



四川映秀井水位年变下降异常成因分析

张 映, 刘华姣, 陈梦蝶, 芮雪莲, 梁 慧, 何思源, 周思哲

Analysis of the abnormal variation of water level at Yingxiu well, Sichuan Province

Zhang Ying, Liu Huajiao, Chen Mengdie, Rui Xuelian, Liang Hui, He Siyuan, and Zhou Sizhe

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19987/j.dzqxjz.2024-123>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

豫01井水位急剧下降原因调查与分析

Investigation and analysis on the cause of the sharp drop of water level in well Yu-01

地震科学进展. 2020, 50(9): 16-19

德令哈台尔海井水位异常分析

Analysis on the water level anomaly at Delingha Gahai well in Qinghai Province

地震科学进展. 2020, 50(2): 36-39

永清井水温仪观测数据异常核实的实例与分析

Example and analysis of abnormal verification of water thermometer observation data in Yongqing well

地震科学进展. 2022, 52(9): 420-427

四川盐源干海双井水位观测干扰分析

Analysis of interference of water level observation at Ganhai double wells in Yanyuan County, Sichuan Province

地震科学进展. 2023, 53(6): 268-277

蚌埠监测中心井水位短时升高成因探究

Study on the cause of short-term rise of water level in Bengbu monitoring center well

地震科学进展. 2023, 53(6): 261-267

蚌埠监测中心井水位长时间持续升高成因分析

Analysis on the causes of the long-term continuous increase of the water level in the well of Bengbu Monitoring Center

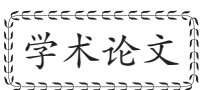
地震科学进展. 2021, 51(10): 472-476



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张映, 刘华姣, 陈梦蝶, 等. 四川映秀井水位年变下降异常成因分析 [J]. 地震科学进展, 2025, 55(12): 668-677. doi:10.19987/j.dzksjz.2024-123

Zhang Y, Liu H J, Chen M D, et al. Analysis of the abnormal variation of water level at Yingxiu well, Sichuan Province[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2025, 55(12): 668-677. doi:10.19987/j.dzksjz.2024-123



四川映秀井水位年变下降异常成因分析

张 映¹⁾ 刘华姣¹⁾ 陈梦蝶^{2)*} 芮雪莲²⁾ 梁 慧¹⁾ 何思源¹⁾ 周思哲¹⁾

1) 成都地震监测中心站, 四川成都 611730

2) 四川省地震局, 四川成都 610041

摘要 2021—2022 年映秀井水位出现大幅度年变下降异常。本文开展降雨与水位的相关性分析、降雨对水位影响的定量排除、观测井周边环境调查、水文地球化学测试以及井孔含水层系统应力变化分析等工作, 浅析映秀井水位年变形态减小的异常成因。认为映秀井水位 2022 年水位年变大幅度下降除受控于降雨因素外, 还受到其他因素的制约; 而观测井含水层参数在 2022 年初出现大幅度的波动变化, 说明水位年变阶降是因为含水层受到构造静应力作用, 可能与 2022 年 6—9 月一系列 6 级地震前后区域构造应力的变化或调整有关。

关键词 映秀观测井; 水位下降异常; 含水层参数

中图分类号: P315.63 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7780(2025)12-0668-10

doi: 10.19987/j.dzksjz.2024-123

Analysis of the abnormal variation of water level at Yingxiu well, Sichuan Province

Zhang Ying¹⁾, Liu Huajiao¹⁾, Chen Mengdie²⁾, Rui Xuelian²⁾, Liang Hui¹⁾, He Siyuan¹⁾, Zhou Sizhe¹⁾

1) Chengdu Earthquake Monitoring Center Station, Sichuan Chengdu 611730, China

2) Sichuan Earthquake Agency, Sichuan Chengdu 610041, China

Abstract From 2021 to 2022, the water level in the Yingxiu well showed a large anomalous annual decline. In this study, we analyzed the correlation between rainfall and the water level and conducted a quantitative exclusion analysis of the impact of rainfall on the water level. The environment surrounding the observation site were also investigated, geochemical tests were conducted on water samples, and stress changes in the wellbore aquifer system were analyzed to determine the abnormal cause of this annual change. The results showed that the annual change in the water level in Yingxiu well dropped significantly in 2022, and this was controlled by both rainfall factors and other factors. At the beginning of 2022, the parameters of the aquifer in the observation period fluctuated significantly, indicating that the annual water level gradient was related to the tectonic static stress of the aquifer that may be related to changes or

收稿日期: 2024-07-31; 采用日期: 2024-12-18。

基金项目: 四川省地震局科技专项(LY2402)资助。

第一作者: 张映(1990-), 男, 工程师, 主要从事地震监测预报工作。E-mail: zylqn0810@163.com。

* 通信作者: 陈梦蝶(1994-), 女, 工程师, 主要从事地震分析预报工作。E-mail: chenmd0128@163.com。



adjustments in the regional tectonic stresses before and after a series of earthquakes with a magnitude 6 occurring from June to September 2022.

Keywords Yingxiu observation well; abnormal water level drop; aquifer parameter

0 引言

地震孕育、发展和发生过程是地壳应力积累、强化和释放的过程,而封闭性良好的井-含水层系统可作为一个天然的体应变仪,能够捕捉地壳中微小的应力应变过程^[1-2]。大量的震例表明,中强地震前普遍存在井水位的异常变化^[3-5]。然而,井水位微动态并非都能反应区域构造应力场的状态,还可能受大气降雨、环境变化等多种因素的影响^[6-7],这些因素会在一定程度上对通过井水位判断区域应力场变化的灵敏度和准确度产生干扰。因此,开展井水位的异常分析需首先排除各类干扰因素^[8-9],在尽可能排除干扰的前提下进一步开展水位异常和地震前兆的关联性分析。

国内学者尝试采用多种方式来分析井水位异常与构造活动的相关性。在排除降雨对井水位的影响时,采取了卷积滤波法^[10]、组合水箱模型法^[9, 11]及相关性分析法^[12]等多种分析方法,并取得了良好的效果。在地下水循环过程中,离子成分和氢氧同位素可作为地下水循环的示踪剂,可以有效判定地下水的类型、补给来源以及水岩反应程度,判断地下水中是否存在来自地壳深部信息^[13-14];在分析地下水动力学过程时,井-含水层系统参数可作为反映地壳内应力应变能力的重要指标^[15-17],通过观测井水位的固体潮效应获取含水层系统参数,该方法也是目前在缺少形变资料的情况下提取构造活动信息和应力状态的重要手段。综上,通过水物理和水化学的综合分

