龙门山断裂带大邑地震空区地应力状态与地震危险性

李兵^{1,2†}, 谢富仁², 黄金水¹, 徐锡伟^{2*}, 郭啟良^{2†}, 张广伟², 许俊闪², 王建新², 姜大伟², 王健², 丁立丰²

1. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026;

2. 应急管理部国家自然灾害防治研究院, 北京 100085

* 通讯作者, E-mail: xiweixu@vip.sina.com

† 通讯作者, E-mail: guoql302@sohu.com

‡ 通讯作者, E-mail: mycoon@139.com

收稿日期: 2021-08-31; 收修改稿日期: 2022-01-19; 接受日期: 2022-02-28; 网络版发表日期: 2022-06-02

国家自然科学基金项目(批准号: 41941016、U1839204、42074105)、国家重点研发计划项目(编号: 2018YFC1504104)和应急管理部国家自然灾害防治研究院基本科研业务专项项目(编号: ZDJ2019-20)资助

摘要 龙门山断裂带大邑地震空区位于2008年汶川地震区和2013年芦山地震区之间, 是一个长约40~60km缺少地震发生的区域. 关于大邑地震空区的地震危险性以及是否存在高应力仍存在争议. 为进一步从应力角度评估大邑地震空区的地震危险性, 在具有发生地表破裂型地震能力并且具有高地震危险性的双石-大川断裂带两侧各布置1个钻孔(深度分别为1000和500m)进行水压致裂地应力测量工作. 利用这些新数据结合Byerlee定律的稳定性分析和已有强震前的应力测量资料进行类比, 结果表明, 大邑地震空区双石-大川断裂带(大川镇)附近处于高地应力状态, 具备了摩擦滑动的必要条件, 具有发生中、强震的潜在危险性. 研究结果揭示了大邑地震空区内1000m深度范围内的地应力剖面, 为全面评估地震空区地震危险性提供了全新数据, 这对于探索地震发生的机理与减灾具有重要意义.

关键词 大邑地震空区, 汶川地震, 芦山地震, 地应力状态, Byerlee准则, 断层稳定性

1 引言

2008年和2013年在龙门山断裂带上先后发生了汶川地震和芦山地震, 然而在芦山地震后, 两次地震之间依然存在一个长约40~60km的地震空区, 即大邑地震空区(陈运泰等, 2013; 徐锡伟等, 2013a; Pei等, 2014; Liu等, 2018, 2020)(图1a). 大邑地震空区是否具备再次

发生中强震的高应力积累存在争议(陈运泰等, 2013; 徐锡伟等, 2013b; Pei等, 2014; 梁春涛等, 2018; 郑勇和郭汝梦, 2021). 例如, 一种观点认为芦山地震后大邑地震空区依然存在发生中强震的危险性(陈运泰等, 2013; Liu等, 2020), 尤其是芦山地震后, 大邑地震空区周边的大部分段落依然处于强闭锁状态(赵静等, 2013, 2018), 最大水平主应力量值高于芦山地震前,

中文引用格式: 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. 2022. 龙门山断裂带大邑地震空区地应力状态与地震危险性. 中国科学: 地球科学, 52(7): 1409–1418, doi: [10.1360/SSTe-2021-0280](https://doi.org/10.1360/SSTe-2021-0280)

英文引用格式: Li B, Xie F, Huang J, Xu X, Guo Q, Zhang G, Xu J, Wang J, Jiang D, Wang J, Ding L. 2022. *In situ* stress state and seismic hazard in the Dayi seismic gap of the Longmenshan thrust belt. Science China Earth Sciences, 65(7): 1388–1398, <https://doi.org/10.1007/s11430-021-9915-4>

NW向应力持续增加(Wu等, 2016; 邱君等, 2017). 这一观点受到来自地震波反演证据的挑战, 该证据显示, 地震空区下方不利于应变能的储存, 发生大地震的可能性不大(Pei等, 2014; Wang等, 2018). 最近的研究表明, 大邑地震空区的应力积累并未因1970年大邑 $M_s6.2$ 级地震(大邑地震)的发生完全释放, 双石-大川断裂带和大邑隐伏断裂带仍可能发生更大的地震(Liu等, 2018; Liu等, 2020). 了解空区内是否存在高应力最直接的方法是进行地应力测量, 然而, 目前大邑地震空区尚缺乏相关的研究工作. 因此, 我们在距芦山地震震中约30km的双石-大川断裂带(大川镇段)两侧, 各布置了1个钻孔进行水压致裂地应力测量, 查明了大邑地震空区的地应力状态(图2), 利用Byerlee定律并结合周边几个强震前后地应力测量资料分析地震空区的潜在地震危险性. 本研究揭示了大邑地震空区1000m深度范围内的地应力剖面, 这对进一步探索地震发生的机制具有重要参考意义.

