

郭晓,张元生,刘旭宙,等.甘肃主动源建设发展与展望[J].地震工程学报,2020,42(5):1146-1150.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.05.1146

GUO Xiao,ZHANG Yuansheng,LIU Xuzhou,et al.Development and Prospects of Active-Source Construction in Gansu Province[J].China Earthquake Engineering Journal,2020,42(5):1146-1150.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.05.1146

甘肃主动源建设发展与展望

郭 晓,张元生,刘旭宙,秦满忠,魏从信,邹 锐,
王亚红,孙点峰,刘志国

(1. 甘肃兰州地球物理国家野外科学观测研究站,甘肃 兰州 730000;
2. 中国地震局兰州地震研究所,甘肃 兰州 730000)

摘要: 利用大容量气枪震源探测已成为探索地震预报新途径的一个重要发展方向,将推进经验性地震预测与物理预测的结合。祁连山、刘家峡气枪发射台的选址与建设经历曲折过程,在多方努力和帮助下,克服重重困难,最终高质量完成。祁连山气枪发射台的稳定运行,已积累了丰富的主动源气枪激发数据,并取得了多项创新性成果。新建的刘家峡气枪发射台将实现对海原断裂和西秦岭北缘深大断裂的连续监测,通过多点监测,分析强震孕育与区域应力场和介质变化的关系,开展地震危险性的分析研究。位于青藏高原东北缘强震活动强烈地区的甘肃未来计划再建设3个气枪主动源,联合祁连山、刘家峡气枪主动源,实现对青藏高原东北缘断裂带系进行主动源四维探测,对于甘肃的防震减灾和地震预测具有重要意义。

关键词: 主动源;重复探测;祁连山;刘家峡;甘肃

中图分类号: P315.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)05-1146-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.05.1146

Development and Prospects of Active-Source Construction in Gansu Province

GUO Xiao, ZHANG Yuansheng, LIU Xuzhou, QIN Manzhong, WEI Congxin, ZOU Rui,
WANG Yahong, SUN Dianfeng, LIU Zhiguo

(1. Lanzhou National Observatory of Geophysics, Lanzhou 730000, Gansu, China;
2. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: The use of large-capacity air-gun source detection has become an important development direction to explore new earthquake prediction methods, which will promote the combination of empirical earthquake prediction and physical prediction. The site selection and construction processes of Qilianshan and Liujiaxia air-gun launchers were complex. With the efforts and help of various parties, many difficulties were overcome and the construction was finally completed with high quality. The stable operation of the Qilian Mountain air-gun launcher has accumulated

收稿日期: 2020-07-10

基金项目: 国家重点研发计划课题(2018YFC1503206)

第一作者简介: 郭 晓(1974-),男,江西宜春人,副研究员,主要从事主动震源技术应用研究。E-mail: guox@gsdzj.gov.cn。

通信作者: 张元生(1965-),男,贵州湄潭人,研究员,主要从事地震学与卫星遥感应用方面的研究工作。E-mail: zhangys@gsdzj.gov.cn。

abundant data of air-gun active source in the Qilian Mountain, and many innovations have been achieved. The newly built Liujiaxia air-gun launcher will realize the continuous monitoring of the Haiyuan fault and deep and large faults in the northern edge of the West Qinling fault. Through multi-point monitoring, the relationship between strong earthquake preparation, regional stress field, and medium change was analyzed, and seismic risk analysis and research were carried out. Furthermore, there are plans to construct three air-gun active sources in Gansu Province, which is located in an area with strong earthquake activity in the northeast margin of the Qinghai Tibet Plateau. There are also plans to combine the Qilian Mountains and Liujiaxia air-gun active sources to realize the four-dimensional detection of active sources in the fault zone system on the north-east edge of the Qinghai Tibet Plateau. Implementing these plans will be greatly beneficial to earthquake prevention, disaster reduction, and earthquake prediction in Gansu Province.

