

三峡库首区现今构造应力场的形成体制分析

李细光¹, 姚运生², 曾佐勋³, 刘立林³

(1. 广西壮族地震局工程地震研究中心, 南宁 530022; 2. 中国地震局地震研究所, 武汉 430071;
3. 中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074)

摘 要: 本文从地质、地震、形变、地应力测量等方面对三峡库首区现今构造应力场进行了系统的分析和论证, 并用数值模拟进行了验证, 认为三峡库首区现今构造应力场属于纯剪切变形体制, 即: 在来自西部 NE—SW 方向主压应力挤压的基础上, 同时叠加有因江汉—洞庭盆地拉张而引起的 NWW—SEE 向主张应力的作用, 这两种力源近于直交, 可以分别作为研究区现今构造应力场的主压应力 (σ_1) 和主张应力 (σ_3)。

关键词: 三峡库首区; 现今构造应力场; 纯剪切变形体制; 数值模拟

中图分类号: P642.27

文献标识码: A

0 引言

关于三峡地区现今构造应力场的形成体制, 存在不同的观点: 袁登维^[1]、孙叶^[2]等认为三峡地区的现今构造应力场是由 NE—SW 方向主压应力挤压而成; 李蓉川^[3]、高锡铭^[4]、李安然^[5]等认为三峡地区的现今构造应力场是由拉张体制形成的; 高士钧^[6]在 NE—SW 向主压应力挤压的基础上, 提出了“双力偶”的观点; 杨森楠等^[7]提出了黄陵背斜为一“压力影”的观点。以上观点概括起来, 主要是围绕两种力源 (即: NE-SW 方向挤压或 NWW-SEE 向拉张) 之争。

作者在分析研究前人资料和成果的基础上, 结合野外地质调查和室内研究, 根据自己对三峡库首区 (这里指沿长江两岸南北外延 20 ~ 30km、东至三斗坪下游 5km、西至巴东上游 20km 的地区, 以下简称研究区) 实际资料的把握和理解, 提出了研究区现今构造应力场属于纯剪切变形体制, 即: 在来自西部四川盆地 NE-SW 方向主压应力挤压的基础上, 同时叠加有因江汉—洞庭盆地拉张而引起的 NWW-SEE 向主张应力, 这两种力源近于直交, 可以分别作为研究区现今构造应力场的主压应力 (σ_1) 和主张应力 (σ_3)。

1 地质概况

研究区位于扬子准地台中段北部, 东起江汉—洞庭断陷西缘, 西临四川台坳, 北抵大巴

收稿日期: 2005-10-18

基金项目: 科技部“十·五”重点科技攻关项目“长江三峡水库诱发地震监测研究”(国科发财字[2002]484号)。

作者简介: 李细光 (1966-), 男, 博士, 主要从事活动构造、新构造、地震地质的研究以及科技开发工作。

通讯地址: 530022, 南宁市古城 33 号; 广西地震局工程地震研究中心; E-mail: hnouyang@163.com

山台缘拗褶带，其主体位于上扬子台褶带。

研究区构造格架主要由秭归盆地、黄陵背斜及神农架穹隆南部组成。根据沉积建造、岩石组合、变形变质特征、构造样式及地层接触关系，划分出三个构造层：基底构造层、盖层构造层及第四系构造层^①，其中基底由崆岭群、神农架群和马槽园群组成，盖层由古生界和中、新生界地层等组成^[8]。活动断裂主要有：九湾溪断裂、仙女山断裂、马鹿池断裂、周家山—牛口断裂、水田坝断裂、高桥断裂、雾渡河断裂以及天阳坪断裂（图1）。

