昆明地区重力异常数据处理*

庞 卫东[1], 杨润海[2], 张建国[2]

(1. 云南大学 地球物理系, 昆明 650091; 2. 云南省地震局, 昆明 650224)

摘要: 为了有效地划分出重力异常, 利用小波多尺度分析和奇异值分解重建两种方法对昆明地区布格重力异常数据进行处理, 实现了位场的分离。分离结果反映了不同深度和尺度地质体密度的不均匀性, 从而较好地圈定了盆地, 并揭示了几条主要断裂的空间延展特征。运用这两种方法对重力数据的处理都具有可行性。

关键词: 重力场; 小波多尺度分解; 奇异值分解; 昆明地区

中图分类号: P312.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-0666(2009)03-0299-07

0 引言

地球物理方法是研究地壳深部构造有力且可靠的工具。其中, 用重磁方法取得的位场资料是矿产勘查、地质构造研究、岩石圈结构研究的重要基础性资料 (杨文采, 1997)。重力观测数据是地下不同深度、不同尺度和不同形状的密度不均匀体所形成的场在地表的综合反映 (重力勘探资料解释手册编写组, 1983)。观测数据中既含有浅部的细节信息及各种噪声干扰, 又含有深部的构造信息。实测得到的重力异常场大都比较复杂, 直接进行解释较为困难, 因而, 选择合理的重力位场数据处理方法就显得特别重要。以往用于重力异常分离的方法主要有趋势分析、向上延拓和滑动平均等, 这些方法在实际应用中都有一定的效果, 但也都存在一定的局限性。本文中, 笔者将分别利用小波分析和奇异值方法对昆明地区布格重力异常数据进行处理以实现位场的有效分解, 并对所得结果进行地质方面的解释。

1 方法和原理

1.1 小波多尺度分解方法

小波分析作为傅立叶分析思想的发展和延拓, 克服了傅立叶分析不能获得信号局部特性的缺点, 使得其在信号处理、图像分析、地球物理学等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), 将信号分解成各种不同的频道、频率成分或各种不同尺度成分, 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, 刘家琦, 1994)。人们利用小波变换的上述特点将重力异常场精细地分解到多个不同的尺度上, 来反映不同尺度和深度的重力异常。侯遵泽和杨文采 (1997, 1998)、高德章等 (2000) 和杨文采等 (2001) 先后把小波分析方法应用于重力场的分离和处理, 得到了很有意义的结果。他们的论文中已经详尽阐述了小波变换及多尺度分析方法的原理, 因此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 $\Delta g(x, y) = f(x, y)$, 则利用小波多尺度分析原理对其进行分解后的重力异常表达式可记为

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

式中, $D_1 G \sim D_N G$ 为 1阶至 N 阶小波变换异常细节, $A_N G$ 为 N 阶小波变换异常逼近。

1.2 奇异值分解和重建方法

奇异值分解是线性代数中的经典方法之一。过去由于计算成本高、速度慢等原因, 它的实际应用受到限制, 但在计算机技术迅速发展和普及的今天, 其计算成本已大大降低, 运用奇异值分解方法解决一般数据量的地球物理计算问题已经不存在任何困难。在地球物理数据处理方面, 奇异值分解与傅立叶变换相比具有更大的优势, 它能够最大可能地利用相邻重磁测量信号之间存在较好的相关性这一特点, 按照能量关系对信号进行分解、截断和重构,

* 收稿日期: 2008-09-03.
基金项目: 国家和省重大科学工程项目“昆明市活断层探测和地震危险性评价”(1-4-25)资助.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

而不需要通过时频转换来完成。因此利用该方法同样可以快速、高效地实现对重力异常场的分解（杨文采，1997；李平等，2001）。

设 $\boldsymbol{A}$ 为地球物理或地球化学数据插值后的二维矩阵，其奇异值分解形式为

$$\boldsymbol{A}_{m\times n}=\boldsymbol{U}_{m\times r}\Sigma^{T}_{r\times r}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}_{n\times r}. \tag{2}$$