查明大邑地震空区内是否存在高应力积累对评估能否再次发生地震的危险性十分重要. 从地震发生的动力学机制看, 汶川地震和芦山地震都是龙门山断裂带黏滑错动产生的地震(徐锡伟等, 2013b), 地震前浅部的地应力测量结果均显示为高应力(郭啟良等, 2009; 秦向辉等, 2013). 如果大邑地震空区浅部存在高地应力, 则仍具有发生地震的潜在危险性. 长期的绝对应力观测表明, 从活动断层开始闭锁至地震发生的应力积累是一个长期过程, 如果给定地震发生时的应力临界条件, 那么测定任一时刻的应力状态即可进行地震危险性评估. 通常把Byerlee定律($u_m=0.6$)作为地震发生时应力临界点, 注水诱发地震和构造地质学观测的研究印证了断层摩擦强度与Byerlee定律相一致(Ra-leigh等, 1976; Brodsky等, 2020). 目前, 大邑地震空区内尚缺乏地应力测量相关的研究, 距其最近的地应力测量点位于碓碛地区, 测量结果是2014年之前进行的, 孔深不大于400m(图1). 因此, 有必要针对大邑地震空区的地震危险性, 从地应力角度进一步开展研究.

2 数据和方法

2.1 构造地质背景及钻孔概况

2.1.1 构造地质背景

巴颜喀拉块体SE向“逃逸”运动是其东边界带及其

邻近地区的活动构造作用以及地震的动力源(闻学泽, 2018), 在这种区域构造动力学背景下, 该区是中国大陆大地震频发的地区之一. 龙门山断裂带位于青藏高原东缘, 是巴颜喀拉块体的东边界, 长约500km, 宽约30~50km, 沿NE-SW向展布, 见图1.

龙门山断裂带主要包含汶川-茂县断裂、映秀-北川断裂和江油-灌县断裂, 这些断裂都以逆冲为主, 兼具一定的右旋走滑分量; 汶川地震主要与映秀-北川断裂带和江油-灌县断裂带有关(Xu等, 2009; Liu等, 2018). 龙门山断裂带经过映秀镇延伸到南段后, 产生了一系列分支, 其中大邑地震空区内发震构造最强的断裂为汶川-茂县断裂、映秀-北川断裂、双石-大川断裂以及山前地带的大邑断裂; 芦山地震的发生与盲逆断层(徐锡伟等, 2013b)或双石-大川断裂带(Liu等, 2018)有关. 双石-大川断裂带为龙门山断裂带前山断裂的南段, 是地震空区内一条全新世活动断裂, 总体走向约40°, 倾向NW, 逆断性质, 长约115km. 古地震研究推测, 双石-大川断裂带具有发生地表破裂型地震的能力(冉勇康等, 2018). 因此进一步利用应力测量技术论证双石-大川断裂带的地应力状态对于探索地震发生的机理与减灾具有重要意义.

2.1.2 钻孔概况

两个钻孔布置在大川镇附近的双石-大川断裂带上下盘(图1a), 布置的依据主要如下: (1) 双石-大川断裂带和大邑隐伏断裂带可能是区域应力积累的主要断裂, 仍可能发生比大邑地震更大的地震(梁春涛等, 2018; Liu等, 2018; Shao等, 2019; Liu等, 2020); (2) 大邑地震空区靠近芦山段存在岩体结构完整的闪长岩体, 且应力环境比近汶川段稳定, 构造相对简单(Yang等, 2017); (3) 根据活动断层对地应力影响范围的研究(Zoback和Healy, 1992; Ikeda等, 1996; 郭啟良等, 2009), 2个钻孔布置在距离断层5km左右的范围内, 其中GQX-1位于双石-大川断裂带上盘, 深度为1000m, 距离断层约5km; GQX-5位于双石-大川断裂带下盘, 深度为500m, 距离断层约5km.

钻孔结束后, 进行了地球物理综合测井和地温测量, 结果表明: GQX-1孔地层主要划分为第四系全新统松散沉积物, 元古界黄水河群火成岩(闪长岩、花岗岩)和变质岩(石英岩、角闪斜长岩); GQX-5孔揭露的主要地层为第四系沉积物和上白垩统灌口组泥岩、砂

图 1 大邑地震空区钻孔分布和活动断裂分布

(a) 龙门山断裂带地震构造背景与周边地应力测量钻孔分布图(郭啟良等, 2009; 陈群策等, 2012; 吴满路等, 2013; 邱君等, 2017); GQX-1孔深度为1000m, GQX-5孔深度为500m. (b) 龙门山断裂带震源机制解(Luo等, 2019). (c) 应力方向玫瑰花图(郭啟良等, 2009; 陈群策等, 2012; 吴满路等, 2013; 邱君等, 2017)

