文章编号:1671-8860(2010)10-1135-03　　**文献标志码**:A

应用小波变换确定琉球俯冲带的深部特征

宁津生[1,2]　王　伟[1,2]　汪海洪[1,2]　罗　佳[1,2]

(1　武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)
(2　武汉大学地球空间环境与大地测量教育部重点实验室,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘　要:综合应用离散小波变换和连续小波变换进行了干扰源分离和场源深度确定的模拟实验,发现通过小波变换可有效地确定场源深度。根据实测重力异常数据研究了琉球俯冲带的深部特征,推测其在东经122.5°线上地下 105 km 左右发生弯曲变为水平延伸。

关键词:小波变换;琉球俯冲带;多尺度边缘;重力异常
中图法分类号:P223; P227

琉球俯冲带地区的地震活动频繁,受到地学界的广泛关注。国内外许多学者利用地震地质和人工反射剖面等资料,采用地震层析成像、联合反演等技术研究了其构造特征,但是对于深部特征的认识还不明确[1-3]。本文应用小波变换方法,在模拟实验的基础上采用真实重力异常数据研究了琉球俯冲带的深部特征。

1　位场小波变换

Moreau 等根据泊松半群核构建了一种位场小波基,将小波变换和位场数据的向上延拓联系起来[4,5],如下式所示:

$$W[\Delta g_z](s,x) = sD_x\Delta g_{z+s} = 4Gs\int_{-\infty}^{+\infty}\mathrm{d}x'\int_{-\infty}^{0}\rho(x',z')\frac{(s-z')(x-x')\mathrm{d}z'}{[(x-x')^2+(s-z')^2]^2} \tag{1}$$

选用位场小波时,小波变换的尺度参数 s 可以理解为高度,小波变换的模极大值点表示的是尺度 s 处重力发生突变的位置[6,7]。小波多尺度边缘是不同延拓高度上重力发生突变的所有点连成的曲线,它反映了地球内部的质量异常分布。

当 $z=0$ 时,宽度为 $2b$、顶面和底面深度分别为 h 和 H 的二度直立柱体的重力异常的小波变换为:

$$W[\Delta g_0](s,x) = G\rho s\cdot \ln\frac{[(x+b)^2+(s+H)^2][(x-b)^2+(s+h)^2]}{[(x+b)^2+(s+h)^2][(x-b)^2+(s+H)^2]} \tag{2}$$

小波变换模极大值点的位置为:

$$x = \pm\sqrt{[2b^2-(s+H)^2-(s+h)^2+A]/6} \tag{3}$$

其中,

$$A = [[(s+H)^2+4b^2]^2+[(s+h)^2+4b^2]^2+14(s+H)^2(s+h)^2-16b^4]^{1/2}$$

在无干扰情况下,根据多尺度边缘可以估计场源的深度和形状,采用式(3)可以进一步反演获得宽度和厚度等场源信息。

2　模拟实验

2.1　无干扰场源的情况

$h=120$ km、$H=140$ km、$b=30$ km 的二度直立柱体,坐标原点位于柱体在地面投影的中心线上,剩余密度 $\rho=0.6$ g/cm^3,计算它在地面上 $-300\sim300$ km 产生的重力异常,采样间隔为 1 km,如图 1 所示。

采用一阶位场小波,将重力异常进行连续小波变换,得到各尺度上的模极大值点,即小波多尺度边缘,如图 2 中粗实线所示。将模极大值点进

收稿日期:2010-07-20。
项目来源:国家自然科学基金资助项目(40704003);武汉大学地球空间环境与大地测量教育部重点实验室开放研究基金资助项目(080201)。

行直线拟合，交点 M 的坐标（x，z）为（2.38，−120.4）。拟合直线方程分别为：

$$s_1 = -1.585\,6p - 116.666\,9 \tag{4}$$

$$s_2 = 1.581\,4p - 124.216\,1 \tag{5}$$

式中，s_1、s_2 是变换尺度；p 是位置参数。

将 M 点 z 坐标的绝对值作为场源 h 的初值，利用得到的尺度和模极大值点位置数组，根据式(3)采用非线性最小二乘法确定 h、H、b 三个参数的最优值分别为 120.5 km、137.6 km 和 33.4 km。实验发现，反演结果受到初值和选择尺度一定的影响。