其中，$\boldsymbol{U}_{m\times r}$为左特征向量矩阵，$\boldsymbol{V}^{T}_{n\times r}$是右特征向量矩阵的转置矩阵，$\Sigma$是奇异值对角矩阵。如果用 $\boldsymbol{SV}_k$ 代表奇异值，则有 $\boldsymbol{SV}_1>\boldsymbol{SV}_2>\boldsymbol{SV}_3>\boldsymbol{SV}_4\cdots$，且奇异值的平方为特征值，用 λ 代表特征值，则有

$$\boldsymbol{SV}_k=\sqrt{\lambda_k}. \tag{3}$$

将 $\boldsymbol{U}$ 和 $\boldsymbol{V}$ 写成 $\boldsymbol{U}=(U_1\cdots U_r)$ 与 $V=(V_1\cdots V_r)$。$\boldsymbol{U}$ 和 $\boldsymbol{V}$ 的直积张成子空间 Ψ_k，

$$\Psi(\lambda_k)=\boldsymbol{U}_k\leftarrow\boldsymbol{V}^{T}_k. \tag{4}$$

所有 Ψ_k $(1\leqslant k\leqslant r)$ 构成 $\boldsymbol{A}(m,n)$ 的 1个正交完备基：$\Psi=\bigcup\psi_k$。此时 $\boldsymbol{A}$ 可以表示为

$$\boldsymbol{A}(i,j)=\Sigma^{r}_{k=1}\boldsymbol{SV}_k\cdot\Psi\lambda_k. \tag{5}$$

由上式可知，在 Ψ空间中，矩阵 $\boldsymbol{A}(m,n)$ 可以被完全重建。如果选择部分奇异值，可以重建其对应的部分信息，这正是奇异值分解异常重建的方法。

2 区域地质构造概况和重力异常特征

本文中，研究区以昆明为中心，东西宽 130 km，南北长 189 km。研究区位于康滇地轴东缘、扬子准地台西南部和川滇台背斜与滇东台褶皱带交汇部位（云南省地质矿产局，1990）。区内断裂以南北走向为主，主要包括昆明盆地以东的小江断裂带、穿过盆地的普渡河断裂带和盆地以西的汤郎（罗茨）—易门断裂带。它们规模大、形成时间早，控制了区内其它构造、褶皱、地层及岩浆岩的发育。元古界以来区内地壳经历了多次构造运动，褶皱长轴方向大都与断裂线的走向平行。区内大部分地区具典型的基底和盖层双层结构，盖层形成时间短，其褶皱一般比较开阔，而基底褶皱则具有紧密线状特征[1]。

图 1显示，昆明地区布格重力异常多呈带状展布，方向以南北向为主，其次为北西及北东向，呈现出带状重力梯级带、重力高低异常转换带、串珠状闭合椭圆形及半闭合舌形等。这是由于研究区内南北向展布的小江断裂、汤郎（罗茨）—易门断裂、普渡河区域性断裂以及受它们控制的次级断裂的存在造成的。

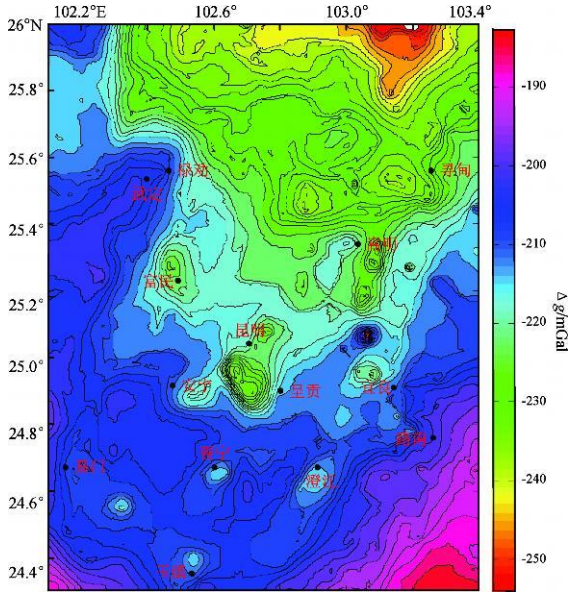


图 1 昆明地区重力异常图

Fig. 1 Gravity anomalies in Kunming area

3 昆明地区重力异常小波多尺度分析和奇异值分解

3.1 数据处理

笔者依据上述方法分别对昆明地区布格重力异常进行数据处理。数据资料使用云南省地矿局编制的 1∶50万布格重力等值线图。在对等值线图进行数字化的基础上，应用泛克里格（Kriging）数学模型生成间距为 500 m × 500 m的矩形网格数据作为处理对象。

