

云南地区重力异常的小波分解与解释^{*}

庞卫东, 张建国, 沈娅宏

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

摘要: 利用小波多尺度分析对云南及周边地区的布格重力异常场进行分解, 并选用振荡较为平缓、光滑, 且具有较好对称性、紧支撑性和较高消失矩的小波基函数进行计算, 同时使用功率谱分析方法对异常场分解结果计算获得对应的场源深度。分解结果与地质解释表明: 云南及周边地区地壳、上地幔物质存在明显的横向不均匀性, 深部隆坳中心有北向偏移的现象; 区内重力异常梯度带、转换带多与断裂展布吻合; 云南作为强震多发区, 其地震发生多受活动断裂控制, 区内重力异常条带、复杂异常区与地震分布具有一定的相关性。

关键词: 云南地区; 小波分析; 重力异常; 地质构造

中图分类号: P315.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2014)04-0614-06

0 引言

地质历史各期构造作用, 伴随的岩浆活动在造成大陆岩石圈结构横向非均质性的同时, 必然会造成地壳内部、上地幔物质分布不均匀及其密度等物性差异, 并表现为相应的重力异常分布。对重力异常场的研究可以帮助了解区域尺度范围内的地壳、上地幔结构, 尤其是基底性质、莫霍面起伏等。

云南及攀西(攀枝花—西昌)地区处于印度板块向中国大陆挤压作用地带, 区内构造复杂, 深大断裂发育, 地壳较为破碎, 地震活动十分频繁, 为中国大陆构造活动最为强烈的地区之一。自20世纪80年代以来, 很多学者已对该地区的地壳结构进行了探测和研究工作(阚荣举等, 1977, 1986; 熊绍柏等, 1986; 胡鸿翔等, 1986; 孙洁等, 1989; 王椿镛等, 2002)。前人也对区内重力资料进行过大量的研究(阚荣举, 林中洋, 1986; 何翔, 吴国华, 1986; 蒋航, 刘福生, 1987; 蒋福珍, 方剑, 2001), 得到了莫霍面深度及地壳与上地幔密度变化等很多成果。但由于资料和研究方法的限制, 由重力资料得到的一些结果与地震测深等研究结果不太一致, 因此有必要作进一步地研究。本文运用小波分析方法对云南地区的重力

资料进行处理, 以实现位场的有效分解, 并结合区域地质资料及其它地球物理资料对研究区的地质构造、地壳结构和地震活动性进行分析研究。

1 方法

小波分析作为傅立叶分析思想的发展, 克服了傅立叶分析不能获得信号局部特性的缺点, 使其在信号处理、图像分析、地球物理等很多学科领域得到越来越广泛的应用。小波变换应用其多尺度分析原理(Mallat, 1989)可将信号 $f(x)$ 分解成各种不同的频道和频率成分, 并且通过伸缩、平移聚焦到 $f(x)$ 的任一细节加以分析(李世雄等, 1994)。利用小波变换的特点能将重力异常场精细地分解到多个不同的尺度上, 可反映不同尺度和深度的异常, 侯遵泽等(1997, 1998)、高德章等(2000)、杨文采等(2001)先后把小波分析方法应用于重力场的分离和处理, 并详尽阐述了小波变换及多尺度分析的计算方法及原理, 本文只给出重力异常多尺度分解后的表达式。

假设二维重力异常场为 $\Delta g(x, y) = f(x, y)$, 利用小波多尺度分析原理对其分解后的重力异常表达式为

$$\Delta g = A_N G + D_1 G + D_2 G + \cdots D_N G. \quad (1)$$

^{*} 收稿日期: 2013-12-04.

