doi:10.3799/dqkx.2012.S1.022

# 三峡地区中上地壳密度结构

### 张 毅,陈 超\*,梁 青,王林松,杜劲松,刘圣博

中国地质大学地球物理与空间信息学院,湖北武汉 430074

摘要: 三峡地区处于扬子板块北缘,北部与秦岭造山带相连,西部和四川盆地相邻,东北及东南部分别为华北板块及华南褶皱带,其在历史上各种地质构造运动频繁、复杂.本文利用三维重力成像方法,得到了三峡地区中上地壳三维密度分布,结果显示黄陵背斜为高密度异常区域,其最深处大约 15 km;黄陵背斜周围的主要区域性断裂构造呈菱形分布,这些断裂深度大约 10~15 km,一般切割至中地壳上部,控制着该区域的构造演化过程以及大部分的地震分布;黄陵背斜中部沿长江一线有大面积低密度地层分布,推测主要为低密度物质沿雾渡河断裂侵入有关.此外,西部的秭归盆地为低密度沉积区域,其沉积厚度明显尔均,自巴东向秭归方向沉积厚度明显加深.

关键词:三峡;黄陵背斜;秭归盆地;三维密度结构;断裂;沉积学;地球物理.

**中图分类号:** P312.1 **文章编号:** 1000-2383(2012)S1-0213-10 **收稿日期:** 2012-01-02

### Density Structure of Upper and Middle Crust in Three Gorges Reservoir Area

ZHANG Yi, CHEN Chao\*, LIANG Qing, WANG Lin-song, DU Jin-song, LIU Sheng-bo

Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The Three Gorges located in northern margin of Yangtze plate, is surrounded by four different geotectonic units: Qinling orogenic belt in north, Sichuan basin in west, North China plate in northeast and South China fold belt in southeast. In history, there are so many kinds of tectonic movements occurred. Utilizing Bouguer gravity anomaly in the Three Gorges area, and based on the technology of 3D gravity inversion, the 3D density structure of the upper and middle crust of Three Gorges reservoir area is obtained. The results show that Huangling anticline is a high density area, with a maximum depth of about 15 km. The distribution of regional faults around the Huangling anticline is lozenge-shaped, and those faults cut to the top of the middle crust with a depth of about 10-15 km, controlling the tectonic evolution and earthquake distributions in this area. Along Yangtze River, there is a low density stratum in the middle of Huangling anticline, which presumably is the result of the low density materials intruded along Wuduhe fault. Furthermore, Zigui basin in west has low density values, and its deposit stratum is nonuniform in thickness, that is, becoming thicker and thicker from Badong to Zigui.

Key words: Three Gorges; Huangling anticline; Zigui basin; 3D density structure; fault; sedimentology; geophysics.

长江三峡西起重庆奉节,东至湖北宜昌,由瞿塘 峡、巫峡与西陵峡组成,是举世瞩目的三峡大坝所在 地.三峡地区地貌以大巴山、巫山山脉为骨架,在震 旦系至三叠系形成以碳酸盐岩为主的褶皱山地,属 于以侵蚀为主兼具溶蚀作用的中山峡谷间夹低山宽 谷的地貌景观(图1).山脉总体为近东西向,局部为 南北向.由于长江多斜切或横切,因而河谷多为斜向 或横向.由于该区域的地质与地球物理背景复杂,几 十年来,受到国内外科学家的关注,围绕该地区进行了地质、水文与灾害防治等多方面的调查与研究.

以往的研究结果表明,三峡地区以黄陵背斜和 秭归盆地为主要地质构造单元,其地壳为多层结构, 主要可分为上地壳、中地壳和下地壳3层(Li et al.,2009).历史上,三峡地区主要经历了3次较强 的构造运动,分别为晋宁运动、燕山运动和喜山运 动.晋宁运动时期,地层褶皱、变质作用强烈、岩浆运

基金项目:科技部国际科技合作专项(No. 2010DFA24580);国家自然科学基金重点项目(No. 40730317).

作者简介:张毅(1982一),男,博士,主要从事重磁数据处理、反演与解释方面的研究. E-mail: zhangyi\_921@163. com

通讯作者:陈超(1960-),E-mail: chenchao@cug. edu. cn





动频繁,形成了该地区古老的结晶基底,而黄陵背斜 以及大多数区域断裂也形成于此时;燕山运动对基 底的破坏较轻,其主要表现为秭归以西海侵沉积区 域盖层的褶皱和断裂;喜山运动时期,除盖层有轻度 变形、少数断裂有微弱的继承性活动外,全区转入新 构造运动时期,以整体抬升为主要特征(http:// www.sxdzfz.gov.cn/kqgk\_View.aspx?cid = d0e72046-87d0-46fa-bc5c-9b6cfb4adc90).

