

储集层中高压流体引爆强地震的机理——以 5.12 汶川地震为例

毛小平¹, 何廉康¹, 刘佳林¹, 李岁岁¹, 张学强², 宿宇驰¹, 卢鹏宇¹

MAO Xiaoping¹, HE Liankang¹, LIU Jialin¹, LI Suisui¹, ZHANG Xueqiang², SU Yuchi¹, LU Pengyu¹

1. 中国地质大学 (北京), 北京 100083;
2. 中国地质大学 (武汉), 武汉 430074

1. School of Energy Resource, China University of Geoscience, Chengfu Road 20, Haidian District, Beijing 100083, China;

2. School of Earth Exploration and Information Technology, China University of Geosciences (Wuhan), Lumu Road, Hongshan District, Wuhan 430074, China

MAO X P, HE L K, LIU J L, et al., 2021. Mechanism of the strong earthquake triggered by high pressure fluid in reservoir: A case study of the 5.12 Wenchuan earthquake [J]. Journal of Geomechanics, 27 (4): 628-642. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.04.052

Abstract: At present, the mechanism of earthquake is still based on elastic rebound theory—Earthquake is caused by the release of elastic energy of rock strata due to fault dislocation. But more and more scholars began to question whether the elastic energy after fault faulting can really reach the huge energy released by the actual earthquake. Therefore, it is necessary to study the nature of destructive strong earthquake and its real energy source after the initial movement. According to the characteristics of the reservoir and its pressure in the sedimentary strata, it is concluded that there are a lot of high-pressure fluid in the reservoir, and its pressure can be released under certain conditions, resulting in fluid physical explosion, which may be an important part of strong earthquake energy. The calculation results show that when the fault ruptures and penetrates the reservoir with large area, the elastic energy produced by the pressure release can reach the energy released by the earthquake with magnitude above 8.0; Artificial engineering activities can also lead to the release of small-scale fluid pressure, such as blowout during drilling, earthquake induced by hydraulic fracturing, etc. At the same time, according to the analysis of the waveforms and propagation ray paths of the seismic stations close to the epicenter, it is considered that the strong earthquake wave may not be S-wave, but P-wave. Therefore, it cannot be ruled out that the strong earthquake might be caused by explosion. A large number of direct or indirect evidence, such as the time domain and frequency domain characteristics of seismic waves recorded by several stations during the Wenchuan earthquake, the explosion phenomena observed on the ground, and the cores obtained by scientific drilling after the earthquake, indicate the possibility of the release of this kind of fluid explosion energy. Finally, this paper proposes that the seismicity can be divided into three stages: The stage I of micro rupture, in which there is fluid activity and electrokinetic effect, but the initial earthquake motion is not triggered; The stage II of fault rupture after the initial earthquake motion; The strong earthquake stage III, which is caused by the release of fluid pressure.

Key words: Wenchuan earthquake; time frequency analysis; initial fracture; initial motion; reservoir; fluid overpressure

基金项目: 中国石油化工股份有限公司科技项目 (No. JP14009)

This research is financially supported by the Science and Technology Project of China Petrochemical Corporation (Grant No. JP14009)

第一作者简介: 毛小平 (1965—), 副教授, 研究方向为地球物理勘探、地震波传播。E-mail: maoxp9@163.com

收稿日期: 2021-04-05; **修回日期:** 2021-07-16; **责任编辑:** 吴芳

引用格式: 毛小平, 何廉康, 刘佳林, 等, 2021. 储集层中高压流体引爆强地震的机理: 以 5.12 汶川地震为例 [J]. 地质力学学报, 27 (4): 628-642. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.04.052

摘要:目前产生地震的机制仍以弹性回跳说为主:地震是因为断层错断使岩层的弹性能释放而引发。但越来越多的学者开始质疑,仅断层错断后的弹性能,是否真能达到实际地震所释放的巨大能量。因此,有必要探讨地震初动后破坏性强震的性质及其真正的能量来源。文章根据沉积地层中的储集层及其压力的特点分析得出,储集层内含有大量的高压流体,其压力在一定条件下可以释放出来,产生流体物理爆炸,有可能是强震能量的重要组成部分。通过计算得出,当断层破裂并刺穿面积较大的储集层时,其压力释放所产生的弹性能可以达到震级8.0以上地震所释放的能量;人为的工程活动也可引发小规模的流体压力的释放现象,如钻井时的井喷、水力压裂会诱发有感地震等。同时,文章根据对距离震中较近的地震台的波形及传播射线路径分析认为,强震波动可能不是横波S波,而是涨缩波P波,据此不能排除强震是由爆炸所致。综合汶川地震多个台站记录到的地震波的时间域和频率域特征、地面观测到的爆炸现象、地震后科学钻探获得的岩心等大量直接或间接证据,说明了这种流体爆炸能量释放的可能性。最后,文章提出了地震活动可分为三个阶段:微破裂阶段Ⅰ,该阶段有流体活动,并可产生动电效应,但未触发地震初动;地震初动后的断裂破裂阶段Ⅱ;由流体压力释放产生地震强震阶段Ⅲ。

