

吴满路, 马寅生, 张春山等. 兰州至玛曲地区地应力测量与现今构造应力场特征研究. 地球物理学报, 2008, 51(5): 1468~1474  
Wu M L, Ma Y S, Zhang C S, et al. In-situ stress measurement and tectonic stress field study in the region of Lanzhou-Maqu. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(5): 1468~1474

# 兰州至玛曲地区地应力测量与现今构造 应力场特征研究

吴满路<sup>1,2</sup>, 马寅生<sup>1,2</sup>, 张春山<sup>1,2</sup>, 廖椿庭<sup>1,2</sup>, 区明益<sup>2</sup>

1 国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室

2 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081

**摘 要** 兰州—玛曲地区是印度板块东北向推挤引起青藏块体强烈变形的前缘区, 该区的现今构造应力场研究对研究大陆动力学问题具有重要意义. 本文给出了兰州—玛曲地区不同地点的现今地应力实测值的大小和方向. 测量方法采用压磁应力解除法, 测点分别布置在阿姨山、大水、尕海、玛艾以及清水. 为系统研究本区及邻近地区现今构造应力场特征, 对已有应力实测数据进行了整理分析. 研究结果表明, 本区及邻区几十米浅表部应力与其他地区相比, 属于中等大小量值; 应力随深度增加而加大, 但在不同构造单元, 应力增加梯度有所不同; 最大水平主应力方向总体上为北东向, 不同构造单元上方向有所不同. 鄂尔多斯地块最大水平主应力方向为近东西向, 河西走廊带最大水平主应力方向在北北西—北东方向内变化, 祁连山东南端最大水平主应力方向变化较大, 西秦岭地块是现今地应力的一个过渡带, 最大水平主应力方向由北侧的 NE 向逐渐转变为中部的 EW 向和南侧的 SEE 向. 本文给出的结果与由 GPS 观测给出的该区域应变场分布具有一致性.

**关键词** 兰州—玛曲地区, 地应力测量, 构造应力场

**文章编号** 0001-5733(2008)05-1468-07

**中图分类号** P553

**收稿日期** 2007-07-27, 2008-06-13 收修定稿

## In-situ stress measurement and tectonic stress field study in the region of Lanzhou-Maqu

WU Man-Lu<sup>1,2</sup>, MA Yin-Sheng<sup>1,2</sup>, ZHANG Chun-Shan<sup>1,2</sup>, LIAO Chun-Ting<sup>1,2</sup>, OU Ming-Yi<sup>2</sup>

1 *Key Laboratory of Neotectonic Movement & Geohazard*

2 *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100081, China*

**Abstract** The study region is a strongly deformed area of the east margin of the Tibet plateau due to the northeastward compression of Indian plate. A study on the recent state of stress in the plateau provides basic data for research of continental dynamics. The values and directions of the ground stress at several sites of Lanzhou-Maqu area are given in the paper using piezomagnetic stress gauge overcoring method. The measurement sites are situated in Ayishan, Dashui, Gahai, Ma'ai and Qingshui. The previous stress data are also analyzed for studying the tectonic stress field in the region of Lanzhou-Maqu and its adjacent area. It is shown that the values of ground stress in depths less than 100m are medium as compared to that in other areas, and increase with depth, the increase rate differs in different tectonic units. The overall direction of maximum principal stress is northeast with a small variation in different tectonic units. The direction of maximum principal stress is nearly west-east in Ordos block, NNW-NE in Hexizoulang. The

**基金项目** 中国地质调查局地调项目(20012400103)、中国地质科学院大调查预警工程项目(DKD2003003)和地质力学研究所基本科研业务费项目(DZLXJK200812)联合资助.

**作者简介** 吴满路, 男, 1968 年生, 研究员. 主要从事地应力测量、岩石力学等方面研究工作. E-mail: wumanlu@126.com.

changing of maximum principal stress direction is maximum in the southeast part of Qilanshan mountain. The west Qinling mountain is a transition zone of ground stress direction. The direction of maximum principal stress is changed gradually from NE in north to EW in middle part and SEE in south. The results agree with the results from GPS observation in this area.

