扬子区地壳密度扰动成像和华南燕山期花岗岩成因

杨文采

浙江大学地球科学学院,杭州,310027

内容提要:用区域布格重力场小波变换多尺度分析方法确定了扬子克拉通地壳的密度扰动模式,它反映了区域的壳源大花岗岩基等板内构造。扬子克拉通的大地构造边界和上地壳浅层密度扰动梯度带重合。克拉通内部上地壳浅层密度扰动和大地构造分区没有明显的对应关系;但是它和地质图有一定对应关系。根据构造边界和上地壳浅层密度扰动梯度带一致的原则,利用研究区重力小波细节勾画出了上地壳结晶基底构造图,提供基底构造准确定位的参考。由于大陆地壳经常发生岩层的近水平拆离,地面的地质构造和地下构造可能发生明显变化。基于密度成像的地壳构造研究表明,古地块的碰撞作用使大陆地壳发育裂隙裂缝,在三叠纪华北和扬子克拉通碰撞时地壳原有的裂隙裂缝复活了,又使得热流体活动加剧和中地壳岩石逐渐重熔,形成了雪峰山—幕阜山—皖南黄山燕山期花岗岩带。花岗岩重熔作用属于岩石圈克拉通化的一种作用。现今雪峰山、幕阜山和皖南黄山还是弱地震多发区,说明这个燕山期花岗岩带虽然已经克拉通化,但是克拉通化的程度还是比扬子地块略逊。

关键词:中国大陆;扬子克拉通;地壳密度成像;区域布格重力场;中地壳重熔作用;燕山期花岗岩

相继而来的信息革命和智能革命,为地球的三 维成像奠定了坚实的基础,现今地球的密度扰动、地 震波速扰动和电阻率成像方法技术已经为地球科学 革命打开了新的视野。地球物理学家致力于探测区 域岩石圈三维的物质分布,希望揭示地壳中历次地 质作用形成的构造遗迹,并从中提取岩石圈动力学 作用的信息。反映地壳物质运动的最直接物理信息 是密度,因此我们致力于从区域布格重力场中提取 地壳三维密度信息的方法研究(侯遵泽等,1997, 1998,2011;杨文采等,2001,2015a、b、c、d,2016a, 2017a,b)。在以前的论文中(杨文采等,2016a, 2017a,b),我们已经分析了扬子克拉通构造单元形 成的动力学作用和中国克拉通地块地壳密度结构的 特点,本论文进一步讨论扬子克拉通的地壳密度结

扬子克拉通的面积虽然不是很大,但是它是全 球最适合人居和最富庶的地块,也是中华民族永久 扎根的宝地。扬子克拉通有 3.0 Ga 的演化历史,与 大型的克拉通相比,从中元古代到中生代它内部的 岩浆活动和构造变形还是比较频繁的,直到新生代 地壳才比较稳定。这么长时间的地壳活动在地壳内 部形成了那些重要的遗迹?也许可以从现今的地壳 三维密度成像中看出来。从学术上看,扬子克拉通 是研究板块内部造山运动的典型区域,而现在我们 对板块内部的造山运动规律还了解甚少。因此,本 文想利用区域重力资料反演地壳的三维密度扰动, 为研究长期活动型克拉通的地壳构造格局和大陆动 力学提供新的认识。

1 扬子区域重力数据处理及反演

根据布格重力异常确定地下密度结构,先要进行异常分解,即从布格重力异常中划分出对应于不同埋藏深度密度体岩的的异常;然后确定引起它的地质体的深度和密度分布。自从笔者等 1997 年引入重力异常小波多尺度分解以来(侯遵泽等,1997,1998,2011),重力场区域场源的三维密度结构的反演方法日趋完善,显示了其在区域地球物理研究中应用的诸多优点(杨文采等,2001,2015~2018;侯遵泽等,2012,2014)。在研究重力场的二维离散小波变换多尺度分析方法及其应用的基础上,笔者们又结合功率谱分析和广义线性密度反演,形成了多尺度密度反演方法,用以描述区域地壳的三维密度结

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:2018-05-06;改回日期:2018-08-26;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2018.05.001

作者简介:杨文采,男,1942年生,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,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, Email: yangwencai@ cashq.ac.cn。