析,可进一步提高异常分析可信度,为前兆异常的提取提供更加科学的依据。

本文首先通过对比分析、水化学测试来分析降雨和水位的相关性,并采用数值模拟降雨对水位的影响;再利用井水的潮汐动态变化反演含水层的参数变化,从而推断区域构造应力的变化;最后通过区域其他流体井资料、定点形变数据进一步佐证构造应力场变化情况。综合以上方法分析 2021—2022 年映秀井水位年变下降异常成因,为以后在该地区开展异常核实工作提供参考依据。

1 观测井概况及水位异常特征

映秀井位于四川汶川县映秀镇渔子溪村,构造位置处于龙门山构造带的中央断裂——北川—映秀断裂东南侧,区域活动断裂发育,构造变形显著^[18]。以映秀—北川断裂为界,断裂西北侧为以岩浆岩为主的彭灌杂岩体,断裂南东侧为以沉积岩为主的碎屑岩类^[19]。映秀井周边区域地震活动强烈,1900 年以来在观测井 200 km 范围内发生 $M_S \geq 6$ 地震 22 次,而 2008 年汶川 $M_S 8.0$ 地震破裂起始点距映秀井不足 2 km (图 1a)。

映秀井井深 400 m,观测含水层段为 100~400 m,0~100 m 采用 217×7 钢管,100~400 m 采用 168×7 钢管护壁。含水层岩性为三叠系上统须家河组砂岩、砾岩、泥岩,地下水类型为砂、页岩类裂隙层间水^[20]。观测井周边无同层抽水情况。该观测井隶属地方应

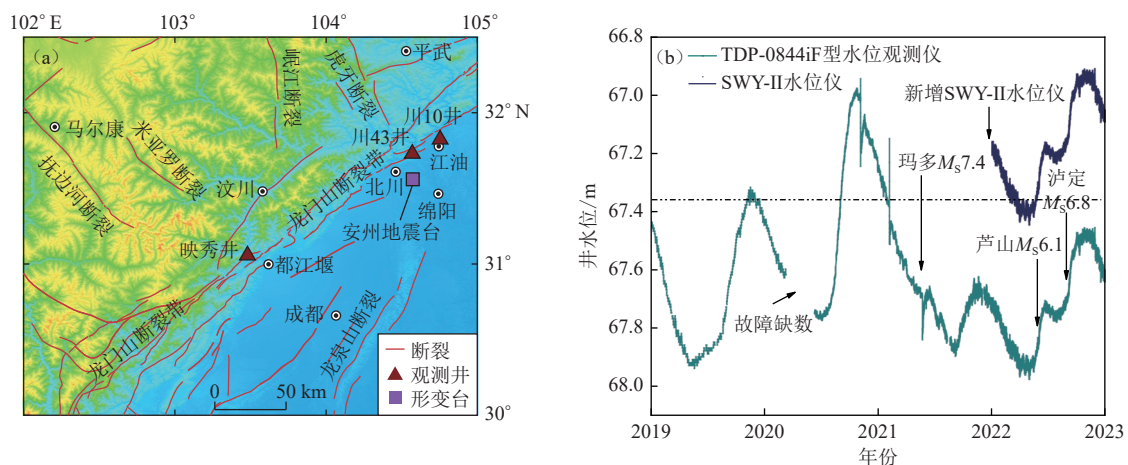


图 1 映秀井构造位置图(a) 及井水位时序图(b)

Fig. 1 Structural map of Yingxiu well (a) and time series chart of well water level (b)

急管理局,于2018年11月启动观测,主要测项为静水位,井水位观测使用TDP-0844iF型水位观测仪,数据采用本地存盘未入网观测。2022年新增SWY-II水位仪并行对比观测,两套仪器数据采样间隔均为分钟采样,观测数据一致性高。

映秀井水位自观测以来主要呈夏升冬降的年变形态(图1b),夏季上升转折点发生在5—9月,下降转折多发生在10—12月。但2021年9月—2022年12月的水位较2019—2020年明显降低,2021年年变高值较2020年年变高值降低了67.9 cm,表现为水位年变大幅度下降的现象。引起这一显著变化的原因是降雨减少、震后应力调整亦或是地震前兆异常,有待进一步分析。

2 水位变化与环境影响分析

2.1 降雨对水位变化的影响分析

观测井所在的映秀镇属于盆地边缘亚热带湿润季风气候区,区域内降雨频繁,年均降雨量为1134 mm,历史最大日降雨量269.8 mm,最大年降雨量1688 mm,降雨天数超过200天。每年5—9月为汛期,占全年降雨量70%^[21]。从观测资料来看,观测井水位受区域降雨较为明显,补给类型为降雨补给型,井水位年变形态存在显著的季节性特征(图2),表现为雨季后水位逐步转为上升,冬季降雨大幅减少,水位缓慢下降。如果从最大月累计降雨量角度看,2019年映秀地区最大月累计降雨时段发生在7月,为291.6 mm,2020年最大月累计降雨为8月的333.2 mm,2021年

为8月的212.5 mm,2022年为8月的155.2 mm,可见2019—2020年水位变化与最大月累计降雨呈正相关性。2021—2022年最大月累计降雨量较2019—2020年都有较显著的降低,水位年变幅度也随之降低,因此判断水位年变幅和最大月累计降雨量存在一定关联。然而,也看到2022年最大月累计降雨比2021年低,水位年变高值却高于2021年,因此降雨量的变化并不能完全解释水位的变化。

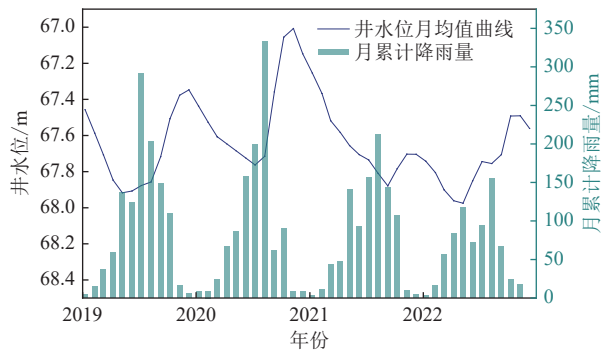


图2 映秀地区月累计降雨量与水位对比图
Fig. 2 Comparison chart of the monthly cumulative rainfall and water level in Yingxiu area

