

三峡重庆库区深部地球 物理特征与断裂构造

胡建平^{1,3}, 赵军龙², 汪文秉¹, 李娜²

(1. 西安交通大学 电子与信息工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 长安大学 地质工程与测绘
工程学院, 陕西 西安 710054; 3. 天津城市建设学院 计算机科学与技术系, 天津 300384)

[摘要] 为了深入研究三峡重庆库区岩石圈动力学特征及其对断裂构造活动的控制和影响, 并为之提供基础资料, 为三峡重庆库区地震、地质灾害的监测与防治提供基础依据, 在已有地球物理资料的基础上, 从综合地球物理研究角度出发, 通过实测地震测线资料的再解释, 采用新的处理技术方法, 对本区的东西向主剖面和南北向支测线的地震测深资料进行二维射线追踪处理、 P_g 波成像; 选用场分离技术、位移数字成像技术重新处理了重力和航磁资料, 通过联合反演来建立深部二维构造剖面, 对剖面所揭示的基底构造特征和地壳结构特征、主要断裂构造特征以及莫霍面的起伏特征进行了精细分析和细致研究, 从地球物理平面场特征出发建立了岩石圈构造三维框架。研究结果表明, 这样的研究思路准确、方法得当, 结论可靠; 沿该剖面, 把可解译的断裂分为III级: I级为超岩石圈断裂; II级为壳断裂; III级为盖层断裂。依据地球物理特征, 准确揭示了库区的断裂构造特征, 达到了预期效果。

[关键词] 构造特征; 地震; 重力; 航磁; 射线追踪; 平面场; 断裂; 三峡; 长江; 重庆库区

[中图分类号] P631 [文献标识码] A [文章编号] 1672-6561(2005)03-0049-06

[作者简介] 胡建平(1958-), 男, 陕西西洲人, 天津城市建设学院教授, 西安交通大学博士研究生, 从事计算机科学与技术和地球物理综合研究。

三峡重庆库区位于东经 $101^{\circ} \sim 111^{\circ}$, 北纬 $27^{\circ} \sim 33^{\circ}$ 。库区在中国南北地震带中段的东部边缘, 处于大陆岩石圈东西地壳差异较大的边缘过渡带内。一级构造单元隶属扬子准地台和秦岭地槽褶皱系; 二级构造单元为四川台坳、上扬子地台和北大巴山冒地槽^[1]。

中国区域重磁场以南北带为界分东西两部分^[2,3]。南北带是一条巨型的重力梯度带, 宽约 150 km, 布格重力异常值从东至西降低 $1 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 以上。三峡重庆库区横越该南北带, 重力均衡异常显著, 较中国东部低。本区地壳呈东薄西厚, 北西西走向。大断裂处的重力梯度展布显著。库区东、西部构造分野明显, 其分界线大致在北川—汶川—康定—小金河, 此线以东为扬子准地台, 以西为松潘—甘孜褶皱系及三江褶皱系。扬子准地台的基底由两

套岩性、原岩建造和时代都不相同的岩群组成^[1,4]。

多年来, 许多单位在本区进行多方法的地球物理探测工作, 特别是横跨本区的宽角反射与折射地震剖析为研究其深部构造提供了依据。现有地球物理资料表明, 四川地壳具有成层性和不均一性的多层结构特点。莫霍面深度由东向西逐渐变深^[5], 涵盖的四川省和重庆市现今的构造地貌与深部莫霍面的起伏呈镜像关系。

1 地球物理资料处理方法和解释

1.1 地震资料处理

1.1.1 原始数据说明

1986~1988年, 中国地质科学院完成的黑水—邵阳深地震测深剖面, 以大致北西—南东方向穿越重庆市。该剖面与南北带成近 45° 斜交, 北起四川阿坝, 经绵阳、重庆、武隆、秀山, 止于湖南邵阳, 剖面长约 1 000 km。在主剖面上有 4 次爆破, 炮点间距 70~120 km。支测线有 2 次爆破, 相距约 240