Keywords: active source; repeated monitoring; Qilian mountains; Liujiaxia; Gansu Province

0 引言

目前,地震预测仍然是具有强烈社会需求而又有待解决的世界难题,解决这一问题的可能途径是发展透视地球的能力——“把地下搞清楚”^[1]。地震和地球物理是地球深部探测的基本手段和“核心技术”,通过地震观测和地球物理成像可以获得地球深部的结构、物性和变化图像,可为地震监测预报提供直观、全面和真实的信息,为实现地震物理数值预报提供强有力的支撑。

主动源重复探测技术,在强震多发的研究区域开展地震前后结构变化的实证性研究,有望成为地震科技创新的重要突破点。利用高性能人工震源主动探测地壳介质物性变化已成为探索地震预报新途径的一个重要发展方向^[2-3]。自 21 世纪初,国内外学者以大容量气枪为震源在河北省遵化市上关湖等地开展了介质物性变化主动源探测的试验研究,相关技术已经成熟^[4-11],并取得了不少成果^[12-16]。

甘肃省是我国地震多发省份之一,位于青藏高原东北缘地区,在大地构造上属于青藏、新疆和华北三大亚板块交界地带,被深大断裂交错切割,地貌反差强烈,是地壳物质最易变形和流动、构造运动极其强烈的地区,也是地球动力学研究的前沿阵地。甘肃地区地震活动十分强烈,长期以来一直是地震危险的重点监视区,也是研究大陆地区地震孕育背景和动力过程的一个典型地区,被视为研究内陆地震的天然试验场。为此,在甘肃建立主动源多点联合监测对于地震学和地球动力学的研究都具有重要意义。

1 祁连山主动源

1.1 选址与建设

主动源重复探测项目工程是一个较复杂的工程

项目,气枪震源激发点场地有特殊要求(要求水深至少 20 m 以上,离坝体要间隔一定距离,至少 1 km 以上)^[17],野外观测台站要以气枪震源激发点为中心,同时考虑断层均匀分布。项目自 2013 年 3 月召开启动会以来,项目实施组随即开展了收集和整理资料,实地考察甘肃河西地区水库。5 月上旬对候选水库(摆浪河)进行了现场勘查,对候选水库(鸛嘴和双树寺水库)实际水深进行了测量,同时抄录了水库近二年来的每天水位记录。水位变化图及水深分布图显示双树寺水库整体优于鸛嘴水库,但还是存在农灌放水至水位达不到要求的问题。随后了解到于 2006 年建成的张掖河西水电水库(西流水水库)条件更好,经多方沟通获得对方同意(西流水水库所属甘肃电投来函确认)。激发场地遴选经历重重困难,在艰苦恶劣的环境下圆满完成了气枪激发水库的详勘,最后经专家论证确定祁连山黑河西流水水库为主动源激发场地。

激发平台实验基地的遴选也是一波三折,由于水库边上往往山坡陡峭,无宽敞平地可选,加之山坡滚石频发和夏天山洪甚多,不同季节环境差异特别大,导致勘选结果一次次被否定。最后甘肃省地震局痛下决心、增加经费投入,确定劈山建房。经过近 50 天的苦战,在陡峭的山坡上挖出了一块平地,运走土石约 6 万 m³。当时已进入冬季,湖面冰厚已达 50 cm 左右,气温接近-25℃,不适合建房,只能建临时用房来满足气枪激发要求,实现了在 2014 年 12 月 31 日前进行气枪激发实验的阶段性目标。最终,在中国地震局地球物理所王宝善等专家帮助下,不怕严寒和酷暑,大家齐上阵,陡坡上用安全绳上下,在湖面上靠安全绳和救生衣的保护,经仪器吊装、管线布设、仪器安装调试等工作,于 2015 年 7 月

祁连山主动源发射台竣工后开展运行。同时,激发源地确定后,研究讨论确定了 40 个野外观测台站的分布设计图。为确保满足观测的环境条件及最佳场地位置,调研台站施工条件和建设成本,保证新建观测台站长期正常运行、产出高质量观测数据。遴选结果全部满足国家和地震行业颁布的地震观测测项“观测环境的技术要求”。

1.2 实验与成果

祁连山气枪发射台从 2015 年 7 月 9 日至今,已平稳运行近 6 年,共激发了约 20 000 次。运行期间,主要开展了以下激发试验:(1)主动源激发系统现正按项目有关要求计划每周一晚晚上至周二凌晨(21:00—07:00)进行试验(间隔为 1 周,连续激发 1 夜,激发次数不少于 50 次);(2)主动源激发系统从 2015 年 9 月 30 日至 11 月 10 日进行了 40 天连续激发试验,每小时约激发 5 次。(3)主动源激发系统于 2015 年 11 月 5 日进行了不同深度激发试验(深度分别为 10 m、15 m、20 m 和 25 m)。