三峡地区地震、重力、航磁等地球物理资料丰富.李安然等(1987)利用平均剩余重力异常和回归 方程得到了三峡地区莫霍面埋深;王石任等(1992) 利用 Parker-Oldenburg 快速位场反演方法(Parker, 1973; Oldenburg, 1974)得到了三峡地区的不 同深度的密度界面;近年来,赵旭等(2007)利用地震 资料建立了三峡地区的一维速度模型;廖武林等 (2007)和 Li *et al.* (2009)进一步利用层析成像技术 建立了三峡地区的三维速度模型.和前人主要利用 布格重力异常反演莫霍面深度及密度界面不同,本 文运用 Li and Oldenburg(1998)提出的三维重力反 演方法,对三峡地区的布格重力异常进行三维密度 成像,得到了该地区中上地壳的三维密度分布情况. 通过和前人的研究成果进行对比,并结合该地区地 震资料等地球物理数据,对成像结果进行了初步的 解释,为完善三峡地区的区域地质地球物理背景、深 部构造等方面提供一些地球物理证据.

### 1 三峡地区布格重力异常

三峡及其邻近区域布格重力异常整体上为负异 常区域,其异常值自西向东逐渐递增;特别沿十堰-保康-宜昌-五峰-线呈现明显的重力梯度带,该 梯度带近 SN向,呈弧形向东突出,等值线均匀扭 曲,形态较规则.这也正是贯穿我国南北的"太行-武陵重力梯度带"的组成部分(刘绍府等,1984;孙 叶等,1996; Li et al., 2009).该梯度带将本区域分 为东、西 2 部分,其中西部负异常幅值较大,超过





-100 mGal,异常分布面积较广;东部负异常幅值明显减小,且异常分布形态复杂,多为较小面积的圈闭.一般来说,重力梯度带附近对应有断裂分布,如处于同一重力梯度带的华北太行山地带,沿带有深切岩石圈的活动断裂(刘绍府等,1984);但是人工地震及其他资料表明,三峡地区近 SN 向的重力梯度带并没有成为东、西两侧地质构造的分界线(图2a),沿梯度带方向也没有深大断裂存在,仅为莫霍面在该区域不连续的错断(刘绍府等,1984;孙叶等,1996; Li et al., 2009).

根据该地区的数字高程模型(http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/topo/globe.html),西部的巴东 附近最高海拔近3000m,东部江汉平原最低处海拔 约为0m,其高差接近3000m,地形高度总体上呈 阶梯状向东递减.同时,地形高度与布格重力异常基 本呈负相关关系,体现了该区域地壳的均衡效应.

本文中利用六阶多项式趋势分析方法对三峡地 区布格重力异常进行分离,并对异常进行了圆滑处 理,得到的区域重力异常反映了三峡地区莫霍面的 起伏情况.与该区域莫霍面等深图(钱熊虎等, 1993;涂光美等,1996;Lietal.,2009)比较,两者 负相关关系十分明显,表明该地区莫霍面深度自西向 东逐渐变浅;即西部普遍隆升而东部以凹陷为主,而 重力梯度带则是东西部莫霍面深度突变的主要区域.

图 2b 为去除了区域异常后的三峡地区局部布

格重力异常.从图中可以看出,计算区域中部黄陵背 斜核部出露地区存在明显相对重力高的区域,异常 整体沿 NW向,在相对重力高的区域中部的宜昌市 区附近(即三峡大坝所在地)有一明显的低重力异常 区域;在西部的巴东一秭归一兴山区域,低重力异常 则覆盖了整个秭归盆地,该异常区域大致沿 NE向, 其西南部较宽而东北部较窄,平面上整体呈三角形 分布;西北部神农架地区为高重力异常区域,其异常 区域也大致沿 NE向,它和黄陵背斜区域被认为是 扬子板块的出露部分.

## 2 三维重力异常反演方法

笔者采用 Li and Oldenburg(1998)提出的光滑 模型目标函数对重力异常数据进行反演. Constable et al. (1987)最早利用光滑模型目标函数进行 Occam反演大地电磁数据,其基本理论是利用 Tikhonov 正则化理论(Tikhonov et al., 2005)来构造 反演目标函数,并通过搜索合适的正则化参数使模 型复杂度和观测数据拟合差达到一个最小化的平衡 点,同时构造的最光滑模型也可以解决困扰反演算 法的多解性问题. Li and Oldenburg(1998)将Occam 反演引入三维位场反演,其最大的贡献是提出了深 度加权函数,使位场反演过程中的"趋肤效应"在一 定程度上得到了适当的补偿.