关键词:汶川地震;时频分析;起始破裂;初动;储集层;流体超压

中图分类号: P315 **文献标识码:** A

0 引言

众所周知,天然地震被认为是构造运动产生的断层错断所致(Brace and Byerlee, 1966; Byerlee, 1970; Sokos et al., 2020),这就是经典的现在仍被广泛认可的弹性回跳模型。汶川7.9级地震也不例外,被认为是印度板块碰撞引起的地壳缩短所引起的(hubbard and Shaw, 2009)。用地震初动来确定震相,研究地震的特点及定位地震已发展得相当成熟了,但对于初动后的强震波动的研究程度相对较低。强震波动在多数情况下被认为是S波所引发的(Honda, 1962)。一些学者提出了质疑,认为仅断层错断所释放的弹性能,小于实际地震所释放的能量,如Gomberg et al., (2004)推测触发地震的应力变化,通常比地震本身释放的应力数量级要小。Gilat and Vol (2005)做过一个计算,尺度为 $600\text{ km}^3 \times 100\text{ km}^3 \times 20\text{ km}^3$ 的优质钢,其最大应变能(弹性能)是 $2.9 \times 10^{17}\text{ J}$,相当于8.4级地震,而实际震源体远小于这个尺寸,这个结果充分说明断层错断的弹性能小。李铁等(2005)分析了1954—2005年在中国大陆发生的120多个煤震和非煤矿矿井的矿震分布、特征,有震级记录的有47次,多数为2.8级左右,矿震就是塌陷,相当于断层的错动,这进一步说明,只有断层错动时地震的震级很小。

一些学者认为这种能量的不匹配,有可能与地球内部的流体参与有关,将这些流体活动现象

归结为深部流体的体现,且能主动作用于地震。

Zhao et al. (1996)认为1995年日本神户7.2级地震是由于震中下16 km深处的深部流体引发的。Kurz et al. (2004)认为欧洲板块内震群可能是流体触发的。Reyners et al. (2007)认为深部流体一般是地壳地震活动的重要驱动因素。刘武英等(1996)认为岩浆上涌的垂直力是唐山地震的动力来源。

还有一些学者认为深部流体扮演了地震事件的主角。岳中琦(2013)指出,汶川地震是来自地幔里的甲烷在震源处形成了气囊并爆炸所致。梁光河(2017)得出汶川地震是一个隐爆过程。Du et al. (2008)指出,地核和下地幔的流体不断地向上逸散,在运移过程中聚集于不同地点发生隐爆。Jamtveit et al. (2018)认为下地壳的流体驱动相关的变质和结构转变,使岩石圈强度大幅下降。Mandal (2019)认为碳酸岩熔体结晶释放的挥发性物质 CO_2 对印度Gujarat邦Kachchh裂谷带不间断地震的发生起着关键作用。Heinickea et al. (2019)认为在地壳内普遍存在 CO_2 排放,导致断裂带的弱化和滑移。

此次研究中,将探讨这些流体产生隐爆的可能性,并提出了地震过程中主要能量的可能的来源。

1 深部流体产生隐爆的可能性

来自于地幔的“深部流体”主要赋存于变质基底中(图1),在地震发生时,它是否能产生隐

爆，是文中要质疑的核心之一。石油专业沉积地层有两类储集层，一种是高孔隙的常规储集层；一种是低孔低渗的泥页岩层。为了说明深部流体

产生隐爆的可能性，文中将变质基底和这两类储集层合并在一起，做一个参数（含气丰度、孔隙度、渗透率）对比。

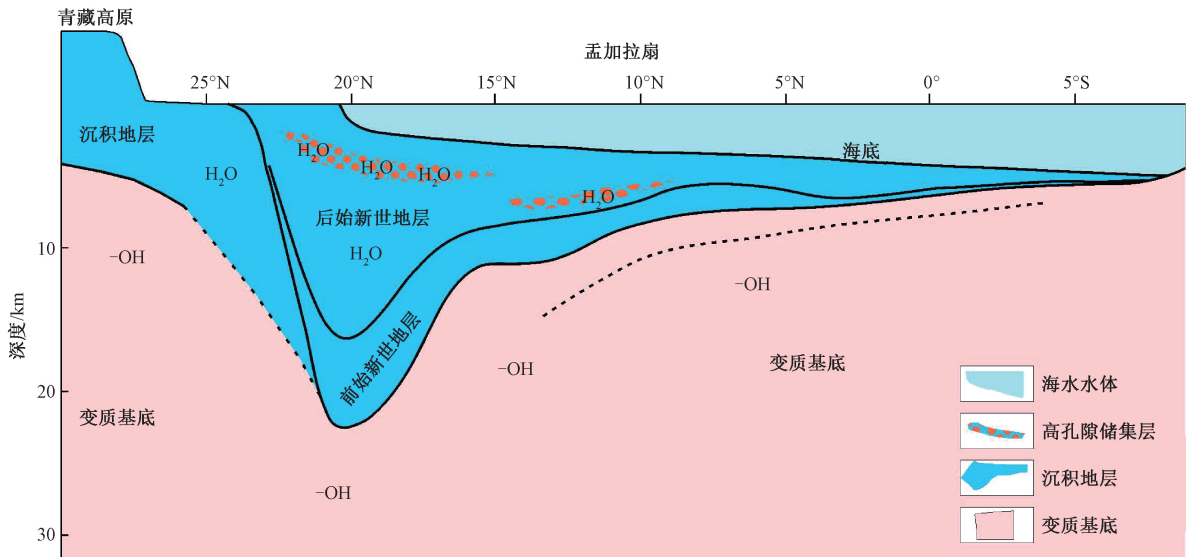


图 1 孟加拉湾沉积地层与变质基底（剖面经度 87°；据 Curray, 1991 修改）
Fig. 1 Sedimentary strata and metamorphic basement in Bay of Bengal (modified after Curray, 1991). Note: longitude of geological section: 87°

首先看一下页岩气的一些参数。以涪陵页岩气田为例，焦页 1 井（JY1）的炭质页岩，吸附气丰度为 0.5~2.5 m³/t（李湘涛等，2014）。刘文平等（2017）分析了长宁区块龙马溪组页岩储层的物性特征，孔隙度为 1%~10%，多数为 6%；威远区块孔隙度为 2%~9%，多数为 6%。