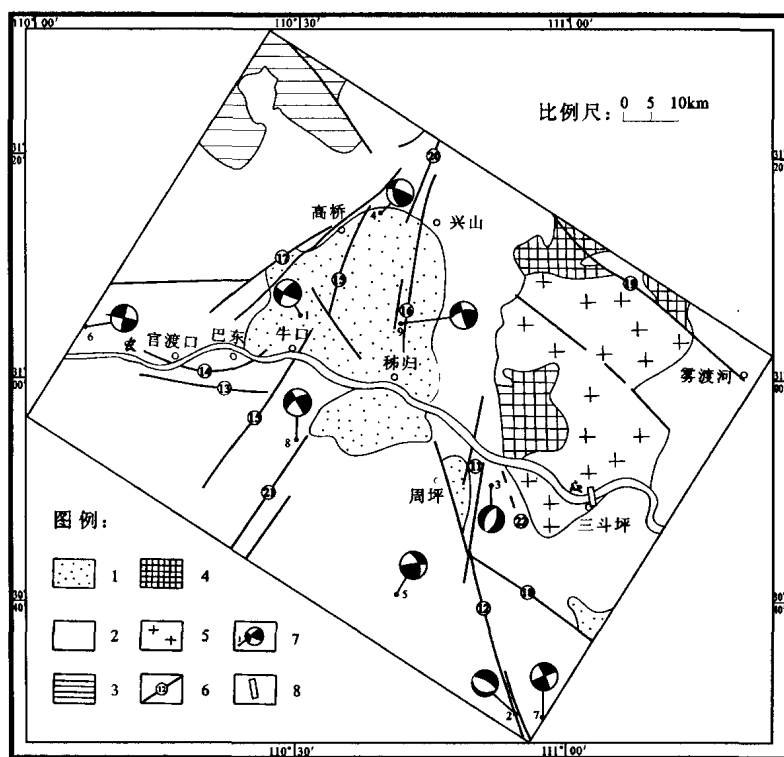


图1 研究区地质构造及震源机制解略图

Fig.1 Schematic map showing the geological structure and focal mechanism solution in the study area

1. 白垩系—上三叠统上部盖层构造亚层；2. 震旦系—中三叠统下部盖层构造亚层；3. 中元古界上部基底构造亚层；4. 下元古界下基底构造亚层；5. 晋宁期中酸性侵入岩；6. 活动断层及编号；7. 震源机制解及编号（黑区示压缩区，白区示拉张区）；8. 三峡大坝位置

活动断裂及编号：⑪九湾溪断裂；⑫仙女山断裂；⑬马鹿池断裂；⑭官渡口断裂；⑮周家山—牛口断裂；⑯水田坝断裂；⑰高桥断裂；⑱天阳坪断裂；⑲雾渡河断裂；⑳新华断裂；㉑磨坪断裂；㉒狮子口线性影像带

2 研究区现今构造应力场的形成体制分析

2.1 地质方面

2.1.1 活动断层研究 研究表明^{[1,5]②}，围绕黄陵背斜的活动断裂现今多表现为走滑正断性

① 水利部长江勘测技术研究所，“八五”国家重点科技攻关项目成果报告“长江三峡工程区牛口、水田坝等断裂活动性研究与地震危险性评价”，1995，5~6。

② 国家地震局地震研究所，“七·五”国家重点科技攻关项目“长江三峡工程库坝区水库诱发地震的地质条件研究”成果报告，1991，32~34。

质,其中NW向、NNE向断裂,如远安断裂、仙女山断裂、九湾溪断裂、水田坝断裂、新华断裂等活动断裂多表现为右行走滑正断性质,而NE向和NEE向断裂,如高桥断裂、马鹿池断裂等活动断裂则表现为左行走滑正断性质。这表明黄陵背斜周边在受到不断挤压剪切的同时,由于黄陵背斜的不断隆起与扩展,其四周的活动断裂发生走滑作用的同时也产生正断作用。

2.1.2 节理统计分析 白垩系—第三系红层中节理统计结果表明^[5],研究区晚近时期以来的最大主应力方向(σ_1)优势方向大多为NE向;但同时也应注意到黄陵背斜东西两侧白垩—第三系红层中张性和张剪性断层、裂隙的存在。另外,杨森楠等^[7]还发现在黄陵背斜核部及边部,早期形成的剪裂隙因黄陵背斜隆起而表现出向上张开状。