 $\phi_{m}(m) = \| W_{s}(m - m_{\text{ref}}) \|^{2} + \| W_{x}(m - m_{\text{ref}}) \|^{2} + \| W_{y}(m - m_{\text{ref}}) \|^{2} + \| W_{z}(m - m_{\text{ref}}) \|^{2} = \| W_{m}(m - m_{n_{\text{ref}}}) \|^{2}, \qquad (1)$ 

$$\phi_{\rm d} = \sum_{i}^{N} \left( \frac{d_i^{\rm pre} - d_i^{\rm obs}}{\varepsilon_i} \right)^2 = \| W_{\rm d}(d^{\rm pre} - d^{\rm obs}) \|_2^2, \qquad (2)$$

式(1)中 φ<sub>m</sub>(m)为离散化后的模型目标函数,其中 W<sub>i</sub>(i=x,y,z,s)为各个方向上对应的差分矩阵, W<sub>m</sub> 为各个方向上差分矩阵的和,m<sub>ref</sub>为参考模型; 式(2)中 φ<sub>d</sub> 为离散化后的数据拟合差,其中 d<sup>pre</sup> 为 预测数据,d<sup>obs</sup>为观测数据,ε 为观测数据误差的标 准差,W<sub>d</sub> 为离散化后误差标准差矩阵.利用正则化 理论构建反演目标函数为:

$$\min_{\mathbf{i}} \phi(m) = \phi_{\mathrm{d}} + \mu \phi_{m} , \qquad (3)$$

式中: µ为 Tikhonov 正则化参数. 此目标函数既包

含了对数据拟合差的约束,也包含了对模型的范数 以及模型的光滑程度的约束.

### 3 三峡地区三维密度成像及结果分析

#### 3.1 三峡地区三维密度成像

反演过程中利用不同的正则化参数代入式(3) 中进行迭代,得到 Tikhonov 曲线并确定最优正则 化参数,最终完成三维密度成像.

利用密度成像结果正演得到的拟合数据,和图 3 中反演区域的实际数据相比,反演拟合数据形态 基本一致,但是幅值较小且较为平缓.这说明反演方 法可以在一定程度上剔除数据中的高频误差,这也 和反演方法中 L<sub>2</sub> 范数(即欧几里得距离见式 1)的 光滑效应有关.

图 3 中是三峡地区不同深度的密度分布图像.



图 3 三峡地区三维密度结构水平切片 Fig. 3 Horizontal slices of 3D density structure of Three Gorges area

从总体上来看,反演区域的密度分布在 2.59~ 2.74 g/cm<sup>3</sup>之间,其中该地区的主要地质构造如黄 陵背斜、秭归盆地等在成像结果中都清晰可见,和周 围岩石密度分布有较大的差异.

(1)0~2 km 深度密度成像结果.图 3a 反映的 是 0~2 km 深度的密度分布.反演过程中利用了 Li et al.(2009)的层析成像结果,将其表层(0~2 km) 的 P 波速度利用 Gardner 公式(曾华霖,2004)转换 为密度范围作为约束进行反演.从成像结果来看,该 深度上密度分布较为均匀,和地壳平均密度相当;高 密度异常区域主要分布在雾渡河以西以及宜昌以北 的长江北岸地区,而低密度异常区域则主要分布在 巴东一秭归一线的长江以南地区.

(2)4~6 km 深度密度成像结果.图 3b 反映的 是 4~6 km 深度的密度分布.从成像结果来看,图 3b 中部的黄陵背斜为高密度区域,密度范围大约 2.695~2.740 g/cm<sup>3</sup>,走向沿 NW 向,类似一个弓 形构造;其中部被沿长江流域的低密度区域分为南、 北 2 个部分,尾部在长阳一当阳一线连接起来,但密 度明显低于南、北 2 部分.图 3b 中西部的蓝色低密 度区域为秭归盆地,它位于西北部的神农架地块和 黄陵背斜之间,密度范围大约 2.59~2.63 g/cm<sup>3</sup>. 从图 3b 来看,其沉积层走向在秭归一兴山一线基本 沿 NE 方向,在南部的秭归一巴东一线则转为近 EW 向.图 3b 中西北角的高密度区域为神农架地 块,其走向和秭归盆地类似,在北部基本沿 NE 向, 在南部则转为近 EW 向.

(3)8~10 km 深度密度成像结果.图 3c 反映的 是 8~10 km 深度的密度分布.从成像结果来看,密 度分布特征和图 3b 中的大致相同,但是密度异常分 布区域面积却明显减小.特别是秭归盆地巴东地区 密度分布明显高于兴山地区,显示该盆地的沉积厚 度不均匀,巴东地区的沉积厚度明显浅于兴山地区.

(4)12~14 km 深度密度成像结果.图 3d 反映 的分别是 12~14 km 及以下深度的密度分布.从成 像结果来看,在 12 km 深度处还能大致分辨出黄陵背 斜与秭归盆地等主要构造的轮廓,而到了16 km及更 深深度则基本和周围背景密度相当,显示在此深度上 已达到或者超过黄陵背斜等主要构造的最深处.