图2 三向主应力和测井参数随深度变化特征

(a) GQX-1孔杨氏模量、三向主应力量值、Gamma射线和电阻率随深度变化特征; (b) GQX-5孔杨氏模量、三向主应力量值、Gamma射线和电阻率随深度变化特征; (c) GQX-1孔不同深度地应力测段的杨氏模量、最大水平主应力 S_H 、Gamma射线和电阻率。 S_H 与杨氏模量、Gamma射线和电阻率的相关系数分别为0.31、-0.21和-0.24; GQX-1孔在535~744m深度范围内高于48MPa, 最大值达到了60MPa, 即使剔除800m左右的地形高差对应力产生的影响, 各深度段修正后的测量值也高达33.20~44.56MPa, 依然属于高应力

砾岩和砾岩。地温的测量在终孔一周后进行(图3a), 并在终孔后1个月进行了重复测量, 测量结果与第一次无明显差异, 测量精度为1℃。GQX-1孔在不同深度段存在涌水, 最深涌水部位出现在830m深度左右。同时根据测井资料所获得的纵波时差及岩性、密度测井资料计算了地层岩石力学参数的大小(杨氏模量 E 、体积模量 K 、剪切模量 G 和泊松比 σ 等)。

2.2 方法

2.2.1 水压致裂地应力测量方法

水压致裂地应力测量方法(简称HF)是国际岩石力学学会推荐的地应力测量方法之一。HF是利用高压水把完整岩石压裂并获得压力-时间曲线, 据此可确定破裂压力 P_b 、重新张开压力 P_r 以及闭合压力 P_s (等于最小水平主应力 S_h), 根据 S_h 的值可求出最大水平主应力 S_H , 选取压裂曲线的后3个回次, 分别利用 dt/dp 、Maskat法、渐变法和双切线法确定 P_s 值, 并分别取其中3种方法的平均值为最终值, 详细的数据处理方法以及质量控制可参考Meng等(2015)。

HF系统由两个跨接式的充水橡胶封隔器和一个最大流量为21L min⁻¹和额定压力为35MPa的高压泵组成。HF测段选择在岩芯完整的部位, 为避免重新张开压力较低的原生裂隙对应力状态的影响, 在HF工作开始前, 利用测量系统对即将开展实验的测量段进行高压渗透性实验, 地应力测量段选择在压力不会降低的部位。然后, 用钻杆把HF系统下放至测量深度, 向跨接式封隔器加压, 使其与钻孔壁完全接触, 密封住约0.9m长的压裂段。然后, 通过钻杆以恒定流速将水注入压裂段使其破裂。为了避免钻杆柔度和摩擦阻力对测量结果的影响, 2个钻孔的应力测量均采用了井下采集系统, 压力数据以20Hz的采样率实时记录, 获得典型的压力-时间曲线列于网络版附图S1(<http://earthcn.scichina.com>), 测量结果见网络版附表S1。GQX-1孔测量曲线为第二次压裂曲线, 第一次压裂时由于井下采集设备进水, 未能获得压裂曲线。

所有的HF试验完成后, 使用长约1.0m, 外裹一层硫化橡胶的印模封隔器确定压裂裂缝的方位。使用钻杆将其放入 P_b 明显的压裂段, 用高压泵泵入压力至稍微大于闭合压力的水平, 保持0.5h, 硫化橡胶将会把压裂段内的裂缝形状印在封隔器上。

2.2.2 断层稳定性分析

当岩石中预存一个软弱面, 发生破裂和摩擦滑动时, 假设不同应力圆的外切线和通过最大剪应力面摩擦滑动线的斜率分别为 μ_w 和 μ_m , 两者的对应关系为(李兵等, 2020)

$$\mu_m = \frac{\mu_w}{\sqrt{\mu_w^2 + 1}}, \quad (1)$$

其中, μ_w 是材料的内摩擦系数。

根据Byerlee定律, 在低压和高压下断层摩擦系数的上下限分别为0.85和0.60, 取 $\mu=0.6$ 时发生摩擦滑动, 此时 $\mu_w=0.6$ 时, $\mu_m=0.51$ 。

3 结果

为避免地形可能对地应力产生影响, 本文采用深度大于100m的数据进行分析(Wu等, 2016)。假设垂直应力(S_v)是三个主应力之一, 根据不同深度的岩石覆盖层乘以密度来计算 S_v 的大小, 根据测井资料密度取0.0267g m⁻³。2个钻孔的 S_H 值介于10.60~60.30MPa, S_h 值介于6.75~33.90MPa, 在2个钻孔测试深度范围内, 三向主应力的相对大小表现为 $S_H > S_h > S_v$, 有利于逆断层的活动(附表S1和图2)。对 S_H 和 S_h 进行线性拟合(图2):

$$\begin{cases} S_H = (12.003 \pm 4.385) + (0.044 \pm 0.009)H, r^2 = 0.61, \\ S_h = (6.433 \pm 2.328) + (0.027 \pm 0.005)H, r^2 = 0.68, \\ S_v = 0.0267H, \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} S_H = (4.378 \pm 3.850) + (0.064 \pm 0.012)H, r^2 = 0.77, \\ S_h = (2.888 \pm 2.241) + (0.036 \pm 0.007)H, r^2 = 0.76, \\ S_v = 0.0267H, \end{cases} \quad (3)$$