2.2 有干扰场源的情况

当场源上方存在一个长 60 km、宽 10 km、右上角坐标为(40，−30)的薄板干扰时，如图 3 所示，将产生的重力异常进行多尺度边缘分析，采用直线拟合多尺度边缘，得到交点 M'' 的坐标为(42.7，−31.0)，与干扰源的右上角坐标值接近，如图 4 所示。

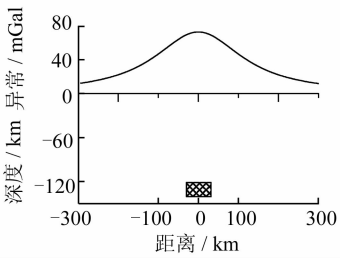

图 1 二度直立柱体的位置和重力异常

Fig. 1 Position and Gravity

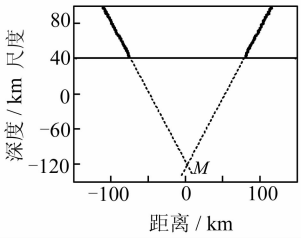

图 2 二度直立柱体重力异常的多尺度边缘

Fig. 2 Multiscale Edges

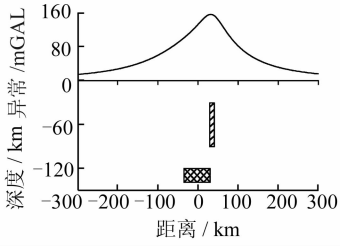

图 3 存在干扰的二度直立柱体的位置和重力异常

Fig. 3 Position and Gravity Anomaly

直接采用连续小波变换进行多尺度边缘分析不能得到正确的场源深度信息，因此，首先采用离散小波变换去除干扰[8]。根据采用的数据量，利用 db5 小波对得到的重力异常进行 8 层分解，在第 7 层上进行低频重构[9]，然后将重构获得的低频信息进行小波多尺度边缘分析，如图 5 所示。模极大值拟合线交点 M' 的坐标为（48.2，−134.0）。虽然在 x 坐标上有差距，但是 z 坐标值具有一定的可信度，认为场源深度在−134 km 左右。图 5 中 x 坐标值 300 附近的模极大值点主要是边缘效应引起的。

3 实际数据分析

琉球俯冲带是菲律宾板块俯冲到欧亚板块形成的，位于台湾岛东北部和日本南部之间，沿着琉球群岛分布[10]。根据卫星测高数据和船测重力等计算获得分辨率为 1″的自由空气重力异常数据，选取北纬 22°～26°、东经 122.5°线 AA' 上的数据进行分析，如图 6 所示。

俯冲带地区重力异常的影响因素比较复杂，首先采用 db5 小波进行离散小波变换，将重力异常进行 8 层分解。根据重力异常和地形等的关系以及采用的重力异常数据量，在第 6 层上进行低频重构[8]。将重构后的重力异常进行位场连续小波变换，选择的尺度是 1～60，得到的多尺度边缘如图 7 所示。采用直线拟合两组模极大值点，得到交点 N 的 z 坐标为−100.8 km。

选择不同的尺度进行小波连续变换，得到的深度在−100～−110 km范围内，推测俯冲板块在地下 105 km 左右发生弯曲变为水平向延伸。这种推论与地震资料的推断以及琉球俯冲带南部