利用小波分析方法时，笔者参考李健等（2001）的研究成果，选用双正交 bior3.5小波对重力异常数据进行 7阶分解，并对各阶小波细节进行了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）（图 2、图 3）。

[1] 云南省防灾研究所．2007．昆明市 1∶25万区域地震构造图说明书．

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

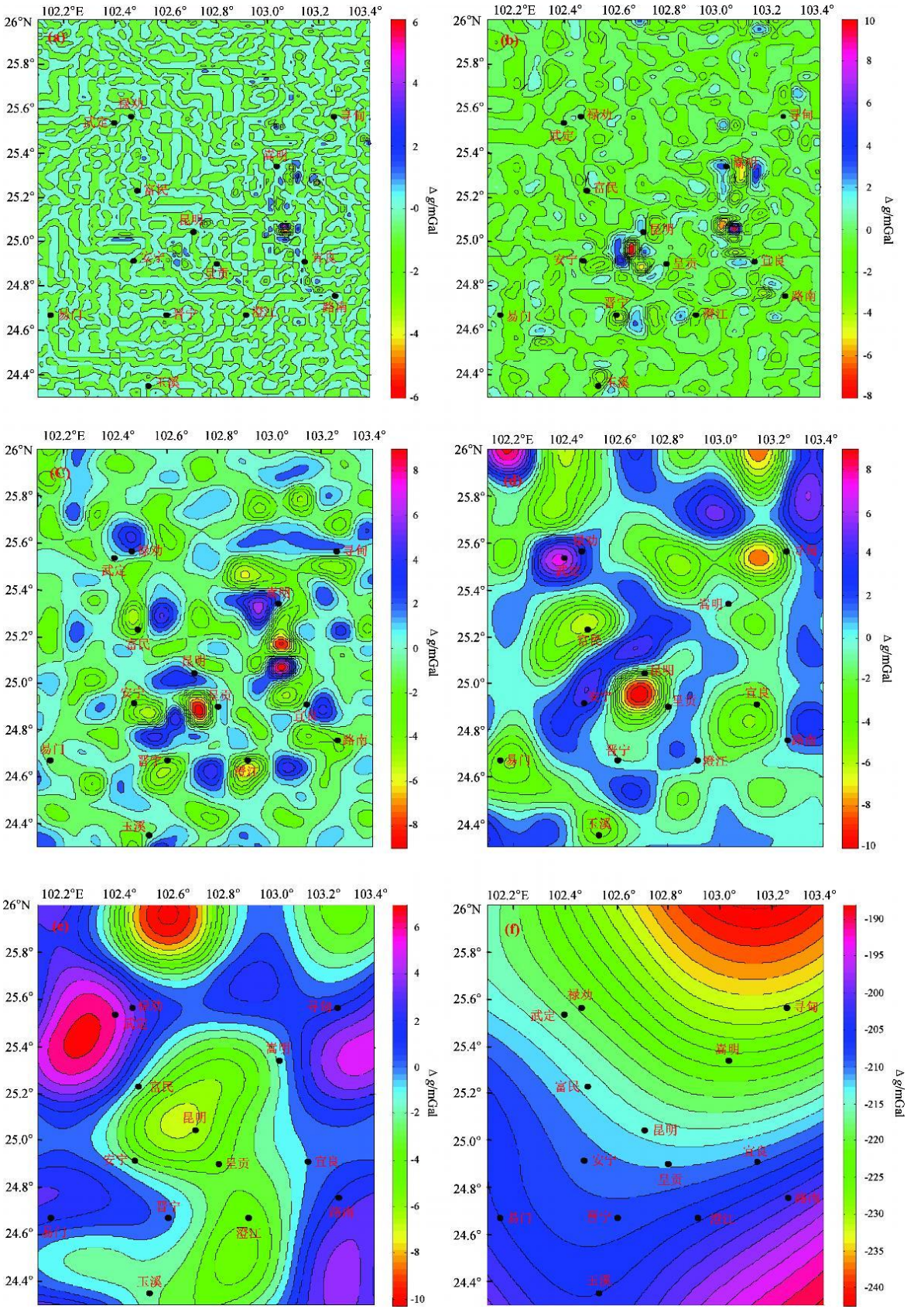


图 2　昆明地区重力异常多重分解的 3~7阶细节(a)~(e)和 7阶逼近(f)