2.1.3 盆地演化方面 一方面,三峡地区在NE-SW向主压应力作用下产生掀斜隆起运动,西高东低,秭归盆地自晚第三纪以来一直处于缓慢隆起状态,江汉—洞庭盆地晚第三纪以来沉积中心缓慢东移,盆地内缺失第三系等沉积物^[9]。另一方面,江汉—洞庭盆地演化研究^[9]以及水准^[10]、GPS^[11]等形变结果表明,宜昌、武汉等地现今仍在缓慢下沉,这说明第四纪以来至今,江汉—洞庭盆地仍处于缓慢拉张状态。

综上所述,研究区现今构造应力场是以NE-SW向主压应力为主导、以近NWW-SEE向主张应力为辅。

2.2 地震方面

2.2.1 震源机制解 研究区可收集到震源机制解只有9个(图1),不具备统计意义。为进一步求解研究区的主压应力轴和主张应力轴的方位,作者采用了P波初动资料来求解综合断层层面解。

严尊国^[12]、高锡铭^[4]曾通过求研究区 $M_s \geq 1.0$ 大量的P波初动综合断层层面解和 $M_s \geq 2.1$ 有感地震的初动资料,分区并计算了三峡及其邻接区的主压应力轴方位,并与原地应力测量资料进行了对比,结果得出三峡及邻区区域平均应力场的主压应力轴方向为NE62°,研究区所在的黄陵背斜及其西部的现今构造应力场的主压应力轴方位为NE57°,这与许忠淮等人的研究结果^[13]基本一致。

李蓉川^[3,14]、高锡铭^[4]通过分析研究鄂西地区的单个震源机制解、P波初动综合断层层面解,并结合发震构造、原地应力测量等方面资料后认为:鄂西江汉地区总体处于引张应力场^[3],主张应力轴方位呈现以黄陵背斜为中心的辐射状分布^[4](图2);刘锁旺等^[15]认为:江汉—洞庭盆地存在非对称扩张;姚运生等^[16]认为:第四纪至今,江汉—洞庭盆地以NE-SW向的挤压和NW-SE向的拉张为主,尤其是震源机制解T轴平均方位呈158°更为集中。

综和上述研究结果表明:研究区现今构造应力场的主压应力轴方位为NE57°,主张应力轴的方位约为NW327°或SE147°。

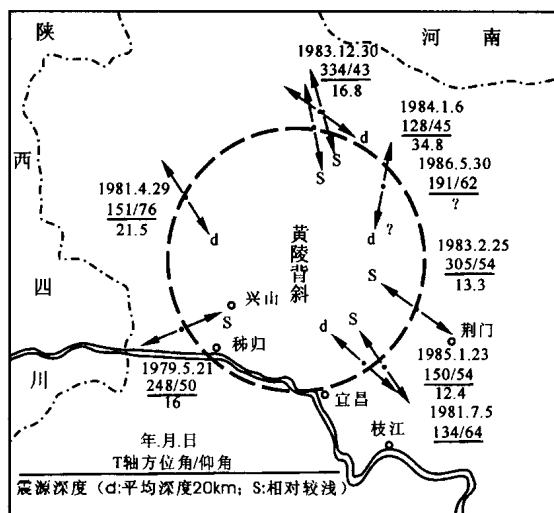


图2 黄陵背斜地区地震机制分布图^[4]

Fig.2 Distribution of the focal mechanism in the Huangling anticline

2.2.2 宏观地震调查与发震构造 研究区及其邻区历史强震和现代强震的宏观等震线资料中，绝大部分地震的极震区长轴取向与震中地表附近的主要构造形迹一致^[6]。据文献^[5-6]统计，NE向和NNW向两组断裂构造几乎不分主次地为主要发震构造，并以水平剪切错动为主，其中NE向长轴平均为36°，NNW向长轴多为330°~340°，而这正是震源机制解两组节面的方位（图1）。