基金项目: 云南省政府十项措施“云南强震活动与板缘动力学机制研究”(JCYB-20080601-4)和“地球物理场和化学场动态变化与强震活动关系研究”(JCYB-20080601-7)联合资助。

式中, $D_1G - D_NG$ 为一阶至 N 阶小波变换异常细节; A_NG 为 N 阶小波变换异常逼近。

在利用小波分析方法处理数据时, 其基函数有多种选择, 对于位场数据, 需要考虑小波基函数的一些重要性质, 李健等 (2001) 对此进行了分析与试验。小波函数的完备正交性是多尺度分析的基本要求, 正交小波可以保证多尺度分析的低阶细节不变性。小波函数的对称性直接影响信号的重构, 如果具有对称性, 重构算法失真小, 重构信号能给出原始信号的一个很好的逼近。小波函数的消失矩决定了小波函数逼近光滑函数时的收敛率, 较高的消失矩能够研究函数的高阶变化。由于不存在正交对称小波, 在处理中考虑到研究区位场的变化较为平缓, 选择小波基函数时, 倾向于选用振荡较为平缓和光滑的小波基函数, 此外选用的小波基函数还应有较好对称性、紧支撑性和较高的消失矩。

2 资料与数据处理

数据资料选用云南省地矿局编制的 1: 100 万布格重力异常数据, 其数据范围为 ($22.5^{\circ} \sim 29.4^{\circ} \text{N}$, $98.6^{\circ} \sim 105.5^{\circ} \text{E}$)。图 1 显示区域布格重力异常值全为负, 多在 $(-80 \sim -400) \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 变化, 宏观上从滇东南到滇西北随地势升高逐渐降低, 等值线呈向南东凹入, 由南北转东西的弧形展布。重力异常特点表现为: 以红河断裂为界,

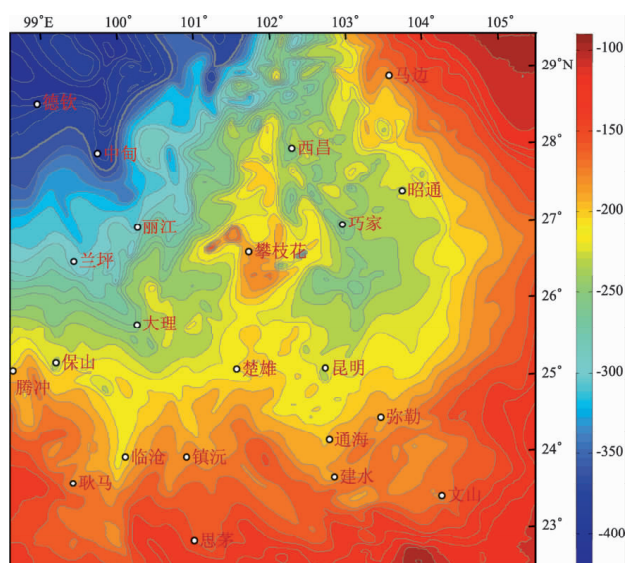


图 1 云南布格重力异常图 (重力单位: mGal)

Fig. 1 Bouguer gravity anomalies in Yunnan area

断裂带两侧重力场特征迥异。滇西地区重力场总的呈南高北低, 但又沿北东方向呈高低相间的起伏变化, 异常以北西向为主, 兼有南北向及北东向的异常表现; 滇西北则表现为北东向梯级带上叠加近南北向异常。滇中、滇东地区重力场总趋势由南东向北西逐步降低, 重力高、低异常呈多个中心分布, 异常有较大的升降幅度, 但带状延展不如滇西明显, 异常带比较宽, 异常数目比滇西少, 在 26°N 以南变化平缓。滇东地区南盘江以南, 高低异常带呈东西向展布, 表现特殊 (云南省地质矿产局, 1990)。