深部流体主要是指来自于地幔中或变质基底中的流体包裹体或矿物中的结构水，数量大，但丰度低。Bell and Rossman（1992）认为辉石是最富含水的，丰度可达 200×10⁻⁶~500×10⁻⁶，但仅相当于页岩含气的 5%。深部流体丰度测试成果主要来源于变质基底中的一些岩石，其孔隙度比较小，没有储集空间（Harms, 1994；Huenges et al., 1997）。

综上所述，深部变质基底的孔隙度，渗透率及流体丰度，都要远小于页岩地层，如表 1 所示。页岩气是很难自发地从页岩地层中释放出来，需要对页岩进行压裂。因此，深部流体就更不可能从晶格中挣脱出来，产生快速的流动，为地震提供能量。

2 高压流体弹性能释放的可能性

岩石圈可以看作双相介质，包含固体和流体。

表 1 深部流体与油气参数对比

Table 1 Comparison of parameters between deep fluid and oil and gas			
	深部流体	页岩气	常规油气
赋存空间	变质基底	盆地	盆地
孔隙度	<1%	1%~5%	5%~30%
渗透率	<0.1 mD	0.1~50 mD	50~5000 mD
可自由流动距离	1 nm	1 m	500 m
流体/气体丰度	<0.05 cm ³ /g	7~15 cm ³ /g	>8000 cm ³ /g

既然固体部分的活动，断层错断直接产生的能量偏小，于是可以提出一个假说，产生天然地震的主要能量可能有浅层流体的贡献：由发震断层破开了高孔隙度沉积岩，使其内部的高压流体进入发震断裂带，然后释放其能量，从而增强地震的破坏性，产生流体物理爆炸。

高压流体和固体一样，在压力降低后其体积膨胀，并释放弹性能量。这种压力的释放现象是常见的，例如，海洋地震勘探使用汽枪作为震源（Lv et al., 2020）产生地震波，就是利用高压流体或气体释放压力膨胀而产生；Wang et al.（2012）采用了 4 台大型空气罐被放置在湖中同时释放压力，可产生相当于 0.5 级地震；Zhang et al.（2018）利用高压液态二氧化碳爆破岩石代替普通炸药爆炸。

遗憾的是，目前几乎一致认为天然地震产生强烈破坏的强震波动是横波 S 波，而这种压力释放

或流体爆炸则只能产生涨缩波 P 波,且地震学家还使用相位的 P/S 型谱比(如 P_g/L_g 、 P_n/L_g 、 P_n/S_n)来判断该地震是否是由爆炸事件引起(Zhao et al., 2014; Zhang and Wen, 2015)。只要能证明地震强振幅波动是涨缩波 P 波,就不能否定流体爆炸假说。

为此,需要回答几个关键科学问题,在活动断层刺穿储集层时,多孔隙储集层内的流体会不会释放能量;储集层内是否含有海量流体;若能释放能量,其能量可否定量计算;这种能量释放产生的信号和实际地震信号的区别。

2.1 储集层中流体压力的释放

对于常见的爆炸现象,爆炸物浓度大,它们几乎都能参与爆炸。在常温常压下,储集层内的孔隙之间是不连通的,孔隙内的流体不能自发地流出来。但井喷现象却证实了,储集层在实际地层条件下,一定空间范围内的孔隙流体是可以自由流入井筒的,其压力是可以释放的,这也是钻探过程时刻需要防止发生的安全事故(Tingay et al., 2008; Pinkston and Flemings, 2019)。

一定深度的储集层一般具有高压特征,孔隙压力采用压力系数来表征,在多数情况下该压力

系数是大于 1 的,如川西坳陷就达到 1.8 (冷济高等, 2011), 在深度 4 km 处压力为 72 MPa (图 2a)。这时,在钻探过程中钻井液就需要掺入细砂以便增加钻井液的密度 ρ 。在钻探前如果低估了压力系数,将钻井液密度只配成了 1.5 g/cm^3 , 在 4 km 深处井筒内的钻井液压力将只有 60 MPa (注:石油工程专业将压力等同于压强,如地层压力系数,故为方便起见,将流体压强均称为压力)。该压力和深度 4 km 处的储集层内的压力(72 MPa)相比,这就会产生 12 MPa 的富余差应力 ΔP 。在这种情况下,井筒内的流体就会产生井喷并冲开钻机,引发重大安全事故(图 2b),这就是孔隙流体压力释放的机理。离井筒一定距离 r 以内的流体可以自由流动到井筒内(图 2b 所示中的黄色区域);范围之外的流体则不能,且仍保持高压状态。这个距离 r 在石油勘探中称为井间距或极限动用半径(Li et al., 2017)。水驱油技术(Tetteh et al., 2021)就是在注水井井口用高压水(压力为 ΔP)注入井筒内(图 2c)。如果两口井的距离大于 r ,则驱动失败。袁士义等(2007)得出在渗透率为 5~150 mD 时,井距 r 可设计为 1~1.5 km。对低渗透油藏, r 值大约可取 250 m。