2.3 形变方面

2.3.1 区域地壳形变方面 根据GPS研究成果^[11,17]并结合50~70年代武汉—郑州测线重复水准测量结果及1992年完成的湖北省现代地壳垂直形变图^[10]分析，区域现今地壳形变特征主要表现为：主压应变近EW向；桐柏山、大别山垂直隆升，三峡地区缓慢隆升，江汉盆地则缓慢下降。

2.3.2 库首区GPS形变结果分析 根据1998年至2003年三峡135水位蓄水前进行的5期（1998，1999，2000，2001，2003/5）GPS流动观测结果^[18]，利用Surfer软件对研究区的垂直形变进行处理，并将各GPS测站相对于华南参考系的位移矢量投影到相应的位置得到图3。从图中可以看出，黄陵背斜和神农架处于隆起状态，Z向位移为正值，秭归盆地和江汉盆地

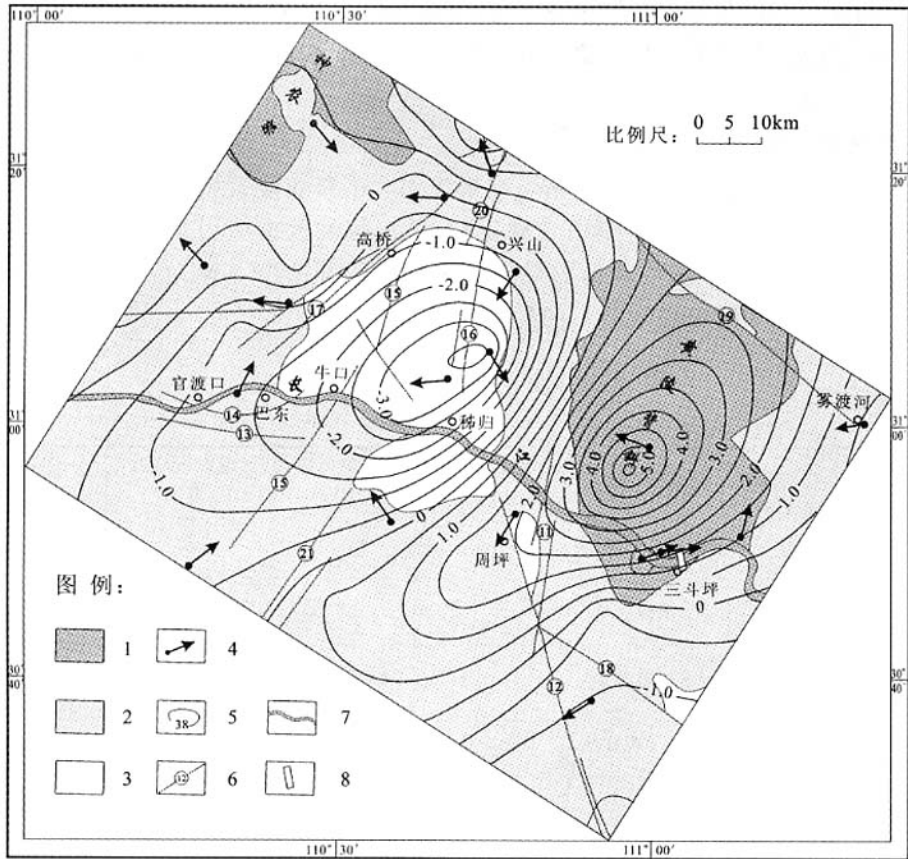


图3 研究区GPS测站在华南参考系下的平均位移矢量及其地壳垂直形变图

Fig.3 Average displacement vectors and crustal vertical deformation measured by the GPS bases under the frame of the South China references in the study area

1. 基底构造层；2. 下部盖层构造亚层；3. 上部盖层构造亚层；4. GPS测点位移矢量；5. GPS测站垂直位移等值线（单位：mm/a）；6. 活动断裂及编号；7. 长江；8. 三峡大坝