构(杨文采等,2001,2015~2018)。地壳的三维密度 结构反演分以下三步进行:① 区域重力异常小波多 尺度分解;② 区域重力异常功率谱分析;③ 小波细 节对应的密度扰动广义线性反演。

经过大量地质学家的研究,扬子克拉通的大地 构造情况总体上是清楚的(李四光,1942;程裕祺, 1994; Hall,2002,2012;舒良树等,2006;周新民, 2007;徐先兵等,2009;杨文采,2010,2015a)。2010 年以来张国伟院士对扬子克拉通进行了大量研究, 为笔者提供了进行对比研究的重要图件。

本文的扬子研究区位于华南北部,东经取为 100°~124°;北纬 25°~35°。数据主要来自原地质矿 产部和原石油工业部有关单位的地面实测资料,按 照有关规范进行观测和数据处理,得到布格重力数 据集,按规范布格重力数据精度为1 mGal。由于此 数据集来自几个不同单位,数据融合时会有一定误 差,数据融合后精度为2mGal。我们按1:50 0000 的比例尺进行内插后,汇编了扬子区高精度重力测 量数据集,其布格重力异常示于图 1a。图 1 b 显示 扬子克拉通的大地构造,来自张国伟院士2014年的 报告。由图可见,研究区的主体为扬子克拉通,北面 有秦岭—大别碰撞造山带和华北克拉通的南缘。研 究区的西北面有松潘--甘孜复理石盆地,东南面为 华夏陆块。现今的华南克拉通就是由扬子克拉通和 华夏陆块共同组成的。本文重点讨论扬子克拉通, 因为华夏陆块的地壳密度结构已经在关于扬子克拉 通演化的论文中详细介绍过了(杨文采等,2016a)。 图 1c 为区域布格重力异常在经过 Fourier 变换后取 得的功率谱,也标明区域小波细节对应的频带。

与以前的论文一样,应用了小波变换多尺度分析和功率谱分析技术(侯遵泽等,1997,1998,2011;杨文采等,2001,2015b、c;Yang Wencai et al.,2016~2018)。根据试验取小波最高阶次 P=7,取得了1~7阶小波细节 D1,D2,D3,…,D7;和7阶逼近 S7。小波细节重构取得的结果与布格重力异常数据几乎完全相同,证明小波变换计算的高精度。

根据功率谱的梯度变化判定异常可分解为6个 尺度,因此,有的小波细节尺度相近要进行合并。根 据小波变阶时尺度呈2的方次增加的规律,进行D1 +D2的小波细节合并。连同D3、D4、D5、D6、D7、S7 分成7个层次再进行频谱分析,求取对应各小波细 节的密度扰动等效层的中心深度。利用D1+D2数 据和频谱分析方法求得等效层的平均深度为1.53 km。利用D3数据频谱分析方法求得等效层的平均 深度为 3.31 km。由于这些等效层接近地表,受小 沉积盆地的密度变化影响较大,本文没有采用来分 析地壳构造。

利用 D4 数据和频谱分析方法求得四阶小波细 节等效层的平均深度为 6 km;利用 D5 数据和频谱 分析方法求得的五阶小波细节平均深度为 8.37 km;此两层反映上地壳结晶基底的密度扰动。研究 区四阶小波细节示于图 2 a,底图为图 1 b 显示扬子 克拉通大地构造图。为了与地表的岩石性质进行比 较,在图 2b 标明了扬子克拉通的地质图。小波变换 取得的研究区五阶小波细节示于图 3a。

利用 D6 数据和频谱分析方法求得等效层的平 均深度为 19.82 km;反映中地壳横向密度扰动的六 阶小波细节见图 3b。利用 D7 数据和频谱分析方法 求得的平均深度为 26.37 km;该层反映下地壳,反 映下地壳横向密度扰动的七阶小波细节见图 3c。7 阶小波逼近 S7 数据和频谱分析方法求得的平均深 度大于 40 km;反映莫霍面起伏。