利用小波分析方法对布格重力异常数据进行处理, 参考李健等 (2001) 研究成果, 选用双正交 bior3.5 小波对重力异常数据进行 6 阶分解, 并对各阶小波细节进行径向对数功率谱分析, 求取其对应的场源深度 (Spector, Grant, 1970; 杨文采等, 2001), 结果如图 2 所示。本文仅展示 4~6 阶的细节和 6 阶逼近图像。从统计意义上看, 重力异常的径向平均对数功率谱曲线可以反映异常场源的平均深度。功率谱计算结果表明, 4 阶细节的场源埋深为 8 km, 反映了上地壳密度不均匀体; 5 阶小波细节场源埋深为 15 km, 6 阶小波细节场源埋深为 25 km, 5 阶和 6 阶小波细节反映了上地壳底部和中地壳的不均匀性; 6 阶小波逼近场源埋深 48 km, 则反映了莫霍面起伏的趋势。

3 布格重力异常场结果分析及解释

对云南地区布格重力异常场处理结果进行分析, 并结合研究区内的地质及其它地球物理资料进行相应的地质解释, 对区域地质构造和地震活动性做初步探讨。

3.1 小波分解结果

笔者对云南及周边地区布格重力异常小波分解各阶结果进行分析。图 2a 为布格重力异常 4 阶小波细节, 等值线形态十分复杂, 为上地壳浅部小尺度构造及岩体的反映。图 2b 是 5 阶小波细节, 由图可见异常带清晰连续, 对区内断裂带反映的突出, 表现为地下物质密度的小波细节异常的位置与地表断裂是基本吻合的。同时也存在不完全吻合的地方, 一方面这也许是可以对地表断裂做出相应修正的地方, 因为地球物理场具有连续性, 有利于确定断裂的位置, 而地表岩石或断层的露

