

龙门山断裂带地震空区的震源机制研究

杨 宁 吴俊柯 左亚兰

四川省地震局阿坝地震监测中心站 四川阿坝藏族自治州 623300

摘 要：龙门山地处中国四川盆地东缘，是一条典型的地震断裂带，龙门山区存在一段较长时间未发生较大地震的震空区，是潜在地震危险区。因此开展龙门山断裂带地震空区的震源机制研究，具有重要的科学与现实意义。笔者本篇文章以龙门山地区为研究对象，结合现代地震监测技术，探讨地震空区可能的震源机制及影响因素，为深入认识该区的地震活动性提供新的思路。

关键词：龙门山；断裂带；地震空区；震源机制

随着地震科学的发展，技术手段的提高，人们对地震的了解也越来越多，龙门山地区地震活动已引起广泛关注，但目前对震空区的震源机制研究还很少。通过对龙门山地区地质构造特征、地震活动规律及地震监测资料的深入分析，能够更全面地揭示龙门山地区地震活动规律，为地震灾害预测及防灾减灾提供科学依据。

一、龙门山断裂带地震空区概述

龙门山断裂带是中国四川省境内一条重要的构造断裂带，历史上曾发生过多次强烈的地震活动。然而近年来，该区表现出明显的地震活动异常平静，这一现象被地质学家称之为“地震空区”，在地学领域，这一现象受到广泛关注，可能预示着未来大地震活动的积聚与释放^[1]。龙门山断裂带存在“震空区”，但这并不意味着今后该地区将不再发生地震，相反有些地质学家警告称，长期的沉寂会使地下压力不断累积，进而增加未来大型地震发生的可能性。因此加强对该区域地震的监测与研究，不仅可以加深人们对地震发生机理的认识，还可以为提高地震预警水平、防灾减灾提供科学依据。

二、地震空区震源机制

（一）断裂带的应力累积与释放模式

要理解应力的累积和释放规律，首先要了解地壳板块之间的互动关系，由于地球内部热对流的作用，地壳板块不停地运动，当两个板块发生碰撞或挤压时，其边缘的岩石便会产生压力，这种压力的累积过程叫做应力累积。当岩体内的应力超过其强度极限时，所积聚的能量就会以地震的形式快速释放出来，这个过程被称为“活力释放”^[2]。在龙门山断裂带这种构造背景下，油气富集释放规律表现得尤为明显，龙门山断裂带地处青藏

高原东缘，受印度板块和欧亚板块的持续挤压作用，地壳应力快速积累，然而在龙门山断裂带地震空区中，却出现了罕见的强震活动，这一矛盾现象引起了国内外学者的广泛关注。龙门山断裂带及邻区的地质及地球物理资料分析表明，该区油气资源的积累与释放规律具有独特的时空分布特征，在龙门山震空区，由于深部岩石物理特性的特殊性，应力积累速度缓慢，或存在一种能吸收并分散应力的机制，这说明空区内应力虽然不断积累，但却有效地减轻并弥散了应力。进一步地，当周边区域的应力积累达到临界值时，地震波到达空区时，地震波的能量已经大大衰减，不能再引发新的地震，这种现象可以部分地解释龙门山断裂带地震空区历史上罕见的地震活动。另外龙门山断裂带震空区中的流体活动，也影响着该区的油气富集和释放规律，已有研究表明，地壳深部流体作用可导致岩石物性改变、断裂强度降低，进而影响应力累积和释放过程，在龙门山震空区，深部流体活动对应力再分配起到了一定的促进作用，避免了局部应力过度积累，从而降低了地震的危险性。

（二）岩石圈的物理性质

龙门山断裂带具有明显的厚度不均一性，这种不均一性造成了地壳应力分布不均，岩石圈厚度越小，地壳变形越大，应力积累越多，地震发生的可能性就越大，但是在某些特殊的震空区，岩石圈厚度较大，可以承受较高的应力而不发生破裂，从而降低了地震的危险性。不同温度的岩石圈会呈现不同的物理特性，温度越高，岩石越容易发生塑性变形，龙门山断裂带地震空区内的高地温促使岩石发生塑性流变，降低了发生脆性破裂的可能性，从而降低了大地震的发生概率。

此外岩石圈的物理特性还可分为脆性和韧性两个方面,在龙门山断裂带区,地震空区岩石韧性较高,意味着在地壳应力作用下更易发生塑性变形,而非断裂,这一塑性变形可缓和应力积聚,减少地震发生的可能性。在岩石圈中,岩石的化学成分、矿物成分对岩石的物性也有一定的影响,不同类型的岩石对地质营力的响应是不同的,例如,含有水的矿物可降低岩石的熔点,从而使其在低温时发生塑性变形,龙门山断裂带地震空区内特殊的岩石成分可能使岩石在较低应力状态下发生变形,从而避免了脆性破裂。