2 扬子克拉通的地壳密度结构 和内部构造

扬子克拉通地区四阶小波细节反映深度 6 km 的结晶基底,示于图 2a,底图为图 1b 显示扬子克拉 通大地构造图。由图可见,研究区的主体扬子克拉 通的大地构造边界和上地壳浅层密度扰动有明显的 互相关。作为克拉通地块,扬子研究区具有相对高 密度的特性,其北部和西部边界,都以高密度为特 征。由于印支期扬子克拉通向北和向西俯冲,它北 面的秦岭碰撞造山带和龙门山下方也以高密度为特 征;但是秦岭北边的汾渭盆地和西北面的松潘—甘 孜复理石盆地密度变低。因此,扬子克拉通的大地 构造边界反映为上地壳浅层密度梯度变化。扬子克 拉通东南面为华夏陆块,其西边的边界为安化—罗 城断裂带,北边的边界为江山—绍兴断裂带,它们也 反映为上地壳浅层密度梯度变化。密度成像结果表 明,大地构造图上扬子克拉通整体轮廓是准确的。

在另一方面,由对比底图可见,图 2a 中扬子克 拉通内部大地构造分区和上地壳浅层密度扰动没有 明显的互相关。例如,三峡和鄂东南的低密度异常 就没有构造区块与之对应。为了进行比较,在图 2 b 标明了扬子克拉通的地质图。对比可见,上地壳结 晶基底的密度扰动和地表的岩石类型有相互关系。 小波变换取得的研究区五阶小波细节示于图 3a,可 见图中有雪峰山、幕阜山和皖南黄山三个顺序排列



图 1(a)扬子克拉通区域布格重力异常图,重力异常色标单位 mGal; (b)扬子克拉通大地构造图,来自张国伟的报告; (c)扬子克拉通区域布格重力场的功率谱,标明小波细节对应的频带

Fig. 1 (a) Bouguer gravity anomaly map of the Yangtze Craton; (b) tectonic map of the Yangtze Craton,

的低密度异常,它们与图 2 b 中的三个侏罗纪—早 白垩世的大花岗岩体重合。那么,扬子克拉通内部 的密度扰动是否可以由地壳内的大花岗岩基引起? 密度扰动图 3a 反映扬子区域上地壳 8.4 km 深



图 2 (a)扬子克拉通重力四阶小波细节与大地构造图的对比; (b)扬子克拉通地区地质图, 红色区域为花岗岩带(据马丽芳等,2006)

Fig. 2 (a) The forth-order wavelet detail of the gravity anomalies corresponding to depth 6 km with comparison to the tectonic map, and (b) simplified geological map of the Yangtze Craton, red areas are granites belts (from Ma lifang et al., 2006#)

表 1 岩石密度表 Table 1 The measured density values of rocks

名称	均值	类型	名称	均值	类型
砂岩	2.35	沉积岩	闪长岩	2.85	岩浆岩
页岩	2.4	沉积岩	玄武岩	3.0	岩浆岩
石灰岩	2.75	沉积岩	辉长岩	3.16	岩浆岩
/大理岩		/变质岩	橄榄岩	3.3	岩浆岩
花岗岩	2.66	岩浆岩	榴辉岩	3.4	变质岩
片麻岩	2.75	变质岩			

度的密度扰动,与地形及地表地质已经没有紧密的 相关性。引起重力场扰动最大幅度为±24 mGal,对 应密度扰动最大幅度相当于±0.06 g/cm³。图中沿 北纬 26°~30°线有北东东走向的雪峰山—幕阜山— 皖南黄山三个顺序排列的低密度异常,对应中生代 岩浆作用形成的花岗岩体。扬子克拉通内部上地壳 由变质基底组成,主要岩石为片麻岩等。地壳结晶 岩石密度统计表见表 1(杨文采,2017b)。由表可 见,上地壳结晶基底中低密度的岩石主要为花岗岩, 其密度可以比其他结晶岩石低 0.1 g/cm³以上。因 此,图 3a 中的这三个低密度异常带主要反映克拉通 内的中生代花岗岩体。

密度成像还表明,雪峰山—幕阜山—皖南黄山 三个顺序排列的克拉通内的中生代花岗岩体是壳源 重熔型花岗岩体,它没有延深到下地壳。图 3b 等效





图 3 扬子克拉通地区重力小波细节:(a) 五阶小波细节,深度 8.4 km,对应上地壳结晶基底; (b) 六阶小波细节,深度 20 km,对应中地壳;(c) 七阶小波细节,深度 26 km,对应下地壳