此外,从图 3 中不同深度的震源及其震级分布 可以看到,三峡地区地震强度不大,一般均小于 4.0 级.纵向上来看,地震震源深度一般在 4~12 km 左 右的上地壳底部以及部分中地壳上部,即发震位置 大多位于秭归盆地的沉积地层中;横向上来看,地震 发生位置大多处于黄陵背斜周围沿 NE 向两侧的构 造转换带以及西部的秭归盆地之中,说明这些地方 的地质活动较为活跃.

图 4 为三峡地区北纬 31.04°处 EW 向垂向剖 面图,它揭示了黄陵背斜、秭归盆地以及其他区域的 深部密度结构特征.从成像结果来看,黄陵背斜主要 分布深度为 4~10 km,最深处达到了 15 km 左右, 且自西向东其深度明显增加,即存在向西倾斜的趋 势.秭归盆地沉积地点主要集中在新华断裂以西的 秭归一兴山一线,沉积厚度最深处大约为 10 km,大 于 Li et al.(2009)利用层析成像得到的秭归盆地大 约 6 km 的沉积厚度;此外,该盆地的沉积厚度不均 匀,从秭归向西至巴东沉积厚度逐渐变浅.秭归盆地 内沉积地层活动频繁,集中了区域内大多数的地震 分布.远安断裂以东的当阳盆地与秭归盆地类似,均 为三叠纪末一侏罗纪初发展形成的中生代构造盆地 (夏金梧等,1996);但其沉积层密度和地壳平均密 度相似,明显大于秭归盆地沉积层密度,显示 2 处盆





Fig. 4 East-west vertical profile of Three Gorges area

①秭归盆地;②上地壳地层;③黄陵背斜;④当阳盆地;⑤高密度地层;⑥中地壳地层;F1.新华断裂;F2.远安断裂



图 5 黄陵背斜周缘主要区域性断裂分布



①新华断裂;②仙女山断裂;③渔阳关-土门断裂;④远安断裂;(a)为东西向垂向剖面(31.04°N);(b)为南北向垂向剖面(111.2°E)

地沉积物物源并不相同.此外,当阳盆地以东,图 4 的⑤处有一密度大约为 2.68 g/cm<sup>3</sup> 的高密度异常 体,可能隐伏高密度岩体.图 4 中剖面底部为中地壳 地层,其平均密度大约为 2.670~2.675 g/cm<sup>3</sup>,顶 面平均深度为 15 km,其中在当阳盆地处最浅,只有 10 km 左右.中地壳顶面在黄陵背斜两侧明显不连 续,分别对应该区域的 2 条区域断裂,其中黄陵背斜 直接位于中地壳地层之上.

图 4 中新华断裂位于黄陵背斜西北部,是黄陵 背斜和秭归盆地的分界线,其北部走向近 NE 向. 由 于"秦岭洋"壳持续向南俯冲,黄陵背斜沿着向西倾 斜的断面向上隆起,从而形成逆断层结构,与前文所 述黄陵背斜深度为西浅东深是一致的.新华断裂地 震活动性不强,历史上较少有地震记录(涂光美等, 1996),一般被认为不会对大坝产生影响.远安断裂 位于黄陵背斜东北部,和仙女山断裂一起在黄陵背 斜两侧呈近平行分布,是当阳盆地和黄陵背斜在东 北方向的分界线,也被认为是扬子板块和华北板块 的构造分界线(李安然等,1982).该断裂在印支期 形成,燕山期进一步活动.从密度成像剖面上来看, 远安断裂近乎直立;另外该断裂具有张性右旋扭动 性质,且上升、下降交界部位主要受引张力的控制, 张裂隙带沿 NE向(韩晓光和李蓉川,1984;邢灿飞 等,2003).从图 5 中地震分布范围来看,该断裂周 围地震活动频繁.

图 6 为三峡地区 111.2°E 处的 SN 向垂向剖面 图,该剖面穿越黄陵背斜核部及其周围区域,主要反 映了黄陵背斜的深部结构特征.从剖面上来看,黄陵 背斜明显被分布于宜昌一三斗坪一线的低密度地层 分割为南、北2部分,这和前文中图 3 所示的结果一 致.另外图 6 中的①和⑤处地层密度大致相同,且地 表出露地层也相似,均为寒武一三叠系地层.这说明 在晋宁期黄陵背斜受断裂控制隆起后,在南、北2 侧 形成的断陷盆地的沉积环境基本一致,这和黄陵背 斜东西两侧的当阳盆地和秭归盆地密度差异较大有 明显的区别.

