属于第三类造山带。为什么会有这种规律性？这种规律性与板块碰撞有什么关联？

在印度次大陆和欧亚板块碰撞时，沿雅鲁藏布江展布的缝合线两侧，喜马拉雅和冈底斯造山带属于地壳变形最剧烈的地区。碰撞时青藏高原南部地壳受强烈挤压变形增厚，在缝合线两侧形成碰撞造山增生楔(图 6b)。增生楔包含大量特提斯洋的海水和沉积物，密度相对较低，使喜马拉雅山脉上中地壳密度偏低；而印度克拉通块体的楔入和特提斯洋壳的仰冲又可使下地壳密度增高。冈底斯山脉位于缝合线北侧，不仅含有碰撞造山增生楔，还由于印度次大陆向北俯冲，特提斯洋的海水注入冈底斯上中地壳，诱发岩浆房和火山作用，使冈底斯上中地壳密度降低。属于第二类造山带的冈底斯体现了大陆碰撞带密度结构的这一规律性。属于第二类的秦岭—大别造山带、阿尔泰造山带等，也与板块俯冲碰撞作

用直接相关。

碰撞前青藏高原中部位于印度板块向欧亚俯冲的前端下方，这里的唐古拉和念青唐古拉造山带属于大陆俯冲前沿的造山带(板沿造山带)，印度板块俯冲到这里的下地壳截止。由于印度次大陆向北俯冲，特提斯洋的海水沿俯冲带注入使岩石变湿，绝热温度降低，可以诱发大规模岩石蠕变，甚至形成下地壳流(Wang C Y, 2013; 杨文采等, 2015d)。岩石变湿蠕变造成密度相对变低和热应变，使这些山脉上中下地壳密度都偏低。唐古拉和念青唐古拉造山带体现了大陆板块俯冲前沿第一类密度结构的必然性。与板块俯冲有关的板沿造山带地壳增厚，而属于同一类的板内造山带地壳不增厚，如大兴安岭、长白山脉、燕山—阴山山脉和武夷山脉。因此，根据地壳密度变低和厚度是否加大，可以识别板沿和板内造山带。

青藏高原北沿远离印度次大陆向欧亚板块碰

撞,属于第三类造山带。这里的昆仑、阿尔金、祁连山造山带属于古生代或早中生代碰撞造山带,但在新生代又受印度板块碰撞“远程效应”的影响,地壳再次变形。受印度次大陆向北俯冲的挤压力推动,这些碰撞造山带地壳可以仰冲在北侧的塔里木和阿拉善块体之上。仰冲使上地壳岩石被严重剥蚀,造成上中地壳密度偏高。同时,塔里木和阿拉善块体向南俯冲,下地壳会增厚破裂。例如,北苏格兰加里东造山带的反射地震剖面(图6c),下地壳厚而且有插入下方的“漏斗”,这是古俯冲的顶面的地幔入口,可能存有古海洋的海水,会降低密度。此外,由于邻近地壳缩短最为严重的克什米尔构造结,克什米尔的岩石极度破裂变形造成下地壳流,挤入这些山脉的下地壳,也可能造成下地壳密度相对变低。

通过上述对造山带地壳密度结构分类的解释可见,青藏高原南部,中部和北部地壳密度结构分属三类不同的造山带。这里体现的规律性是印度次大陆和欧亚板块碰撞不同阶段作用造成的结果。

## 4 结论

(1) 根据重力场小波变换的尺度—源深度转换律,进行地面重力异常场多尺度分解,取得了反映中国地壳不同埋藏深度的小波细节,揭示了造山带地壳的密度结构。

(2) 和克拉通地体不同,中国大陆的造山带下地壳密度都偏低,只有古生代块体弱碰撞形成的褶皱山脉是例外。这些造山带大都与古大洋封闭和俯冲碰撞作用有关。古大洋封闭后在地壳中留下的裂隙和海水,会造成地壳密度降低。

(3) 中国大陆造山带地壳密度结构大致可以分为四类。上中下地壳密度都偏低的属于第一类造山带。第二类造山带上中地壳密度偏低,而下地壳密度偏高。第三类造山带上中地壳密度偏高,而下地壳密度偏低。第四类造山带上中下地壳密度都偏高。

(4) 通过板块构造原理和岩石物理规律对青藏高原造山带地壳密度结构分类的解释可见,青藏高原南部,中部和北部地壳密度结构分属三类不同的造山带,体现印度次大陆和欧亚板块碰撞不同阶段作用造成的结果。根据地壳密度变低和厚度是否加大,还可以识别板沿和板内造山带。