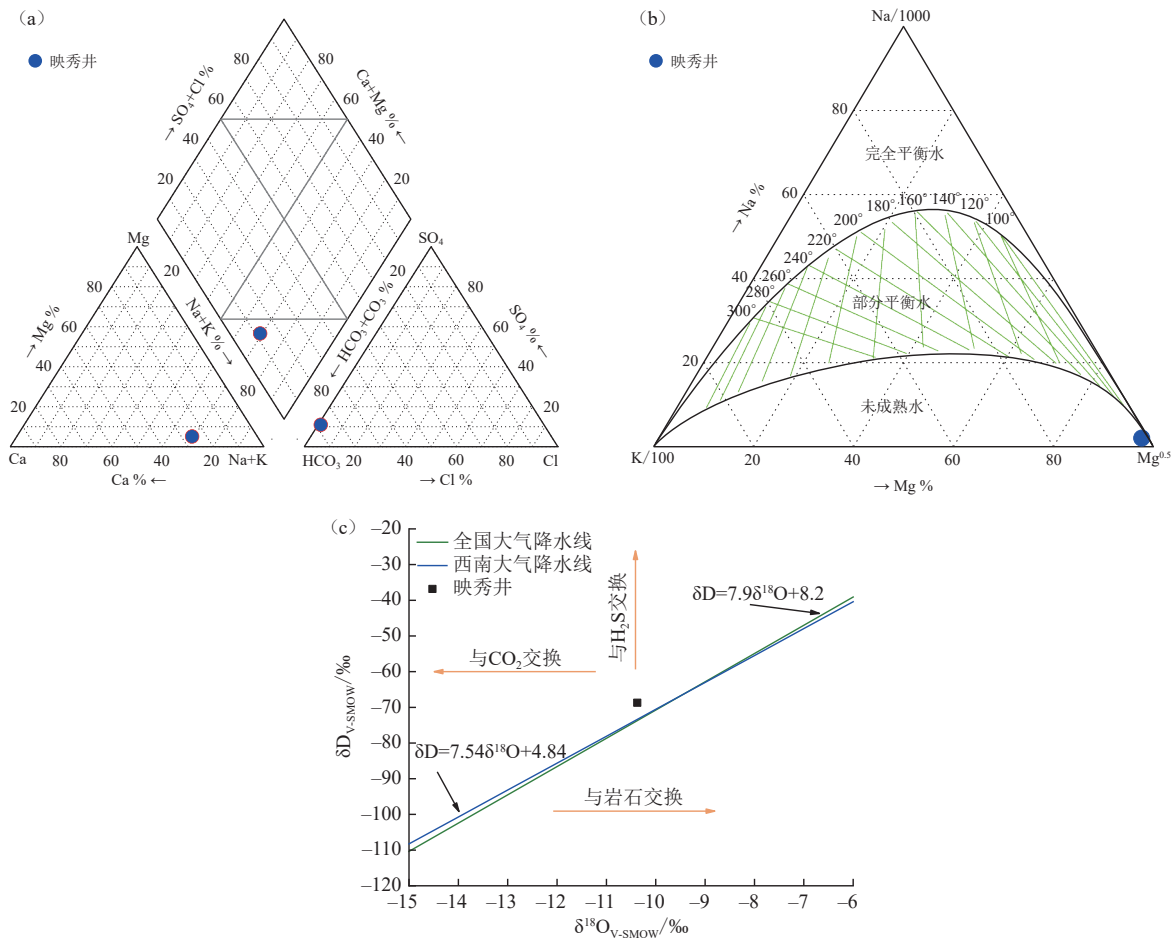
地下水的化学组分和稳定同位素可以判定水-岩平衡反应程度及其补给来源^[13-14]。为进一步判定观测井中的水岩反应程度,定量分析井水是否接受大气降雨的补给以及是否携带深部构造信息,笔者对映秀井进行了水化学取样,并委托应急管理部国家自然灾害防治研究院进行水化学成分和同位素检测。检测结果见表1。

表1 映秀井水化学成分及同位素分析结果
Table 1 Chemical composition and isotope analysis results of Yingxiu well water

水样	化学组成/(mg·L ⁻¹)								同位素/‰	
	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	δD	δ ¹⁸ O
映秀井	1.67	18.24	0.00	146.25	35.55	2.27	2.80	14.07	-68.71	-10.37

根据映秀井水化学成分分析结果(表1)及Piper三线图(图3a)可以看出,映秀井水化学类型属于HCO₃⁻—Na型,主要阳离子为Na⁺,其次为Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺,主要阴离子为HCO₃⁻,为重碳酸型水,反映为浅层和时间较快的地下水循环。从离子的相对含量来看,观测井中Na⁺离子明显高于Ca²⁺、Mg²⁺离子,而三叠系须家河组(T₃)地下水化学类型多为HCO₃⁻—Ca型或HCO₃⁻—Ca Mg型,根据阳离子的交替吸附原理,观测井的水体与含水层围岩接触时,地

下水中的Ca²⁺离子会被吸附而析出更多的Na⁺离子,由此说明观测井的水体与围岩发生了一定的阳离子交换作用,携带了部分构造信息。Na-K-Mg三角图(图3b)可用来评价水-岩平衡状态和区分不同类型的水样^[22],映秀井水位于“未成熟水”范围内,表明含水层水体与岩体发生相互作用程度较弱,水-岩之间尚未达到离子平衡状态。地下水氢氧同位素分析(图3c)可以示踪地下水的来源,确定地下水的补给条件以及地表水与地下水的联系程度^[14],经测试映



(a) 地下水 Piper 图；(b) Na-K-Mg 三角图；(c) 氢氧同位素对比图

图 3 映秀井水样水化学测试结果

Fig. 3 Hydrochemical test results of water samples from Yingxiu well

秀井氢氧同位素位于中国大气降雨线及西南地区大气降雨线左侧，表明补给来源主要来自大气降雨，同时 δD 漂移现象说明观测井水位在运移过程中存在与含 OH 矿物或碳氢化合物等发生同位素交换。综合以上来看，观测井地下水主要来自大气降水，水岩反应程度较弱，但与围岩发生离子交换，仍可以一定程度反映深部构造信息。

针对降雨对观测井入渗补给滞后的现象，王旭升等^[11]提出了降雨-水位动态组合水箱模型，用于定量剔除降雨对井水位变化的影响。用该模型反演水位动态变化需首先利用正常年动态时段的井水位与降雨资料拟合响应函数参数 z_0 、 β 、 t_0 、 T_h 、 T_{iq} 、 T_{jq} （其中 z_0 为排泄基准面的高度， T_h 反映的是断裂带贮存水的能力， T_{jq} 反映降水直接渗入断裂带的能力， T_{iq} 反映断裂带获得侧向补给的能力）。考虑到自 2021 年 5 月 22 日青海玛多 $M_S7.4$ 地震后井水位年变幅度发生异常变化，因此将 2021 年 5 月前的数据作