[收稿日期] 2004 06 13

[基金项目] 国家科技攻关计划项目(2001B091A37)

km(图 1)。研究成果见文献[6]。

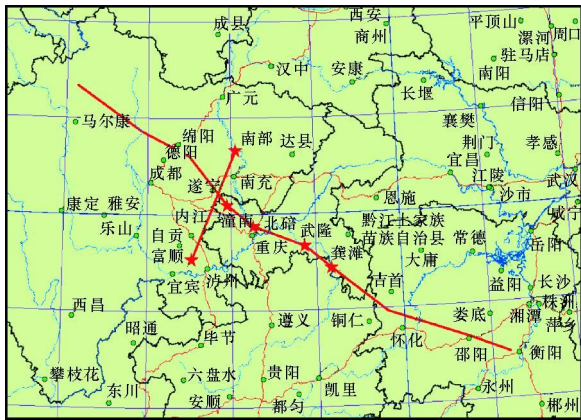


图 1 三峡重庆库区深地震测深剖面测线布置
Fig 1 Work route of Yangtse Gorges Chongqing Reservoir area

由于当时技术条件所限,主要采用中法合作获得的 DANTZ 计算程序,该程序突出界面的上下错动和界面产状,但不能较好地反映各层速度的横向变化。处理结果如图 2。

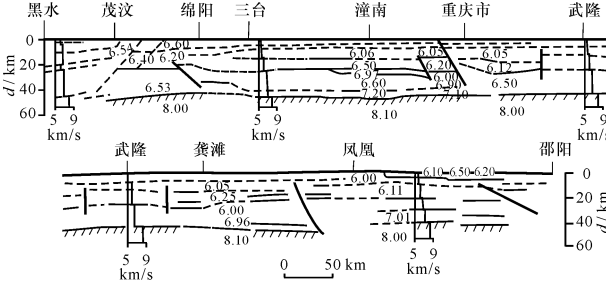


图 2 黑水—邵阳深地震测深解释剖面
Fig 2 Deep seismic interpretation section of Heishui Shaoyang
1.1.2 资料处理方法

研究中采用二维射线追踪软件包 SEIS81, SEIS83。SEIS8X 程序包是以 Cerveny 射线追踪算法为基础的程序包^[7]。该程序适用在含有弯曲界面、层状结构、尖灭、断面和孤立体的二维横向不均匀介质中进行两点间的射线追踪和理论地震图的计算。两点射线追踪用试射法^[8]进行,振幅用标准射线公式计算。直达波、一次反射的 P 波、S 波及反射点转换波的振幅是通过一些程序可识别的控制参数来自动确定;把折射波作为具有复合射线段反射波的特殊情况来考虑;射线的几何扩散用改进的欧拉方法求解一阶线性常微分方程组。

动力学射线追踪方程^[7]为

$$s \frac{d\mathbf{p}}{ds} + \frac{d\mathbf{s}}{ds} = \nabla s \quad (1)$$

式中: s 为慢度; \mathbf{s} 为慢度矢量; $\mathbf{p} = \nabla \varphi$ 为沿波阵面法线方向的单位矢量。模型界面用 3 次样条插值来

逼近,对模型都要求每个界面横穿模型左右边界,允许边界有重合、虚设、角点等构造特征,用 Runge Kutta 数值方法计算射线,界面的角点、尖灭等构造用特定识别码描述。采用 3 次样条插值逼近的方法,可以使二维地壳结构模型具有弯曲的界面,在横向和纵向不均匀的介质中进行两点(爆破点和接收点)之间的射线追踪。