## 参 考 文 献 / References

- Chinese with English abstract; the literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)
- 程裕祺. 1994. 中国区域地质概论. 北京:地质出版社.
- 侯遵泽,杨文采. 1997. 中国重力异常的小波变换与多尺度分析. 地球物理学报,40(1):85~95.
- 侯遵泽,杨文采,刘家琦. 1998. 中国大陆地壳密度差异多尺度反演. 地球物理学报,41(5):651~656.
- 侯遵泽,杨文采. 2011. 塔里木盆地多尺度重力场反演与密度结构. 中国科学(D辑),41(1):29~39.
- 孙艳云,杨文采. 2014. 从重力场识别与提取地壳变形带信息的方法. 地球物理学报,57(5):1578~1587.
- 杨文采,郭爱缙,等. 1978. 重磁异常频率域解释的理论与方法. 物化探研究报导,78(2):134~178.
- 杨文采. 1997. 地球物理反演的理论与方法. 北京:地质出版社.
- 杨文采,施志群,侯遵泽,等. 2001. 离散小波变换与重力异常多重分解. 地球物理学报,44(4):534~541.
- 杨文采. 2010. 东亚古特提斯域大地构造物理学. 北京:石油工业出版社;1~443.
- 杨文采,宋海斌. 2014a. 从地壳上地幔构造看洋陆转换作用. 地质论评,60(1):1~21.
- 杨文采,于常青. 2014b. 从地壳上地幔构造看大陆碰撞造山作用. 地质论评,60(2):237~259.
- 杨文采,于常青. 2014c. 从地壳上地幔构造看大陆碰撞和地体拼合作用. 地质论评,60(3):486~502.
- 杨文采. 2014d. 从地壳上地幔构造看大陆碰撞带的克拉通化. 地质论评,60(4):721~740.
- 杨文采. 2014e. 探测大陆岩石圈的属性、相态与物质运动: 固体地球物理学的新使命. 地质论评,60(6):1181~1198.
- 杨文采,于常青. 2015a. 根据形成地质作用对中国大陆岩石圈作构造分区. 地质论评,61(4):709~716.
- 杨文采,侯遵泽,孙艳云,等. 2015b. 用于区域重力场定量解释的多尺度刻痕分析方法. 地球物理学报,58(2):520~531.
- 杨文采,孙艳云,于常青,侯遵泽. 2015c. 重力场多尺度刻痕分析与满加尔坳陷深层构造. 地质学报,89(2):211~221.
- 杨文采,侯遵泽,于常青. 2015d. 青藏高原地壳的三维密度结构和物质运动. 地球物理学报,58(11):4223~4234.
- 杨文采. 2016. 揭开南岭地壳形成演化之谜. 地质论评,62(2):257~266.
- 杨文采,陈召曦,侯遵泽,孟小红. 2016. 从卫星重力资料看中国及邻区地壳密度结构. 地质学报,90(9):2167~2175.
- Adlan A A and Safari A. 2005. Global height datum unification: new approaching gravity potential space. J. Geodesy, 79: 512~523.
- Bhimasankam V, Nagendra L S, Seshagiri R. 1977. Interpretation of gravity anomalies due to finite inclined dikes using Fourier transformation, Geophysics, 42(1): 51~59.
- Chen Yuqi. 1994#. Introduction to Regional Geology in China. Beijing: Geological Publishing House.
- Hou Zunze and Yang Wencai. 1997#. Two-dimensional wavelet transform and multiscale analysis of gravity field in China. Chinese J. Geophys., 40(2):261~273.
- Hou Zunze, Yang Wencai. 1998#. Multi-scale inversion of Density contrast within the crust of China. Chinese J. Geophys., 41(5): 642~651.
- Hou Zunze and Yang Wencai. 2012. Wavelet multi-analysis method and applications. Beijing: Science Press; 1~96.
- Hou Zunze and Yang Wencai. 2011. Multi-scale inversion of density structure from gravity anomalies in Tarim Basin. Sci. in China (Ser. D), 54(3), 399~409.