Fig. 2　The 3rd to 7th wavelet order details (a) ~ (e) and the 7th order approximation of the gravity anomalies in Kunming area

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

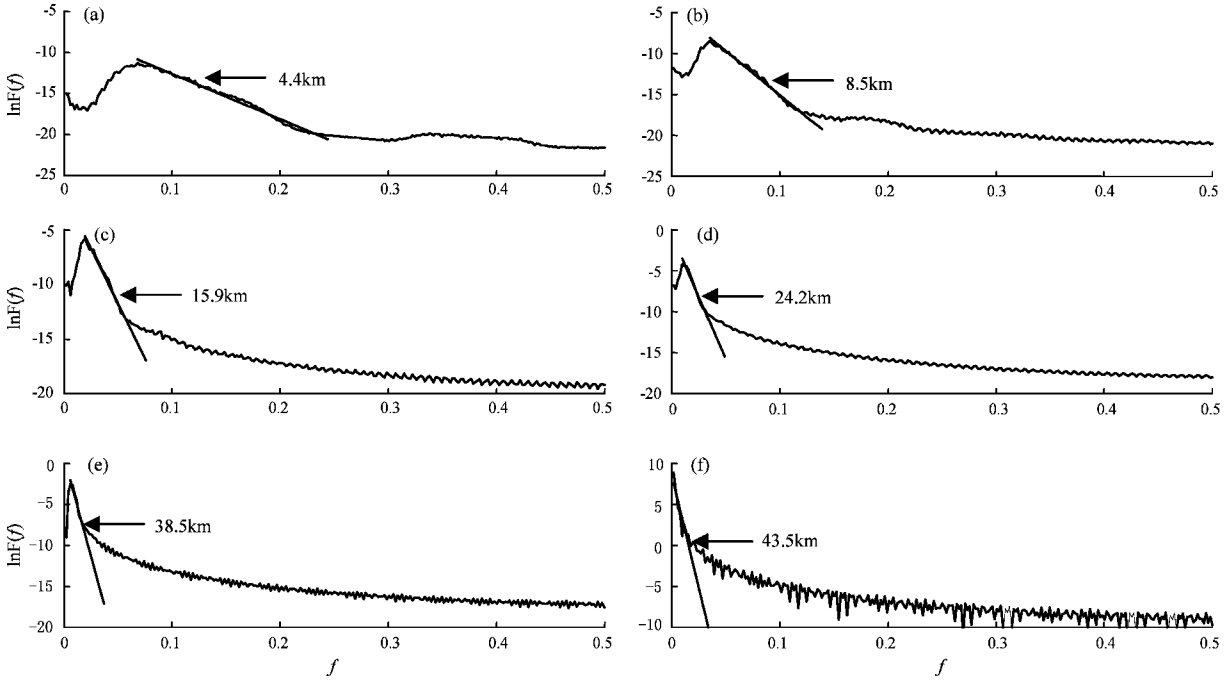


图 3 昆明地区重力异常小波多重分解 3~7阶细节(a)~(e)及7阶(f)逼近径向对数功率谱及估计深度

Fig. 3 Logarithm power spectra and depth estimates (a) ~ (e) The 3rd to 7th order wavelet details, (f) The 7th order approximation of the gravity anomalies in Kunming area