具体资料处理时,在反演求得各反射界面深度和界面上覆介质的平均速度后,以其为基础建立二维射线追踪的初始模型,然后采用 SEIS81, SEIS83 程序进行计算。追踪时,地震波从震源出发,穿入地壳模型,在指定的反射界面上反射到指定的观测点,并绘出射线轨迹和波组振幅来,给出波组的运行时间,便于与实际走时和振幅进行对比。最后,用速度线构制出二维等值线速度结构模型^[9,10]。

1.1.3 资料处理成果
(1)东西向主测线 P_g 震相拟合和剖面的地壳结构、基底构造特征。研究对主测线潼南、龚滩 2 炮记录的 P_g 震相进行了拟合计算,理论值与实测值达到最佳拟合,射线分布及潼南、龚滩 2 炮的模型计算与实测走时的拟合结果如图 3。

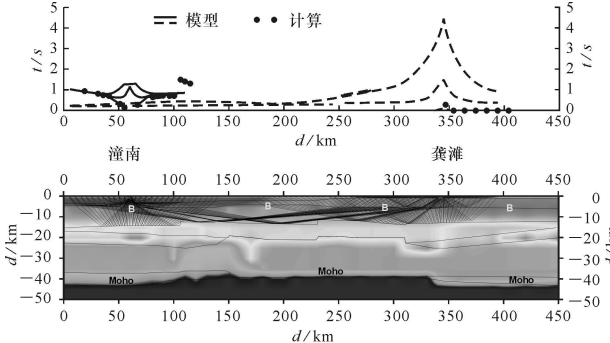


图 3 潼南炮和龚滩炮的 P_g 震相拟合
Fig. 3 Yangtse Gorges Chongqing Reservoir area Tongnan and Gongtan explosion P_g imitating

重新计算表明,主测线潼南—秀山段(以下简称东西向剖面)以潼南炮点(S_3)以西 60 km 为剖面横坐标起算(0 点),剖面长 450 km。按地壳结构特点分为:西段(北碚以西)属于四川盆地,中段为川东褶皱带,其间以华蓥山断裂(图 4, F_2)为界。东段为川黔断褶带,与中段的分界位于武隆、龚滩之间,即彭水断裂(图 4, F_4)。东段至松桃断裂(图 4, F_5)截止。

地壳结构总体上呈似层状结构,横向看中段结构简单,东西两段复杂。垂向大致可两分,上地壳包括沉积盖层、结晶基底和上地壳底部的低速层,厚度

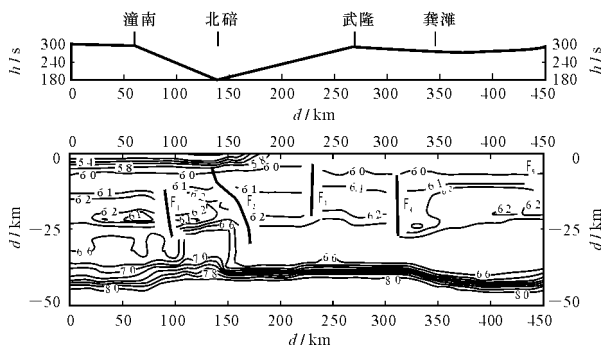


图 4 三峡重庆库区潼南—龚滩地壳结构
Fig. 4 Yangtze Gorges Chongqing Reservoir
area Tongnan Gongtan lithosphere structure

24 km 左右。下地壳从低速层下界面到 Moho 面, 厚度 16~20 km。从横向看西段是上地壳稳定, 下地壳活动; 中段是整个地壳都稳定; 东段是上下地壳都有一定程度的变形。从西向东, P_g 震相逐渐不发育, 并被折射波所代替, 这是由于潼南所在四川盆地东部边缘有较厚沉积盖层, 而向东到武隆、龚滩一带结晶基底几乎裸露地表的地震地质条件决定的。

(2)南北向支测线 P_g 震相拟合和剖面的地壳结构、基底构造特征。对支测线富顺、南部 2 炮记录的 P_g 震相进行了拟合计算, 理论值与实测值达到最佳拟合, 射线分布及富顺炮的走时拟合情形如图 5。