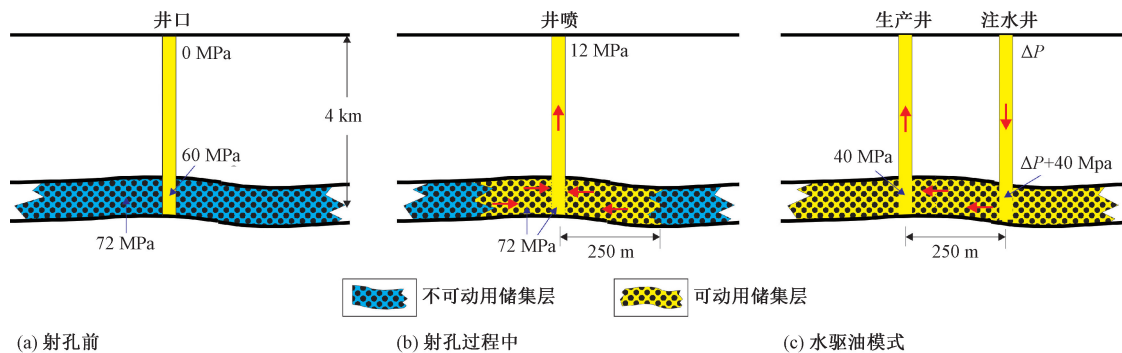


图2 钻穿储集层前后储集层及井筒压强变化示意图 (ΔP 为流体压强)

Fig. 2 Pressure variation of the reservoir and the wellbore before and after drilling through reservoir (ΔP is the fluid pressure). (a) Before the perforation. (b) During the perforation. (c) Water flooding mode.

2.2 沉积地层所具有的流体数量

在沉积地层中,只有少部分沉积岩才含有较大的孔隙,并富含水(表1)。汶川地震震中地区有沉积地层,具有和四川盆地相似的构造、沉积背景。地震发生后的钻探 WFSD-1 井证实 1000 m 以内是三叠系须家河组地层(Fang et al., 2020),而三叠系须家河组是川西坳陷的主要产水层和产气层。因此,更准确地说,四川盆地应包含地震震中地区。为此,文章利用川西坳陷的储集层规

模,从纵向上和横向上进行类比,以说明汶川地震时流体可参与的数量。

在纵向上,川西坳陷仅须家河组一套高孔隙度砂岩储集层累积厚度就已超过了 500 m (赵正望等, 2013),同时,还发育了志留系、奥陶系及震旦系等多套高孔隙储集层,三叠系须家河组和震旦系灯影组孔隙度可达 5%~20% (表2)。从实际油气勘探剖面中可以看出,高孔隙储集层层数多,累积厚度大,这个特点也只有沉积地层才具备。

从川西拗陷什邡地区孔隙度剖面可以看出，在纵向上发育了多套高孔隙储集层（图 3 红色区域部分；武恒志等，2015）；2020 年 5 月 4 日在大英县

天保镇钻探，在震旦系灯影组中获测试日产天然气 $1.220\times10^6\text{ m}^3$ ，间接说明了该地区具有高孔隙含流体储集层。

表 2 川西拗陷须家河组和灯影组储集层参数与模型参数对比表

Table 2 Comparison of reservoir parameters and model parameters of the Xujiahe formation and the Dengying formation in the Western Sichuan Depression

储层参数		实测参数	所取模型参数	资料来源
长度	10~50 km		5 km	冷济高等（2011）
宽度	5~22 km		0.5 km	
储层厚度	150~300 m		100 m	赵正望等（2013）
储层孔隙度	5%~20%		5%	武恒志等（2015）
深度	>6 km		4 km	
储层压力	1.8~2.1 倍超压		按 1.8 倍超压	冷济高等（2011）
流体含量	鸭子河气田探明储量 $3.09\times10^7\text{ m}^3$ 油当量（至 2014 年）		$1.3\times10^7\text{ m}^3$	徐天吉（2017）

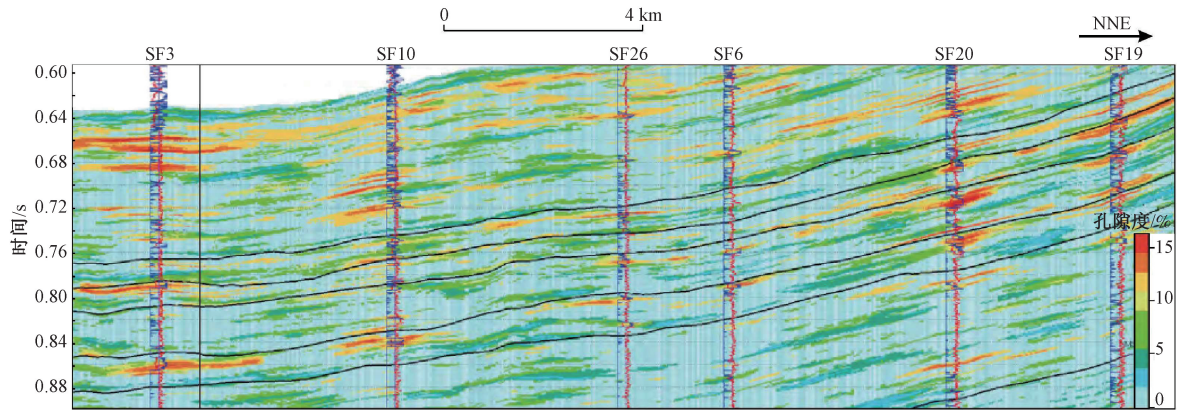


图 3 川西拗陷什邡地区地质统计学模拟的连井孔隙度剖面（武恒志等，2015）

Fig. 3 Cross-well porosity section from the geostatistics modeling of the reservoirs in the Shifang area, Western Sichuan Depression (Wu et al., 2015)