**Keywords** The region of Lanzhou-Maqu, In-situ stress measurement, Tectonic stress field

## 1 引言

兰州—玛曲地区及邻区在地形上处于青藏高原隆起区的东北边缘。在大地构造上,北侧及东北侧是阿拉善地块和鄂尔多斯地块,向西南依次为祁连山造山带、秦岭造山带、松潘—甘孜造山带,东南为扬子地块。本区是强烈地震活动区,也是现今构造活动强烈地区,区内分布多条大型深断裂带,其中多数不仅是重要的构造分区边界断裂,也是控制现今地震活动的活断层<sup>[1]</sup>,其现今块体运动动力驱动机制、断裂活动性以及构造形变特征等方面研究已成为许多学者关注的热点<sup>[2~5]</sup>。本区所处青藏高原东北缘地区现今构造应力特征研究,作为以上诸多研究问题的基础,也已受到广泛重视。许多学者从 GPS 观测、震源机制解、第四纪地质调查、数值模拟角度研究青藏高原东北缘地壳变形特征、动力驱动机制,取得了一系列重要成果<sup>[6~8]</sup>,认为该区总体在东北向构造应力场控制之下,主应力变化主要集中在块体边界断裂,最大剪应力沿断裂走向交替变化。以上这些研究工作从总体上论述了青藏高原东北缘地区动力变形及构造应力场特征,但没有对本区不同构造单元现今构造应力场差异性进行系统研究。利用地应力测量技术进行这方面的研究工作是较直接的方法。前人已对本区及邻近地区进行了大量的地应力实测,并积累了相当数量的测量数据,但这些测量工作主要集中在几个水电工程和矿山附近,而区域上的测量工作还很少。为从区域上分析本区的现今应力状态,并进行构造应力场特征研究,我们在没有实测地应力数据的兰州—玛曲段进行了现场地应力实测工作。本文主要从地应力测量结果来讨论兰州—玛曲地区及邻区现今构造应力场特征。

目前国内外比较常用的地应力测量方法有压磁应力解除法、空芯包体应力解除法、水压致裂法等<sup>[9]</sup>。压磁应力解除法主要用于地表、隧道和矿山应力测量,既可以测量平面应力,也可以测量三维应力,它的优点是稳定性好、测量精度高,测值误差在 10% 以内,方向误差在 3° 以内<sup>[10]</sup>,用于地表应力测

量,测量深度已达近百米;空芯包体应力解除法广泛用于矿山、隧道工程井下浅部和深部地应力测量,单孔可求解三维应力状态,该方法测量精度较高,井下测量深度已达 1100 多米<sup>[11]</sup>;水压致裂法操作简便,且不需要知道岩石的弹性参数,并能方便地测量钻孔中任意深度的应力状态,测量深度可达数千米,是目前能够进行深部应力测量的主要方法<sup>[12]</sup>。近些年来,许多学者在本区及邻近地区应用以上方法进行了大量地应力测量研究工作,均取得了很好的效果<sup>[13~20]</sup>。

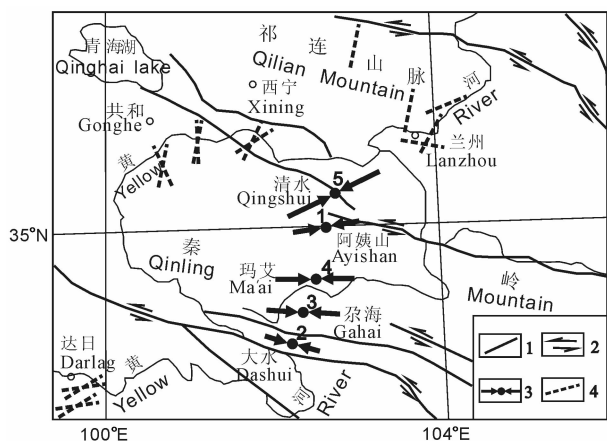
本次地应力测量采用了压磁应力解除法,在兰州—玛曲实测应力空白区布置了 6 个地应力测点。为了对本区及邻近地区进行系统的现今应力状态研究,我们还对本区已有的地应力测量成果进行了总结分析<sup>[21]</sup>。

## 2 兰州至玛曲地区地应力测量结果

### 2.1 测点布设

压磁应力解除法在测量过程中需要对测点岩石进行套芯解除试验,此后还要对解除的岩芯进行围压率定试验,只有完整岩芯才能把岩石弹性恢复特征准确反映于测量元件上,因此地应力测点要选择于节理裂隙不发育、新鲜完整的岩石中,避开大的断层破碎带。此外,由于压磁应力解除法属于地表浅部应力测量方法,地形起伏对测量结果有一定影响,因此测点要尽量选择在地形平坦、基岩埋深较浅的地方。本次兰州—玛曲段地应力测量共布置了 6 个测点(图 1),测量深度基本都在 20 m 以内。

1 号测点位于北纬 35°12'55",东经 102°42'24",海拔高度 2729m,测点位于甘肃省夏河县达麦乡山塘村阿姨山铜矿选矿场,岩性为花岗岩。2 号测点位于北纬 34°00'55",东经 102°16'01",海拔高度 3438 m,岩性为灰岩,测点位于甘肃省玛曲县尼玛乡大水。3 号测点位于北纬 34°14'57",东经 102°17'48",海拔高度 3476 m,岩性为灰岩,测点位于甘肃省碌曲县尕海乡库尕合。4 号测点位于北纬 34°36'25",东经 102°27'59",海拔高度 3121m,岩性为砂岩,测点



1 断裂 Fault; 2 断层走滑方向 Slip direction of fault; 3 测点及最大主应力大小及方向 Measurement site and the values and direction of the maximum principal stress; 4 本区已有应力测点及方向 Other measurement site and direction of stress in the area.