其中, H 为深度, 单位: m; r^2 为相关系数; 应力单位: MPa。式(2)和(3)分别为GQX-1孔和GQX-5孔拟合。

2个钻孔的 S_H 均处于高应力状态, GQX-1孔 S_H 在小于200m深度的多个测段大于18MPa, 而GQX-1孔和GQX-5孔的 S_H 在大于300m深度的测段均大于20MPa, 尤其是GQX-1孔, 在535~744m深度范围内高于48MPa, 最大值达到了60MPa, 明显高于其他深度范围内的值。由拟合方程可知, 2个钻孔的 S_H 和 S_h 应力梯度分别大于0.044和0.027, 明显大于中国大陆和世界范围内的平均

图3 地温与几次强震前地应力随深度变化特征

(a) 地温随深度变化特征, 2个钻孔的地温梯度小于 $2^{\circ}\text{C} (100\text{m})^{-1}$, 可以推测在10~15km的深度, 温度大约为 $217\sim 327^{\circ}\text{C}$; (b) 汶川地震前后地应力随深度的变化特征, 2个钻孔大于300m深度的 S_H 大于2003年之前和汶川地震临震前的值; (c) 几个强震前 S_H 变化对比, S_H , 最大水平主应力; S_v , 垂直主应力

值, 介于龙门山断裂带地区已有研究结果的范围内 (Meng等, 2015). 2个钻孔的 S_H 方向在浅部为 $\text{N}10^{\circ}\text{E} \sim \text{N}15^{\circ}\text{E}$, 随深度增加转变为 $\text{N}52^{\circ}\text{W} \sim \text{N}70^{\circ}\text{W}$, 与区域应力场趋于一致. 根据地温测量结果, GQX-1与GQX-5孔的地温梯度介于 $0.9\sim 1.7^{\circ}\text{C} (100\text{m})^{-1}$, 前者的地温梯度大于后者(图3a).

4 讨论

4.1 区域构造应力场的特征

图2a和2b表明, 2个钻孔不同深度的 S_H 值与测井资料获得的杨氏模量、Gamma射线和电阻率相关性较弱, 表明岩石力学性质对2个钻孔的地应力状态影响较小. 如果考虑地形的影响, 距GQX-1孔2km的范围内, 钻孔与山体存在800m左右的地形高差, 利用双轴应力模型估算垂直应力对水平应力产生的影响(Turcotte和Schubert, 1982):

$$S_c = \frac{\nu}{1-\nu} S_v, \quad (4)$$

其中, S_c 是垂直应力在水平方向产生的侧压力; ν 为泊松比, 综合测井结果为0.29; S_v 是800m高差与测量深度之和的垂直应力. 在535、590、643和744m的深度上, S_v 产生的水平应力分别为14.56、15.16、15.75和16.84MPa. 各测段减去 S_c 后分别为33.97、42.76、44.56和33.20MPa, 与其他深度段相接近(图2c). 然而, 如果考虑地形对应力的影响, 部分测段的构造应力可能仅为2MPa, 例如295.65m(按照理论垂直应力产生的水平应力约为11.9MPa), 这表明地形对应力的影响远小于理论值, 因此忽略地形对应力的影响.

由图2a和2b可知, 三向主应力的相对大小有利于逆断层的活动, 这表明水平构造应力起主导作用. 震源机制的结果表明深部应力具有明显的逆断层应力状态(Yang等, 2017; Luo等, 2019), 预示浅部应力状态与深部应力状态相一致. 此外, 断层上盘和下盘2个钻孔在相近深度同时出现1个明显的应力集中区,

上盘GQX-1孔在370~744m的应力集中区厚约400m, 而下盘GQX-5孔在340~470m的应力集中区厚约130m; 上盘应力集中区的量值介于36~60MPa, 而下盘介于37~40MPa. 这表明上盘的应力强度明显强于下盘.

两个钻孔的 S_H 方向除在浅部受到影响表现为 $N10^\circ E \sim N15^\circ E$ 外, 随深度的增加转变为 $N52^\circ W \sim N70^\circ W$, 与区域应力场趋于一致, 反映了青藏高原向ES挤压控制的背景应力状态. 震源机制解显示(图1b), 在龙门山断裂带的南段, 最大主压力垂直于主断裂带(Luo等, 2019). 根据汶川地震和芦山地震前后的地应力方向的玫瑰花图可知(图1c), 研究区的 S_H 以NWW向为主. 芦山地震前后碛碛地区的地应力测量结果显示, 龙门山断裂带西南段主应力方向保持相对稳定, 并且以NW-NWW向为主.