为正常时间进行模型参数计算。本文利用 2019—2021 年 4 月映秀井井水位和降水资料（月均值）拟合得到模型参数分别为 $z_0=67.69$ 、 $\beta=3.5$ 、 $t_0=0.9$ 、 $T_h=102.5$ 、 $T_{iq}=39.8$ 、 $T_{jq}=0.1$ 。由模拟结果（图 4）可以看出，井水位 2019—2021 年 4 月实测值与模拟值曲线形态基本一致，具有较好的吻合性。再利用拟合后的参数模拟 2021 年 5 月—2022 年 12 月的水位动态，模拟结果如图 4 所示，可以看到总体上玛多 $M_S7.4$ 地震后模拟水位和实测水位一致，存在年变幅度下降的现象，表现为水位受降雨减少而降低。但也可以看到，在 2021 年 7 月—2022 年 12 月模拟水位均高于实测水位，最大差值为 36 cm，初步判断除降雨外还存在其他因素导致水位的年变幅度降低。

2.2 台站环境干扰调查分析

在对映秀井周边环境调查中发现，在观测井北南向有一大型水库——紫坪铺水库，水库距离映秀井约 6 km，水库秋冬季蓄水用于发电，汛期降低蓄

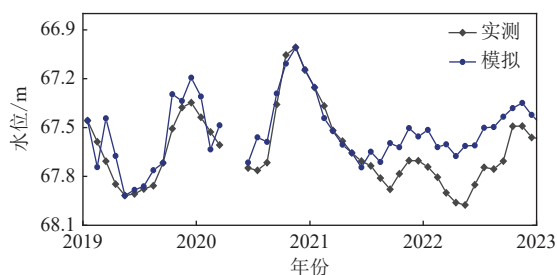


图4 映秀井水位观测值与模拟值对比

Fig. 4 Comparison between observed and simulated water level in Yingxiu well

水用于防洪, 水位呈现秋冬高、春夏低的水位年动态。2019—2020 年观测井水位与水库蓄水变化形态(图5)具有一定吻合, 2021 年夏季后映秀井水位年变幅度降低, 在 2022 年出现水位年变畸变, 井水位与水库库容水位重合性降低, 分析认为 2021 年前井水位与水库水位有较高重合性是因为同时受季节降雨影响的偶然因素, 并非两者之间的内在耦合。经调查, 台站周边无同层水位抽水井。

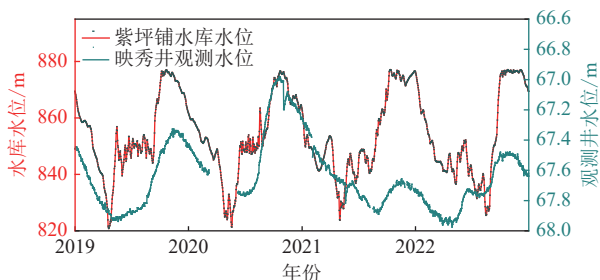


图5 映秀井水位与紫坪铺水库水位变化对比

Fig. 5 Comparison between water levels in Yingxiu well and Zipingpu reservoir

3 构造特征活动分析

3.1 井-含水层应变状态变化分析

前人研究表明, 水位的固体潮效应与含水层参数之间存在密切关系, 可以在一定程度上反映观测井水文地质参数变化, 明确水位异常变化所反映的构造活动信息^[16, 23]。目前普遍采用 Venedikov 调和分析法^[24]对固体潮进行分析, 再通过潮汐参数与气压系数进一步获取孔隙度、导水系数、贮水率等含水层参数^[25-26], 其函数表达式为:

$$B_g = 2T/[4T^2 - 4Tr_w^2\omega Kei(a_k) + r_w^4\omega^2 Kei^2(a_k)/\cos^2\psi]^{1/2} \frac{1}{S_s} \quad (1)$$

$$\varphi_g = -\arctan\{r_w^2\omega Ker(a_k)/[2T - r_w^2\omega Kei(a_k)]\} \quad (2)$$

式中, φ 为观测井水位对固体潮响应的相位差, r_w 为井管的半径, ω 为扰动信号的角频率, S_s 为含水层的单位贮水系数, T 为含水层的导水系数, S 为含水层的贮水系数, Ker 和 Kei 分别为开尔文函数的实部和虚部。

映秀井为裂隙承压井, 井深 400 m, 能够较好的记录到固体潮。在获得观测井潮汐参数前, 需首先对水位观测数据去除气压效应。本文利用 Clack 回归分析法^[27]对水位实测整点值数据去除气压效应, 再采用 Venedikov 法对去除气压效应后的数据进行调和和分析(图6)。考虑到映秀井为承压井, 因此对固体潮 M_2 波进行调和和分析来获得潮汐参数, 再基于以上公式利用固体潮参数获得观测井含水层的导水系数和贮水率的逐月变化值(图6c 和图6d)。

前人研究表明强震(动态加载)和静应力加载均可以引发井-含水层参数的改变^[28-30], 静应力和地震波作用可能改变含水层孔压、含水层力学和水动力学参数^[31-32]。那么 2021 年 9 月—2022 年 12 月映秀井水位较 2019 年、2020 年显著降低是玛多 $M_S7.4$ 地震导致的含水层形变, 还是 2022 年 6—9 月一系列 6 级地震前后应力变化或应力调整所致, 有必要进一步探讨。本文梳理了映秀井含水层参数在 2019—2022 年间发生在四川及邻区的 6 级以上强震和龙门山邻近地区 5 级以上中强地震前后的变化情况, 相关地震事件参数见表 2。

由图 6a 可以看到, 映秀井水位 2019—2020 年正常年份发生年变转折上升时间分别为 5 月和 7 月, 且在玛多 $M_S7.4$ 地震前井水位潮汐参数变化平稳, 几乎维持在 0.07×10^{-9} mm 左右。随着玛多 $M_S7.4$ 地震发生, 映秀井水位产生了约 15 cm 的同震阶变, 震后 8 天水位恢复至震前水平, 潮汐因子和相位差也出现了同震阶升, 潮汐因子由震前的 0.084×10^{-9} mm 迅速上升至 0.133×10^{-9} mm, 相位差也由 -53.40° 变为 76.07° , 导水系数由震前的 $0.22 \text{ m}^2/\text{d}$ 逐渐提高至 8 月的 $1.84 \text{ m}^2/\text{d}$ 。分析认为在地震波的作用下, 裂隙流体压力上升, 裂隙张开或者被疏通, 流体从含水层裂隙向基岩扩散, 含水层岩石渗透系数增大^[33]。根据 2.1 节中降雨与水位的相关性分析可知, 该井水位受季节性变化影响, 8 月受降雨增多影响含水层补给区水位增加, 导致含水层孔压会随之增加, 从含水层时序图也可以看出在此阶段导水系数也呈现阶梯式增大现象, 在此过程中水位仍持续下降。震源机制显示玛多 $M_S7.4$ 地震为左旋走滑性质, 该地震引起的龙门