图 1 兰州—玛曲地区及邻区地应力测点及断裂分布图  
Fig. 1 Distribution of stress measurement sites and faults in the region of Lanzhou-Maqui and the adjacent area.

位于甘肃省碌曲县玛艾乡桥头北 2 km 处, 5 号测点位于北纬  $N35^{\circ}22'21''$ , 东经  $102^{\circ}51'12''$ , 海拔高度 2302 m, 岩性为花岗闪长岩, 测点位于甘肃省夏河县清水乡头道河村, 6 号测点位于北纬  $35^{\circ}21'43''$ , 东经  $102^{\circ}50'14''$ , 海拔高度 2344 m, 测点位于甘肃省夏河县麻当乡黄年村班洞沟, 岩性为花岗闪长岩。测点具体位置如图 1 所示。以上阿姨山、大水、尕海、玛艾、清水五个地点地应力测量获得成功, 班洞沟测点由于岩石破碎, 未取得有效数据, 测量失败。

## 2.2 本次兰州—玛曲段应力测量结果

青藏高原东北缘兰州—玛曲间基本为实测应力空白区, 为获得该区现今应力状态, 并深入分析构造应力场特征, 我们在兰州—玛曲间布设了 6 个测点, 进行应力解除测量。利用压磁应力解除法成功地获得了 5 个测点的地应力实测数据。根据野外应力解除数据和现场率定数据, 应用最小二乘法进行计算分析, 得到各个测点的地应力方向和大小(表 1、图 1), 此外为便于应力结果分析, 还给出了各个测点平面应力椭圆图(图 2)。

本次兰州—玛曲间地表浅部的地应力测量, 测量深度均在 20 m 左右, 阿姨山、尕海、大水 3 个测点最大水平主应力量值基本都在 3~4.5 MPa 之间, 最小水平主应力量值基本都在 2~3 MPa 之间, 与最大水平主应力量值相比差别不大, 剪应力量值不高; 玛艾测点最大水平主应力量值为 4.8 MPa, 最小

表 1 兰州—玛曲地区压磁法地应力测量结果  
Table 1 Results of stress measurements by piezomagnetic stress gauge in Lanzhou-Maqui area

测点编号	测点位置	岩性	测量深度 (m)	水平最大主应力 (MPa)	水平最小主应力 (MPa)	最大主应力方向
1	阿姨山	花岗岩	19.0	3.5	2.3	$N87^{\circ}E$
2	大水	灰岩	20.0	2.8	-0.9	$N118^{\circ}E$
3	尕海	灰岩	22.0	4.4	2.3	$N93^{\circ}E$
4	玛艾	砂岩	18.0	4.8	1.9	$N91^{\circ}E$
5	清水	闪长岩	16.0	7.4	2.8	$N56^{\circ}E$

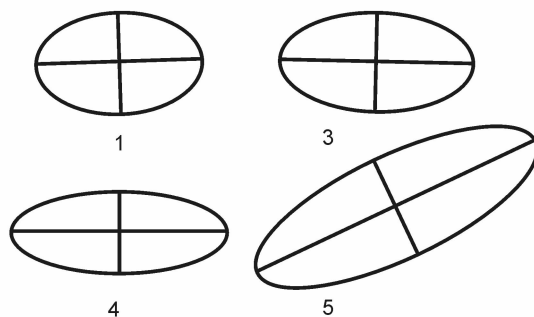


图 2 兰州—玛曲地区地应力测点应力椭圆示意图  
(2 号测点最小水平主应力为负, 应力椭圆不能图示)  
Fig. 2 Sketch map of stress ellipse at each stress measurement site in the region of Lanzhou-Maqui  
(The minimum horizontal principal stress is negative at site 2, so the stress ellipse is not shown)

水平主应力量值仅为 1.9 MPa, 剪应力量值较高; 清水测点最大水平主应力量值达 7.4 MPa, 对于地表浅部 20 m 深度之内来说, 这个量值属于高应力量值。

兰州—玛曲间 5 个测点最大水平主应力方向变化较大, 清水测点最大水平主应力方向为  $N56^{\circ}E$ , 阿姨山、玛艾、尕海 3 个测点最大水平主应力方向比较一致, 分别为  $N87^{\circ}E$  方向、 $N91^{\circ}E$  方向和  $N93^{\circ}E$  方向, 大水测点最大水平主应力方向为  $S62^{\circ}E$  方向。这 5 个测点最大水平主应力方向, 从东北的清水测点到西南的大水测点, 呈现明显的顺时针偏转规律。