(三) 地下流体活动

地下流体活动是指地壳中地下水,岩浆,以及其它地质流体的运动,这些流体的运动,不但可以改变地壳物理状态,而且对断裂带内的应力场也有一定的影响。龙门山断裂带地下流体的活动,降低了岩石间的摩擦强度,改变了断层内的应力状态,进而影响了地震的发生。特别是地下流体进入断层带后,会使断层面之间的压力增大,这就是所谓的孔隙流体压力,孔隙内流体压力的增大将导致断层面的有效正应力降低,从而减小了岩石之间的摩擦阻力,从而使可能由于应力累积而产生的地震变得不那么容易了^[3]。在某些地区,例如龙门山断层带,地下流体具有异常强的渗透性,这意味着地下水能够更深地渗入断层带,从而影响到更广的岩层。深部渗流不仅会改变深部岩石的塑性等物理性质,而且会引起地下应力场的再分配,这一应力重分布可引起局部应力水平的降低,从而降低地震发生的可能性。在断层带内,地下水起着润滑剂的作用,减小了断层面的摩擦力,使断层在低应力状态下仍能滑移,但其滑动强度不足以诱发地震,这一机制对于龙门山断裂带地震空区的形成具有重要意义,它使断裂带能够在不发生破坏性地震的条件下自行调节并释放应力。另外,地下流体的活动也可以通过改变地质构造而间接地对地震活动产生影响,龙门山断裂带长期的流体活动,可能会导致一些地质构造的产生或消失,从而改变地震波的传播路径,或直接影响断裂带的稳定性。

三、用于研究地震空区震源机制的技术和方法

(一) 地震波性分析

地震波形分析技术对地震波资料的采集提出了更高的要求,要做到这一点,就必须安装一套高灵敏的地震仪,这样才能准确地记录不同介质中的地震波,对地震资料进行初步处理后,可得到地震波初至波、振幅、频

率和波形等基本信息。

要分析地震波速度,反演地下介质特性,地震波波速与介质密度、弹性模量有关。不同地质构造区地震波传播速度存在差异,通过对比不同地点的地震波传播速度,可以了解地壳内部结构的差异。尤其是对龙门山断裂带这类复杂地质结构,利用纵、横(横波)速度比可进一步确定介质泊松比,进而判断区域应力集中程度。由于介质的不均匀性及多种复杂情况,地震波在传播过程中会发生能量衰减,研究地震波在某一频率范围内的能量衰减规律,反演其吸收特征及裂缝分布状况,是研究断裂带动力学行为的关键^[4]。利用地震波的反射、折射等性质,可以得到地下结构图像,利用不同方位、不同距离的地震波数据,可以构建三维地下介质模型,揭示断裂带内复杂的构造,这对认识断层活动性,预测地震危险性具有重要意义。地震波形分析技术也包括波形模拟与反演,通过建立地下地震波传播数学模型,结合实测资料反演分析,能够更加精确地反演地下介质的物性参数。该方法不仅可提高地震预报精度,而且可为研究震空区内部结构及动力学过程提供重要依据。

(二) 地质调查

可以利用GPS、激光雷达等地质测量手段,精确测定断裂带的几何形态及其变化,绘制出精细的断裂带地质图,在此基础上,还可以结合野外地质调查、岩石样品采集等手段,对断裂活动历史及断层岩石微结构进行分析,探讨断裂活动特征及地震发生机制。在地震空区地质调查中,采用了地震反射与折射法、电磁法和重力法等方法,利用该技术可实现对断裂带深部结构的“透视”,揭示断裂带深部的岩石成分、构造形态及应力状态^[5]。如利用地震波波速的变化,可推断地下岩层类型及断层分布;利用重力观测资料,可辨识出地下密度异常区,进而推断出断裂的活动深度及范围。地质样品分析为震源机制研究提供了微观证据。本项目拟在已有工作的基础上,利用岩石学、矿物学及地球化学等手段,详细研究岩石的物质组成、结构及形成环境,而且通过对断裂附近岩石的年代学研究,可以确定断裂活动的年代,进而推断出地震活动的周期与规律。可以结合历史震例、古震迹及长时间的地震监测资料,反演过去地震事件,对特定区域的地震活动进行评估,为未来地震预报及防灾减灾提供科学依据。