Fig. 3 扬子克拉通地区重力小波细节:(a) The five-order wavelet detail of the gravity anomalies corresponding to depth of 8. 4 km. (b)The six-order wavelet detail of the gravity anomalies corresponding to depth of and 19.8 km. (c) The seven-order wavelet detail of the gravity anomalies corresponding to depth of 26 km

层的平均深度为 19.82 km;六阶小波细节反映中地 壳横向密度扰动,这三个顺序排列的中生代花岗岩 体都有低密度异常对应,但是范围和幅度都减小了。 反映下地壳横向密度扰动的七阶小波细节见图 3c, 其中这三个顺序排列的低密度异常都消失了;反映 在下地壳对应中生代岩浆作用形成的这三个花岗岩 体没有延深到下地壳。这三个花岗岩体沿中下扬子 克拉通南缘排列,南侧正是新元古代华夏地块和扬 子地块发生碰撞缝合的江南造山带(在图 3a 用编号 "3"的线段标明).需要进一步深入研究。

扬子区域上地壳 8.4 km 深度的密度扰动图 3a 上,还有 6 个低密度异常,它们是乌蒙山、神农架 (在图 3a 用编号"1"和"2"的线段标明)、大别山、武 夷山和南黄海盆地(在图 3a 用编号"4"的线段标明)。对比扬子克拉通的地质图(图 2 b)可见,大别山、武夷山和神农架与出露的花岗岩体有一定的相关性,它们也没有延深到下地壳。乌蒙山低密度异常从地表一直延深到下地壳,与中生代岩浆作用没有直接关系。

图 3b 为扬子克拉通中地壳密度扰动平面图, 对应中心深度为 19.8 km。与上地壳结晶基底图 3a 相比,上扬子的密度扰动的趋势大致相似,四川盆地 为高密度区,神农架和乌蒙山低密度异常十分明显。 神农架低密度异常分为北和南两段;北段为大巴 山—神农架,在图 3b 中分别用编号"1"的线段标 明;南段为大娄山,在图 3b 中分别用编号"2"的线



(b) 地面大地构造图和上地壳密度成像的活动构造图的对比

Fig. 4 (a) The forth-order wavelet detail of the gravity anomalies corresponding to depth 6 km with the middle-crust tectonic map; (b) comparison between the middle-crust tectonic map with surface tectonic map as shown in Figure 1 b

1051

段标明。

扬子克拉通地壳三维密度扰动成像为研究板块 内部的造山运动提供了新的信息。上述雪峰山—幕 阜山—皖南黄山三个顺序排列的壳源重熔型花岗岩 体属于板内地壳运动的产物,它们的位置和走向与 新元古代华夏地块和扬子地块发生碰撞缝合的江南 造山带相关,说明由于这个造山带的地壳强度因前 期碰撞减小了,又可以为后期板内造山运动所继承。 大巴山—神农架的造山运动和印支期扬子和华北克 拉通的碰撞有关。大娄山位于上扬子地块和中扬子 地块之间,其形成可能和元古代上扬子地块和中扬 子地块的聚合作用有关,又为中生代板内折皱造山 运动所继承。武夷山的低密度带位置和走向又不一 样,说明它是板内造山运动的不同类型。可见,扬子 克拉通地壳三维密度扰动成像可以为研究板内造山 运动提供丰富的信息。

扬子克拉通下地壳密度扰动和中地壳又有明显的不同。图 3c 为扬子克拉通下地壳的密度扰动 平面图,对应深度为 26.4 km。由图可见,在上述雪峰山—幕阜山—皖南黄山以北都是高密度区,表明 在下地壳中—下扬子克拉通低和华北克拉通已经完 全融合为一个整体,成为欧亚大陆东南的一个统一 的克拉通地体。在雪峰山—幕阜山—皖南黄山以南 的华夏地块,是中密度区,在武夷山下方密度稍低一 些,可能表明华夏地块受西太平洋俯冲作用的影响 比较明显。扬子克拉通下地壳密度扰动图表明,新 生代以来西太平洋俯冲作用对杭州湾以北的中国大 陆的影响已经很小了。