图 6 中仙女山断裂位于黄陵背斜西南部,北部 走向近 SN向,向南折转沿 NW向,其深度约 10 km 和秭归盆地最深处相当,由伴随印支期黄陵背斜的 激化隆起而产生.该断裂作为黄陵背斜西南部的边 界,自印支期形成以来有多期活动,且近期仍有活 动. 仙女山断裂为同沉积正断层结构(张或丹, 1986),向南至少抵达渔阳关,其北部边界是否越过





#### Fig. 6 South-north vertical profile of Three Gorges area

①低密度地层;②上地壳地层;③黄陵背斜;④低密度地层;⑤远安盆地;⑥中地壳地层;F1. 仙女山断裂;F2. 远安断裂

长江则一直存在争议(周明礼等,1984;谭成轩, 1991;杨淑贤等,1993;王瑞江等,1995).由于三 峡地区受 NE-NNE 向挤压,断裂容易发生剪切滑 动,同时该区域黄陵背斜隆起产生垂直升降运动,断 裂的上升部位呈张扭性质运动(韩晓光和李蓉川, 1984).仙女山断裂历史上至今仍活动频繁,一直被 认为是三峡地区最有可能发生强震的区域之一.

渔阳关一土门断裂位于黄陵背斜东南部,走向沿 NE向,是当阳盆地和黄陵背斜在东南方向的分界线. 该区域地震活动不明显,韩晓光和徐卓民(1992)认为 该区域是一组新生的或沿老构造线再次发生新活动 的构造,控制了该区域内震级较小的地震.

#### 3.2 库区低密度异常区域

从图 3 中可以看到,在黄陵背斜中部存在一处 很大的低密度区域,恰好是三峡大坝所在地.此区域 内长江及其支流等水系发育,岩溶型水库地震活动 频繁(狄莉莎,2004;李锋等,2004),时变重力观测 表明该区域库水渗透现象明显(申重阳等,2004; 孙少安等,2004).但是仅仅由于库水荷载引起的最 大重力变化约 0.2 mGal(李志昌等,2002;孙少安 等,2004;杨光亮等,2005),其影响达不到图 2b 中 所示局部布格重力异常的量级,因此该处的低密度 异常如何解释成为一个待解决的问题.

Li et al. (2009)认为,此处的低密度异常在 8 km 以上与沉积和库水渗透相关,其下则和"岩浆 囊"有关,它是上地幔部分未固结的熔融物质沿晋宁 期前形成的古断裂上涌至上地壳形成.综合图4与6 来看,除了黄陵背斜、秭归盆地以及西北角的神农架 地块以外的地区,特别是15 km 以下的中下地壳部 分,密度分布都较为均匀,大致在2.67~2.69 g/cm<sup>3</sup> 之间,没有密度变化剧烈的渐变或者突变带,因此很 难找到切割地壳达到上地幔的古断裂存在的证据.

一般认为,黄陵背斜形成于晋宁晚期,是扬子板 块北侧的"秦岭洋"壳向南俯冲导致的大陆边缘造山 运动的结果,其岩基的形成与岩浆底侵作用有关,可 分解为三斗坪、黄陵庙、大老岭、晓峰4个岩套及14 个单元(冯定犹等,1991;马大铨等,2002;李志昌 等,2002).以往的研究表明,雾渡河断裂形成于前 震旦晋宁期,属左旋压剪性平移断层(甘家思等, 1996),斜切黄陵背斜及其上覆盖层,其切割深度达 到了中地壳上部(陈学波,1994),倾向为 NE 向,倾 角 50°~80°(熊成云等,2004);即断裂中下部恰好 位于此低密度异常处,和图 6 中黄陵背斜中部低密 度区域的位置基本一致.此外,雾渡河断裂在燕山期 活动性较强(甘家思等,1996),这和西部的秭归盆 地在三叠纪末一侏罗纪初大规模沉积形成中生代构 造盆地(夏金梧等,1996)的时间一致.因此笔者认 为,在燕山期黄陵背斜大规模隆起(马大铨等, 2002)之后,秭归盆地附近大量的低密度沉积物可能 沿雾渡河断裂向东侵入,是造成该区域密度较低的 主要原因;同时该区域水系发育,主要为低密度的碳 酸岩,岩石孔隙度较大,河水渗透量较多,客观上也 为侵入提供了便利,造成该区域相对周围地区物质 密度的下降.此外,扬子板块北侧的"秦岭洋"壳持续 向南俯冲则是沉积物质侵入的动力来源,这和该时 期三峡地区深部的地应力优势方向为 NW-NNW 向(Li et al., 2009)也是一致的.

### 4 结论

本文利用三峡地区布格重力异常资料进行三维 反演,得到了该地区中上地壳的三维密度分布,成像 结果对区域内黄陵背斜、秭归盆地以及几条区域型 断裂等较大的地质构造有较好地显示.