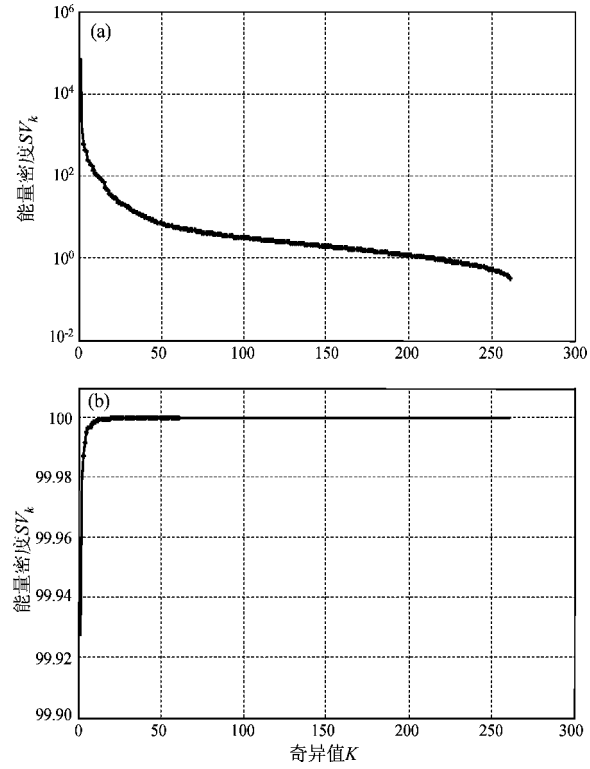


图 4 布格重力异常奇异值分解能量密度曲线 (a) 与积分能量贡献 (b) 随奇异值的变化

Fig. 4 Energy spectrum density (a) and accumulated energy (b) of singular-value number of the bouguer gravity anomalies

笔者运用奇异值分解方法对昆明地区布格重力异常值做数据处理，得到布格重力异常能量密度曲线 (图 4a) 和归一化能量积分曲线 (图 4b)。从图 4b中可以看出，初始的几个特征子空间就集中了原始信号的绝大部分能量，其中前 5个奇异值对应的能量就占总能量的 99.98% 还多。图 4a中，初始的几个奇异值号对应的能量密度以指数级迅速减小。李庆谋和刘少华 (2003) 指出：大的奇异值对应低频成分，描述区域异常场；小的奇异值对应高频成分，描述局部异常。依据上述分析，我们选取前 5个奇异值所占有的能量作为研究对象，并把 SV_5 以后对应的能量作为高频干扰舍去 (图 5)。

3.2 结果分析

(1) 图 2反映了分解后相应的重力异常的局部场。比较各阶小波细节图像可知，随着阶次的增大，重力异常值具有异常等值线圈闭加大、弱小异常消失和分布规律逐渐增强的趋势。在对应场源深度分别为 4.4 km、8.5 km的 3、4阶细节图 (图 2a、2b) 中，圈闭尺度较小、分布离散、杂乱无规律，笔者推测这是区内地壳表层展布密集的小断裂相互交切的结果。在场源深度为 15.9 km的 5阶细节图 (图 2c) 中，异常圈闭加大，呈现出一定的规律性，区内新生代盆地多与闭合椭圆形

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

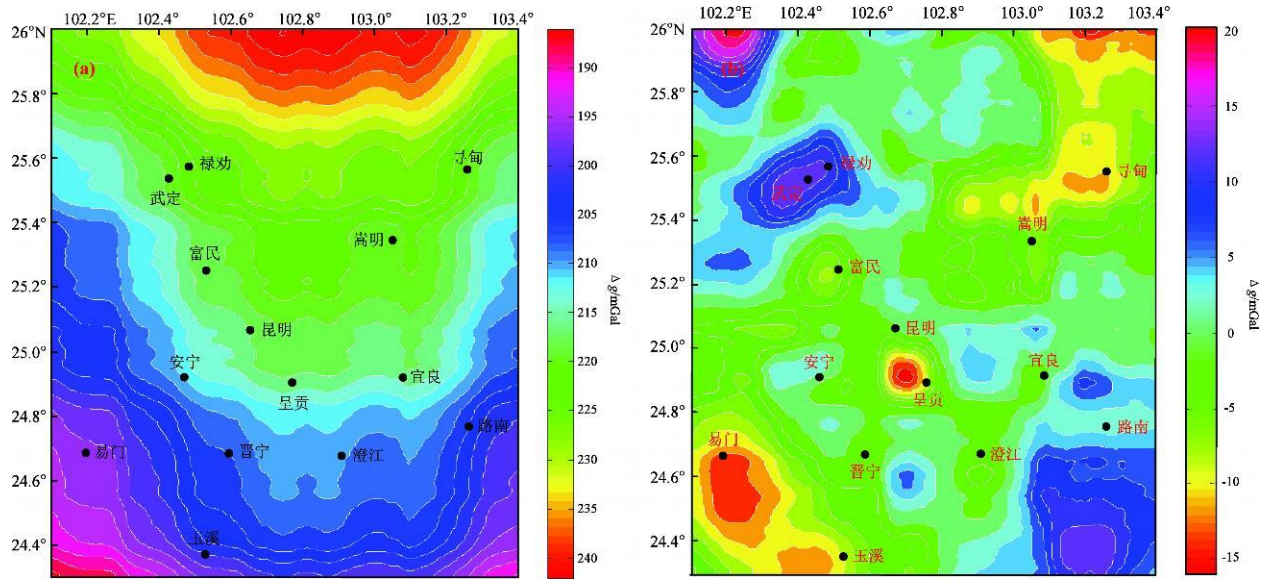


图 5　奇异值 SV_1 (a) 和 $SV_2 \sim SV_5$ (b) 分别对应的重力异常场

Fig. 5　Gravity anomalies fields corresponding to the singular-value number SV_1 (a) and $SV_2 \sim SV_5$ (b).