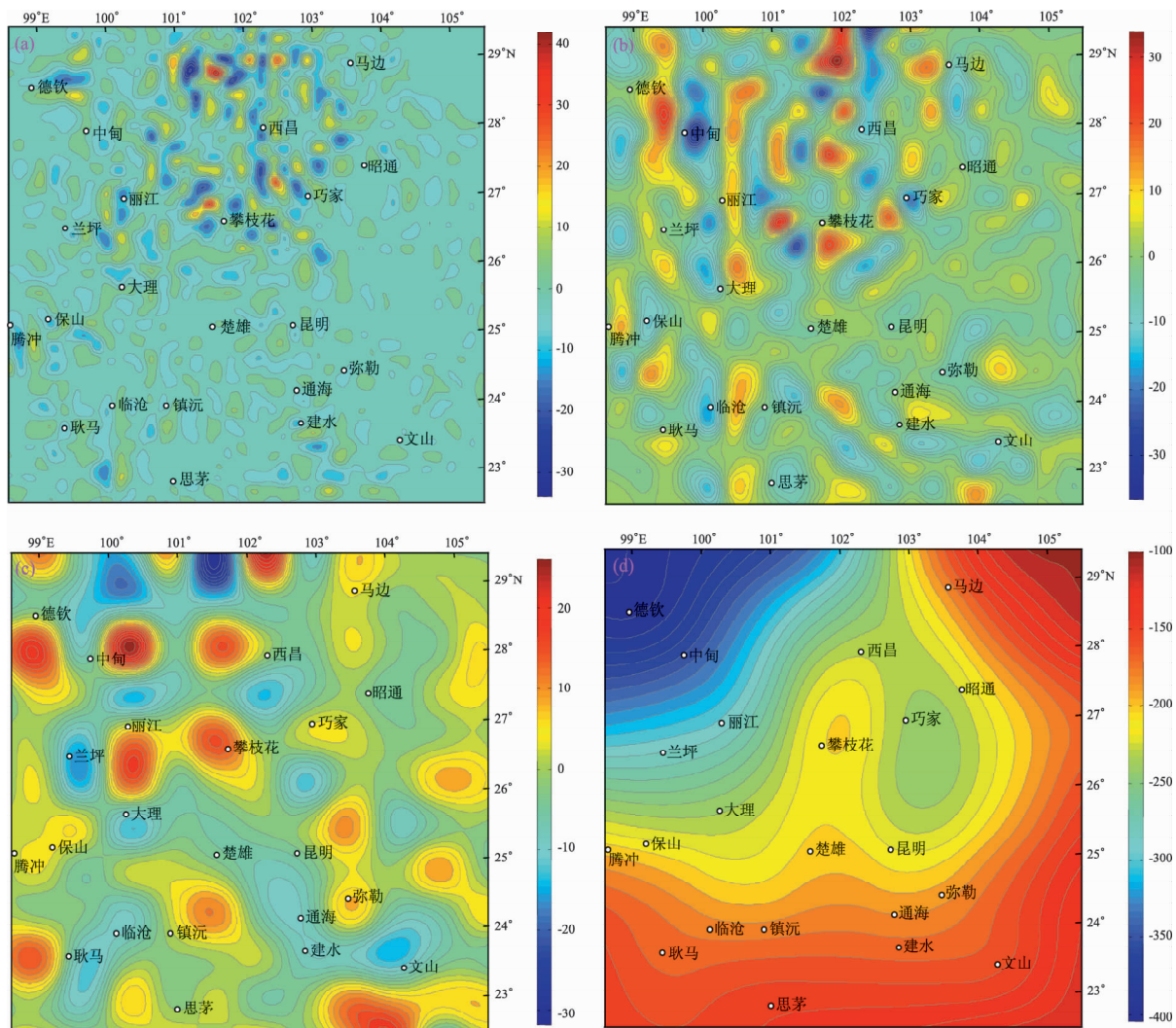


图2 云南重力异常4阶(a)、5阶(b)、6阶(c)细节和6阶逼近(d)(重力单位:mGal)

Fig. 2 The 4th (a)、5th (b)、6th (c) order wavelet details (a~c) and the 6th order approximation (d) of the gravity anomalies in Yunnan area

头出现比较孤立;另一方面考虑到在此深度上的(5阶细节场源深度为15 km)这种不吻合,也许是断裂向下延伸时倾角发生变化而造成。在4阶、5阶细节图中除在局部和沿断裂带部位有正的重力异常区(推测正异常是地幔高密度物质沿断裂上涌至地壳浅部所致)外,在这一深度层次上(4阶细节8 km,5阶细节15 km)以重力负异常为背景,尤其是区内主要的拗陷和湖盆区,如滇中拗陷内的楚雄—南华地区、镇沅—思茅弧后盆地及昆明新生代湖盆区等,异常分布与表面地质构造相关。这与王椿镛等(2002)利用地震记录获得的P、S波三维速度结构在地壳10 km深度上区域内速度异常值相对较小,存在楚雄—南华地区等负异常区的结果相吻合。

云南地区6阶小波细节如图2c所示,计算场源深度为25 km,反映的是中地壳密度不均匀分布,由于重力资料对深部场源的分辨率较低,所以该阶小波细节相较5阶细节对断裂构造的反映没有那么清晰,但该图像清楚得显示深部大尺度不均匀块体。研究区中部的西昌—攀枝花—楚雄直至红河断裂南北向展布的重力正异常区与攀西裂谷和滇中拗陷区位置相对应,滕吉文(1987),熊绍伯等(1986)研究指出滇中拗陷与攀西裂谷具有相似的壳幔结构和地球物理特征,表明攀西中生代古裂谷实际上已南延至滇中(阚荣举,1989),滇中拗陷具备了裂谷的特征。中生代扬子古陆裂陷形成滇中拗陷,发育了巨厚的中生代沉积(云南省地矿局,1990),对应4阶和5阶细节

重力负异常区，而在巨厚的中生代盖层之下，中地壳内存在镁铁质岩体和基性岩墙群，此应为沿裂谷中的岩浆通道上涌的高密度物质，对应西昌—攀枝花—楚雄直至红河断裂的南北向展布的重力正异常。在该正异常条带东侧存在着与其平行展布的重力负异常带，在地质构造上对应着康滇古隆起；再向东侧出现南北向的异常等值线宽疏的正异常区，小江断裂东侧的正异常应是牛首山古陆的反映。图2d显示了6阶小波逼近，功率谱计算场源深度为48 km，反映了莫霍面起伏趋势，其形态与根据地震测深资料编制的地壳等厚线形态十分相似，并与胡家富等（2003）利用S波地壳结构反演所得地壳厚度结果相吻合。重力异常6阶逼近图像中（图2d），可以看到一个向南东突出