## 3 兰州—玛曲地区及邻近地区已有的应力测量结果

兰州—玛曲地区及邻近地区前人已进行了相当数量地应力实测工作<sup>[13~20]</sup>, 由于测量数据分散, 且测量方法多样, 为研究本区及邻区现今构造应力场特征, 需要对前人应用各种测量方法获得的地应力

实测数据进行系统的整理分析. 这些实测地应力测量数据, 主要在矿山、交通隧道及水利水电等工程测试中获得的, 由于一些测量工作需要特定的工程部位应力状态进行测试, 而这些特定工程部位往往存在应力集中, 测试数据不能完全反映区域构造应力特征, 因此这部分测试数据需要在分析中加以去除, 以使实测数据真实反映构造地块稳定的应力状态. 对已有地应力测试数据筛选的原则是: 去除矿山巷道、水电洞室、交通隧道中弯、拐、叉等应力集中或应力松弛部位测试数据; 去除受地形影响斜坡卸荷带测点及测段数据; 去除受断裂构造影响的测点数据.

兰州—玛曲地区及邻近地区已有的地应力实测工作主要集中分布在青铜峡、李家峡、拉西瓦、龙羊峡几个主要的水利工程的坝址附近和金川铜镍矿、白银铜矿、华亭煤矿等矿区及其周边, 而北部河套地区应力实测数据较少. 近年来为配合铁路深埋隧道、南水北调等工程的实施, 也针对性地开展了一系列地应力测试工作. 以上地应力测量工作主要采用压磁法、空心包体法和水压致裂法, 为了对各种方法获得的测量结果进行对比分析, 我们对以上测量数据进行了整理, 列于表2、表3、表4, 此外综合以上实

测数据, 给出了本区及邻近地区最大水平主应力、最小水平主应力随深度变化曲线图(图3).

兰州—玛曲地区及邻近地区前人进行的地应力测量, 测量深度在十几米至几百米, 最大水平主应力值从几兆帕到40~50 MPa不等, 最小水平主应

**表3 青藏高原东北缘地区空心包体法地应力测量结果**  
**Table 3 Results of stress measurements by hollow inclusion gauge method in the northeastern margin of the Qinghai-Tibetan Plateau**

测点位置	岩性	测量深度 (m)	最大主应力 (MPa)	中间主应力 (MPa)	最小主应力 (MPa)	最大主应力方向(°)
李家峡	混合岩	100	9.7	2.9	0.1	61
李家峡	混合岩	130	5.5	4.5	2.8	58
青铜峡	砂岩		8.2	3.0	2.5	291
青铜峡	砂岩		9.1	1.4	0.1	296
金川二矿	贫矿	580	28.1	14.3	11.6	35
金川二矿	贫矿	580	28.4	13.3	9.4	37
金川二矿	围岩	730	37.0	17.6	13.1	177
金川二矿	围岩	730	37.9	16.8	12.2	18
金川二矿	围岩	790	40.6	20.6	16.8	161
砚北煤矿	砂岩	383	16.9	7.9	6.5	103
砚北煤矿	泥岩	450	16.5	9.3	6.6	71
砚北煤矿	砂岩	450	14.5	8.23	4.0	93

注: 表中数据引自丁旭初等<sup>[16]</sup>、蔡美峰等<sup>[20]</sup>以及李化敏等<sup>[17]</sup>.

**表2 青藏高原东北缘地区压磁法地应力测量结果**  
**Table 2 Results of stress measurements by piezomagnetic stress gauge in the northeastern margin of the Qinghai-Tibetan Plateau**

测点位置	岩性	测量深度 (m)	最大水平主应力 (MPa)	最小水平主应力 (MPa)	最大主应力方向 (°)
青铜峡	灰岩	31.3	4.8	3.0	75
青铜峡	砂岩	29.5	4.5	2.7	17
龙羊峡		49~60	7.8	6.7	15
龙羊峡		68~96	10.2	6.2	178
龙羊峡		87~95	11.6	7.6	116
龙羊峡		84~99	11.3	4.0	0
拉西瓦	花岗岩	200~267	19.0	10.5	56
金川二矿	大理岩	44	4.2	3.5	20
金川二矿	大理岩	375	19.8	10.8	3
金川二矿	大理岩	460	50.0	28.2	163
金川二矿	富矿	480	32.0	20.6	32
甘肃青山堡	闪长岩	14.7	2.9	2.2	59
甘肃平峡口	花岗岩	37	8.4	3.0	43

注: 表中金川、青山堡、平峡口数据引自廖椿庭等<sup>[13]</sup>, 龙羊峡、拉西瓦数据来自地壳应力研究所谢富仁.