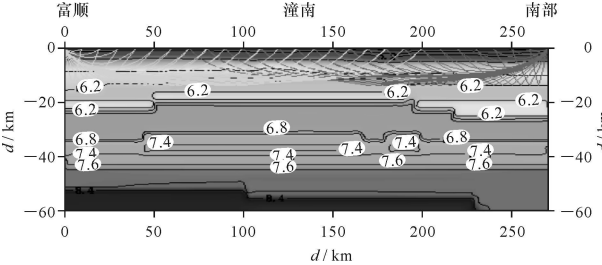


图 5 富顺、南部支测线 P_g 震相射线追踪拟合
Fig. 5 Yangtze Gorges Chongqing Reservoir area
Fushun Nanbu explosion P_g imitating

地壳结构的主要特点是在剖面中间部分, 结晶基底以下地壳向上隆起, 基底以上部分产状平缓。地壳内含有低速层, Moho 面 44~48 km 总体南浅北深, Moho 面之上存在 P 波速度为 $7.4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的壳幔过渡层。支测线地壳结构与东西向主剖面潼南段的地壳结构特征一致(图 6)。对支测线富顺、南部 2 炮记录的 P_g 震相进行了拟合计算, 理论值与实测值达到最佳拟合。

1.2 重磁资料处理

1.2.1 原始数据说明

重庆地区重力数据采自 1989 年原地质矿产部

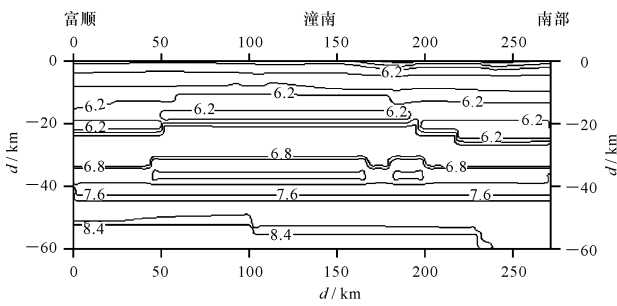


图 6 三峡重庆库区富顺—南部地壳结构
Fig. 6 Yangtze Gorges Chongqing Reservoir
area Fushun Nanbu lithosphere structure

地球物理地球化学勘探研究所和区域重力地质调查方法技术中心编制的 1:250 万布格重力异常图。航磁 ΔT 数据采自 1988 年原地质矿产部航空物探遥感中心编制的 1:100 万航磁 ΔT 图。

1.2.2 资料处理方法和成果

对布格重力异常(图 7)进行了向上延拓 20 km, 40 km, 80 km, 并且对其进行垂向一阶导数、二阶导数和水平梯度模计算。重力水平梯度模为

$$|\nabla g| = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta g}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta g}{\partial y}\right)^2} \quad (2)$$

然后在重庆地区重力水平梯度模图上, 沿异常长轴方向的连线, 并参考重力垂向二阶导数的零值线, 绘制了重力构造线, 将重力构造线和磁构造线合在一起形成重磁构造线(见图 9)。

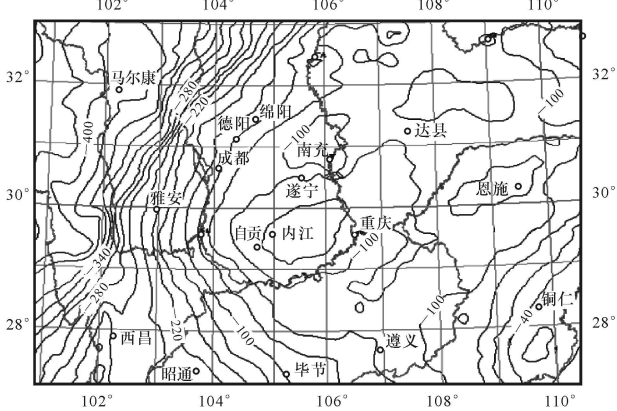


图 7 三峡重庆库区布格重力异常
Fig. 7 Yangtze Gorges Chongqing
Reservoir area gravity anomaly

对重庆地区航磁 ΔT 异常化到地磁极的计算参数为:地磁倾角 45.54° , 地磁偏角 2.34° (西)(图 8)。化极后原来在正磁异常北面的负异常明显减弱, 而在正磁异常南面的负异常有所增强。