总的来说,三峡地区的主要构造以黄陵背斜为 中心,其周围环绕着一个菱形断裂带,这些断裂带控 制着该区域的构造演化过程,其中黄陵背斜的相对 隆起,以及周围秭归、当阳等盆地的相对下降均受其 影响.从成像结果来看,黄陵背斜区域为高密度区 域,其中部沿长江流域分布有 NW 向低密度带,推 测应该为低密度物质沿其内部断裂侵入的结果;西 部秭归盆地密度较低,沉积厚度自西向东逐渐加大.

从地震分布图上来看,三峡地区的地震活动与 黄陵背斜周围的菱形断裂构造有密切联系.在水平 方向上,沿菱形断裂构造边缘的区域是地震多发区 域,且地震多位于 NW 向断裂带上,而在 NE 向断 裂带上地震分布较少且震级较小;在垂直方向上,地 震震源深度一般在 4~10 km 深度的上地壳地层中. 一般来说,这些断裂最深大约 15 km,一般切割至中 地壳上部,规模都不大,均未造成大范围的岩体破 坏,形成震源深度 2~10 km 的浅源地震,但是震级 一般较小,不构成强震孕育的条件.此外,在黄陵背 斜内部,还有雾渡河与天阳坪等断裂分布,但是受限 于反演网格剖分的精细程度,这些断裂在成像结果 中并没有很好地显示.

由于黄陵背斜为古老的岩浆岩侵入后固结形成,其磁性较强,因此利用其高密度高磁性的特征、 利用重力反演结果对航磁数据的磁化率反演做某种 程度的约束,将成为下一步航磁异常数据反演的主要内容,也可以为该地区的地质构造特征研究提供 更多的资料与参考.

致谢:本文得到科技部国际科技合作专项 (2010DFA24580)、国家自然科学基金(40730317) 及国家石油天然气专项资助,并得到教育部长江三 峡库区地质灾害研究中心支持.所用数字高程模型 数据(GLOBE Task Team and Others, 1999, http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/topo/globe.html)来自美国国家地球物理数据中心(national geophysical data center, NGDC);布格重力异常数据 来自中国地质调查局发展研究中心,比例尺 1:200000;地震震源及强度分布数据来自国家地 震科学数据共享中心(时间范围为 2009 至今).此外 在论文撰写过程中得到了博士生杨波同学的热情帮 助,在此一并表示衷心的感谢.

#### References

- Chen, X. B., 1994. Characteristics of deep structure of Three Gorges and adjacent area. Earthquake Press, Beijing (in Chinese).
- Constable, S. C., Parker, R. L., Constable, C. G., 1987. Occam's inversion: a practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Ge*ophysics, 52(3):289-300. doi:10.1190/1.1442303
- Di, L. S. ,2004. Structral features mobility Shuitianba fault in the Three Gorges area. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 24(2):52-57 (in Chinese with English abstract).
- Feng, D. Y., Li, Z. C., Zhang, Z. C., 1991. Intrusive ages and isotopic characteristics of massives in the south of Huangling granitoids. *Resources Environment & Engineering*, 5 (2):1-12 (in Chinese with English abstract).
- Gan, J. S., Liu, S. W., Li, A. R., et al., 1996. Investigation advance of the Wuduhe fault in the Huangling block. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 16(1):72-78 (in Chinese with English abstract).
- Han, X. G., Li, R. C., 1984. Crustal stress and seismic activity in Three Gorges region. North China Earthquake Sciences, (1):53-57 (in Chinese with English abstract).
- Han, X. G., Xu, Z. M., 1992. Features of linear structure on the southeastern edge of Huangling anticline and its seismotectonic significance. *South China Journal of Seismology*, 12 (4):42-45 (in Chinese with English abstract).
- Li, A. R., Han, X. G., Xu, Y. J., 1987. Characteristics of gravity field in the Three-Gorge region, western Hubei Province and its seismotectonic significance. *Seismology and Geolo-*

gy,9(3):71-78 (in Chinese with English abstract).