从地壳密度成像的结果来看,可以根据研究区 重力四阶小波细节勾画出上地壳结晶基底构造图, 见图 4a。在图 4b 把它和地面大地构造图进行对 比。由此可见,扬子克拉通的大地构造边界和上地 壳浅层密度扰动梯度带一致。但是,扬子克拉通内 部大地构造分区和上地壳浅层密度扰动没有明显的 位置相关。笔者觉得,大陆地壳和大洋不一样,内部 经常发生岩层的近水平拆离,使地面的地质情况和 地下的地质情况有很大的区别。地面的地质图和构 造图能提供地质年代和岩性的大量信息,而密度成 像等地球物理资料能提供构造的随深度的变化和准 确定位。

3 扬子克拉通的地壳地震构造

图 5 为研究区 1970~2014 年地震活动和上地 壳密度成像的活动构造图的对比,圆圈大小标明地 震级别高低,红色为 7 级以上地震。由此可见,5 级 以上地震主要发生在扬子克拉通的西沿、北边的汾 渭盆地和南黄海,在扬子克拉通内部发生的主要为 5 级以下的小地震。但是,也可以看到,在扬子克拉 通内部发生的地震分布也是有一些规律的。首先, 沿长江是地震多发区。长江流过多条断裂带,而且 蓄水也能诱发地震。而且,雪峰山、幕阜山和皖南黄 山这三个克拉通内的低密度异常区也是弱地震多发



 $(1970 \sim 2014, \geq M3.0)$

图 5 研究区 1970~2014 年地震活动和上地壳密度成像的活动构造图的对比。黄色三角标明地震台站位置, 圆圈大小标明地震级别高低,红色为 7 级以上

Fig. 5 Seismicity of the Yangtze Craton from 1970 to 2014, yellow triangles show location of seismic stations, and size of the circles show magnitudes of the earthquakes

区。上一中地壳的低密度异常区说明这里克拉通化 程度相对较低,容易发生弱地震。由图 5 可见,详细 的三维密度结构成像资料对地震预测可能有指导意 义。

从图5还可见,现今扬子克拉通内部的地震带 主要为大娄山—乌蒙山带和雪峰山—幕阜山—皖南 黄山带两条,方向都是 NEE 向。大娄山—乌蒙山带 可能是中—新元古代上扬子东南缘和中扬子的古碰 撞带:雪峰山--幕阜山--皖南黄山花岗岩带位于中 扬子东南缘和华夏地块的古碰撞带北侧,它的活动 时间从南华纪到早古生代。过去认为,这条华南燕 山期花岗岩是由于古太平洋板块向西俯冲作用形成 的;由于它是壳内的低密度带,方向又是 NEE 向,很 难想象它与古太平洋板块向西俯冲有直接关系;而 应该和中扬子东南沿与华夏地块的古碰撞带有关 (图 6a,b)。这些年代久远的古地块的碰撞作用对 大陆地壳的破坏使地壳发育裂隙裂缝,在三叠纪华 北和扬子克拉通碰撞时地壳原有的裂隙裂缝复活了 (图 6c、d),使得热流体活动加剧。华北和扬子克拉 通碰撞后地壳转向拉伸,中地壳岩石逐渐重熔,形成 了雪峰山—幕阜山—皖南黄山燕山期花岗岩带(图 6e)。在白垩纪之后,华南地壳转向挤压,形成燕山 期花岗岩山脉(图 6f)。

中地壳岩石重熔作用使扬子地块和华夏地块紧 密地焊合在一起,使它们成为统一的华南克拉通地 体。因此,花岗岩重熔作用也是岩石圈克拉通化的 一种作用。现今雪峰山、幕阜山和皖南黄山还是弱 地震多发区,说明这个燕山期花岗岩带虽然已经克 拉通化,但是克拉通化的程度还是比扬子地块略逊。 克拉通化是大陆增生的主要机制,以前已经知道变 质作用和裂谷作用都可以造成岩石圈克拉通化。本 文研究表明,花岗岩重熔作用也可以造成岩石圈克 拉通化。

4 结论

(1)用区域布格重力场小波变换多尺度分析方 法确定了扬子克拉通地壳的密度扰动模式,它反映 了区域的壳源大花岗岩基等板内构造。

(2)扬子克拉通的大地构造边界与上地壳浅层 密度扰动梯度带重合。克拉通内部上地壳浅层密度



图 6 雪峰山—幕阜山—皖南黄山燕山期花岗岩带形成演化示意图,见文中解释 Fig. 6 Illustration of formation and evolution of the Yanshanian Granite Belt in the Yangtze Craton 扰动与大地构造分区没有明显的对应关系;但是它 与地质图有一定对应关系。