**表4 青藏高原东北缘地区水压致裂法地应力测量结果**  
**Table 4 Results of stress measurements by hydraulic fracturing stress measuring methods in the northeastern margin of the Qinghai-Tibetan Plateau**

测点位置	岩性	测量深度 (m)	水平最大主应力 (MPa)	水平最小主应力 (MPa)	最大主应力方向 (°)
拉西瓦 ZK39 孔	花岗岩	40.7	5.5	3.9	61
拉西瓦 ZK39 孔	花岗岩	66.7	6.5	5.2	21
拉西瓦 ZK39 孔	花岗岩	94.4	15.3	9.0	41
拉西瓦 ZK39 孔	花岗岩	165	32.9	16.8	53
拉西瓦 ZK72 孔	花岗岩	44.8	11.1	7.7	17
拉西瓦 ZK72 孔	花岗岩	164.8	22.3	11.7	354
达日长须乡	板岩	140	10.9	6.9	69
达日长须乡	板岩	155	10.6	6.5	57
达日莫坝乡	砂板岩	212	10.1	8.1	54
达日莫坝乡	砂板岩	220	10.5	8.7	70
达日莫坝乡	砂板岩	235	11.1	8.8	48

注: 表中数据引自梁国平等<sup>[15]</sup>、王学潮等<sup>[19]</sup>.

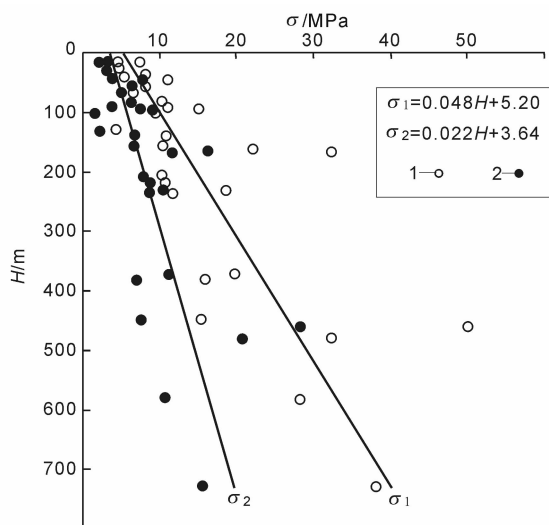


图3 兰州—玛曲地区及邻区应力随深度变化图

1. 最大水平主应力; 2. 最小水平主应力;  $\sigma_1$  最大水平主应力回归值;  $\sigma_2$  最小水平主应力回归值.

Fig. 3 Variation with depth of the stresses in the region of Lanzhou-Maqu and adjacent area

1. The maximum horizontal principal stresses; 2. The minimum horizontal principal stresses;  $\sigma_1$  The regression curve of the maximum horizontal principal stress;  $\sigma_2$  The regression curve of the minimum horizontal principal stress

力量值基本在几兆帕到 20 MPa 之间,且不同方法获得的应力量值,在相同深度范围内差别不大. 测量深度在 50 m 之内,最大水平主应力量值一般不超过 10 MPa,测量深度在 50~300 m 范围内,最大水平主应力量值一般在 15 MPa 左右,测量深度在 300 m 以上,最大水平主应力量值一般都在 20 MPa 以上,最大可达 40~50 MPa;最小水平主应力量值在 100 m 之内一般不超过 6 MPa,测量深度在 100~400 m 范围内,最小水平主应力量值一般在 10 MPa 左右,测量深度在 400~700 m 范围内,最小水平主应力量值一般不超过 20 MPa. 以上数据基本反映了本区构造应力随深度变化规律(图 3). 同一构造单元最大主应力方向随测量方法、测量深度不同变化不大,在不同构造单元最大主应力方向具有一定变化,但基本是在近南北—北东—北东东方向范围内变化,说明本区现今构造应力场具有相对稳定性,并呈现一定分布规律.

## 4 讨论

### 4.1 各种方法地应力测量结果代表性

在世界各地开展的地应力测量工作,浅部的应

力测量主要应用应力解除法,深部的应力测量主要采用水压致裂法. 浅部的地应力测量数据容易受到地形和地质条件影响,而深部的地应力测量(水压致裂法)也要考虑原生裂隙等因素的影响,此外为获得稳定的构造应力场数据,地应力测点还应远离大的活动断裂带. 在排除地应力测量各种影响因素的情况下,地应力测量结果是能够反映区域构造应力场特征的<sup>[22~24]</sup>.