祁连山发射台自运行以来,数据基本连续,已积累了丰富的祁连山主动源气枪激发数据,并取得了多项创新性成果^[18-21]:(1)在 2015 年 40 天连续激发实验中观测到了地震波走时与固体潮变化的同步性特征,揭示了用人工震源探测地球内部微弱应力变化的可能性。(2)观测到了监测区内 2016 年 1 月 21 日门源 M6.4 地震和 2019 年 9 月 16 日张掖甘州 5 级地震震前存在较明显的走时异常变化。

2 刘家峡主动源

2.1 选址与建设

2017 年 10 月 22—23 日,甘肃省地震局组织,由陈颢院士等组成的专家组,对刘家峡主动源激发场址备选水库(甘肃永靖县刘家峡水库)进行实地考

察和论证。专家组一致认为,刘家峡水库能够满足气枪主动源多点激发场地大水体的各项要求,同意通过论证。2018 国家重点研发项目“地震构造主动源主动源监测技术系统研究”获得资助,研究内容之一为构建刘家峡气枪震源激发和观测系统。由于重点研发计划项目不支持建设工程和重大设备的采购,需要争取配套经费支持。在多方努力下,中国地震局和甘肃省地震局给予了一定的配套经费支持。

2019 年上半年在永靖县政府、地震局、林业局、环保局等的大力支持下,经过多次具体位置堪选、沟通协商,攻坚克难,气枪发射台确定位于永靖县岷源镇刘家村附近水域,最终完成了刘家峡主动源观测基地的征地工作。同时,项目的环境影响评价报告也顺利通过了评审。

配套建设工程主要包括建设 600 m² 实验楼和空压机房、停泊码头及附属设施等,刘家峡气枪激发实验基地全景和设计效果如图 1。刘家峡主动源激发系统组成与祁连山主动源基本一致,主要包括空气压缩机、储气瓶组、配气台、大容量气枪与控制系统、高压气管线等。为了满足刘家峡主动源发射台在刘家峡水库中实现移动式多点激发,主要差异在于刘家峡主动源空压机压缩流量更大(5 m³/min),以及刘家峡主动源储气瓶组容量更大(工作压力 25 MPa, $L=16\text{ m}^3$)。

刘家峡主动源实验楼与空压机房基建基础结构工程已完成组织验收。空压机、高压储气系统和水上移动式实验平台等主要设备已基本到位,预计 9 月下旬刘家峡主动源发射台开始试运行。

2.2 运行及研究计划

刘家峡气枪发射台预计于 2020 年 9 月底开始运行,计划每周三晚上至周四凌晨(21:00—07:00)进行试验(间隔为 1 周,连续激发 1 夜,激发次数不



图 1 刘家峡气枪激发实验基地全景和设计效果图

Fig.1 Panorama and design effect picture of Liujiaxia active source experimental base

少于 50 次)。刘家峡水库库容 50 多亿 m^3 , 水库形状如“葫芦”, 这样一个大水体适合开展从海洋中无限水体过渡到有限水体的主动源重复探测研究, 拟在刘家峡水库中进行移动式多点激发。

正如南京大学陈颙院士在刘家峡主动源激发场地论证会上所说, 刘家峡气枪发射台定位于建成科研、人才培养、科普教育旅游基地。不是简单的第四个陆地固定点主动源激发基地, 是国家“一带一路”主动源建设中的创新型科研基地, 是从海洋无限水体过渡到有限水体的使用无线电相控技术(多点激发)科研基地。参考甘肃大尖山核査台阵, 在刘家峡主动源附近建设现代化接收微型台阵, 可及时确认主动源激发效果。同时, 结合刘家峡水库炳灵寺旅游, 与当地共建科普、亲历地震的旅游基地。

新建的刘家峡气枪发射台将实现对海原断裂和西秦岭北缘断裂的连续监测, 在断层附近布设超密集观测, 通过分析断层两侧记录到的地震波波波形差异, 可以分析断层精细结构及断裂带物质的组成和性质。通过多点监测, 获取介质波速变化的时间特征和空间联系, 综合描述研究区断裂系不同关键区域介质变化的差异和联系。利用深部结构、区域背景应力场, 加入多个关键监测区域的介质变化特征, 分析强震孕育与区域应力场和介质变化的关系, 开展地震危险性的分析研究。