在横向上，川西拗陷里已探明了多个大型北西—南东方向的圈闭。离震中距离仅 50 km 处就有一个天然气田（图 4）：鸭子河气田，其长度为 60 km，宽度 5~20 km（Ma et al., 2019）。这些大型圈闭以三叠系须家河组为储集层，其孔隙中的流体体积估计可达 $3.75\times10^8\text{ m}^3$ 至 $6.60\times10^{10}\text{ m}^3$ 。2020 年 5 月 12 日在更靠近震中的龙门山构造带南段部署了一口探井（龙探 1 井），在下二叠统栖霞组储层获日产 $6.686\times10^5\text{ m}^3$ 气流。可以推测，震中映秀深部也具有海量流体。

2.3 储集层流体可以释放的能量

井喷仅限于很小范围内的流体参与，其能量小；如果发震断层破开了一个较长的储集层，有可能会产生远大于井喷所产生的能量。

为此，设计一个长度为 5 km，宽度为 500 m，厚度为 100 m 的储集层，埋深度为 4 km（图 4），并将它和鸭子河气田放在同一张图上做对比。通

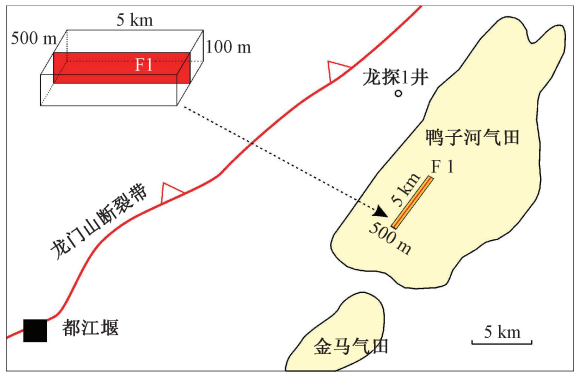


图 4 鸭子河气田及破裂模型范围示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the Yazihe gas field and the fracture model range

过对比图可以看出，要让一条断层在该区域内破开一个 5 km 长度的储集层是很容易的（汶川地震同震破裂达到 100 km）；宽度是按断层两侧极限动用半径 250 m 计算。令储层孔隙度为 5%，则该模

型内孔隙流体的体积就大约为 $1.3 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。当一条断层 (如 F1) 断开该储集层时 (图 4), 这些流体会由 72 MPa 的压力, 释放到对应在深度 4 km 处的静水压力 40 MPa, 体积膨胀将达到约 1.4%。所释放的能量可用水的压力释放公式:

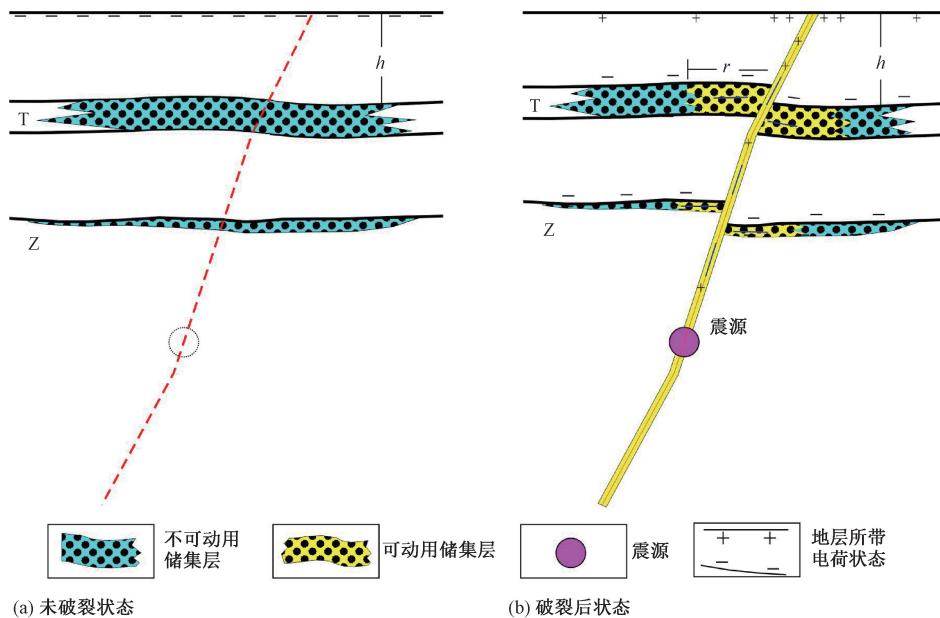
$$E_L = \frac{(\Delta P - 1)^2 V \beta_t}{2} \times 10^8 \quad (1)$$

其中, E_L 为常温液体压力容器释放的能量 (KJ); ΔP 为流体的压力变化 (MPa); V 为储集层体积 (m^3); β_t 为液体在压力 P 和地层温度 T (130°C) 下的压缩系数 (MPa^{-1}), 赋值 $4.4 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$ 。通过计算得到所释放的能量为:

$$E_L = (32 - 1)^2 \times 0.138 \times 10^8 \times 4.4 \times 10^{-4} / (2 \times 10^8 \times 1000 \text{ J}) = 2.748 \times 10^{17} \text{ J} \quad (2)$$

这个能量相当于 8.4 级地震。相同尺寸的优质钢的弹性能仅相当于 4.65 级地震。

上述参数的设置与实际勘探所取得的数据相比并不苛刻, 只取了油气勘探成果所获得的参数的下限值 (表 2)。如储层孔隙度实测值为 5% ~ 20%; 储层压力实测为 1.8 倍至 2.0 倍。另外, 在断层刚错断的瞬间, 断裂带内压力为 0, 储集层内流体压力的释放应由 72 MPa 直接释放到 0, 这个能量将会更大, 体积膨胀将达到约 3.2%。因此, 上面的能量估计是合理的。



T—三叠系; Z—震旦系; h —深度; r —极限动用半径 (距离)