的舌形，在前舌和后舌之间呈现出“一隆两拗”的特点（阚荣举，林中洋，1986），即攀枝花—楚雄重力高对应的滇中幔隆、以东川为中心的重力低对应的滇东幔拗及滇西重力低对应的滇西复式幔拗（任治珏，1996）。若扣除前舌与后舌隆拗相间的影响，则研究区内地壳厚度变化趋势将表现出一个更为平滑的向南东突出的舌形，为此，在六阶小波逼近的基础上进一步做7阶小波分解，所得结果如图3b所示。7阶小波细节（图3a）则更清楚的反映出研究区内上地幔隆拗相间展布的特点，与“一隆两拗”的特征相对应，只是其隆拗中心均发生了不同程度的北向偏移。云南地区布格重力异常场处理结果表明云南及周边地区地壳、上地幔物质存在明显的横向不均匀性。

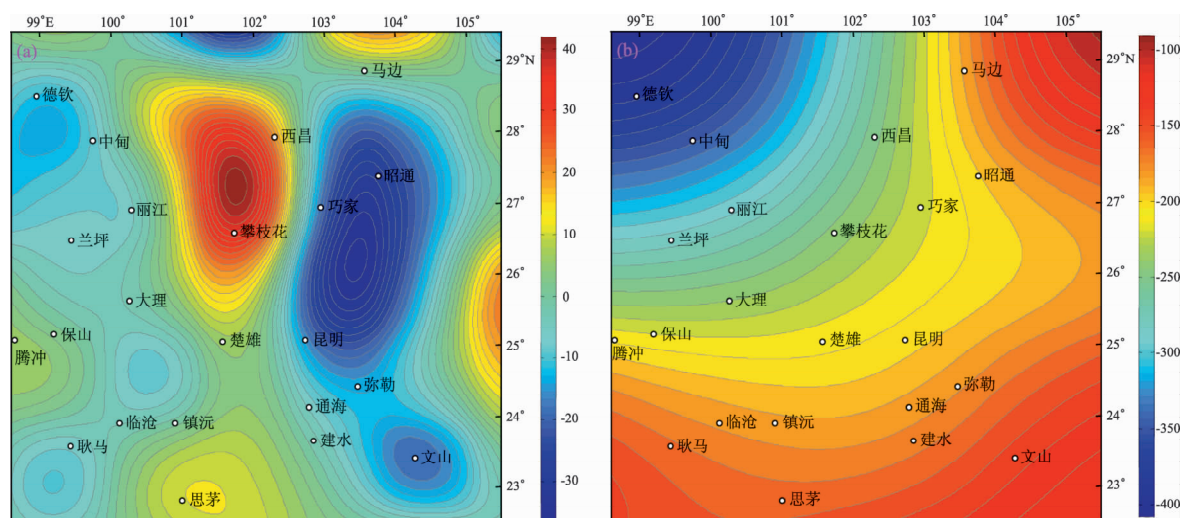


图3 云南重力异常7阶细节（a）和7阶逼近图（b）（重力单位：mGal）

Fig. 3 The 7th order wavelet details (a) and the 7th order approximation (b) of the gravity anomalies in Yunnan area