- Li, A. R., Xu, Y. J., Gu, Z. C., 1982. Neotectonic movement and earthquake of Yuan'an fault zone, center of Hubei. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, (2): 98-103 (in Chinese with English abstract).
- Li, F., Xue, J. R., Han, X. G., 2004. On observation of earth shocks and its genesis in Mazongshan of Badong in Three Gorges reservoir. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 24 (2):78–82 (in Chinese with English abstract).
- Li, Q., Zhao, X., Cai, J. A., et al., 2009. P wave velocity structure of upper and middle crust beneath the Three Gorges reservoir dam and adjacent regions. *Science in China* (*Ser. D*), 52 (4): 567 - 578. doi: 10. 1007/ s11430-009-0047-6
- Li, Y. G., Oldenburg, D. W., 1998. 3-D inversion of gravity data. *Geophysics*, 63 (1): 109 119. doi: 10. 1190/1. 1444302
- Li, Z. C., Wang, G. H., Zhang, Z. C., 2002. Isotopic age spectrum of the Huangling granitic batholith, western Hubei. *Geology and Mineral Resources of South Chi*na, (3):19-28 (in Chinese with English abstract).
- Liao, W. L., Yao, Y. S., Ding, Z. F., 2007. Tomographic imagery of P wave velocity structure in Three Gorges region. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 27 (3): 80-84 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S. F., Liu, S. W., Jia, M. Y., 1984. The deep gravitational field and its geological explanation over Hubei Province and vicinal regions. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 4(4):357-364 (in Chinese with English abstract).
- Ma, D. Q., Du, S. H., Xiao, Z. F., 2002. The origin of Huangling granite batholith. Acta Petrologica et Mineralogica, 21 (2):151-161 (in Chinese with English abstract).
- Oldenburg, D. W., 1974. The inversion and interpretation of gravity anomalies. *Geophysics*, 39(4): 526-536. doi: 10.1190/1.1440444
- Parker, R. L. , 1973. The rapid calculation of potential anomalies. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 31(4):447-455. doi:10.1111/j.1365-246X. 1973. tb06513. x
- Qian, X. H., Yang, H. Z., Xu, Z. X., 1993. A discussion on the structure of basement in Hubei. *Resources Environment & Engineering*, 7(1): 30-37 (in Chinese with English abstract).
- Shen, C. Y., Sun, S. A., Liu, S. M., et al., 2004. Dynamic variations of gravity field in head area of Three Gorges reservoir in recent years. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 24 (2):6–13 (in Chinese with English abstract).

- Sun, S. A., Xiang, A. M., Liu, D. Z., 2004. High precise gravity survey before and after impoundment of Three Gorges project. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 24(2):30-33 (in Chinese with English abstract).
- Sun, Y., Tan, C. X., Wang, R. J., et al., 1996. An assessment and zonation of regional crustal stability in and around the dam region of the Three Gorges project on the Yangtze River. Acta Geosicientia Sinica, 17 (3): 258-268 (in Chinese with English abstract).
- Tan, C. X., 1991. Northward extension of Xiannushan fault in the front region of Yangtze Gorges project. Hydrogeology and Engineering Geology, (5): 13-17 (in Chinese with English abstract).
- Tikhonov, A. N., Goncharsky, A., Stepanov, V. V., et al., 2005. Numerical methods for the solution of ill-posed problems, Kluwer Academic Publishers, London.
- Tu, G. M., Liu, S. K., Xiong, Y. P., 1996. Structral features mobility Shuitianba fault in the Three Gorges area. *Resources Environment & Engineering*, 10(2): 103-112 (in Chinese with English abstract).
- Wang, R. J., Tan, C. X., Sheng, C. M., 1995. A discussion of structural activity of Xiannushan fault belt and its extension towards north in the Three Gorges on the Yangtze River. *Earth Science*, 20(6):693-696 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S. R., Zhu, S. L., Li, R. C., 1992. Three dimensional inversion of gravity anomalies in the region of Three Gorges, the Yangtze River. *Chinese Journal of Geophysics*, 35(1): 69-76 (in Chinese with English abstract).
- Xia, J. W., Zhou, L. Q., Liu, S. K., 1996. Characteristics and activity of main faults in and around Zigui basin, western Hubei. *Hydrogeology and Engineering Geology*, (1):10-14 (in Chinese with English abstract).
- Xing, C. F., Gong, K. H., Du, R. L., 2003. Crustal deformation monitoring network for Three Gorges project on Yangtze River. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 23(1):114-118 (in Chinese with English abstract).
- Xiong, C. Y., Wei, C. S., Jin, G. F., 2004. Pre-Sinian paleostructural framework and major geological events in the Huangling anticline, western Hubei. *Journal of Geomechanics*, 10(2):97-112 (in Chinese with English abstract).
- Yang, G. L., Shen, C. Y., Wang, X. Q., et al., 2005. Numerical simulation of gravity effect of water-impoundment in Three Gorges reservoir. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 25 (1):19-23 (in Chinese with English abstract).
- Yang, S. X., Zhou, M. L., Xu, X. W., et al., 1993. Seeking for east boundary fault structure at Zigui basin: a further discussion on northward extension through Yan-

gtze River of the Xiannushan fault zone. Journal of Geodesy and Geodynamics, 13(2): 48-54 (in Chinese with English abstract).