重力低异常区位置重叠，如昆明盆地处于南北、北西和北东 3个方向的叠加组合的重力低异常区；到了场源深度为 24.2 km 和 38.5 km 的 6、7阶图（图 2d、2e）中弱小异常区已经连片形成了规模较大异常区，其中昆明盆地 3个方向异常叠加现象已不复存在，形成了一个规模较大的椭圆圈闭。在 7阶细节图（图 2e）中明显存在“两高夹一低”的现象，该现象在图 5a中同样可以看到，即中间重力低区被东西两侧重力高区所夹持，两侧重力高区应为地体的隆起或抬升的反映，中间重力低区则与已知的东川—建水地幔凹陷相对应。在第一个奇异值和 7阶小波逼近所对应的图像（图 2f）中可以看到重力等值线值都呈由南向北逐渐减小的趋势，表明区内莫霍面总体向北倾斜变深。利用对数功率谱分析方法获得的 7阶小波逼近对应的平均深度为 43.5km，这一结果与胡家富等（2003）利用接收函数方法反演地壳 S波速度结构所得到的莫霍面深度分布趋势吻合，与阚荣举等（1986）用地震测深和重力异常拟合回归反演所得结果也基本一致。

（2）我们利用获得的处理结果及其它地质资料对区内主要断裂进行分析。在研究区的东西两侧存在显著的同型扭曲带（图 5a），推测为小江断裂和汤郎（罗茨）—易门断裂的反映。从 7阶小波细节（图 2e）和 $SV_2 \sim SV_5$ 对应的异常图（图 5b）中可见研究区内的小江断裂清晰可辨，呈现为明显的南北向高低异常转换带，只是在地表为东、西两支的断裂，这里只显现出西支。在 6阶细节图（图 2d）中则还表现为南北向异常带的两支平行展布，表明断裂两支仍然并行存在。根据功率谱分析的结果：6阶细节场源深度为 24.2 km，7阶细节场源深度为 38.5 km，说明小江断裂东支倾向西，在小江断裂西支的正下方与其交汇，交汇深度在 24.2~ 38.5 km 范围内，并合并为 1条断裂后向下延伸至上地幔。该结果与白志明和王椿镛（2004）的孟连—马龙地震剖面层析成像的结论基本吻合，但在推断交汇深度上略有出入。同为区域超壳断裂的汤郎（罗茨）—易门断裂却未能在低阶小波细节图像中很好地反映出来，而另据测深资料对云南地区上部地壳结构层析成像的研究也表明该断裂下方没有与之相应的明显速度异常，且在测深记录剖面图上该断裂位置附近没有明显的初至走时错断（白志明，王椿镛，2003），说明断裂不甚发育；阚荣举等（1992）的研究指出易门断裂的 P_g、P_2、P_4 震相跳跃，P_3^0 对比中断，为超壳断裂，且西浅东深，这与本文 5~ 7阶细节图（图 2c、2d、2e）显示的在断裂处的正负异常转换带随深度的增加由西向东迁移的现象吻合。通过对汤郎（罗茨）—易门断裂的分析，笔者认为该断裂为一浅部发育规模小、深部发育规模大的向东倾的超壳断裂。普渡河断裂带在结果图中都没有太明显的反映，可能是由于其相对规模小、延伸浅。