3.2 地质构造分析

为了便于分析，笔者把不同阶次的小波细节数据组合起来以获得不同深度的目标场，将5阶和6阶小波细节组合得到重力异常5~6阶细节组合，如图4所示。组合所得结果可以避免由于断裂在不同深度层次上因发育程度的不同而造成某一阶次图像中不能完全显示的缺点，同时也剔除了上部密度不均匀体的干扰。从研究区内深大断裂在组合图中投影的结果看，重力异常的转换带、梯度带或突变带多与断裂展布相吻合。如程海断裂为重力正异常区的东边界，澜沧江断裂南段、绿汁江断裂北段，小江断裂带均为重力异常梯级带，

红河断裂带为正负异常转换带。研究区内异常条带展布的另一个显著的特点是大部分断裂都投影在异常条带的正上方或与其紧邻，这表明区内断裂多具陡倾的水平走滑性质。作为“板块缝合线”的金沙江—红河断裂，金沙江断裂自滇西北进入本研究区，其重力异常显示，呈现局部相当狭窄的北西向负异常轴，与断裂的地面位置符合的很好，特征指示该断裂产状相当陡立，与地震测深资料震相分析获得的断层产状（倾角87.5°）相吻合（阚荣举，韩源，1992）。南部北西走向的红河断裂表现为梯级带，并在其西南侧伴有苍山—哀牢山负异常带，与地质构造上的苍山—哀牢山变

质带相对应, 针对该负异常, 结合 Pg 波低速异常等现象认为该区有逆冲推覆构造, 存在哀牢山推覆体 (陈元坤, 1987)。红河断裂北东侧是重力正异常区与高速异常区对应, 这一正异常影响至与其平行的楚雄—建水断裂。图 4 中红河断裂与楚雄—建水断裂异常条带平行展布且中间夹持正异常轴带的特征, 可能说明两条断裂带实为深部同一大断裂在地表附近的不同分支, 而中间的异常轴对应着深部大断裂, 又联系到地表出露的玄武岩 (云南省地矿局, 1990), 认为重力正异常为地幔、下地壳岩浆顺着该深部断裂侵位到中上地壳, 并沿着此平行断裂系向上传播的反映。本文分析结果与白志明和王椿镛 (2003, 2004) 对地壳结构层析成像研究显示的红河大断裂在浅部倾向南西, 并分支为红河断裂、建水断裂和曲江断裂, 在深部倒转, 倾向北东切穿地壳的结果吻合。在南澜沧江与昌宁—双江断裂之间存在一规模较大的负异常区, 应该反映了华力西、印支时代北澜沧江—昌宁双江断裂带向东俯冲形成的具有低压高温和高压低温的双变质岩系特征的板块缝合带, 西侧靠近昌宁双江断裂的澜沧群变质岩 (刘增池, 1985) 及靠近澜沧江断裂东侧为一个有着复杂形成历史的混合—改造型临沧花岗岩体岩基 (熊家镛, 1983), 则表现为重力正异常。

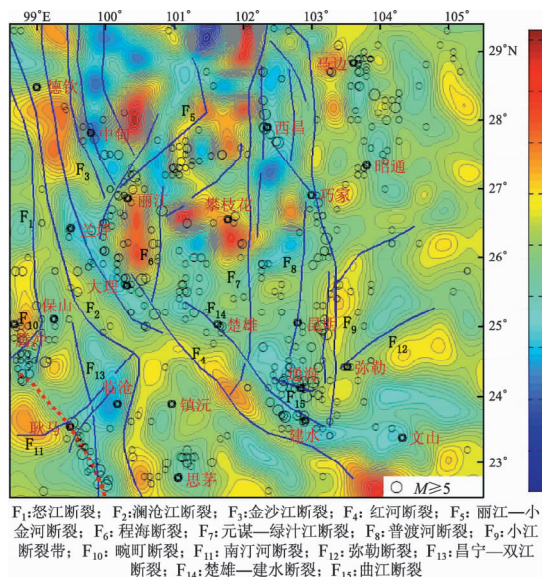


图 4 云南重力异常 5~6 阶细节组合
(重力单位: mGal)

Fig. 4 The combination of 5th and 6th order wavelet details of the gravity anomalies in Yunnan area