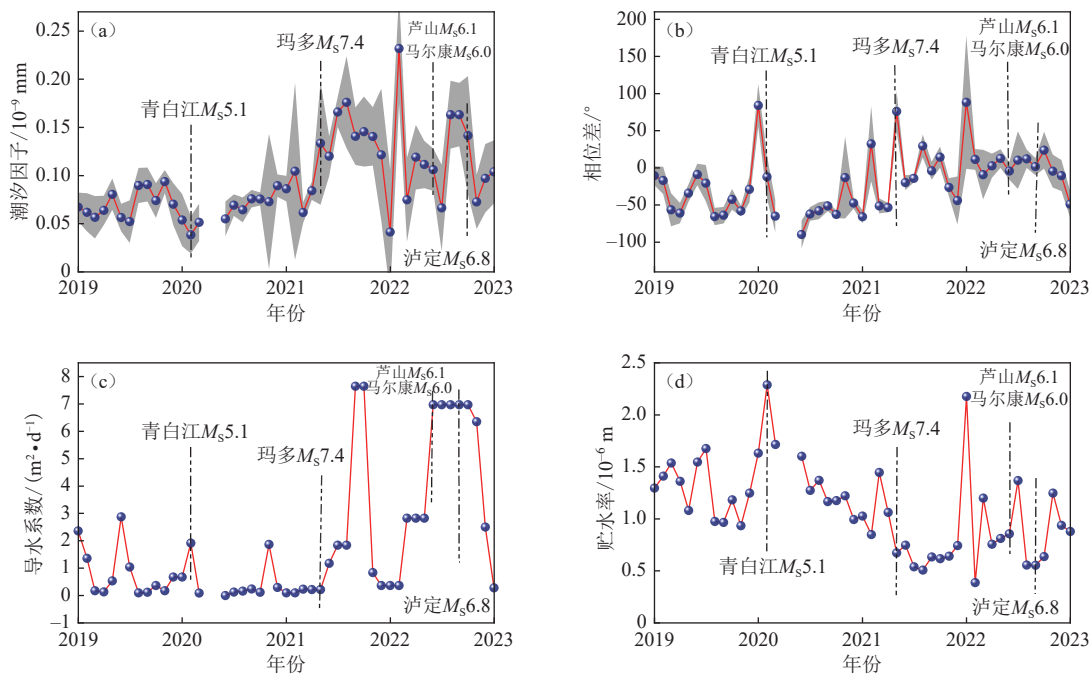


图 6 映秀井水位 M_2 波调和及含水层参数

Fig. 6 Results of M_2 wave harmonic analysis of water level and aquifer parameters in Yingxiu well

表 2 2019—2022 年四川及邻区发生的典型地震事件

Table 2 Typical earthquake events occurring in Sichuan and its adjacent regions from 2019 to 2022

序号	发震时间	北纬/°	东经/°	震级	发震地点	井震距/km
1	2020-02-03	30.74	104.46	5.1	成都青白江区	100
2	2021-05-22	34.59	98.34	7.4	青海玛多县	653
3	2022-06-01	30.37	102.94	6.1	四川芦山县	92
4	2022-06-10	32.25	101.82	6.0	四川马尔康	205
5	2022-09-05	29.59	102.08	6.8	四川泸定县	211

山中南段同震及震后黏弹性库仑应力为负值^[34], 根据 Bitt 线性孔弹性理论, 位于拉张区的映秀井水位在震时和震后水位持续下降现象可以得到合理解释。同年 11 月, 补给水位减少, 孔压下降, 含水层渗透系数逐渐恢复, 水位潮汐参数逐渐恢复至震前水平, 说明玛多 $M_S7.4$ 地震引发了含水层的弹性膨胀, 与 2022 年的持续水位阶降并没有直接关联。与玛多 $M_S7.4$ 地震类似, 发生在盆地内部龙泉山断裂带的青白江 $M_S5.1$ 地震是映秀井自观测以来发生的第一个近场中强震, 震源机制显示为逆冲性质, 所在断裂和观测井所在的北川—映秀断裂有着相同构造变形机制, 均和晚新生代青藏高原向华南地块挤压有关^[35]。在青白江 $M_S5.1$ 地震发生前, 观测井水位潮汐相位差出现显著的增大现象, 含水层岩石贮水率也相应增大, 可能是地震前应力增强导致的岩石产生微破裂引起的贮水率随渗透性增加而增大。但震后裂隙

迅速被充填, 地下水补排系统迅速达到平衡, 并未引发水位的显著阶变。

发生在龙门山段断裂带南段的芦山 $M_S6.1$ 地震震源机制显示为逆冲性质, 为龙门山断裂带构造应力场作用下的一次地震^[36], 震后 10 天在马尔康又发生了 $M_S6.0$ 震群(表 2)。在两次 6 级地震发生前的半年时间里, 即 2022 年初映秀井潮汐因子、相位差以及贮水率存在显著的增大后再减小的波动变化现象, 导水系数也发生呈阶梯式增大现象, 说明并含水层岩石在此阶段受到静应力作用发生了形变, 岩石孔隙度或裂隙开度发生变化, 流体从含水层向裂隙扩散, 表现为井水位阶降。2022 年 9 月 5 日泸定 $M_S6.8$ 地震在震前潮汐参数和含水层参数也出现波动变化, 距离芦山 $M_S6.1$ 地震发震间隔仅 3 个月, 难以厘清其变化是由地震波引起还是构造应力的加载导致, 因此对该地震不作过多分析。

为进一步验证同期龙门山断裂带发生的构造应力场的变化,本文进一步分析了龙门山断裂带中段其他流体观测井的水位数据,选取了北川川43井和江油川10井2020—2022年的水位数据并进行了调和分析。川10井潮汐参数在玛多 $M_s7.4$ 地震时并未出现同震阶变,而是在2021年7月—2022年3月发生大幅度波动现象,指示该井含水层在该时间段发