为分析引起中、长波长异常的磁性体的规模以及在地下大体的位置, 对化极后的磁异常向上延拓

40 km, 80 km。为突出短波长异常在平面的分布特征,用梯形滤波器提取波长 ≤ 150 km 的局部磁异常,并根据局部磁异常图绘制了磁构造线(图 9)。

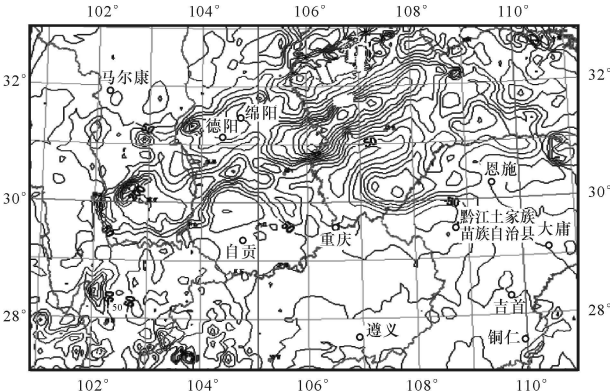
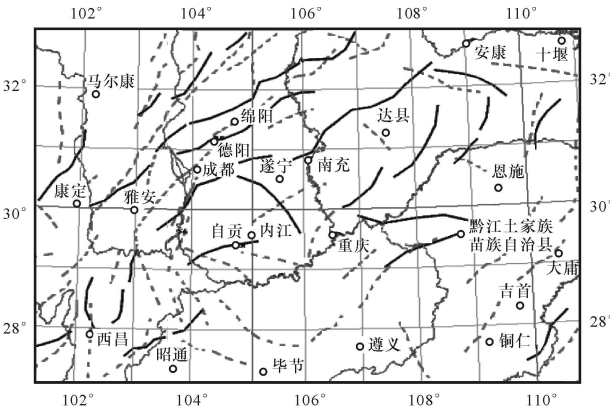


图 8 三峡重庆库区航磁 ΔT 异常(化极后)

Fig. 8 Yangtse Gorges Chongqing Reservoir area magnetism anomaly (converted)



虚线为重力构造线 实线为航磁构造线

图 9 三峡重庆库区重磁构造线

Fig. 9 Yangtse Gorges Chongqing Reservoir area gravity and magnetism structure line

从图 7 可以看出,本区布格重力异常值均为负值,其变化范围为 $(-460 \sim 0) \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,总体自西向东逐渐升高。在工区西部和东部均存在重力梯级带,西部规模很大。在重庆至内江附近存在近等轴状重力高,东西方向延伸约 180 km,南北方向延伸约 120 km,向上延拓 80 km 后上述异常特征仍然存在,说明引起重力异常的密度不均匀体的规模很大。

化极后的航磁 ΔT 异常(图 8)表明,本区东自康定,经雅安、南充至安康以南,北纬 29° 以北,东经 $112^{\circ} \sim 109^{\circ}$ 之间有一强磁正异常。异常走向为北北东向,长约 700 km,平均宽约 120 km,在南充附近异常强度达 450 nT。另外,在恩施以西,东经 $107^{\circ} \sim 109^{\circ}$,北纬 $29^{\circ}30' \sim 30^{\circ}30'$ 之间也存在较大强度