处于凹陷状态，Z 向位移为负值，形成“隆”“凹”相间的现今形变格局，与研究区处于 NWW-SEE 向的拉张状态密切相关；同时还可以看出，Z 向位移值从黄陵背斜和长阳复背斜翼部向轴部递增，并在其轴部附近最大，这又说明黄陵背斜和长阳复背斜处于 NE-SW 向挤压隆起状态。同时还可以看出，形变等值线在活动断裂附近出现弯曲、转折等异常现象，受活动断裂的影响较大，进一步分析表明，仙女山断裂西盘（上盘）Z 向位移值比东盘（下盘）小，说明上、下两盘逐渐拉开，且断裂两侧存在明显的右行分量，说明仙女山断裂属右行走滑正断性质；九湾溪断裂较为复杂，其南段表现为右行走滑正断性质，其北段表现为左行走滑正断性质；新华断裂、水田坝断裂带的西盘（上盘）Z 向位移值比东盘（下盘）小，说明上、下两盘逐渐拉开，且断裂两侧存在明显的右行位移分量，说明新华断裂、水田坝断裂带属右行走滑正断性质；高桥断裂西北盘（下盘）Z 向位移值比东南盘（上盘）大，上、下两盘逐渐拉开，且断裂两侧存在明显的左行位移分量，说明高桥断裂属左行走滑正断性质，这些结果与活动断层的研究结果一致，也进一步佐证了纯剪切变形体制的存在。

2.3.3 跨断层水准测量结果分析 研究区布设 14 条跨断层形变监测线^[19]，其结果与纯剪体制作用下应力作用方式密切相关。以仙女山断裂为例，其北段周坪室内基线和水准观测结果^[19]表明，仙女山断层处于微活动状态，西盘在 NE-SW 向挤压下缓慢上升，积累能量，并通过地震（断层运动方式为顺扭下降）释放所积累的能量，如 1991 年 4 月 17 日都镇湾庄溪发生的 $M_s4.3$ 级地震。

2.4 地应力测量方面

袁登维，梅应堂等进行过统计分析^[1]结果表明，围绕黄陵背斜的不同构造部位，地应力的最大主应力方向是不同的、多变的（见表）：其东侧最大主应力多为 NNE-NE 向；其西侧最大主应力也多为 NE 向；三峡坝区的最大主应力则多为 NNW-NW 向。正是由于纯剪切变形体制的存在，才造就了研究区地应力的复杂性和多变性。

表 研究区及其邻近区地应力测量结果^[1]
Table Measurements of in situ stresses in the study area and its vicinity

地点	测量时间	测量方法	测试深度 (m)	最大主压应力 (MPa)	最大主应力 方向	资料来源
太平溪 (左岸平洞)	1967	应变片解除法	100	14 ~ 28	9°	长江水利委员会 综合勘测局
江汉盆地潜江	1981	水压致裂法	1834 3045	101.14	65°	高士钧等
秭归县城 (500m 深孔)	1989	水压致裂法	393.25	11.4 ~ 17.9	66°	地质矿产部
葛洲坝 (28m 深孔)	1977	应变片解除法	27.9	1.33	50°	中国科学院
秭归茅坪镇 (800m 深孔)	1989	水压致裂法	555 700	22	331° 295°	中国地震局
三斗坪张家湾 (300m 深孔)	1984	李曼式 解除法	122 ~ 129 303.51	8.35 8.5	56.8° 340°	长江科学院