3.3 地震活动性分析

云南地区是强震多发区, 其地震发生多受活动断裂控制。对比云南地区强震分布 (图 4) 和地震带划分情况 (秦嘉政等, 2005), 注意到研究区重力异常条带和复杂异常区与地震分布具有一定的相关性, 大多数强震震中集中在这些区域。断裂两侧异常突变带、梯度带反映了断裂两侧块体物性的差异, 复杂异常区则反映不同断裂条带的交汇或交错造成的块体破碎, 而这些构造部位往往利于应力集中、能量积聚, 为地震孕育和发生提供了场所。如建水断裂和曲江断裂附近的众多中强地震形成的通海—石屏地震带, 就是断裂交汇或交错的部位; 小江断裂异常条带对应的小江地震带则是不同活动块体的连接边界, 该带上曾发生过有记载以来云南最大的 1833 年嵩明 8.0 级地震; 昌宁—双江断裂为 1988 年澜沧耿马 7.6 级地震的发震构造, 在异常图上呈现出的正负异常转换带对应着耿马—澜沧地震带, 从异常等值线形态可以注意到沿北西向澜沧—耿马地震带直至腾冲—龙陵地震带为一个大的异常梯度带, 推测可能为一条隐伏构造 (图 4 中红色虚线标注) 的反映; 中甸—丽江—大理区域异常条带表明川滇菱形块体内部剑川断裂、丽江—小金河断裂为界两侧块体 (北西侧为川西北次级块体、南东侧为滇中次级块体) 具有活动差异性, 与中甸—大理地震带相吻合。

4 结论

利用小波分析方法, 分解云南及周边地区重力异常得到的局部异常 (细节成分) 和区域异常 (逼近成分) 是合理的。通过对重力异常结果的分析及地质解释, 得到了以下认识: 局部异常较好地反映了区内主要的断裂及主要的坳陷去和湖盆区的构造特征; 区域异常则反映出研究区内地壳、上地幔物质存在明显的横向不均匀性, 主要表现为整体向南东突出的舌形, 莫霍面存在南北向的隆起和坳陷, 呈“一隆两坳”的特点, 在深部隆坳中心有北向偏移的现象。云南作为强震多发区, 其地震发生多受活动断裂控制, 区内重力异常条带和复杂异常区与地震分布具有一定的相关性, 断裂带两侧的异常反映了断裂两侧存在明显的物性、结构差异, 而这些差异部位往往有利于应力的相对集中、能量的积累及地震的孕育和发生。

参考文献:

- 白志明,王椿镛. 2003. 云南地区上部地壳结构和地震构造环境的层析成像研究[J]. 地震学报, 23(2): 117-127.
- 白志明,王椿镛. 2004. 云南遮放—宾川和孟连—马龙宽角地震剖面的层析成像研究[J]. 地球物理学报, 47(2): 257-267.
- 陈元坤. 1987. 哀牢山—点苍山推覆构造的认识依据和讨论[J]. 云南地质, 16(4): 291-297.
- 高德章,侯遵泽,唐建. 2000. 东海及邻区重力异常多尺度分解[J]. 地球物理学报, 43(6): 842-849.
- 何翔,吴国华. 1986. 云南地区地壳厚度及重力均衡补偿作用[J]. 地震研究, 9(4): 487-500.
- 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[J]. 地球物理学报, 41(5): 643-651.
- 侯遵泽,杨文采. 1997. 中国重力异常的小波变换与多尺度分析[J]. 地球物理学报, 40(1): 85-95.
- 胡鸿翔,陆涵行,王椿镛,等. 1986. 滇西地区地壳结构的爆破研究[J]. 地球物理学报, 29(2): 133-144.
- 胡家富,苏有锦,朱雄关,等. 2003. 云南地壳S波速度与泊松比结构及意义[J]. 中国科学(D辑), 33(8): 714-722.
- 蒋福珍,方剑. 2001. 康滇地区重力场分离,密度反演与地壳构造[J]. 地震学报, 23(4): 391-397.
- 蒋航,刘福生. 1987. 从重磁场特征探讨攀西裂谷构造[A]//张云湘,袁学诚. 中国攀西裂谷文集(3)[C]. 北京:地质出版社, 76-88.
- 阚荣举,韩源. 1992. 云南遮放至马龙地学断面(说明书)[Z]. 北京:地震出版社.
- 阚荣举,林中洋. 1986. 云南地壳上地幔构造的初步研究[J]. 中国地震, 2(4): 50-61.
- 阚荣举,张四昌,晏凤桐,等. 1977. 我国西南地区现代构造应力场与现在构造特征的探讨[J]. 地球物理学报, 20(2): 96-109.
- 阚荣举. 1989. 攀西古裂谷及南延部分的地球物理场特征[A]//八十年代地区中国物理学进展[C]. 北京:学术书刊出版社, 275-283.
- 李健,周云轩,许惠平. 2001. 重力场数据处理中小波母函数的选择[J]. 物探与化探, 25(6): 410-416.
- 刘增池. 1985. 澜沧群火山岩特征及其构造背景的判别[J]. 云南地质, 4(4): 36-45.
- 秦嘉政,皇甫岗,钱晓东. 2005. 云南强震活动与预测方法研究[M]. 昆明:云南科技出版社.
- 任治矾. 1996. 云南地体构造与成矿作用[M]. 北京:地质出版社.
- 孙洁,徐常芳,江钊,等. 1989. 滇西地区地壳上地幔电性结构与地壳构造运动的关系[J]. 地震地质, 11(1): 35-45.
- 滕吉文. 1987. 攀枝花—西昌古裂谷与“活化”的地球物理场特征[J]. 地球物理学报, 30(6): 581-593.
- 王椿镛,Mooney W. D.,王溪莉,等. 2002. 川滇地区地壳上地幔三维速度结构研究[J]. 地震学报, 24(1): 1-16.
- 熊家镛. 1983. 临沧混合杂岩的基本特征成因探讨[A]//青藏高原地质文集(13)[C]. 北京:地质出版社.
- 熊绍柏,滕吉文,尹周勋. 1986. 攀西构造带南部地壳与上地幔结构的爆炸地震研究[J]. 地球物理学报, 29(3): 235-244.
- 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[J]. 地球物理学报, 44(4): 534-541.
- 云南省地质矿产局. 1990. 云南省区域地质志[M]. 北京:地质出版社.
- Mallat S. 1989. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation[J]. IEEE Pattern Anal. and Machine Intell., 11(7): 674-693.
- Spector A., Grant F. S. 1970. Statistical models for interpreting aeromagnetic data[J]. Geophysics, 35(2): 293-302.

Wavelet Decomposition and Interpretation of Gravity Anomaly in Yunnan

PANG Wei-dong, ZHANG Jian-guo, SHEN Ya-hong

(Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650024, Yunnan, China)

Abstract

The Bouguer gravity anomaly was decomposed in Yunnan and its surrounding areas by the wavelet multi-scale analysis based on the wavelet basis function, which satisfied smooth oscillation, better symmetry, compact support, and high-order vanishing moment. And using power spectrum analysis, we calculated the gravity anomalies decomposed result to obtain its corresponding depths of sources. Combined the decomposed results with geological interpretation, we found that there was a significant lateral heterogeneity in the crust and the upper mantle in Yunnan and its surrounding areas. The center of uplifting subsidence area migrated to northwards in the deep of earth. The distribution of most gradient zones and the transition zones of the gravity anomaly matched the location of the fault distribution. As an earthquake-prone area, the earthquake activity in Yunnan was most likely controlled by active faults. The anomalous gravity belts, multi-anomaly zones had correlation with the distribution of earthquake in Yunnan and its surrounding areas.

Key words: Yunnan area; wavelet analysis; gravity anomaly; geological structure