生了相应变化(图7a、图7b)。川43井潮汐参数在玛多 $M_s7.4$ 地震当月未发生明显的同震阶变,但在次月发生显著阶升,3个月后逐渐恢复(图7c、图7d)。且11月潮汐参数发生大幅下降,指示含水层参数也发生变化。由此可见,龙门山断裂带3口流体观测井于2021年下半年均出现含水层参数的变化,印证了在此时间段龙门山断裂带存在构造应力场的变化。

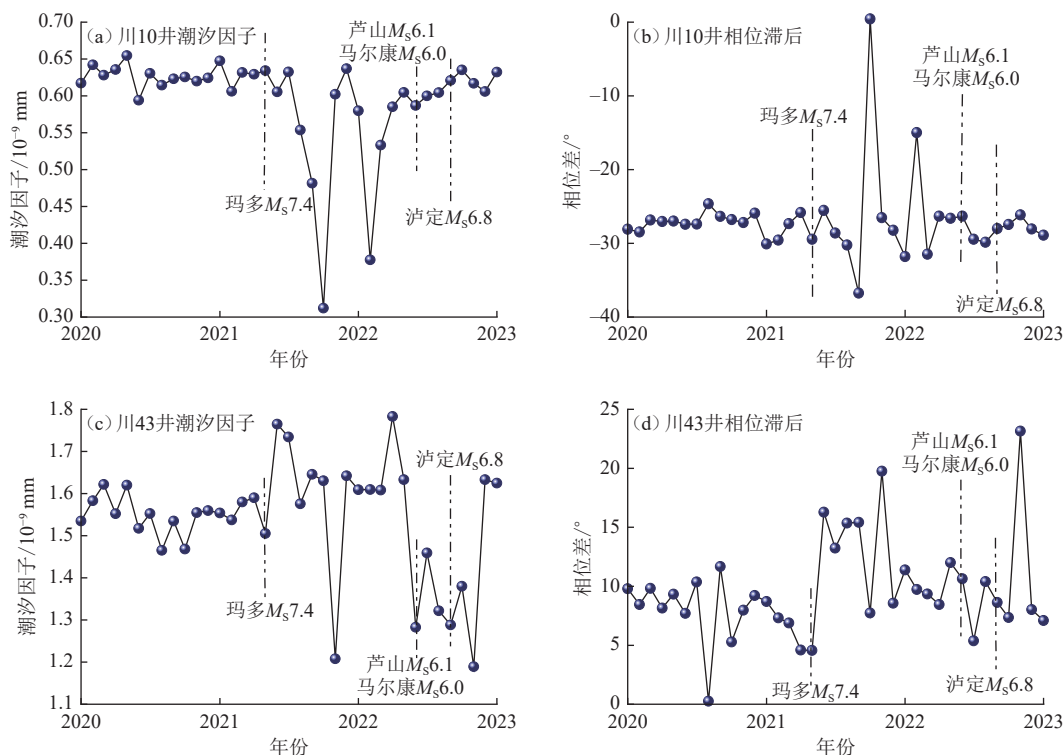


图7 川10井和川43井水位 M_2 波调和结果

Fig. 7 M_2 wave harmonic analysis of water level in Chuan10 well and Chuan43 well

3.2 基于形变资料的构造活动分析

前人研究表明,当区域应力发生变化,构造活动会引发地下水位的变化^[12]。为进一步印证该时段存在区域构造应力场的变化,本文拟对龙门山地区的形变观测资料进行分析。绵阳安州洞体形变位于龙门山中段,距离映秀井约110 km,垂直摆NS向2018—2021年整体趋势为向北倾斜(图8)。2022年1月初,安州垂直摆NS向发生趋势性转折,并加速向南倾现象,表现由张性向压性的转变过程,经过对观测数据去趋势后可见2021年9月后便出现破年变现象,在正常年变转折时间发生反向并向北加速,在2022年初再次发生反向又加速向南倾现象,南倾幅度远超过2017年以来的平均水平,体现了区域构造应力场在该时段存在调整或者加载可能,与2022年6—9月发生在四川地区的一系列6级地震前的构造应力变

化存在关联。而应力场的变化会改变含水层岩石的渗透性和孔隙度,因此会引发井水位的变化。

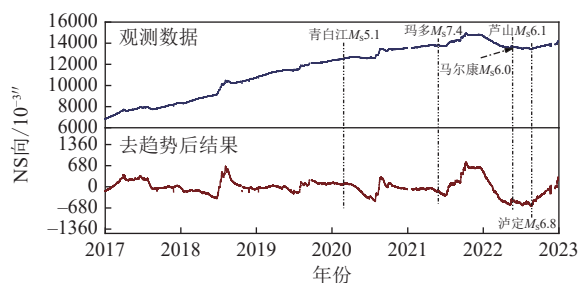


图8 安州垂直摆NS向时序图

Fig. 8 NS-direction time series of vertical pendulum in Anzhou district of Mianyang

4 结论

映秀井地处龙门山中央断裂,地下构造环境复

杂, 很难用单一的方式描述该区域地下水的水力联系, 由于各种原因也未能对井-含水层系统建立完整的认知。本文尝试通过降雨因素分析、环境调查、含水层参数分析, 浅析映秀井水位 2021 年后出现的水位年变幅度减小的异常成因, 初步得到以下认识:

(1) 映秀井水位年变形态与雨季和旱季存在显著的对应关系, 2021 年 7 月以后水位实测值明显低于模拟值, 分析认为井水位除受季节性变化影响外, 还受其他影响因素制约。通过井孔水样的化学成分分析以及氢氧同位素测试表明, 观测井水岩反应程度较快, 主要补给来自大气降水, 但仍能够一定程度反映构造信息。

(2) 紫坪铺水库水位与观测井水位无对应关系, 排除其对井水位的影响。

(3) 利用井水位的固体潮效应反演井-含水层参数在地震前后的变化, 分析玛多 $M_S7.4$ 地震虽然引发了含水层的弹性膨胀, 导致井水位的下降, 但与 2022 年的水位年变阶降并没有直接关联。

(4) 2022 年初开始的井水位潮汐参数和含水层参数大幅波动变化说明 2021 年 9 月—2022 年 12 月的水位年变阶降是因为含水层受到构造静应力作用, 与 2022 年 6—9 月四川省一系列 6 级地震前的区域构造应力场变化存在关联。