4.2 双石-大川断裂带的稳定性分析

双石-大川断裂带是大邑地震空区内发生地震潜在危险性高的断层(Liu等, 2018), 分析该断层的稳定性是评估地震空区潜在地震危险性的关键.

根据安德森断层理论, 逆断层的断层倾角与摩擦系数存在如下关系(Turcotte和Schubert, 1982):

$$\tan 2\theta = \frac{1}{\mu}. \quad (5)$$

式(5)表明, 高角度逆断层需要低摩擦系数才具备滑动的必要条件, 如果是高摩擦系数, 则需要高差应力或者存在高压流体(周永胜和何昌荣, 2009).

本文2个钻孔距碛碛测点约40km, 距芦山地震震中约30km, 210m深度以上的 u_m 平均值为0.57, 大于芦山地震前碛碛地区的值, 而小于地震后的值, 但均已超过摩擦滑动的下限, 处于危险的状态. 从GQX-1孔858~978m的 u_m 值看, 其平均值为0.27, 小于浅部测点的值, 如果考虑有效应力(主应力减去孔隙压力), u_m 值平均为0.37, 也处于较高的水平. 由式(5)可知, 如果双石-大川断裂带断层倾角随深度的增加逐渐变小, 假设深部的摩擦系数为0.37, 如果不存在高孔隙压力, 断层倾角必须减小至 35° , 该断层才有可能发生摩擦滑动. 如果深部存在高孔隙压力, 会降低断层的摩擦强度, 那么即使断层倾角大于 35° 也会发生摩擦滑动. 根据人工地震勘探结果(测深2km), 结合野外地质地貌调查的研究表明: 双石-大川断裂主断层整体呈NNE走

向, 倾向NWW, 倾角 $29^\circ \sim 56^\circ$ (王万合和郭春衫, 2021). 而断裂带出露地表的部分显示, 断层倾角为 $65^\circ \sim 75^\circ$, 据此推测双石-大川断裂浅部属于高角度逆断层, 随着深度的增加断层倾角有变缓的趋势. 这一推测与基于更深的地震勘探和该区域的地质模型相一致(Jia等, 2010; Shao等, 2019).

尽管有研究显示, 大邑地震释放了地震空区的大部分能量(Shao等, 2019), 地震空区较弱的岩石物理性质和强的ES应变传递, 其地震发生的危险性较小(Pei等, 2014; Wang等, 2018; Shao等, 2019), 但是我们的测量结果更支持大邑地震的应力降相对较小, 不足以减小地震空区地震危险性(Liu等, 2020)的观点. 由图3c可知, GQX-1和碛碛测点均位于两个不同断层的上盘, 在相近的深度范围内, GQX-1孔的 S_H 最大值高于碛碛地区. GQX-1和GQX-5大多数测点在相近深度上的 S_H 大于或等于汶川地震和康定地震前的量值. 与芦山地震前地应力量值对比看, 其发震的能力似乎应与芦山地震相当.

高应力和低应力尚未有统一的标准界定, 本文以汶川和芦山地震2次强震前的地应力量值作为高应力和低应力的标准, 即应力值大于20MPa为高应力标准, 本文的结果属于高应力. 有意思的是, 芦山地震后碛碛地区160m深度的地应力明显增加, 与汶川地区的P波波速增加相吻合, 促进了汶川地区断层的愈合(Pei等, 2019). GQX-1孔在160m深度的量值与芦山地震后碛碛地区的相近, 而且3个不同地区均表现为高地应力, 这预示高地应力状态可能是区域性的. 综合来看, 双石-大川断裂带(大川镇)附近存在高应力条件, 具备发生地震的应力条件.

4.3 地震空区地震发生的潜在危险性

总体看 S_H 和 S_h 随深度的增加而增大, 应力状态属于高应力, 结合碛碛地区的测量结果, 可以推测高应力是区域性的, 同时地温测量和速度结构证实了深部结构具备应力积累的条件, 在这种应力背景下, 具有滑动优势方向的断层均具有发生摩擦滑动的潜在危险性.