（3）研究区内有 3个南北向的地震带通过：

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

小江断裂强震带、易门断裂中强地震带及普渡河断裂中强地震带。上述 3个地震带多次发生 6级以上中强震，地震发生受活动断裂控制。从重力异常分解图中可以看到，地震多分布在重力异常正负转换界面或梯度带上。如区内最大地震——1833年嵩明 8.0级地震就发生在地震频度低、强度高的小江断裂带所反映的异常正负转换界面上，研究区内小江断裂段 6.8级地震重现周期为 108～225年，目前已平静 175年，自 1833年 8.0级地震后未发生过 6.5级以上地震 (钱晓东，秦嘉政，2008)。另有研究指出，小江断裂未来 100年有发生 7级以上地震的危险 (闵子群，1989)，所以小江断裂带是研究区内地震安全的一大隐患，应该引起重视。1995年武定 6.5级地震和 1985年禄劝 6.3级地震则发生在梯度带的异常转换部位。这些异常部位代表了地下深部不同岩性或构造的结合部，如小江断裂东、西两支的交汇部位，是地震孕育、地应力集中和能量释放的有利场所。而在重力异常变换较平缓的区域，地震活动较为平静，如异常表现不突出的普渡河断裂带上就未发生过强震。

(4) 综合上述分析，可以看出在研究区域中从东向西确实存在着 3个密度差异较为明显的地块，该现象在 7阶小波细节图像中尤为突出。据此，再参照其他资料 (云南省地矿局，1990)，我们做了研究区域的构造分区 (图 6)。

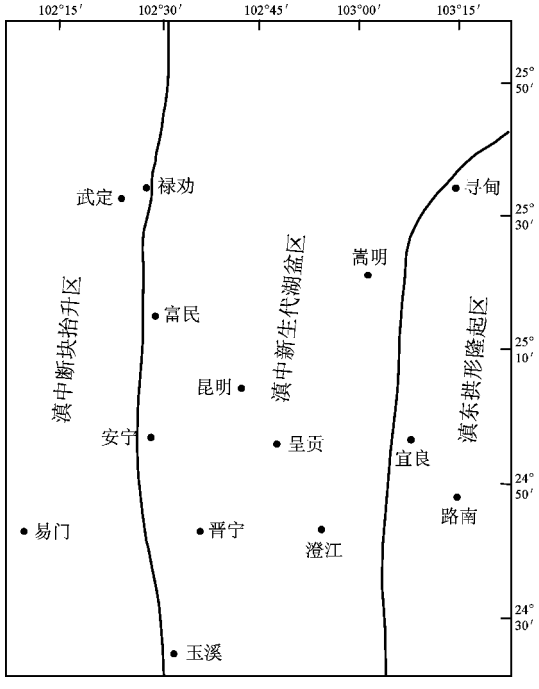


图 6 昆明地区构造分区略图

Fig.6 Structural division map of Kunming area

4 结语

我们分别运用小波多尺度分析和奇异值分解两种方法对昆明地区布格重力异常数据进行了处理，实现了位场的有效分解。我们利用所得结果，从地壳结构、深部地体分布、断裂体系和地震活动性等方面进行了初步分析。结果显示：区域地壳平均厚度约为 43.5 km，总体呈由南向北倾斜加深。区域东西两侧隆起抬升，中间凹陷；小江断裂东、西两支在深部发生交汇，相交深度在 24.2～38.5 km范围内。易门断裂为一深浅发育不均的超壳断裂。最后我们利用分析结果并参照其他地质资料做了研究区域构造分区。这些结果的获得证明了本文所选用方法的可行性。因受到所用数据精度的限制，我们得到的结果还不够精确，选用精度更高的数据进行处理应该可以得到更有价值的结果。

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.

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.

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.

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.

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.

阚荣举，韩源．1992. 云南遮放至马龙地学断面 [M]. 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 (5)：50－61.

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.

李平，王椿镛，许厚泽，等．2001. 地球物理反演中奇异值分解的若干问题探讨 [J]. 自然科学进展，11 (8)：891－896

李庆谋，刘少华．2003. GIS环境下地球物理信号的奇异值分解、多维分形特征与应用 [J]. 地球物理学进展，18 (1)：97－102.

李世雄，刘家琦．1994. 小波变换与反演数学基础 [M]. 北京：地质出版社.

闵子群．1989. 昆明地区的地震危险性问题 [J]. 地震研究，12 (2)：97－102.

钱晓东，秦嘉政．2008. 小江地震带及周边地区强震危险性分析 [J]. 地震研究，31 (4)：354－361.

杨文采．1997. 地球物理反演的理论与方法 [M]. 北京：地质出

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

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 [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 .
重力勘探资料解释手册编写组 . 1983. 重力勘探资料解释手册 [K]. 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: 674- 693.
Spector A. Grant F S. 1970. Statistical models for interpreting aeromagnetic data [J]. Geophysics, 35: 293- 302.