的正异常。在正异常北部伴生有负异常。将磁异常化极并向上延拓 80 km,上述主体异常强度仍达 300 nT。显然,引起该异常磁性体的磁性较强,并有一定的规模。

图 9 可看出,重力构造线围绕四川盆地分布。在康定雅安一带,重力构造线分成 3 条即:经西昌以西向南伸展;转向南东方向;沿小金河向西南方向伸展。磁构造线分布,显示本区上地壳中构造带的展布特征。在库区西部,自西昌经雅安、德阳、绵阳至广元的磁构造线与龙门山断裂有关。自乐山经南充至至安康以南的磁构造线可能反映了在四川盆地中存在隐伏构造带。在重庆以北 50 km 处,向北北东方向伸展的磁构造线可能是沿华蓥山的构造带。

2 对断裂构造变形踪迹的解译

通过实测地震测线成果的再解释以及人机交换、重磁震联合反演^[11]来建立深部二维构造剖面,然后根据地球物理场平面特征来推广建立三维岩石圈构造模型。研究所得的三峡重庆库区的重庆(阿坝—邵阳)地学断面中包括布格重力异常图、航空磁力异常图、岩石圈地温及低阻层剖面图、地壳速度剖面、岩石圈解释剖面图。

2.1 二维构造剖面的精细分析

将剖面分为 3 段:西段位于四川盆地东缘(安县以西),横向上地壳较稳定,下地壳活动,莫霍面抬升梯度较大,深度变化 60~45 km;中段位于安县—武隆之间,除断裂带处外,地壳上下部分都较稳定,莫霍面深度 44~40 km;东段位于武隆—邵阳之间,上下地壳都有一定程度变形,莫霍面在秀山处有下凹特征,但梯度不大,深度 44~36 km。在西段,莫霍面之上有 $7.1 \sim 7.4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的壳幔过渡层,贯穿整个西段;中段缺失该层;在东段该层又出现,但速度值减小为 $6.96 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$,视该层为下地壳的一部分。

沿该剖面,可以把可解译的断裂分为 II 级: I 级为超岩石圈断裂,其切深大,至上地幔; II 级为壳断裂,展布于地壳中; II 级为盖层断裂(含基底断裂)。主要断裂概述如下:

(1) 茂汶 I 级断裂带、北川—映秀 I 级断裂带以及江油—灌县 II 级断裂带。在图 7 中,重力异常等值线紧密展布,其延伸方向与断裂近乎垂直,航磁异常图上也呈现一定的梯度分布特征,低温等值线形成上扬拐点。地壳速度剖面上,地层水平展布被

破坏。这3条断裂带合称龙门山断裂带,该断裂带走向北东,纵向切深大,深至上地幔。

(2)巴中-龙泉山Ⅱ级断裂带。图7中,安县—三台间有较致密的梯度带,沿北西南东方向重力异常值升高;航空磁力异常在该区段呈较明显地磁异常,即从安县—三台,磁异常从负值逐渐变为零值;在速度剖面上,浅部盖层水平性好,深部岩层水平性破坏显著,反映了在该区段的地壳中展布有巴中-龙泉山Ⅱ级断裂带。结合布格重力异常图和速度剖面图可看出,该断裂带南东侧川中台拱上呈宽缓变化的巨大航磁异常,速度层水平性好,反映其基底为古老结晶基底;而北西侧的川西、川北台陷上为降低的负异常带,基底应为塑性褶皱基底。

(3)华蓥山Ⅱ级断裂带。图7中,梯度带较显著。在图8中,该区段呈弱磁性。速度剖面上,速度线在距重庆较近处西北侧有断裂反映,表明从遂宁向东南方向沿剖面地层展布基本稳定,但距重庆45 km处,有大断裂存在。该断裂为华蓥山Ⅱ级断裂带,其切深约21 km,断裂带两侧地层差异显著。华蓥山Ⅱ级断裂是其北西侧川中台幔与南东侧隔挡式褶皱的分界线^[1]。