图 5 流体压力释放模式剖面示意图

Fig. 5 Profile of the fluid pressure release mode before (a) and after (b) the fault-rupture

T—Triassic system; Z—Sinian system; h —depth; r —limited drainage radius (distance)

3 流体压力释放模式及汶川地震信号分析

3.1 压力释放的模式

下面以川西坳陷什坊地区剖面 (图 3) 为原型, 提出高压流体弹性能释放的模式, 如图 5 所示, 为抽象出来的模式图: 在地震发生之前, 三叠系储集层未受到扰动 (未破裂状态; 图 5a); 一旦构造运动产生的破裂刺穿储集层, 断裂附近的孔隙流体会快速进入断裂带, 形成一个高压流体囊 (图 5b 的黄色区域), 并产生强震前的小振幅波动。当破裂面到达地表时, 该高压流体囊就会释放过剩压力 ΔP , 产生强震; 震源深度为高压流体囊体积中心, 位于储集层下方一定深度处 (图 5b)。上文中按 4 km 深的储集层计算地震能量, 是获得能量的下限值, 若储集层埋藏更深, 压力更大, 则产生的地震能量就会更强。因此, 实际地震过程可以分为断层破裂 II 和流体压力释放产生强震 III 两个过程。在初动之前还有一个微破裂过程 I, 在该过程中地震台站接收不到振动信号, 但其流体活动产生的动电效应可被检测到。断层破裂过程 II 可以产生主震前的弱振幅; 只有破裂逐步发展, 并刺穿高压储集层, 才有强震 III 产生。

3.2 直接证据

下面列举几个方面的证据。

(1) 证据 1: 不同台站地震波动到达时间的分析

从不同台站的初动和强震到达时间上看,地震过程主要分为断层破裂Ⅱ和强震Ⅲ两大类过程,且强震波形由多个不同地点的事件所产生,如图 6 所示,为 2008 年汶川 7.9 级大地震中多个不同震中距台站接收到的波形图。各台站的初动连线为 A、各台站强震前的连线为 B。A 至 B 之间的直达波 P 是弱振幅,代表断层破裂过程Ⅱ;B 的右侧代表了第 2 个过程,即多个事件引起的多个强震振幅

Ⅲ,该强震一般被认为横波 Sg。A 与 B 不平行,且 A 的斜率小,说明破裂的发展过程与波的传播是同方向进行的。第 1 条波动曲线(卧龙台站)初动 A 与强震 B 之仅间隔 1.3 s,而最远的第 5 张曲线(重华台)间隔约 25 s,基本上代表了断层总破裂时间长度,与 Shang et al. (2015) 的推测 22 s 是一致的。清平台虽然离震中距离较远(90 km),但离断裂带垂直距离近,其强振幅(S1)有一定衰减(图 7),而其初动的最高频率为 60~70 Hz,和卧龙台基本一致。事件 S2 的发生位置相对于卧龙台而言,更靠近清平台,振幅强,频带宽,且清平的最高频率要高于卧龙台。