致谢

本文在撰写过程中使用到应急管理部国家自然灾害防治研究院孙小龙研究员的计算程序, 在此表示感谢。感谢审稿专家提出的宝贵意见和建议。

参考文献

- [1] 张昭栋, 刘庆国, 耿杰. 由承压井水位动态反演水井含水层的应力变化[J]. *华南地震*, 1999, 19(1): 37-42
Zhang Z D, Liu Q G, Geng J. Stress variation of well aquifer inverted by water level behaviors of pressure well[J]. *South China Journal of Seismology*, 1999, 19(1): 37-42
- [2] 车用太, 鱼金子. 地震地下流体学[M]. 北京: 气象出版社, 2006
Che Y T, Yu J Z. Underground fluids and earthquake[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006
- [3] 万迪堃, 汪成民, 李介成, 等. 地下水动态异常与地震短临预报[M]. 北京: 地震出版社, 1993
Wan D K, Wang C M, Li J C, et al. Anomalies of groundwater behavior and short and imminent term earthquake prediction[M]. Beijing: Seismological Press, 1993
- [4] 杨晓芳, 孙小龙, 张涛. 新疆及周边 7 级强震前地下流体异常时空演化特征[J]. *内陆地震*, 2013, 27(2): 127-134
Yang X F, Sun X L, Zhang T. Time-space evolution characteristics of underground fluid anomalies before strong earthquakes with $M_S7.0$ in Xinjiang and adjacent region[J]. *Inland Earthquake*, 2013, 27(2): 127-134
- [5] 付虹, 邬成栋, 赵小艳, 等. 云南开远井水位异常分析[J]. *地震学报*, 2014, 36(2): 292-298
Fu H, Wu C D, Zhao X Y, et al. Analysis on the anomaly of water level in Kaiyuan well, Yunnan[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2014, 36(2): 292-298
- [6] 晏锐. 影响井水位变化的几种因素研究[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所, 2008
Yan R. Study of several influence factor of well water level change[D]. Beijing: Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, 2008
- [7] 樊春燕. 基于小波分析的井水位典型干扰动态分析研究[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所, 2010
Fan C Y. The study on the typical interference of water level based on wavelet[D]. Beijing: Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, 2010
- [8] 方震, 孙盼盼, 李军辉, 等. 2012 年 10 月后皖 27 井水位下降成因分析[J]. *地震*, 2016, 36(2): 85-93
Fang Z, Sun P P, Li J H, et al. Causes of groundwater level decreases in Wan-27 well since October 2012[J]. *Earthquake*, 2016, 36(2): 85-93
- [9] 孙小龙, 刘耀炜, 晏锐. 云南姚安井 2009 年 10 月后水位下降的成因分析[J]. *地震学报*, 2013, 35(3): 410-420
Sun X L, Liu Y W, Yan R. Causation of groundwater level descending since October 2009 in Yunnan Yaoan well[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2013, 35(3): 410-420
- [10] 张昭栋, 耿杰, 高玉斌, 等. 井水位降雨影响的定量改正[J]. *地震学报*, 1993, 15(2): 202-207
Zhang Z D, Geng J, Gao Y B, et al. Quantitative correction of the influence of the rainfall to well water level[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1993, 15(2): 202-207

- [11] 王旭升, 王广才, 董建楠. 断裂带地下水位的降雨动态模型及异常识别[J]. 地震学报, 2010, 32(5): 570-578
Wang X S, Wang G C, Dong J N. Simulation of groundwater regime in response to rainfall and identification of anomalies in a fault zone[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2010, 32(5): 570-578
- [12] 胡小静, 付虹, 李琼. 滇南地区近期水位趋势上升异常机理初探[J]. 地震学报, 2018, 40(5): 620-631
Hu X J, Fu H, Li Q. Preliminary study on abnormal mechanism of groundwater level rising in southern Yunnan[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2018, 40(5): 620-631
- [13] 杜建国, 刘丛强. 同位素地球化学在地震研究方面的作用[J]. 地震, 2003, 23(2): 99-107
Du J G, Liu C Q. Isotopic-geochemical application to earthquake prediction[J]. *Earthquake*, 2003, 23(2): 99-107
- [14] 张磊, 刘耀炜, 任宏微, 等. 氢氧稳定同位素在地下水异常核实中的应用[J]. 地震地质, 2016, 38(3): 721-731
Zhang L, Liu Y W, Ren H W, et al. Application of stable oxygen and hydrogen isotopes to the verification of groundwater anomalies[J]. *Seismology and Geology*, 2016, 38(3): 721-731
- [15] 王勇. 宁夏井水位固体潮调和分析结果及应用[J]. 地震地质, 1992, 14(3): 245-250
Wang Y. Result of harmonic analysis of effect of earth tide on water level in seven wells in Ningxia and its application[J]. *Seismology and Geology*, 1992, 14(3): 245-250
- [16] 丁风和, 刘耀炜, 韩晓雷, 等. 基于井潮、气压效应的苏皖地区突出水位异常分析[J]. 地震学报, 2017, 39(2): 248-256
Ding F H, Liu Y W, Han X L, et al. Water level anomaly analysis in Jiangsu and Anhui Provinces based on the well tide and barometric pressure effect[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2017, 39(2): 248-256
- [17] 王熠熙, 邵永新, 李悦, 等. 基于多种方法的宝坻新井水位异常分析[J]. 地震, 2020, 40(1): 172-183
Wang Y X, Shao Y X, Li Y, et al. A study on Baodi well water level anomalies using multiple methods[J]. *Earthquake*, 2020, 40(1): 172-183
- [18] 李勇, 黄润秋, 周荣军, 等. 龙门山地震带的地质背景与汶川地震的地表破裂[J]. 工程地质学报, 2009, 17(1): 3-18
Li Y, Huang R Q, Zhou R J, et al. Geological background of Longmen Shan seismic belt and surface ruptures in Wenchuan earthquake[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2009, 17(1): 3-18
- [19] 葛华, 陈启国, 王德伟. 地震滑坡危险性评价及编图: 以映秀震中区为例[J]. 中国地质, 2013, 40(2): 644-652
Ge H, Chen Q G, Wang D W. The assessment and mapping of seismic landslide hazards: A case study of Yingxiu area, Sichuan Province[J]. *Geology in China*, 2013, 40(2): 644-652
- [20] 四川省地质局水文工程地质大队. 灌县幅 H-48-8 1/20 万区域水文地质普查报告[R]. 成都: 四川省地质局水文工程地质大队, 1978
Hydrologic Engineering Geology Group of Sichuan Geological Bureau. Regional hydrogeological general survey report of guan county on a scale of 1/200 000[R]. Beijing: Hydrologic Engineering Geology Group of Sichuan Geological Bureau, 1978
- [21] 兰剑, 陈晓利. 2008 年 $M_s 8.0$ 汶川地震诱发滑坡灾害在映秀地区的演化特征[J]. 地震地质, 2020, 42(1): 125-146
Lan J, Chen X L. Evolution characteristics of landslides triggered by 2008 $M_s 8.0$ Wenchuan earthquake in Yingxiu area[J]. *Seismology and Geology*, 2020, 42(1): 125-146
- [22] Giggenbach W F. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1988, 52(12): 2749-2765
- [23] 张昭栋, 郑金涵, 冯初刚. 井水位的固体潮效应和气压效应与含水层参数间的定量关系[J]. 西北地震学报, 1989, 11(3): 47-52
Zhang Z D, Zheng J H, Feng C G. Quantitative relationship between the earth tide effect of well water level, the barometric pressure effect and the parameters of aquifers[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 1989, 11(3): 47-52
- [24] Venedikov A P, Arnoso J, Vieira R. VAV: A program for tidal data processing[J]. *Computers & Geosciences*, 2003, 29(4): 487-502
- [25] 张昭栋, 郑金涵, 耿杰, 等. 地下水潮汐现象的物理机制和统一数学方程[J]. 地震地质, 2002, 24(2): 208-214
Zhang Z D, Zheng J H, Geng J, et al. Physical mechanism and unitary mathematical equation for tidal phenomena of ground water[J]. *Seismology and Geology*, 2002, 24(2): 208-214
- [26] 李春洪, 陈益惠, 田竹君. 井-含水层系统对固体潮的动态响应及其影响因素[J]. 中国地震, 1990, 6(2): 37-45
Li C H, Chen Y H, Tian Z J. The dynamic response of well-aquifer system to earth tides and its influence factors[J]. *Earthquake Research in China*, 1990, 6(2): 37-45
- [27] Clark W E. Computing the barometric efficiency of a well[J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1967, 93(4): 93-98
- [28] 张永仙, 石耀霖, 张国民. 孕震过程中孔隙压及地下水位变化的数值模拟[J]. 地震, 1994, 14(1): 65-72
Zhang Y X, Shi Y L, Zhang G M. Numerical simulation of pore pressure and ground water level variation in earthquake preparation[J].