(三) 卫星遥感技术

利用高分辨率遥感卫星,科学家们可以清楚地看到

断层带内和周围区域的高分辨率地表图像,这些图像不仅能识别地表的微小变形,而且能反映断裂带的动态变化。通过对不同时间点遥感影像的对比分析,可以精确识别地表形变的趋势与范围,为认识地震活动性提供重要的数据支撑。卫星干涉(InSAR)可实现地表形变的高精度测量,InSAR是一种利用不同时刻同时段雷达影像的相位差来反演地表形变的方法,在对龙门山震空区进行研究时,利用InSAR技术可以获取毫米量级的地表形变信息,进而确定地震活动区,并对震源机制进行分析。利用遥感技术可以监测地震发生前地表温度、地下水位变化等典型前兆,如通过对地面温度资料的分析,可以在地震发生前发现热异常区;通过对地下水位变化的监测,可揭示由于地壳运动而导致的水文异常,对龙门山断裂地震空区进行监测,对认识地震空区的形成机制有重要意义。此外,卫星遥感技术还具有较强的数据处理与分析能力,利用地理信息系统(GIS)、人工智能(AI)等先进技术,对海量遥感数据进行有效管理与深度分析。

(四) 数值模拟

建立精确的地质模型是数值模拟研究的基础,所以在前期工作的基础上,需要通过大量的地质、地球物理及地震学资料,建立能够真实反映龙门山断裂带地质构造特征的模型。同时可以利用物探资料反演断裂带的三维形态,包括其走向、倾向、长度、宽度及其相互关系等,进一步研究断裂带周边岩石的密度、弹性模量、泊松比等物性参数对断层破裂过程模拟结果的影响,目前常用的方法有有限元法、边界元法和离散元法。龙门山断裂带地震空区研究多采用有限元法,该方法具有处理复杂几何形状、材料非线性等特点,具有较强的适用性,能够将断裂带及邻区划分成成千上万个单元,模拟地壳应力状态的微小变化,并探讨其对断裂面应力积聚与释放的影响^[6]。在数值模拟中,边界条件和初始条件的确定是关键,这包括确定模型边界的应力、位移条件、初始应力、应变状态等,对于龙门山断裂带地震空区的研究,一般都是根据历史地震活动性及野外观测资料确定的,以保证数值模拟结果与真实地震过程相吻合。或可采用迭代计算方法,逐步求解各单元的应力应变状态,实现对裂纹动态演化的模拟,重点研究震空区内应力累

积规律,并探讨断层滑移释放应力的机理,同时结合数值模拟结果,识别影响震空区震源机制的关键因素,如断裂带几何形态、岩石物性、区域应力场分布等。将模拟结果与实测数据进行比较,可以对模型的精度和可靠性进行评价,同时还可对模型进行反思,并对模型进行优化,使数值模拟技术在地震学领域的应用水平得到进一步提升。

结束语

综上所述,对龙门山断裂带地震空区的震源机制进行研究,对认识该区的地震活动特征、预测未来地震灾害风险、制定相应的防灾减灾措施等都有重要的意义。综合应用地质、地球物理、地球化学等多学科手段,提高对震空区震源机制的认识,从提高地震预报精度、发展地震监测手段、加强多学科合作等方面着手,为保障人民生命财产安全,降低地震灾害隐患提供科学依据。

参考文献

- [1]魏来,焦本君,贾德路.采空区和地震断裂带区域生态就地修复与环境治理技术研究[J].建筑施工,2023,45(09):1883-1886.
- [2]李兵,谢富仁,黄金水,徐锡伟,郭啟良,张广伟,许俊闪,王建新,姜大伟,王健,丁立丰.龙门山断裂带大邑地震空区地应力状态与地震危险性[J].中国科学:地球科学,2022,52(07):1409-1418.
- [3]郑勇,郭汝梦.汶川-芦山地震间的空区危险性研究:现状、思考和挑战[J].中国科学:地球科学,2021,51(03):483-486.
- [4]马禾青,杨明芝,罗国富.利用随机场分析方法研究地震空区——以2次地震为例[J].地震地磁观测与研究,2020,41(04):1-10.
- [5]芮雪莲,龙锋,赵敏.龙门山断裂带南段地震空段的地震活动特征[J].四川地震,2020,(02):15-18+47.
- [6]黄焱玲,梁春涛,吴晶,王朝亮,刘志强,江宁波.基于密集台阵研究龙门山断裂带南段地震空段的地震活动性[J].地球物理学报,2020,63(03):1183-1196.