根据地温测量结果, 在1000m深度上温度大约为 $34^\circ C$, 地温梯度为 $1.7^\circ C (100m)^{-1}$, 低于距汶川地震震中约50km处的地温梯度(钻孔深度约为4km, 距GQX-1孔约100km, 地温梯度约为 $2.2^\circ C (100m)^{-1}$ (徐明等,

2011)), 这与龙门山断裂带附近的温度较低的结果相吻合。考虑到可能的地层转换对地温产生的影响, 本文取4km以上为 $1.7^{\circ}\text{C} (100\text{m})^{-1}$, 以下为 $2.2^{\circ}\text{C} (100\text{m})^{-1}$, 估计在10~15km的深度, 温度大约为 $217\sim 327^{\circ}\text{C}$ 。假设 $350\sim 400^{\circ}\text{C}$ 为脆韧转换层的临界温度(王健等, 2018), 那么大川镇地区的转换层可能出现在16~18km左右, 这与汶川地震和芦山地震及其余震的震源深度主要分布在8~20km的深度内基本相吻合(Luo等, 2019), 这表明大川镇深部具备应力积累的温度条件。

由图4三维速度结构的平面及深度剖面图(Wang等, 2015)可知, 钻孔GQX-1和GQX-5均位于高波速体一侧, 其中GQX-5相对靠近低波速体, 这与GQX-1地应力值高于GQX-5相吻合。深部剖面显示高速体从地表延伸到20km深度, 预示浅部应力与深部应力是耦合状态。此外, 震源机制解反演得到区域最大主压应力仰角并非水平, 在深部呈现约 20° 的倾斜(梁春涛等, 2018), 这与低速体结构的分布模式较为一致, 表明低速体作用对深部应力具有一定的扰动。大量研究结果表明, 大地震通常发生于高低速异常结构体的过渡带(Mishra和Zhao, 2003; Wang等, 2015), GQX-1和GQX-5均测得相对较高的应力值, 且深部存在低速异常体, 推测是高地震危险性区域。

从动力学机制看, 龙门山断裂带发生地震的动力来源都与青藏高原向东的强烈挤出有关, 由于南段活褶皱-逆断层运动机制的存在, 随着滑动速率和构造变形由西向东的传递逐渐缩减(李敬波等, 2015), 这可能表明东侧的应力积累高于西侧。从芦山地震后绕碛和大川镇的地应力测量结果看, 大川镇的构造应力值

与绕碛地区相近, 最大值高于绕碛地区, 这预示着地震空区的南端依然存在高应力积累。值得注意的是, 如果地震空区的深部结构为塑性物质(Pei等, 2014, 2019), 并且以塑性流变为主, 地震空区南北两端平行于断层的水平应力差导致空段地壳撕裂(何富君等, 2017; Liu等, 2018; 梁春涛等, 2018), 深部可能会近似成为调节上下地壳相对运动的滑脱层(Müller等, 1997), 这一深部结构与龙门山断裂带叠瓦状构造相吻合(徐锡伟等, 2013a; Wan等, 2017; Shao等, 2019)。那么地震空区受到青藏高原向东的强烈挤出作用, 将会向地震空区的南北两端和东侧传递, 这些部位将依然存在高地应力, 这与地应力测量结果相吻合。那么未来地震发生的潜在部位应该位于地震空区东侧和南端易于应力积累的关键构造部位, 也不排除地震危险区进一步向成都平原扩展。

5 结论

整体看, 研究区处于高地应力状态, 表明双石-大川断裂带具备了摩擦滑动的必要条件, 具有发生中、强震的潜在危险性。地震空区南端依然存在高地应力, 这反映青藏高原向东南强烈挤出在芦山地震后对浅部的影响并没有减弱。如果地震空区深部存在塑性层, 这会使青藏高原向东南的强烈挤出作用更易于向地震空区的南北两端和东侧分解, 增加这些区域的应力积累, 大川镇的高地应力与此相吻合。在区域高应力背景下, 具有滑动优势方向的断层均具有发生摩擦滑动的潜在危险性, 这些断层区域可能会成为下一次地震发生的

图4 三维速度结构的平面及深度剖面图(据Wang等, 2015)

潜在危险区, 应进一步加强动态跟踪观测, 揭示地震孕育发生的过程.

致谢 感谢责任编辑和评审专家为完善本文提出的建设性修改意见. 同时, Paul TAPPONNIER教授在成文过程中提供有益探讨, Tiegan HOBBS博士给予建设性修改意见, 张世民研究员在项目实施过程中给予帮助, 杨树新、李宏、任俊杰研究员和李康副研究员给予帮助和支持, 王显军、张志国和侯砚和在测试过程中给予帮助, 在此一并致谢.