3 现今构造应力场的三维数值模拟研究

为了进一步验证纯剪切变形体制的存在，作者考虑了活动断层非连续介质条件，以地质、地震活动、形变、活动断层以及地球物理等资料为基础，建立地质模型，根据上述所确

定的主压应力轴方位（NE57°）和主张应力轴方位（NNW327°或 SE 147°）进行加载，应用非连续介质有限元软件 Marc，对研究区现今构造应力场进行了三维数值模拟分析。结果发现：在仙女山、九湾溪、新华、水田坝等断裂附近存在明显的 X 向和 Y 向右行位移分量，因而属右行走滑断裂；在高桥和马鹿池等断裂附近存在明显的 X 向和 Y 向左行位移分量，因而属左行走滑断裂。Z 向位移在黄陵背斜、巴东及周坪以南地区相对较大，属于隆起区，秭归盆地及神农架南部地区 Z 向位移逐渐变小，属于相对下降区；Z 向位移等值线受活动断裂带影响明显，其等值线基本上与活动断裂走向平行或垂直，并在活动断裂附近中断，仙女山断裂带、高桥断裂、新华断裂、水田坝断裂的西盘 Z 向位移小于东盘，属正断性质；马鹿池断裂的南盘 Z 向位移大于北盘，也属正断性质；九湾溪断裂带北段西盘 Z 向位移小于东盘，属正断性质，其南段西盘 Z 向位移大于东盘，因而九湾溪断裂具有掀断作用。

最大主应力等值线大致与活动断裂平行并密集分布，在断裂带内部及其两端存在应力集中的现象；同时其等值线向断裂带内部剧减，说明这些活动断裂不同程度地具有正断性质。最大主应力 σ_1 方向在黄陵背斜东翼和神农架地区为 SE，在黄陵背斜西翼和秭归盆地西侧， σ_1 方向为 NW，与“隆”“凹”相间的 GPS 形变结果和地应力测量结果一致（图 4）。 σ_1 变化值在 1.4~15MPa 之间，与地应力测量结果相近。

可见，纯剪切变形体制下现今构造应力场的数值模拟研究结果与前述地质、地震、形变、地应力测量等方面的分析结果一致。

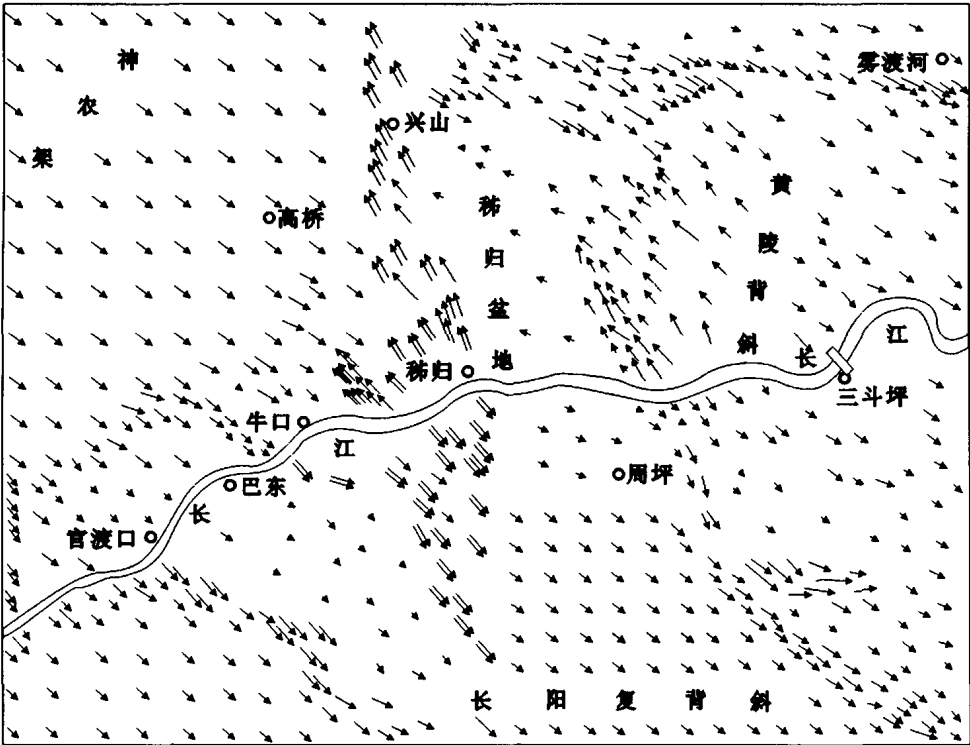


图 4 研究区模拟结果的最大主应力方向分布图

注：箭头代表方向，长短代表大小

Fig.4 Distribution of directions of the maximum principal stress in the study area based on the results of modeling