- Earthquake, 1994, 14(1): 65-72
- [29] Manga M, Beresnev I, Brodsky E E, et al. Changes in permeability caused by transient stresses: Field observations, experiments, and mechanisms[J]. Reviews of Geophysics, 2012, 50(2): RG2004
- [30] Liao X, Wang C Y, Liu C P. Disruption of groundwater systems by earthquakes[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(22): 9758-9763
- [31] Rojstaczer S, Wolf S. Permeability changes associated with large earthquakes: An example from Loma Prieta, California[J]. *Geology*, 1992, 20(3): 211-214
- [32] Elkhoury J E, Brodsky E E, Agnew D C. Seismic waves increase permeability[J]. *Nature*, 2006, 441(7097): 1135-1138
- [33] 刘春平. 地壳应力与地下水动力响应[M]. 北京: 地震出版社, 2017
- Liu C P. Crustal stress and groundwater dynamic response[M]. Beijing: Seismological Press, 2017
- [34] 岳冲, 屈春燕, 牛安福, 等. 玛多 $M_s7.4$ 地震对周边断层的应力影响分析[J]. 地震地质, 2021, 43(5): 1041-1059
- Yue C, Qu C Y, Niu A F, et al. Analysis of stress influence of Qinghai Maduo $M_s7.4$ earthquake on surrounding faults[J]. Seismology and Geology, 2021, 43(5): 1041-1059
- [35] 徐芳, 鲁人齐, 王帅, 等. 基于多元约束方法的 2020 年四川青白江 $M_s5.1$ 地震构造研究[J]. 地震地质, 2022, 44(1): 220-237
- Xu F, Lu R Q, Wang S, et al. Study on the seismotectonics of the Qingbaijiang $M_s5.1$ earthquake in Sichuan Province in 2020 by multiple constraint method[J]. Seismology and Geology, 2022, 44(1): 220-237
- [36] 张致伟, 龙锋, 石富强, 等. 2022 年 6 月 1 日四川芦山 $M_s6.1$ 地震的发震构造与力学机制探讨[J]. 地球物理学报, 2023, 66(10): 4095-4110
- Zhang Z W, Long F, Shi F Q, et al. Discussion on seismogenic structure and mechanical mechanism of the 1 June 2022 $M_s6.1$ Sichuan Lushan earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023, 66(10): 4095-4110

=====

(上接第 667 页)

- [25] 方和第. 成都地区的地震灾害及其防御对策[J]. 四川地震, 1989(2): 55-58
- Fang H D. Earthquake disaster in Chengdu area and its prevention countermeasures[J]. Earthquake Research in Sichuan, 1989(2): 55-58
- [26] 汪贞杰, 郭祥云. 2022 年 9 月 5 日四川泸定 $M_s6.8$ 地震矩心矩张量解[J]. 地震科学进展, 2022, 52(10): 482-486
- Wang Z J, Guo X Y. The centroid moment tensor solution of 2022 Luding $M_s6.8$ earthquake in Sichuan Province[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2022, 52(10): 482-486
- [27] Zhao M, Long F, Yi G, et al. Focal mechanism and seismogenic structure of the $M_s5.1$ Qingbaijiang earthquake on February 3, 2020, southwestern China[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9: 644142
- [28] 易桂喜, 龙锋, 梁明剑, 等. 四川盆地荣县—威远—资中地区发震构造几何结构与构造变形特征: 基于震源机制解的认识和启示[J]. 地球物理学报, 2020, 63(9): 3275-3291
- Yi G X, Long F, Liang M J, et al. Geometry and tectonic deformation of seismogenic structures in the Rongxian-Weiyuan-Zizhong region, Sichuan Basin: Insights from focal mechanism solutions[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2020, 63(9): 3275-3291
- [29] 赵珠, 张润生. 四川地区地壳上地幔速度结构的初步研究[J]. 地震学报, 1987, 9(2): 154-166
- Zhao Z, Zhang R S. Primary study of crustal and upper mantle velocity structure of Sichuan Province[J]. Acta Seismologica Sinica, 1987, 9(2): 154-166
- [30] 易桂喜, 龙锋, 乔慧珍, 等. 青藏高原东缘龙门山断裂带南西段地震危险性分析[J]. 国际地震动态, 2012(6): 97
- Yi G X, Long F, Qiao H Z, et al. Earthquake risk assessment for the southwestern Longmenshan fault zone along the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Recent Developments in World Seismology, 2012(6): 97