- Zeng, H. L., 2004. Gravity field and gravity exploration. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Zhang, H. D. , 1986. Research on formation and structure development of Huangling anticline. *Journal of Jianghan Petroleum Institute*, (1):29-40 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, X., Li, Q., Cai, J. A., 2007. On minimum 1D velocity model applied in Three Gorges reservoir area. *Journal* of Geodesy and Geodynamics, 27(S1):1-7 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, M. L., Qin, X. L., Feng, X. C., 1984. Several views on Xiannushan fault zone. Journal of Geodesy and Geodynamics, 4(1): 82-89 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 陈学波,1994.长江三峡工程坝区及外围深部构造特征研究. 北京:地震出版社.
- 狄莉莎,2004.三峡数字地震台网中心记录典型波形初步分析.大地测量与地球动力学,24(2):52-57.
- 冯定犹,李志昌,张自超,1991. 黄陵花岗岩类岩基南部岩体 侵入时代和同位素特征. 资源环境与工程,5(2): 1-12.
- 甘家思,刘锁旺,李安然,等,1996. 黄陵地块内部北西向雾渡 河断裂的再研究. 大地测量与地球动力学,16(1): 72-78.
- 韩晓光,李蓉川,1984.三峡地区地壳应力场与地震活动.华 北地震科学,(1):53-57.
- 韩晓光,徐卓民,1992.黄陵背斜东南边缘北东向线性构造特 征及其与地震活动的关系.华南地震,12(4):42-45.
- 李安然,韩晓光,徐永键,1987.鄂西三峡区域重力场特征及 其地震构造意义.地震地质,9(3):71-78.
- 李安然,徐永键,古成志,1982. 鄂中远安断裂带的新构造活动与地震.大地测量与地球动力学,(2):98-103.
- 李锋,薛军蓉,韩晓光,2004. 三峡库区巴东马鬃山地振动观测与成因讨论. 大地测量与地球动力学,24(2): 78-82.
- 李志昌,王桂华,张自超,2002. 鄂西黄陵花岗岩基同位素年 龄谱. 华南地质与矿产,(3):19-28.
- 廖武林,姚运生,丁志峰,等,2007.三峡地区 P 波速度层析成 像研究.大地测量与地球动力学,27(3):80-84.
- 刘绍府,刘锁旺,贾民育,1984. 湖北和邻区深部重力场及其 地质解释. 大地测量与地球动力学,4(4):357-364.
- 马大铨,杜绍华,肖志发,2002.黄陵花岗岩基的成因.岩石矿 物学杂志,21(2):151-161.

- 钱熊虎,杨宏章,徐志新,1993. 对湖北基底构造的探讨. 资源 环境与工程,7(1): 30-37.
- 申重阳,孙少安,刘少明,等,2004.长江三峡库首区近期重力 场动态变化.大地测量与地球动力学,24(2):6-13.
- 孙少安,项爱民,刘冬至,2004. 三峡工程蓄水前后的精密重 力测量.大地测量与地球动力学,24(2): 30-33.
- 孙叶,谭成轩,王瑞江,等,1996.长江三峡工程坝区及外围地 壳稳定性评价与分区研究.地球学报,17(3): 258-268.
- 谭成轩,1991.长江三峡工程库首区仙女山断裂北延问题研 究.水文地质工程地质,(5):13-17.
- 涂光美,刘世凯,熊友平,1996. 三峡水田坝断裂构造特征及 其活动性研究. 资源环境与工程,10(2): 103-112.
- 王瑞江,谭成轩,盛昌明,1995. 长江三峡地区仙女山断裂带 构造活动性及其北延问题讨论. 地球科学——中国地 质大学学报,20(6): 693-696.
- 王石任,朱思林,李蓉川,1992. 长江三峡地区三维重力反演 研究.地球物理学报,35(1):69-76.
- 夏金梧,周乐群,刘世凯,1996.鄂西秭归盆地及外缘主要断

裂特征及活动性研究.水文地质工程地质,(1): 10-14.

- 邢灿飞,龚凯虹,杜瑞林,2003. 长江三峡工程地壳形变监测 网络.大地测量与地球动力学,23(1):114-118.
- 熊成云,韦昌山,金光富,2004. 鄂西黄陵背斜地区前南华纪 古构造格架及主要地质事件. 地质力学学报,10(2): 97-112.
- 杨光亮,申重阳,王晓权,等,2005.三峡水库蓄水重力效应数 值模拟.大地测量与地球动力学,25(1):19-23.
- 杨淑贤,周明礼,徐孝文,等,1993.秭归盆地东缘断裂构造觅 踪——再论仙女山断裂带北延过长江问题.大地测量 与地球动力学,13(2):48-54.

曾华霖,2004.重力场与重力勘探.北京:地质出版社.

- 张或丹,1986. 黄陵背斜的形成和构造发展初析. 江汉石油学 院学报,(1): 29-40.
- 赵旭,李强,蔡晋安,2007. 三峡库首区最小一维速度模型研 究. 大地测量与地球动力学,27(S1): 1-7.
- 周明礼,秦兴力,冯选朝,1984. 对鄂西仙女山断裂带的几点 认识.大地测量与地球动力学,4(1):82-89.