3 甘肃主动源未来发展展望

国家地震科技创新体系建设中提出形成具有我国地域特色的若干地震科技优势领域, 并取得一批突破性研究成果。实施“透明地壳”等科学计划的国家地震科技创新工程, 全面开展地下结构和构造的探查工作, 逐步认识活动断层习性、活动地块及相互作用过程^[15-20]。“透明地壳”计划任务中“基于地震信号气枪发射台的介质变化监测”将再建立几个发射台及相应监测系统, 实现地震信号覆盖中国大陆的大部分地区。位于青藏高原东北缘强震活动强烈地区的甘肃未来计划再建设 3 个气枪主动源, 联合祁连山、刘家峡气枪主动源, 开展对青藏高原东北缘断裂带系进行主动源四维探测。具体位置将根据气枪震源激发水体实际勘选情况, 重点考虑甘东南、海原、酒泉等地震多发危险区, 实现以气枪震源为主体, 结合野外台阵观测的气枪主动源地下介质物性变化连续观测。

甘肃未来多主动源的规划发展将气枪震源进一步应用于科学研究和地震监测工作, 实现对青藏高

原东北缘区域地下介质变化的高精度连续监测, 将进一步提高甘肃省地区的地震监测和防震减灾能力, 对于地震预测和防震减灾具有重要意义。

参考文献(References)

- [1] 陈颙, 朱日祥. 设立“地下明灯研究计划”的建议[J]. 地球科学进展, 2005, 20(5): 485-489.
CHEN Yong, ZHU Rixiang. Proposed Project of “Underground Bright Lump”[J]. Advances in Earth Sciences, 2005, 20(5): 485-489.
- [2] 陈颙, 王宝善, 姚华建. 大陆地壳结构的气枪震源探测及其应用[J]. 中国科学: 地球科学, 2017, 47(10): 1153-1165.
- [3] SILVER P G, DALEY T M, NIU F, et al. Active Source Monitoring of Cross-Well Seismic Travel Time for Stress-Induced Changes[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2007, 97(1B): 281-293.
- [4] BRENGUIER F, CAMPILLO M, HADZIOANNOU C, et al. Postseismic Relaxation along the San Andreas Fault at Parkfield from Continuous Seismological Observations[J]. Science, 2008, 321(5895): 1478-1481.
- [5] NIU F L, SILVER P G, DALEY T M, et al. Preseismic Velocity Changes Observed from Active Source Monitoring at the Parkfield SAFOD Drill Site[J]. Nature, 2008, 454(7201): 204-208.
- [6] 林建民, 王宝善, 葛洪魁, 等. 重复地震及其在人工探测中的潜在应用[J]. 中国地震, 2006, 22(1): 1-9.
LIN Jianmin, WANG Baoshan, GE Hongkui, et al. Doublet and Its Potential Application in Active Exploration[J]. Earthquake Research in China, 2006, 22(1): 1-9.
- [7] 王宝善, 王伟涛, 葛洪魁, 等. 人工震源地下介质变化动态监测[J]. 地球科学进展, 2011, 26(3): 249-256.
WANG Baoshan, WANG Weitao, GE Hongkui, et al. Monitoring Subsurface Changes with Active Sources[J]. Advance in Earth Sciences, 2011, 26(3): 249-256.
- [8] 王伟涛, 王宝善, 葛洪魁, 等. 利用主动震源检测汶川地震余震引起的浅层波速变化[J]. 中国地震, 2009, 25(3): 223-233.
WANG Weitao, WANG Baoshan, GE Hongkui, et al. Using Active Source to Monitor Velocity Variation in Shallow Sediment Caused by the Wenchuan Earthquake[J]. Earthquake Research in China, 2009, 25(3): 223-233.
- [9] 杨微, 葛洪魁, 王宝善, 等. 由精密控制人工震源观测到的绵竹 5.6 级地震前后波速变化[J]. 地球物理学报, 2010, 53(5): 1149-1157.
YANG Wei, GE Hongkui, WANG Baoshan, et al. Velocity Changes Observed by the Precisely Controlled Active Source for the Mianzhu $M_s 5.6$ Earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(5): 1149-1157.
- [10] 杨微, 王宝善, 葛洪魁, 等. 大容量气枪震源主动探测技术系统及试验研究[J]. 中国地震, 2013, 29(4): 399-410.
YANG Wei, WANG Baoshan, GE Hongkui, et al. The Active Monitoring System with Large Volume Airgun Source and Experiment. Earthquake Research In China, 2013, 29(4): 399-