Processing of Anomalous Gravity Data in Kunming Area

PANG Wei-dong[1], YANG Run-hai[2], ZHANG Jian-guo[2]
(1. Geophysical Department, Yunnan University, Kunming 650091, Yunnan, China)
(2. Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract

Gravity data is the result of gravity field composition by all underground sources with different densities. In order to effectively divide the gravity anomaly, the wavelet multi-scale analysis and Singular-Value Decomposition (SVD) are applied to the decomposition of the gravity fields. Through the processing of the anomalous data of Bouguer gravity in Kunming area, we get the decomposition data. The data exposes the heterogeneity of the densities of geological bodies with different burial depths and different scales, so the basins are effectively delineated and the spatial extension of several major faults is showed. These two methods are effective for gravity data processing.

Key words: gravity field, wavelet multi-scale analysis, singular-value decomposition, Kunming area

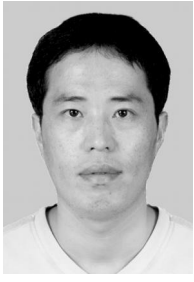
© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



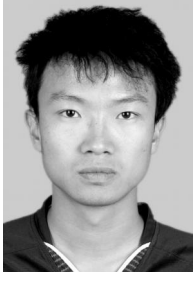
邓柏昌　华南理工大学物理系副教授。1982年 7月毕业于合肥工业大学地质系应用地球物理专业,获学士学位。1992年毕业于北京师范大学物理系物理教学专业,获硕士学位。主要从事电离层物理、地震电磁预报、电磁场理论及工科大学物理教学法等方面的研究工作。



蒋锋云　中国地震局第二监测中心工程师。2002年毕业于东华理工大学测绘系测绘工程专业,获理学学士学位。2006年毕业于中国地震局地震研究所固体地球物理专业,获理学硕士学位。主要从事地震预报与 GPS数据处理及分析等方面的工作。



武艳强　中国地震局地震预测研究所助理研究员。2003年天津大学计算机信息管理专业毕业,获学士学位;2008年中国地震局地震预测研究所固体地球物理学专业毕业,获理学硕士学位。主要从事大地测量数据处理与分析、孕震形变场识别等方面的研究工作。



李　俊　四川大学电子信息学院在读硕士研究生。2006年毕业于四川大学电气信息学院,获工学学士学位。主要从事网络多播技术的研究工作。



吕　坚　江西省地震局预报中心工程师。2007年毕业于中国科学技术大学地球物理专业,获学士学位。主要从事地震活动性、地震危险性和数字地震学研究工作。



武安绪　北京市地震局副研究员。1989年毕业于云南大学地球物理系。目前主要从事地震活动、地壳形变、数字波形、综合预报、爆炸识别、信号处理、软件开发等研究工作。



段虎荣　陕西铁路工程职业技术学院讲师。2002年 7月毕业于长安大学测量工程专业,获学士学位;2006年月 7月毕业于长安大学大地测量与工程测量学专业,获硕士学位;2008年 4月开始攻读长安大学大地测量与工程测量学博士学位。主要从事卫星大地测量研究工作。



张建国　河北省地震局邯郸地震中心台工程师。2006年毕业于中国科学技术大学地球与空间科学学院固体地球物理专业,获理学学士学位。2008年毕业于吉林大学地球探测科学与技术学院固体地球物理专业,获理学硕士学位。主要从事地震监测工作。



庞卫东　2006年毕业于昆明理工大学地球科学系资源勘查工程专业,获学士学位,现为云南大学地球物理系在读硕士研究生。主要从事地球物理数据处理、地震地质及地震活动性分析方面的研究工作。



赵　刚　中国地震局地壳应力研究所副研究员。2002年毕业于中国地震局地壳应力研究所固体地球物理专业,获理学硕士学位。主要从事前兆观测技术研究工作。

注:秦嘉政、付虹、张立、潘纪顺、王赟赟、杨国华、胡亚轩、周光全的简介已分别刊登在本刊 Vol.28, No.4; Vol.30, No.1; Vol.29, No.4; Vol.31, No.3; Vol.32, No.2; Vol.31, No.1; Vol.30, No.2; Vol.29, No.2。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net