(3)根据构造边界和上地壳浅层密度扰动梯度 带一致的原则,图4a利用研究区重力小波细节勾画 出了上地壳结晶基底构造图,提供基底构造准确定 位的参考。由于大陆地壳经常发生岩层的近水平拆 离,地面的地质构造和地下构造可能发生明显变化。

(4)基于密度成像的地壳构造研究表明,古地 块的碰撞作用使大陆地壳发育裂隙裂缝,在三叠纪 华北和扬子克拉通碰撞时地壳原有的裂隙裂缝复活 了,又使得热流体活动加剧和中地壳岩石逐渐重熔, 形成了雪峰山—幕阜山—皖南黄山燕山期花岗岩 带。

(5)花岗岩重熔作用属于岩石圈克拉通化的一 种作用。现今雪峰山、幕阜山和皖南黄山还是弱地 震多发区,说明这个燕山期花岗岩带虽然已经克拉 通化,但是克拉通化的程度还是比扬子地块略逊。

致谢: 笔者感谢西北大学张国伟院士的深入讨 论并为笔者提供了大地构造图件。

参考文献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in 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,等.1998.中国大陆地壳密度差异多尺度反演.地球 物理学报,41(6):642~651.
- 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.
- 侯遵泽,杨文采. 2012. 小波多尺度分析应用. 北京:科学出版社.
- 侯遵泽,杨文采,于长青.2014.华北克拉通地壳三维密度结构与地 质含义.地球物理学报,57(7):2334~2343.
- 李四光.1942. 扬子克拉通何在? 地质论评, 7(6):253~266.
- 马丽芳,丁孝忠,剧远景. 2006. 中国地质图集. 北京:地质出版社.
- 舒良树,周新民,邓平,余心起,2006.扬子克拉通构造带的基本地质特征.地质论评,52(2):251~265.
- 徐先兵,张岳桥,贾东,舒良树,王瑞瑞. 2009. 华南早中生代大地构造过程.中国地质, 36(3).421~428.
- 杨文采, 施志群, 侯遵泽, 程振炎. 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,于长青. 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):715~726.
- 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,侯遵泽,于常青. 2015c.重力场多尺度刻痕分析与满 加尔拗陷深层构造.地质学报,88(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. 2016a. 揭开南岭地壳形成演化之谜. 地质论评,62(2):257~266.
- 杨文采,瞿辰,侯遵泽. 2017a.中国大陆造山带地壳密度结构特征. 地 质论评,63(3):539~548.
- 杨文采,瞿辰,侯遵泽. 2017b. 中国大陆克拉通地体地壳密度结构特征. 地质论评,63(4): 843~853.
- 杨文采,邱隆君,于常青,侯遵泽.2018.塔里木盆地西南部的三维密 度扰动成像.地质论评,64(1):1~9.
- 周新民. 2007.扬子克拉通地区晚中生代花岗岩成因与岩石圈动力学 演化. 北京:科学出版社.
- Chen Yuqi. 1994#. Introduction to Regional Geology in China. Beijing: Geological Publishing House.
- Hall R. 2002. Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW pacific: computed-based reconstructions, models and animation. J. of Asian Earth Sciences, 20: 353~431.
- Hall R. 2012. Plate tectonic evolution of SE Asia and the SW pacific. ectonophysics, $570\!\sim\!571\colon$ 1 \sim 41.
- 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, Yang Wencai. 2011 #. Multi-scale inversion of density structure from gravity anomalies in Tarim Basin. Sci. in China, (Ser. D,) 54(3): 399~409.
- Hou Zunze, Yang Wencai, Yu Changqing. 2014&. Three dimensional density structures of the Huabei craton and implications. Chinese J. Geophys., 57(7): 2334~2343.
- Ma Lifang, Ding Xiaozhong, Ju Yuanjing et al. 2006#. Geological Atlas of China. Beijing: Geological Publishing House.
- Shu Liangshu, Zhou Xinmin, Deng Ping, Yu Xinqi. 2006&. Basic characteristics of Naling tectonic belt. Geoloical Review, 52(2): 251~265.
- Xu Xianbing. Zhang Yueqiao, Jia Dong, Shu Liangshu, Wang Ruirui. 2009&. Tectonic processes of Huanan in Early Paleozoic. Geology of China, 36(3), 421~428.
- Yang Wencai, Shi Ziqun, Hou Zunze, Chen Zhenyan. 2001&. Descrite wavelet transform and multi-scale decomposition of gravity anomalies. Chinese J. Geophys., 44(4): 534~541.
- Yang Wencai. 2010 #. Tectonophysics of Paleo-Tethyan. Beijing: Petroleum Industry Pub.: 1~443.
- 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(1): 41~53.
- Yang Wencai, Sun Yanyun, Yu Changqing, Hou Zunze. 2015c&. Multiscale 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. 2016a &. Raise the curtain on formation and evolution of