参考文献

- 陈群策, 丰成君, 孟文, 秦向辉, 安其美. 2012. 5.12汶川地震后龙门山断裂带东北段现今地应力测量结果分析. *地球物理学报*, 55: 3923–3932
- 陈运泰, 杨智娴, 张勇, 刘超. 2013. 从汶川地震到芦山地震. *中国科学: 地球科学*, 43: 1064–1072
- 郭敏良, 王成虎, 马洪生, 王崇良. 2009. 汶川 M_s 8.0级大震前后的水压致裂原地应力测量. *地球物理学报*, 52: 1395–1395
- 何富君, 梁春涛, 杨宜海, 房立华, 苏金蓉. 2017. 用接收函数方法研究汶川和芦山地震之间未破裂段的地壳结构. *地球物理学报*, 60: 2130–2146
- 李兵, 丁立丰, 郭启良, 姜大伟, 谢富仁. 2020. 2015年金口河 M_s 5.0级地震前地应力状态及动力学背景分析. *地质学报*, 94: 2500–2508
- 李敬波, 李勇, 周荣军, 颜照坤, 闫亮, 郑立龙, 杨丰强, 任聪. 2015. 龙门山南段前缘地区活褶皱-逆断层运动学机制——以芦山地震为例. *地震工程学报*, 37: 202–213
- 梁春涛, 黄焱羚, 王朝亮, 刘志强, 杨宜海, 吴晶, 何富君. 2018. 汶川和芦山地震之间地震空区综合研究进展. *地球物理学报*, 61: 1996–2010
- 秦向辉, 陈群策, 谭成轩, 安其美, 吴满路, 丰成君. 2013. 龙门山断裂带西南段现今地应力状态与地震危险性分析. *岩石力学与工程学报*, 31: 2870–2876
- 邱君, 吴满路, 范桃园, 张重远, 李冉, 陈利忠. 2017. 芦山地震前后龙门山断裂带西南段地应力状态对比分析. *地质学报*, 91: 969–978
- 冉勇康, 王虎, 陈立春, 陈文山, 梁明剑, 徐锡伟. 2018. 龙门山断裂带晚第四纪的大地震活动——来自古地震研究的资料. *地球物理学报*, 61: 1938–1948
- 王健, 张广伟, 李春峰, 梁姗姗. 2018. 青藏高原东缘地震活动与居里点深度之间的相关性. *地球物理学报*, 61: 1840–1852
- 王万合, 郭春衫. 2021. 四川省大川镇活动断层浅层地震勘探项目. 技术报告. 西安: 中煤科工集团西安研究院有限公司
- 闻学泽. 2018. 巴颜喀拉块体东边界千年破裂历史与2008年汶川、2013年芦山和2017年九寨沟地震. *地震学报*, 40: 255–267
- 吴满路, 张岳桥, 廖椿庭, 陈群策, 马寅生, 丰成君, 张重远, 严君凤, 吴金生. 2013. 汶川 M_s 8.0地震后龙门山断裂带地应力状态研究. *地球物理学进展*, 28: 1122–1130
- 徐明, 朱传庆, 饶松, 胡圣标. 2011. 阿坝-简阳地学剖面深部温度及热结构. *地质科学*, 46: 203–212
- 徐锡伟, 陈桂华, 于贵华, 程佳, 谭锡斌, 朱艾澜, 闻学泽. 2013a. 芦山地震发震构造及其与汶川地震关系讨论. *地学前缘*, 20: 11–20
- 徐锡伟, 闻学泽, 韩竹军, 陈桂华, 李传友, 郑文俊, 张世民, 任治坤, 许冲, 谭锡斌, 魏占玉, 王明明, 任俊杰, 何仲, 梁明剑. 2013b. 四川芦山7.0级强震: 一次典型的盲逆断层型地震. *科学通报*, 58: 1887–1893
- 赵静, 任金卫, 江在森, 刘晓霞, 牛安福, 闫伟, 岳冲, 苑争一. 2018. 龙门山断裂带西南段闭锁与变形特征. *地震研究*, 41: 216–225
- 赵静, 武艳强, 江在森, 牛安福, 刘杰, 王丽凤, 魏文薪. 2013. 芦山地震前龙门山断裂带闭锁程度与变形动态特征研究. *地震学报*, 35: 681–691
- 郑勇, 郭汝梦. 2021. 汶川-芦山地震间的空区危险性研究: 现状、思考和挑战. *中国科学: 地球科学*, 51: 483–486
- 周永胜, 何昌荣. 2009. 汶川地震区的流变结构与发震高角度逆断层滑动的力学条件. *地球物理学报*, 52: 474–484
- Brodsky E E, Mori J J, Anderson L, Chester F M, Conin M, Dunham E M, Eguchi N, Fulton P M, Hino R, Hirose T, Ikari M J, Ishikawa T, Jeppson T, Kano Y, Kirkpatrick J, Kodaira S, Lin W, Nakamura Y, Rabinowitz H S, Regalla C, Remitti F, Rowe C, Saffer D M, Saito S, Sample J, Sanada Y, Savage H M, Sun T, Toczko S, Ujiie K, Wolfson-Schwehr M, Yang T. 2020. The state of stress on the fault before, during, and after a major earthquake. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 48: 49–74
- Ikeda R, Yoshihisa I, Kentaro O. 1996. *In-situ* crustal stress variation before and after the 1995 Hyogo-Ken Nanbu Earthquake around the epicenter. In: *Proc VIIIth Int Symp Obs Cont Crust Drill*
- Jia D, Li Y, Lin A, Wang M, Chen W, Wu X, Ren Z, Zhao Y, Luo L. 2010. Structural model of 2008 M_w 7.9 Wenchuan earthquake in the rejuvenated Longmen Shan thrust belt, China. *Tectonophysics*, 491: 174–184
- Liu C, Zhu B J, Shi Y L. 2020. Do the two seismic gaps in the southwestern section of the Longmen Shan fault present the same seismic hazard? *J Geophys Res-Solid Earth*, 125: e18160
- Liu Z Q, Liang C T, Hua Q, Li Y, Yang Y H, He F J, Fang L H. 2018. The seismic potential in the seismic gap between the Wenchuan and Lushan earthquakes revealed by the joint inversion of receiver functions and ambient noise data. *Tectonics*, 37: 4226–4238
- Luo Y, Zhao L, Tian J H. 2019. Spatial and temporal variations of stress field in the Longmenshan fault zone after the 2008 Wenchuan, China earthquake. *Tectonophysics*, 767: 228172
- Meng W, Chen Q C, Zhao Z, Wu M L, Qin X H, Zhang C Y. 2015.