4 现今构造应力场形成体制的深层动力学分析

构成研究区纯剪切变形体制的 NE 向主压应力和 NWW 向主张应力的形成及其深层动力学问题, 作者在其博士论文中进行过系统的研究, 指出: 一方面由于软流圈的物质沿江汉—洞庭盆地岩石圈上部侵入壳幔过渡流变层, 发生底侵作用, 使其向两侧发生伸展作用, 引起岩石圈变薄; 另一方面, 由于受青藏高原隆升等影响, 四川盆地壳幔过渡流变层产生隆拗, 产生 NE 向强烈挤压, 盆地内部形成一系列冲断层 (图 5); 而秦岭造山带中段又存在近 EW 向的右行剪切走滑作用。这三种力源共同叠加作用于三峡地区, 使黄陵背斜等缓慢隆起, 沿黄陵背斜周边的活动断层发生走滑正断作用, 江汉—洞庭盆地早期形成的伸展正断层以及部分铲式正断层也发生剪切走滑正断作用, 秭归盆地等地区则缓慢下沉, 从而形成了三峡地区现今构造应力场格局。

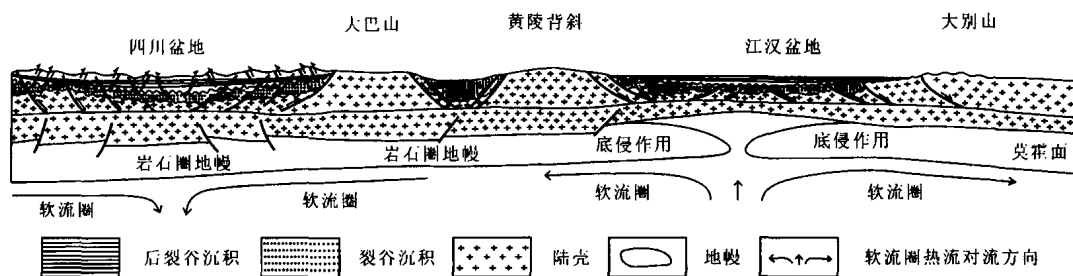


图 5 晚近时期以来江汉—洞庭盆地的底侵作用及四川盆地的对流作用

Fig.5 Underplating of the Jianghan-Dongting basin and convection of the Sichuan basin since the Neoid

5 结论

通过以上分析研究, 作者得出如下结论:

(1) 研究区现今构造应力场属于纯剪切变形体制, 即: 在来自西部 NE 方向主压应力挤压的基础上, 同时叠加有因江汉—洞庭盆地拉张而引起的 NWW 向主张应力的作用, 这两种力源近于直交, 可以分别作为研究区现今构造应力场的主压应力 (σ_1) 和主张应力 (σ_3)。

(2) 研究区现今构造应力场的主压应力轴方位为 NE57°、主张应力轴方位约为 NW327°~SE147°。

(3) 纯剪切变形体制的深层动力学主要源于江汉—洞庭盆地岩石圈上部的底侵作用和四川盆地壳幔过渡流变层 NE 向强烈挤压而产生的隆拗作用。

参 考 文 献

- [1] 袁登维, 梅应堂, 秦兴黎, 等. 长江三峡工程坝区及外围地壳稳定性研究 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996, 17~37.
- [2] 孙叶, 谭成轩, 李开善, 等. 区域地壳稳定性量化评价 [M]. 北京: 地质出版社, 1998, 107~301.
- [3] 李蓉川. 鄂西江汉地区的现代引张应力场 [J]. 地球物理学报, 1986, 29 (3): 302~306.
- [4] 高锡铭, 王少江, 殷志山, 等. 长江三峡及邻区构造应力场和震源错动类型的研究 [J]. 地壳变形与地震, 1994, 14 (2): 1~12.
- [5] 李安然, 曾心传, 严尊国, 等. 峡东工程地震 [M]. 北京: 地震出版社, 1996. 128~135.