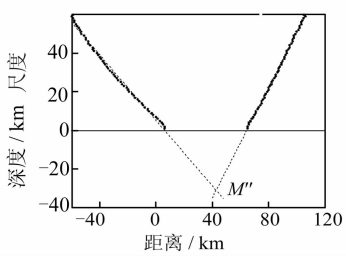

图 4 存在干扰的重力异常的多尺度边缘

Fig. 4 Multiscale Edges of Gravity Anomaly When Having Causative Body

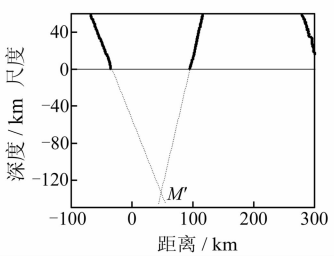

图 5 小波重构后的重力异常的多尺度边缘

Fig. 5 Multiscale Edges of Gravity Anomaly After Wavelet Reconstruction

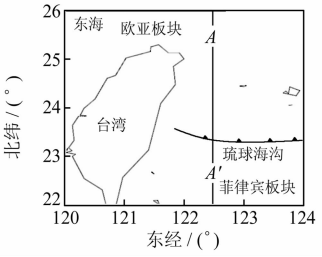

图 6 琉球海沟俯冲带示意图

Fig. 6 Sketch of Ryukyu Trench Subduction Zone

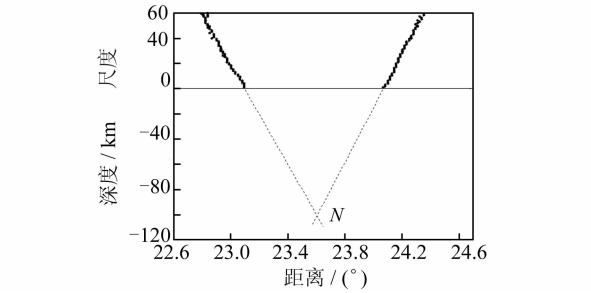

图 7　小波重构后俯冲带重力异常的多尺度边缘

Fig. 7　Multiscale Edges of Gravity Anomaly in Subduction Zone After Wavelet Reconstruction

的俯冲力较弱、俯冲板块容易发生弯曲等相对一致[2,3,10,11]。

实验发现,采用离散小波多尺度分解重构去除干扰源的影响,然后根据位场小波变换的多尺度边缘确定场源深度特征有一定的可行性。俯冲带的形状和密度等信息需要进一步建立相关的组合模型进行研究。

参　考　文　献

[1] 臧绍先,宁杰远,许立忠. 琉球岛弧地区的地震分布、Benioff 带形态及应力状态[J]. 地震学报,1989,11(2):113-123

[2] Font Y, Lallemand S. Subducting Oceanic High Causes Compressional Faulting in Southearnmost Ryukyu Forearc as Revealed by Hypocentral Determinations of Earthquakes and Reflection/Refraction Seismic Data [J]. Tectonophysics, 2009, 466:255-267

[3] Chou H C, Kuo B Y, Hung S H, et al. The Taiwan-Ryukyu Subduction-collision Complex: Folding of a Viscoelastic Slab and the Double Seismic Zone[J]. J Geophys Res, 2006, 111: 723-728

[4] Moreau F, Gibert D. Identification of Sources of Potential Fields with the Continuous Wavelet Transform: Basic Theory [J]. J Geophys Res, 1999, 104(B3): 5 003-5 013

[5] Hornby P, Boschetti F, Horowitz F G. Analysis of Potential Field Data in the Wavelet Domain [J]. Geophys J Int, 1999, 137(1): 175-196

[6] 汪海洪,宁津生,罗志才,等. 基于多尺度边缘的重力异常分离方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2009,34(1):109-112

[7] Mallat S, Zhong S. Characterization of Signals from Multiscale Edges[J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(7): 710-732

[8] 杨文采,施志群,侯遵泽,等. 离散小波变换与重力异常多重分解[J]. 地球物理学报,2001,44(4):534-542

[9] Ingrid D. 小波十讲[M]. 李建平,杨万年译. 北京:国防工业出版社,2004

[10] 陈汝勤,林斐然. 台湾附近之海洋地质[M]. 台北:台湾地质调查所,1990

[11] 高金耀,陈美,金翔龙,等. 由卫星测高数据研究琉球沟弧系的俯冲构造特点[C]. 中国地球物理学会第 20 届年会,武汉,2004

第一作者简介:宁津生,教授,博士,博士生导师,中国工程院院士。现主要从事物理大地测量研究。代表成果:我国地球重力场模型研制和大地水准面的精化等。

E-mail: jshning@sgg.whu.edu.cn

Determine Depth Character of Ryukyu Subduction Zone by Wavelet Transform

NING Jinsheng[1,2]　*WANG Wei*[1,2]　*WANG Haihong*[1,2]　*LUO Jia*[1,2]

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: We apply discrete wavelet transform and continuous wavelet transform to do some simulation experiments of separating causative body and determining the depth of field source, and find that wavelet transform is effective to identify depth of source. What's more, we have researched depth character of the Ryukyu subduction zone based on real gravity anomaly data, and presume that the subduction zone curves to horizontal at about 105km underground at 122.5 degrees east longitude line.

Key words: wavelet transform; Ryukyu subduction zone; multiscale edge; gravity anomaly

About the first author: NING Jinsheng, professor, Ph.D, Ph.D supervisor, Academician of Chinese Academy of Engineering. His interested field is physical geodesy. His typical achievements are the development of the earth gravity field model and geoid refining of China, etc.

E-mail: jshning@sgg.whu.edu.cn