- 410.
- [11] 胡久鹏,王宝善,陈颀.水体形状对陆地气枪激发信号的影响[J].地震研究,2017,40(4):543-549.
HU Jiupeng, WANG Baoshan, CHEN Yong. The Influence of Water Shape on Land Airgun Triggered Signals[J]. Journal of Seismological Research, 2017, 40(4): 543-549.
- [12] 魏芸芸,王海涛,苏金波,等.新疆 2 次中强地震前气枪震源反射波震相走时异常变化初步研究[J].中国地震,2016,32(2): 270-281.
WEI Yunyun, WANG Haitiao, SU Jinbo, et al. The Preliminary Study on Travel Time Abnormal Variation of Reflection Wave Phase of Air-gun in Xinjiang before Two Earthquakes with $M_s 5.0$ [J]. Earthquake Research in China, 2016, 32(2): 270-281.
- [13] SCHAFF D P, BEROZA G C. Coseismic and Postseismic Velocity Changes Measured by Repeating Earthquakes[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2004, 109, B10302 doi:10.1029/2004JB003011.
- [14] WANG B S, YANG W, WANG W T, et al. Diurnal and Semi-diurnal P- And S-Wave Velocity Changes Measured Using an Airgun Source [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2020, 125, e2019JB018218.
- [15] WANG B S, TIAN X F, ZHANG Y P, et al. Seismic Signature of an Untuned Large-Volume Airgun Array Fired in a Water Reservoir[J]. Seismological Research Letters, 2018, 89(3): 983-991.
- [16] 王彬,吴国华,苏有锦,等.宾川地震信号发射台的选址、建设与初步观测结果[J].地震研究,2015,38(1):1-6.
WANG Bin, WU Guohua, SU Youjin, et al. Site Selection and Construction Process of Binchuan Earthquake Signal Transmitting Seismic Station and Its Preliminary Observation Result[J]. Journal of Seismological Research, 2015, 38(1): 1-6.
- [17] 张元生,郭晓,秦满忠,等.甘肃祁连山主动源重复探测项目建设及震源重复性分析[J].中国地震,2016,32(2):209-215.
ZHANG Yuansheng, GUO Xiao, QIN Manzhong, et al. The Construction of Active Source Repeated Monitoring in the Qilian Mountains of Gansu Province[J]. Earthquake Research in China, 2016, 32(2): 209-215.
- [18] 秦满忠,刘旭宙,邹锐,等.甘肃祁连山大容量气枪主动源最大探测范围[J].地震工学报,2017,39(6):1070-1075.
QIN Manzhong, LIU Xuzhou, ZOU Rui, et al. Maximum Detectable Range of the Large-volume Airgun Active Source in Qilian Mountains, Gansu Province[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(6): 1070-1075.
- [19] WEI C X, QIN M Z, ZHANG Y S, et al. Airgun Excitation Experiments at Different Placement Depths in the Qilian Mountain of Gansu Province, China [J]. Seismological Research Letters, 2018, 89(3): 974-982.
- [20] 张元生,王宝善,陈颀,等.两次强震发生前后主动源观测走时数据的变化[J].地球物理学报,2017,60(10):3815-3822.
ZHANG Yuansheng, WANG Baoshan, CHEN Yong, et al. Travel-time Variations before and after Two Major Earthquakes Derived from Active-source Seismic Data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(10): 3815-3822.
- [21] 邹锐,郭晓,张元生,等.利用祁连山主动源资料研究 2016 年门源 6.4 级地震前后波速变化[J].中国地震,2018,34(2): 283-292.
ZOU Rui, GUO Xiao, ZHANG Yuansheng, et al. Using the Active Source Data of Qilian Mountain to Study the Wave Velocity Change before and after the Menyuan $M_s 6.4$ Earthquake in 2016 [J]. Earthquake Research in China, 2018, 34(2): 283-292.