目前国内外开展的地应力测量工作,有浅部的测量(十几米、几十米至近百米),有深部的测量(几百米至近千米),对这些不同方法、不同深度的应力实测结果分析表明,受板块构造运动和地壳动力环境影响,不同地区应力作用特征不尽相同,应力随深度线性增大的梯度也不尽相同,但在同一构造区域最大水平主应力方向比较一致,且浅部的测量结果与深部的测量结果也比较统一,这说明构造应力场是相对稳定的,并呈现规律性分布.

综上所述,浅部应力和深部应力都是由构造应力引起的,浅部应力和深部应力在方向上具有一致性,在排除各种影响因素情况下,地壳表层浅部和深部的应力测量结果是能够反映区域构造应力场特征. 这次兰州—玛曲间应力测量,仅开展了浅层的测量工作,在结合本区已有的应力测量成果基础上,对青藏高原东北缘地区现今应力状态进行探讨.

### 4.2 研究区及邻区现今构造应力场特征分析

本次兰州—玛曲间地应力测量,共获得 5 个测点应力实测数据,结合河西走廊、祁连山东南端以及鄂尔多斯地块已有的应力实测数据,初步形成一个横跨青藏高原东北缘的北东向实测应力走廊剖面.

地应力测量结果表明,测量深度在 50 m 范围内,最大水平主应力量值一般不超过 10 MPa,最小水平主应力量值一般不超过 5 MPa. 阿姨山、尕海、玛艾、大水 4 个测点,测量深度均在 20 m 左右,最大水平主应力量值在 3~5 MPa 之间,最小水平主应力量值在 1.9~2.3 MPa 之间;拉西瓦、龙羊峡、青铜峡以及金川镍矿等地测点,浅部 50 m 深度范围内,最大水平主应力量值也不超过 5~6 MPa,最小水平主应力量值一般不超过 3.5 MPa. 这与我国其他地区地表浅部相同深度范围内实测最大水平主应力量值相比,属于中等应力量值. 清水测点最大水平主应力量值达 7.4 MPa,对于地表浅部 20 m 深度之内来说,这个量值属于高应力量值,加之最小水平主应力量值仅为 2.8 MPa,因此说该点附近现今构造活动在较高的剪应力控制下. 测量深度在 50~300 m

范围内,最大水平主应力量值一般在 15 MPa 左右,最小水平主应力量值一般在 6~7 MPa 左右,测量深度在 300~400 m 以上,最大水平主应力量值一般都在 20 MPa 以上,最小水平主应力量值一般在 10 MPa 左右,地应力随深度增加而加大,但在不同构造单元,地应力量值增加梯度有所不同。

青藏高原东北缘地区地应力分布具有明显的规律性,最大水平主应力方向总体上为北东向,不同构造单元上方向有所不同。在鄂尔多斯地块上最大水平主应力方向为近东西向,河西走廊带最大水平主应力方向在北北西—北东方向内变化,祁连山东南端最大水平主应力方向变化较大,但总体为北东向,西秦岭地块是现今地应力的一个过渡带,由北向南,最大水平主应力方向由北侧的 NE 向逐渐转变为中部的 EW 向和南侧的 SEE 向。

兰州—玛曲地区应力测量结果与构造应力场综合分析方法、地质调查方法以及 GPS 形变分析方法所取得的研究成果具有一致性。

谢富仁等<sup>[25]</sup>利用水压致裂地应力测量、应力解除、震源机制解、钻孔崩落、断层滑动反演和应力应变连续观测资料编制了中国大陆地壳应力环境基础数据库,总结了中国大陆及邻区现今构造应力场的基本特征,进行了构造应力分区,研究表明青藏高原东北缘地区现今构造应力场主压应力方向分布比较复杂,自北向南,有由北东、北东东、近东西、南东到南南东方向的变化趋势,断裂活动以走滑为主。

袁道阳等<sup>[6]</sup>利用地质调查方法研究本区晚第四纪构造运动及其变形机制,认为青藏高原东北缘地区应变被分解为沿北西向西断裂的左旋走滑和沿北北西向断裂的右旋走滑运动,形成一对共轭的剪切断裂,该区存在区域性北东向挤压作用。

江在森等<sup>[26,27]</sup>利用 GPS 观测资料研究中国大陆水平应变场与构造变形,给出了中国大陆应变率场主压应变方向的空间变化规律,结果显示本区主压应变方向呈顺时针旋转特征,这与地应力实测给出的主压应力轴的顺时针旋转特征具有一致性。

## 参考文献(References)

[1] 周民都,吕太乙,张元生等. 青藏高原东北缘地质构造背景及地壳结构研究. 地震学报,2000,22(6):645~653  
Zhou M D, Lü T Y, Zhang Y S, et al. The geological structure background and the crustal structure in the northeastern margin of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2000, 22(6):645~653