- [6] 高士钧. 长江三峡地区地壳应力场与地震 [M]. 北京: 地震出版社, 1992, 26~31.
- [7] 杨森楠, 李江凤, 韦必则, 等. 长江三峡坝区断裂构造的形成和演变的最新研究 [J]. 地质科技情报, 1996, 15 (4): 73~80.
- [8] 湖北省地质矿产局. 湖北省区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1990, 5~30.
- [9] 徐杰, 邓起东, 张玉釉, 等. 江汉一洞庭盆地构造特征和地震活动的初步分析 [J]. 地震地质, 1991, 13 (4): 332~341.
- [10] 虞廷林, 施顺英, 蒋跃. 湖北省现代地壳垂直形变图编制与解释 [J]. 地壳形变与地震, 1992, 12 (2): 74~78.
- [11] 刘经南, 姚宜斌, 施闯, 等. 中国大陆现今垂直形变特征的初步探讨 [J]. 大地测量与地球动力学, 2002, 22 (3): 1~5.
- [12] 严尊国, 薛军蓉. 长江三峡地区弱震重新定位 [J]. 中国地震, 1987, 3 (1): 52~59.
- [13] 许忠淮, 汪素云, 黄雨蕊, 等. 由大量的地震资料推断的我国大陆构造应力场 [J]. 地球物理学报, 1989, 32 (6): 636~647.
- [14] 李蓉川, 韩晓光. 湖北及邻区现代构造应力场初析 [J]. 西北地震学报, 1984, (3): 92~97.
- [15] 刘锁旺, 甘家思, 李蓉川, 等. 江汉洞庭盆地的非对称扩张与潜在地震危险性 [J]. 地壳形变与地震, 1994, 14 (2): 56~66.
- [16] 姚运生, 罗登贵, 刘锁旺, 等. 江汉洞庭盆地及邻区晚中生—新生代以来的构造变形 [J]. 大地构造与成矿学, 2000, (2): 140~145.
- [17] 张强, 朱文耀. 中国地壳各构造块体运动模型的初建 [J]. 科学通报, 2000, 45 (9): 967.
- [18] 杜瑞林, 游新兆, 乔学军. 长江三峡工程诱发地震监测系统 GPS 监测网及其观测结果 [J]. 地壳形变与地震, 2001, 21 (1): 46~52.
- [19] 石建舟. 三峡库区周缘断裂形变监测与地震活动分析 [J]. 人民长江, 2000, 31 (3): 4~6.

ANALYSIS OF THE FORMATION SYSTEM OF THE PRESENT TECTONIC STRESS FIELD IN THE HEAD AREA OF THE THREE GORGES RESERVOIR

LI Xi-guang¹, YAO Yun-sheng², ZENG Zuo-xun³, LIU Li-lin³

(1. Engineering Seismic Research Center, Seismological Bureau of Guangxi, Nanning, 530022, Guangxi;

2. Institute of Seismology, China Seismological Bureau, Wuhan, 430071, Hubei;

3. School of Earth Sciences, China University of Geoscience, Wuhan 430074, Hubei)

Abstract: The present tectonic stress field in the head area of the Three Gorges reservoir was systematically analyzed and verified in the geological, seismological, deformation and in situ stress contexts and checked by numerical modeling. The authors think that the present tectonic stress field in the study area belongs to a pure shear system, i. e. the superimposition of the NE-SW principal compressional stress from the west is superimposed by the WNW-ESE principal tensional stress resulting from extension of the Jiangnan-Dongting basin. The axes of the two stresses intersect nearly perpendicularly to each other; so they can act as the principal compressive stress (σ_1) and the principal tensional stress (σ_3) of present tectonic stress field in the study area respectively.

Key words: head area of the Three Gorges reservoir; present tectonic stress field; pure shear system; numerical modeling