(4)长寿Ⅱ级断裂、七曜山Ⅱ级断裂带。长寿Ⅱ级断裂切深较浅,属于盖层断裂。在重庆—武隆段靠近武隆处展布有沿北北东向的七曜山Ⅱ级断裂带。在地壳速度剖面上该断裂带反映显著,切深达22 km左右。七曜山Ⅱ级断裂带两侧构造形态差异明显,其西北侧为典型的隔挡式褶皱,南东侧为背、向斜近等宽的城垛状褶皱。

(5)大庸-松桃-花垣Ⅰ级断裂带。图7中,秀山凤凰间有较致密的梯度带,沿北西南东方向重力异常值升高,航空磁力异常在该区段呈较高磁异常。在地壳速度剖面上,浅部盖层水平性好,深部岩层水平性破坏显著,反映了在该区段地壳中展布有大庸-松桃-花垣Ⅰ级断裂带^[12]。断裂带切深大,约48 km。

(6)安化-溆浦-靖县Ⅰ级断裂带、溆浦-五团Ⅱ级断裂带。图7中对此有一定反映,地壳速度剖面对此反映显著。该断裂带是华夏式第三隆起带和第二沉降带的重要分界^[12,13]。

2.2 地球物理平面场对构造变形踪迹的揭示

2.2.1 重力异常的地质解释

布格重力异常梯级带几乎围绕四川盆地分布。从布格重力异常水平梯度模与重力构造线可看出,

在四川盆地西部宽达200 km甚至更宽的重力梯级带内部细致的构造特征。在盆地西部重力水平梯度模异常沿龙门山断裂带呈北东向分布。在东经 103° 北纬 31° 附近,存在向北延伸的一个分支。向南,在康定和雅安一带,重力构造线分成3条即:经西昌以西向南伸展;转向南东方向;沿小金河向西南方向延伸。经西昌以西向南伸展的重力水平梯度模异常窄且强度大;而其他两支都较宽,向南东方向伸展的重力水平梯度模异常宽达200 km,由数个规模及强度小的局部水平梯度模异常组成,其位置大体在四川盆地西南缘。

四川盆地东部,重力异常梯级带比西部的窄,宽约100 km,是由数个规模及强度小的局部水平梯度模异常组成,强度大的水平梯度模异常,大约沿铜仁、吉首、大庸,一直向北延伸到东经 111° 北纬 $31^{\circ}20'$ 附近。该异常带大体在四川盆地东部边缘位置。在四川盆地东北部,城口至房县存在北北西南东东向的重力异常梯级带,其规模较小,应为大巴山弧。

2.2.2 航磁异常的地质解释

磁场特征分析表明,本区中、偏北部的上延80 km仍然有很大规模,且强度很大的磁异常;其他部分为局部磁异常。

全球卫星磁异常图与地质构造对比结果表明,一般地盾、地台、俯冲带以及海底高原与正异常对应,因此,推测四川盆地强磁异常为古老的太古代或下元古代的结晶基底引起,估计其赋存深度约为30 km以下的下地壳中。

在重庆附近的局部磁异常,反映了在中生代沉积层下存在火成岩体。从盆地四周出露的火成岩体与磁异常的对应关系看,很可能是花岗岩或闪长岩侵入体。在本区东南西南部的局部磁异常与出露或隐伏的花岗岩、闪长岩侵入体以及震旦纪的岩石有关。从延拓的重庆地区布格重力异常图上可看出,随延拓高度的变化,主要重磁梯度带依然显著,而四川盆地中的几个次级重磁梯度带弱化或者消失,说明次级重磁梯度带揭示的大断裂和基底断裂的断切程度和范围。结合垂向一阶导数和二阶导数图也进一步说明上述重磁梯度带的显著性和稳定性。

3 结语

(1)据主剖面射线追踪研究结果,结合本区最新处理获得的布格重力异常图和航磁 ΔT 异常(化极)