[2] 戴华光,贾云鸿,苏向州等. 青藏高原东北缘最新构造变形的

初步研究. 地质力学学报,1996,2(4):15~20  
Dai H G, Jia Y H, Su X Z, et al. Preliminary study on the latest tectonic deformations along northeast margin of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Geomechanics* (in Chinese), 1996, 2(4):15~20

[3] 熊 熊,滕吉文. 青藏高原东缘地壳运动与深部过程的研究. 地球物理学报,2002,45(4):507~515  
Xiong X, Teng J W. Study on crustal movement and deep process in eastern Qinghai-Xizang Plateau. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2002, 45(4):507~515

[4] 王双绪,张 希,张四新等. 青藏高原东北缘现今构造变动与地震活动特征. 地球学报,2005,26(3):209~216  
Wang S X, Zhang X, Zhang S X, et al. Characteristics of recent tectonic deformation and seismic activity in the northeastern margin of Tibetan Plateau. *Acta Geoscientica Sinica* (in Chinese), 2005, 26(3):209~215

[5] 江在森,张 希,崔笃信等. 青藏块体东北缘近期水平运动与变形. 地球物理学报,2001,44(5):636~644  
Jiang Z S, Zhang X, Cui D X, et al. Recent horizontal movement and deformation in the northeast margin of Qinghai-Tibet Block. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2001, 44(5):636~644

[6] 袁道阳,张培震,刘小龙等. 青海鄂拉山断裂带晚第四纪构造活动及其所反映的青藏高原东北缘的变形机制. 地学前缘,2004,11(4):393~402  
Yuan D Y, Zhang P Z, Liu X L, et al. The tectonic activity and deformation features during the late quaternary of Elashan Mountain active fault zone in Qinghai Province and its implication for deformation of the northeastern margins of the Qinghai-Tibet Plateau. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2004, 11(4):393~402

[7] 张永志,胡 斌,陈宏宾. 应用 GPS 观测青藏高原东北缘应力场变化. 长安大学学报(地球科学版),2003,25(4):80~84  
Zhang Y Z, Hu B, Chen H B. Variation of stress computed from GPS measurement in northeastern margin of Qinghai-Tibetan Plateau China. *Journal of Chang'an University (Earth Science Edition)* (in Chinese), 2003, 25(4):80~84

[8] 徐纪人,赵志新,石川有三. 中国大陆地壳应力场与构造运动区域特征研究. 地球物理学报,2008,51(3):770~781  
Xu J R, Zhao Z X, Ishikawa Y. Regional characteristics of crustal stress field and tectonic motions in and around Chinese mainland. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(3):770~781

[9] 刘允芳,罗超文,龚壁新等. 岩体地应力与工程建设. 武汉:湖北科学技术出版社,2000.1~182  
Liu Y F, Luo C W, Gong B X, et al. *Geostress and Engineering Construction*. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 2000.1~182

[10] 王连捷,潘立宙,廖椿庭等. 地应力测量及其在工程中的应用. 北京:地质出版社,1991.82~101  
Wang L J, Pan L Z, Liao C T, et al. *Crustal Stress Measurements and Their Application in Engineering*. Beijing:

- Geological Publishing House, 1991, 82~101
- [11] 吴满路, 廖椿庭, 张春山等. 红透山铜矿地应力测量及其分布规律研究. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**:3943~3947  
Wu M L, Liao C T, Zhang C S, et al. Research on in-situ stress measurement and its distribution law in Hongtoushan copper Mine. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* (in Chinese), 2004, **23**:3943~3947
- [12] 郭启良. 水压致裂应力测量方法的新发展(中国大陆地壳应力环境研究). 北京:地质出版社, 2003, 164~173  
Guo Q L. New Developments of Hydraulic Fracturing Stress Measuring Methods(Crustal Stress in China) (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 2003, 164~173
- [13] 廖椿庭, 崔明铎, 任希飞等. 金川矿区应力测量与构造应力场. 北京:地质出版社, 1985, 22~35  
Liao C T, Cui M D, Ren X F, et al. In-situ stress measurements and tectonic stress field in the Jinchuan mine area (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1985, 22~35
- [14] 施兆贤, 丁旭初, 安其美等. 拉西瓦水电站地应力测量及有关问题的讨论. 见:地壳构造与地壳应力文集. 北京:地震出版社, 1991, (5):167~180  
Shi Z X, Ding X C, An Q M, et al. Crustal stress measurement of Laxiwa hydropower station and the discussion of the related problem. In: Proceedings of Crustal Tectonic and Crustal Stress (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1991, (5):167~180
- [15] 梁国平, 孙世宗, 郭启良等. 青海拉西瓦水电站水压致裂应力测量结果. 见:地壳构造与地壳应力文集, 1991, (5):132~141  
Liang G P, Sun S Z, Guo Q L, et al. Results of hydrofracture stress measurement in Laxiwa Hydropower Station Region, Qinghai Province. In: Proceedings of Crustal Tectonic and Crustal Stress (in Chinese), 1991, (5):132~141
- [16] 丁旭初, 杨增学, 刘宗坚等. 黄河上游某水电站地应力测量及地下厂房设计中有关问题的研究. 见:地壳构造与地壳应力文集, 1988, (2):59~68  
Ding X C, Yang Z X, Liu Z J, et al. Some problems concerning stress measurements at a hydroelectric station in upper reaches of the Huanghe River and its underground design. In: Proceedings of Crustal Tectonic and Crustal Stress (in Chinese), 1988, (2):59~68
- [17] 李化敏, 周英, 苏承东等. 砚北煤矿地应力测量及其特征分析. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**:3938~3942  
Li H M, Zhou Y, Su C D, et al. Measurement and characteristics analysis of in-situ stresses of Yanbei coal mine. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* (in Chinese), 2004, **23**:3938~3942
- [18] 陶波, 伍法权, 郭启良等. 高地应力作用下乌鞘岭深埋隧道软弱围岩流变规律研究. 地球与环境, 2005, **33**(增刊):304~308  
Tao B, Wu F Q, Guo Q L, et al. Research on rheology rule of deep-buried long tunnel of Wuqiaoling under high crust stress. *Earth and Environment* (in Chinese), 2005, **33** (Suppl.):304~308
- [19] 王学潮, 郭启良, 张辉等. 青藏高原东北缘水压致裂地应力测量. 地质力学学报, 2000, **6**(2):64~70  
Wang X C, Guo Q L, Zhang H, et al. Crustal stress measurement in northeastern Qingzang plateau by hydrofracturing. *Journal of Geomechanics* (in Chinese), 2000, **6**(2):64~70
- [20] 蔡美峰, 乔兰, 于波等. 金川二矿区深部地应力测量及其分布规律研究. 岩石力学与工程学报, 1999, **18**(4):414~418  
Cai M F, Qiao L, Yu B, et al. Results and analysis of in-situ stress measurement at deep position of No. 2 mining area of Jinchuan nickel mine. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* (in Chinese), 1999, **18**(4):414~418
- [21] 马寅生, 廖椿庭, 张业成等. 黄河上游新构造活动与地质灾害风险评价. 北京:地质出版社, 2003, 118~135  
Ma Y S, Liao C T, Zhang Y C, et al. The neotectonic activity and the evaluation of geological hazards risk in the upper reaches of the Yellow River (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 2003, 118~135
- [22] 李方全, 孙世宗, 李立球. 华北及邻区断裂带地应力测量. 岩石力学与工程学报, 1982, **1**(1):73~86  
Li F Q, Sun S Z, Li L Q. In-situ stress measurements in China and Tancheng-Lujiang fault zone. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* (in Chinese), 1982, **1**(1):73~86
- [23] 吴满路, 张春山, 廖椿庭等. 青藏高原腹地现今地应力测量与应力状态研究. 地球物理学报, 2005, **48**(2):327~332  
Wu M L, Zhang C S, Liao C T, et al. The recent state of stress in the central Qinghai-Tibet Plateau according to in-situ stress measurements. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, **48**(2):327~332
- [24] 张春山, 吴满路, 廖椿庭等. 西藏羊八井—康马地区现今地应力测量结果与应力状态分析. 地球物理学报, 2007, **50**(2):517~522  
Zhang C S, Wu M L, Liao C T, et al. The result of current stress measurements and stress state analysis in the region of Yangbajain-Kangmar in Tibet. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, **50**(2):517~522
- [25] 谢富仁, 崔效锋, 赵建涛等. 中国大陆及邻区现代构造应力场分区. 地球物理学报, 2004, **47**(4):654~662  
Xie F R, Cui X F, Zhao J T, et al. Regional division of the recent tectonic stress field in China and adjacent areas. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, **47**(4):654~662
- [26] 江在森, 马宗晋, 张希等. GPS初步结果揭示的中国大陆水平应变场与构造变形. 地球物理学报, 2003, **46**(3):352~358  
Jiang Z S, Ma Z J, Zhang X, et al. Horizontal strain field and tectonic deformation of China mainland revealed by preliminary GPS. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2003, **46**(3):352~358
- [27] 江在森, 杨国华, 王敏等. 中国大陆地壳运动与强震关系研究. 大地测量与地球动力学, 2006, **26**(3):1~9  
Jiang Z S, Yang G H, Wang M, et al. On crustal movement in China continent and its relationship with strong earthquakes. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 2006, **26**(3):1~9