- Characteristics and implications of the stress state in the Longmen Shan fault zone, eastern margin of the Tibetan Plateau. *Tectonophysics*, 656: 1–19
- Mishra O P, Zhao D. 2003. Crack density, saturation rate and porosity at the 2001 Bhuj, India, earthquake hypocenter: A fluid-driven earthquake? *Earth Planet Sci Lett*, 212: 393–405
- Müller B, Wehrle V, Zeyen H, Fuchs K. 1997. Short-scale variations of tectonic regimes in the Western European Stress Province north of the Alps and Pyrenees. *Tectonophysics*, 275: 199–219
- Pei S P, Zhang H J, Su J R, Cui Z X. 2014. Ductile gap between the Wenchuan and Lushan earthquakes revealed from the two-dimensional Pg seismic tomography. *Sci Rep*, 4: 6489
- Pei S P, Niu F L, Ben-Zion Y, Sun Q, Liu Y B, Xue X T, Su J R, Li Z G. 2019. Seismic velocity reduction and accelerated recovery due to earthquakes on the Longmenshan Fault. *Nat Geosci*, 12: 387–392
- Raleigh C B, Healy J H, Bredehoeft J D. 1976. An experiment in earthquake control at Rangely, Colorado. *Science*, 191: 1230–1237
- Shao C, Li Y, Yan Z, Liu S, Zhou R, Li J, Dong S, Yan L, Deng T, Nie Z. 2019. Differential strain transfer, Longmen Shan thrust belt, eastern Tibetan Plateau margin: Implications for seismic hazards. *J Asian Earth Sci*, 169: 284–297
- Turcotte D L, Schubert G. 1982. *Geodynamics—Applications of Continuum Physics to Geological Problems*. New York: Cambridge University Press
- Wan Y, Shen Z K, Bürgmann R, Sun J, Wang M. 2017. Fault geometry and slip distribution of the 2008 M_w 7.9 Wenchuan, China earthquake, inferred from GPS and InSAR measurements. *Geophys J Int*, 208: 748–766
- Wang C, Liang C, Deng K, Huang Y, Zhou L. 2018. Spatiotemporal distribution of microearthquakes and implications around the seismic gap between the Wenchuan and Lushan earthquakes. *Tectonics*, 37: 2695–2709
- Wang Z, Su J R, Liu C X, Cai X L. 2015. New insights into the generation of the 2013 Lushan earthquake (M_s 7.0), China. *J Geophys Res-Solid Earth*, 120: 3507–3526
- Wu M L, Zhang C Y, Fan T Y. 2016. Stress state of the Baoxing segment of the southwestern Longmenshan Fault Zone before and after the M_s 7.0 Lushan earthquake. *J Asian Earth Sci*, 121: 9–19
- Xu X W, Wen X Z, Yu G H, Chen G H, Klinger Y, Hubbard J, Shaw J. 2009. Coseismic reverse- and oblique-slip surface faulting generated by the 2008 M_w 7.9 Wenchuan earthquake, China. *Geology*, 37: 515–518
- Yang Y, Liang C, Li Z, Su J, Zhou L, He F. 2017. Stress distribution near the seismic gap between Wenchuan and Lushan earthquakes. *Pure Appl Geophys*, 174: 2257–2267
- Zoback M D, Healy J H. 1992. *In situ* stress measurements to 3.5 km depth in the Cajon Pass Scientific Research Borehole: Implications for the mechanics of crustal faulting. *J Geophys Res*, 97: 5039–5057

(责任编辑: 郑勇)