Nanling Mountain ranges. Geological Review, 62(2): 257~266.

- Yang Wencai, Chen Zhaoxi, Hou Zunze. 2016b. Three dimensional crustal density structure of central Asia and its geological implications. Acta Geophysica, 64; DOI: 1515/acgeo-2015-0056.
- Yang Wencai, Sun Yanyun. 2016c. Discovering crustal deformation bands by processing regional gravity field. Acta Geologica Sinica (English Edition), 90(1): 66~74.
- Yang Wencai, Qu Chen, Hou Zunze. 2017a&. Crustal density structures beneath orogenic belts of Chinese continent. Geological Review, 62 (3): 539~548.
- Yang Wencai, Qu Chen, Hou Zunze. 2017b&. Crustal density structures of craton terrains in Chinese continent. Geological Rview, 62(4): 843~853.
- Yang Wencai, Qiu Longjun, Yu Changqing Hou Zunze. 2018&. Three dimensional density perturbation of the southeast Tarim Basin. Geological Review, 64(1): 1~9.
- Zhou Xinmin. 2007. Formation of Late-Mesozoic Granites in Yangtze Craton and Dynamic Evolution of the Lithosphere. Beijing: Scientific Press.

Crustal Density Imaging of Yangtze Craton and Formation of the Yanshanian Granitites in South China

YANG Wencai

College of Geosciences, Zhejiang University, Hangzhou, 310027

Objectives: This work shows the results of computing the 3D density disturbance images in Yangtze Craton and interpretation of the these results based on geodynamics and petro-physics, especially for crust beneath craton terrains.

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

Results: The tectonic boundary of the Yangtze craton are coincided with the upper-crust density perturbation gradient zones. But inside the craton, there is no obvious correspondence between the density perturbation of the upper crust and the tectonic zoning. However, it has a certain correspondence with the geological map. According to the principle of uniforming structure boundaries and shallow density perturbation gradient bands in the crust, the structure map of the deep crystal basement is drawn by using the detail of gravity wavelet in the study area, which provides a reference for accurate location of basement structure. Because the continental crust often occurs near horizontal detachment of strata, the ground geological structure and underground structure may change obviously. The study of crustal tectonics based on density imaging shows that the ancient collision processes caused cracks and faults in the continental crust, which were resurrected during the Triassic collision between the North China and Yangtze Craton, gradually reducing the hot-fluid activity, rock anatexis and melting in the middle crust. The Xuefeng —Mufu —South Anhui Huangshan Mountain Yanshanian Granite Belt was formed by this way.

Conclusions: The granite anatexis is a process of Lithospheric cratonization. Nowadays of Lithospheric craton. Nowadays the Xuefeng—Mufu—Huangshan mountains still belong to weak earthquake regions, which indicates that the Yanshanian Granite Belt has become the Huanan craton, but the degree of its cratonization is slightly less than that of Yangtze massif.

Keywords: Chinese continent; Yangtze craton; crustal density Imaging; Bouguer gravity anomalies; anatexis in the middle crust; Yanshanian granite belt

Acknowledgements: Thanks National Science Foundation of China for supporting this research (No. 41574111) and prof. ZHANG Guowei for advices on tectonics

Introduction to Author: Prof. YANG Wencai, born in 1942, Ph. D on geophysics from McGill University in 1984, an academician of Chinese Academy of Science in 2005, Email: yangwencai@cashq.ac.cn

Manuscript received on: 2018-05-06; Accepted on: 2018-08-26; Edited by: ZHANG Yuxu

Doi: 10.16509/j.georeview.2018.05.001