- James D E. 1989. Encyclopedia of solid Earth geophysics. New York; Van Nostrand Reinhold Com.
- Jolivet L and Hataf H C. 2001. Geodynamics. Lisse; A. A. Balkema Pub.
- Parfenov L M, Badarch G, Berzin N A, et al. 2009. Summary of Northeast Asia geodynamics and tectonics. Stephan Mueller Spec. Publ. Ser. 4; 11 ~ 33.
- Rogers J W. 2004. Continents and Supercontinents. Oxford; Oxford Univ. Press.
- Sun Yanyun, Yang Wencai, Yu Changqing. 2015. Multi-Scale Scratch Analysis in Qinghai—Tibet Plateau and its Geological Implications. Pure & Applied Geophys., 172(8): 2083 ~ 2332.
- Sun Yanyun, Yang Wencai, Zeng Xiangzhi, Zhang Zhiyong. 2016. Edge enhancement of potential field data using spectral moments. Geophysics, 81(1): 1 ~ 11; 10.1190/GEO2014-0430.1
- Taylor S R, McLennan S M. 1995. The geochemical evolution of the continental crust. Review of Geophys., 33: 241 ~ 265.
- Telford W M, Geldart L P, Sheriff R E and Keys D A. 1990. Applied Geophysics. Cambridge; Cambridge Univ. Press.
- Wang C Y, Flesch L M, Chang L, Zheng T. 2013. Evidence of active mantle flow beneath South China. Geophys. Res. Lett., 40(5): 5137 ~ 5141.
- Wang Honzhen, Mo Xuanxue. 1995. An outline of the tectonic evolution of China. Episodes, 18(1 ~ 2): 6 ~ 16.
- Yang W C, Guo A Y, Xie Y Q, Zhao J X, and Zhao H Z. 1978&. Theory and methods for interpretation of gravity and magnetic anomalies in the frequency domain. Bull. Inst. Geophys. Geochem. Prospect, 78(2): 134 ~ 178.
- Yang Wencai. 1997&. Theory and Methods in Geophysical inversion. Beijing; Geological Publishing House; 1 ~ 273.
- Yang Wencai, Shi Ziqian, Hou Zunze. 2001. Describe wavelet transform and multi-scale decomposition of gravity anomalies. Chinese J. Geophys., 44(4): 534 ~ 541.
- Yang Wencai, Song Haibin, 2014a&. Ocean—continent transition process reveled by worldwide comparison of crust and upper mantle structures. Geological Review, 60(1): 1 ~ 21.
- Yang Wencai and Yu Changqing. 2014b&. Continental collision process reveled by worldwide comparison of crust and upper mantle structures (I). Geological Review, 60(2): 237 ~ 259.
- Yang Wencai and Yu Changqing. 2014c&. Continental collision process reveled by worldwide comparison of crust and upper mantle structures (II). Geological Review, 60(3): 486 ~ 502.
- Yang Wencai and Yu Changqing. 2014d&. Cratonization processes of continental collision belts reveled by worldwide comparison of crust and upper mantle structures. Geological Review, 60(4): 721 ~ 740.
- Yang Wencai. 2014e&. Exploring Lithospheric Attribute, Phases and Mass Motion; New Mission to the Earth Geophysics. Geological Review, 60(6): 1181 ~ 1198.
- Yang Wencai, Yu Changqing. 2015a&. Tectonic divisions of the Chinese continental lithosphere based on forming tectonic processes. Geological Review, 61(4): 715 ~ 726.
- Yang Wencai, Yu Changqing, Sun Yanyun, Hou Zunze. 2015b. The multi-scale scratch analysis method for quantitative interpretation of regional gravity field. Chinese J. Geophys., 58(2): 58(1): 41 ~ 53.
- Yang Wencai, Sun Yanyun, Yu Changqing, Hou Zunze. 2015c&. Multi-scale scratch analysis of gravity field and deep structures in Manjar depression. Acta Geologica Sinica, 89(2): 211 ~ 221.
- Yang Wencai, Hou Zunze, Yu Changqing. 2015d&. The three dimensional density structures of Qinghai—Tibet Plateau and crustal mass movement. Chinese J. Geophys., 58(11): 4223 ~ 4234.
- Yang Wencai, Sun Yanyun. 2016. Discovering crustal deformation bands by processing regional gravity field. Acta Geologica Sinica (English Edition), 90(1): 66 ~ 74.
- Yang Wencai, 2016&. Raise the curtain on formation and evolution of Nanling Mountain ranges. Geological Review 62(2): 257 ~ 266.

## Crustal Density Structures beneath Orogenic Belts of Chinese Continent

YANG Wencai<sup>1)</sup>, QU Chen<sup>2)</sup>, HOU Zunze<sup>3)</sup>, YAN Ping<sup>1)</sup>, YU Changqing<sup>2)</sup>

1) College of Geosciences, Zhejiang University, Hangzhou, 310027;

2) Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037;

3) Guizhou Henhao Sci-Tec Company, Guiyang, 550018

**Objectives:** This work shows the results of computing the 3D density disturbance images in Chinese continent and interpretation of the these results based on geodynamics and petro-physics, especially for crust beneath orogenic belts.

**Methods:** We apply the scale—depth relationship of gravity anomalies and the multi-scale wavelet for extracting crustal density information from surface Bouguer gravity data of Chinese continent, and presents source disturbance images of the upper, middle and lower crust, which represent the three dimensional density structures in the studied area.

**Results:** The density structures beneath orogenic belts can be divided into four types: (1) relatively low in whole crust; (2) relatively low in the upper and middle crust, but high in the lower crust; (3) relatively high in

the upper and middle crust, but low in the lower crust; and (4) relatively high in whole crust. In southern, middle and northern of Qingzang Plateau, the orogenic belts belong to three different types of the density structures respectively. Based on geodynamics and petro-physics, we infer this arrangement was the result of the collision between India and Eurasia plates. Based on the low-density crustal structures and thickness, one can recognize most of the plate-margin or intra-plate orogenic belts.

**Conclusions:** As the results shows, different from craton terranes, the lower crust of the orogenic belts is usually of low density, except few fold maintains created by weak collision between two small blocks during the Paleozoic.

**Acknowledgements:** Thank National Science Foundation of China for supporting this research.

**Keywords:** geodynamics; Chinese continent; crustal structures; orogenic belts; Bouguer gravity field; multi-scale wavelet analysis; 3D density disturbance images

**Introduction to Author:** Prof. YANG Wencai, Ph. D. on geophysics from McGill University in 1984, an academician of Chinese Academy of Science in 2005.

Manuscript received on: 2016-10-18; Accepted on: 2017-04-15; Edited by: ZHANG Yuxu.

**Doi:** 10.16509/j.georeview.2017.03.001