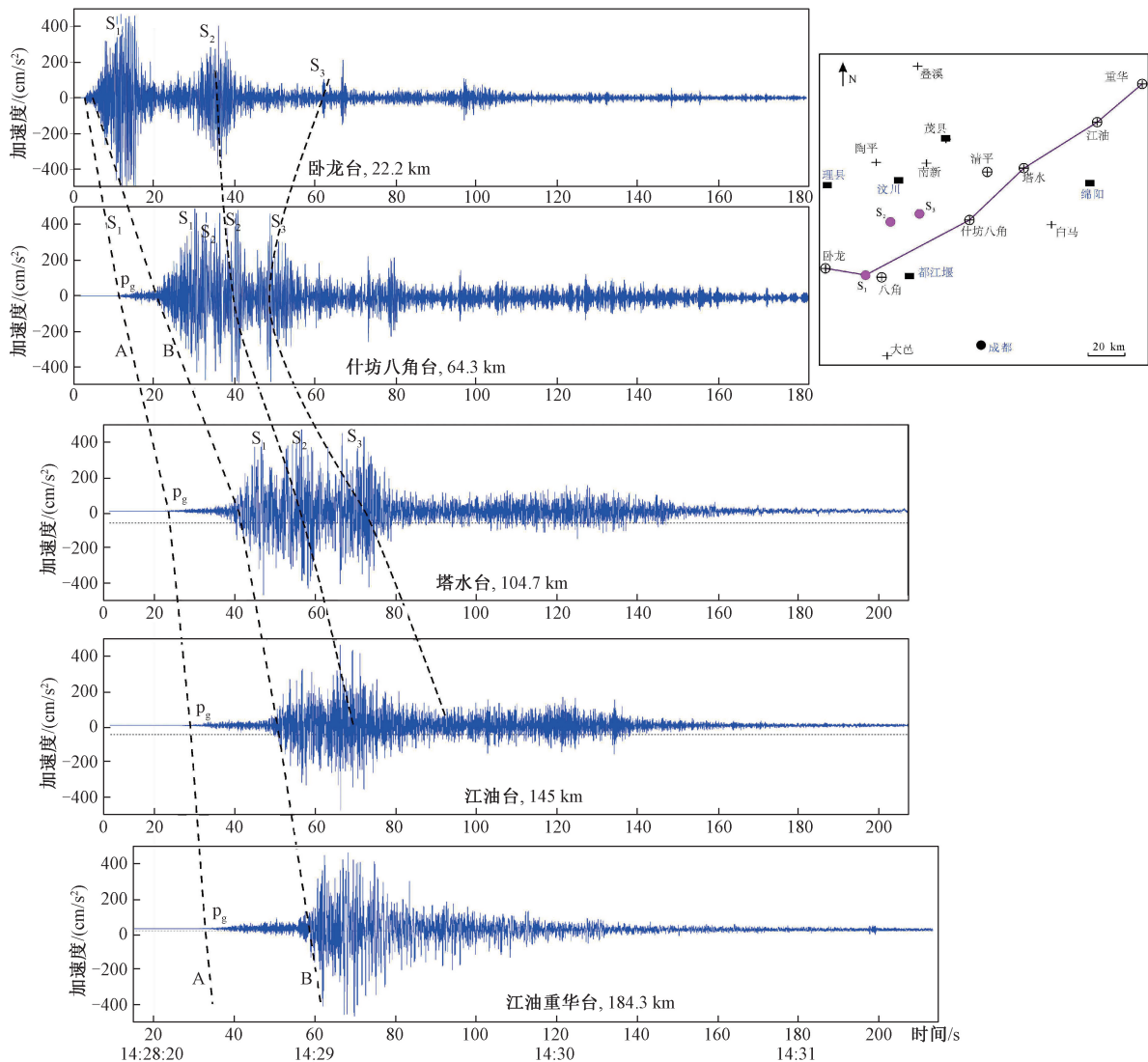
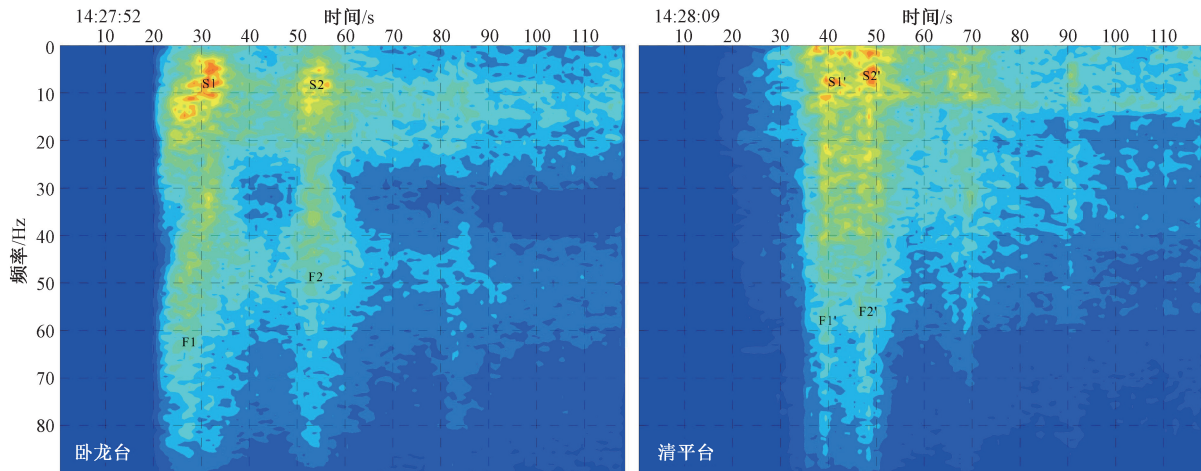


图 6 汶川地震各台站地震波形对比图

Fig. 6 Comparison of seismic waveforms at various stations during the Wenchuan earthquake

(2) 证据 2: 从地震波的双主频特性分析 采用连续时频 FFT 算法对卧龙台的 Z 分量地

震信号(图 6 中第 1 条曲线)进行分析,得出了频谱,如图 8 所示,为卧龙地震台接收到的地震信



S1、S2、S1'、S2'分别为卧龙台、清平台两次强振动事件主频位置; F1、F2、F1'、F2'分别为卧龙台、清平台两次强振动事件最大频率位置

图7 汶川地震近震台站时频分析

Fig. 7 Time frequency analysis of near the seismic stations during the Wenchuan earthquake

S1, S2, S1' and S2' are the main frequency positions of two strong vibration events observed at the Wolong station and the Qingping station respectively; F1, F2, F1' and F2' are the maximum frequency positions of two strong vibration events observed at the Wolong station and the Qingping station respectively.

号振幅包络线及地震射线路径示意图, 其中图 8a 为连续时频分析频谱。可以看到强振幅中明显还包含了另一个和初始破裂基本一致的高频成分, 主频为 5~6 Hz。分时段 FFT 算法获得的振幅谱更加明显, 得到 3 个时间段: 2~3.7 s, 18~28 s, 44~52 s 的弱振幅波动信号, 如图 8b 所示, 其主频分别为 12 Hz, 6 Hz, 7.5 Hz; 而它们的两个间隔时间段的 3.7~16 s, 32~40 s 为强振幅波动, 其主频分别为 2.3 Hz, 2.5 Hz。该地震信号在图 8c 中也有显示, 为蓝色曲线 (仅正半部分)。断层错断产生了弱振幅信号, 但频率高, 和页岩层的水力压裂相似; 而强振幅波动, 为断裂带加储集层所形成的高压流体囊的面震源所引发。流体体积大, 产生的能量大, 但频率低, 和炸药爆炸所产生的地震波类似, 频率和炸药体积成反比关系:

$$\frac{1}{f} = k_2 Q^{m_2} \quad (3)$$

其中, f 为频率, Q 为炸药量, k_2 、 m_2 为常数。震源体越大, 越易产生低频地震子波。这种双主频特性和高家乙 (2020) 的时频分析是一致的。

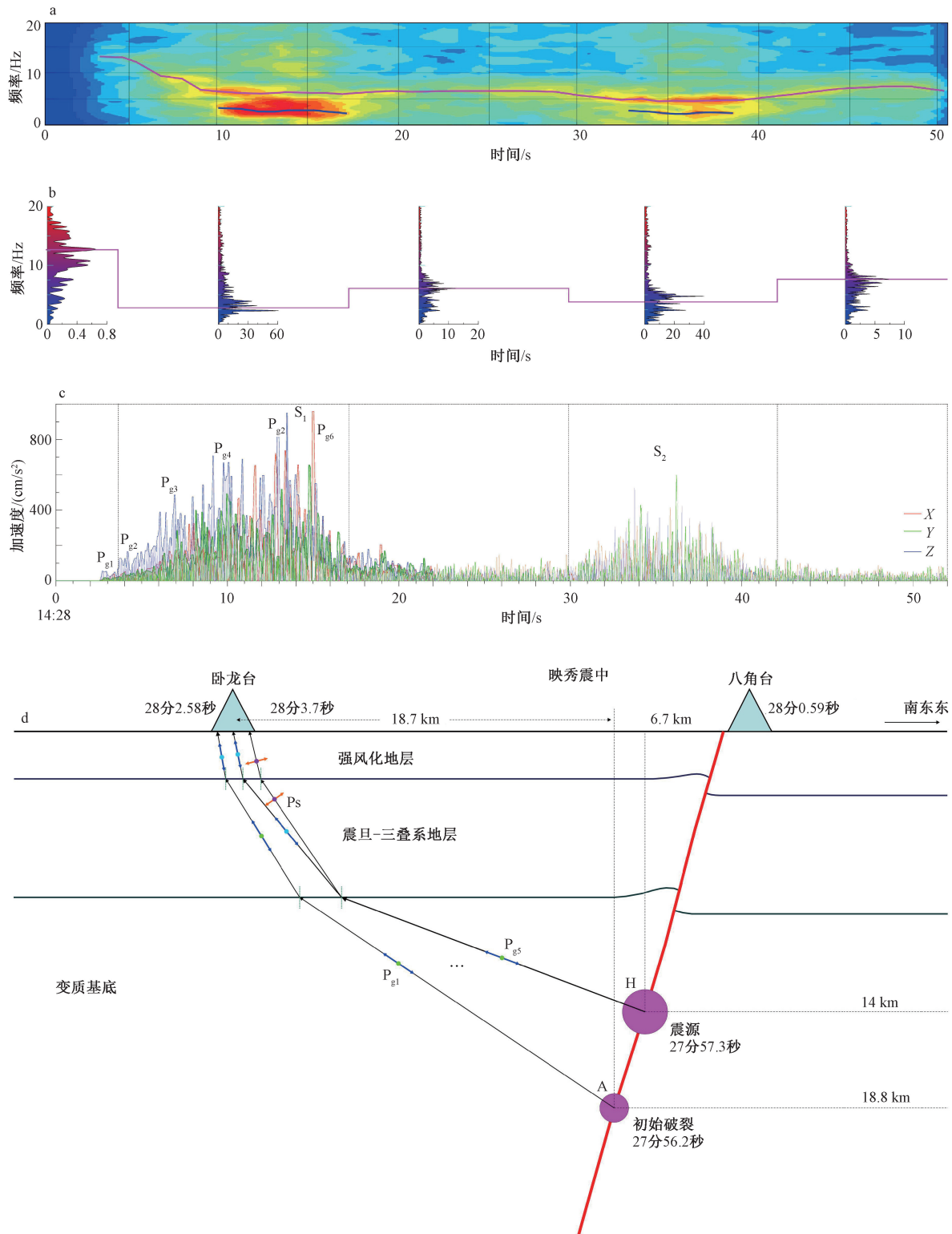
(3) 证据 3: 地震波传播射线路径的分析

从地震波射线路径的分析可以得出, 主震波动以涨缩波 P 波为主。从离震中较近的卧龙地震台 (震中距 18.7 km) 所接收到的地震波的 3 个分

量 (X , Y , Z) 可以看出 (图 8c), 初动时刻 14:28:2.6 至 14:28:14.0 之间的地震波以 Z 分量占主导, 之后的地震记录随着时间的增加而变弱, 变成以 X 分量占主导 (图 8c)。 P_{g2} - P_{g5} 的极化方向 (图 8c) 和初动 P_{g1} 基本一致, P_{g6} 的 X 方向分量超过 Z 分量, 说明事件来自于比映秀更向北的汶川震中。在紫坪铺水库西面的东八角台 (震中距仅 5 km) 所记录到的时长为 1.4 s 的初动波形 (叶建庆等, 2008) 也有类似的规律, 以 Z 分量为主, 之后因限幅无法获得真振幅。考虑到地表低速带会引起射线的偏折 (图 8d), 震源 H 处只有激发纵波, 才能符合规律。如果从震源出发的是横波, 则地震波到达卧龙站时, 质点的振动方向应接近于水平方向, 即接收到的地震波应以 X 方向的分量为主。因此, 可以认为强震波形 (图 8c 波形图在 3.7 s 之后或图 6 第 1 条卧龙台站的 B 线之后), 不是传统的直达横波 S_V 波或 S_H 波, 而是涨缩波 P 波, 这就不能排除因流体压力释放会产生一系列流体爆炸的假说。

(4) 证据 4: 流体活动的直接证据

在震后对地震断裂带进行了钻探, 发现了流体的强烈活动痕迹。王焕等 (2015) 对汶川地震断裂科学钻探一号孔 (WFSD) 的岩心样品, 用扫描电镜 (SEM) 及透射电镜 (TEM) 观察发现, 在同震过程中断裂带中可能涌入大量流体, 如图 9a 所示。

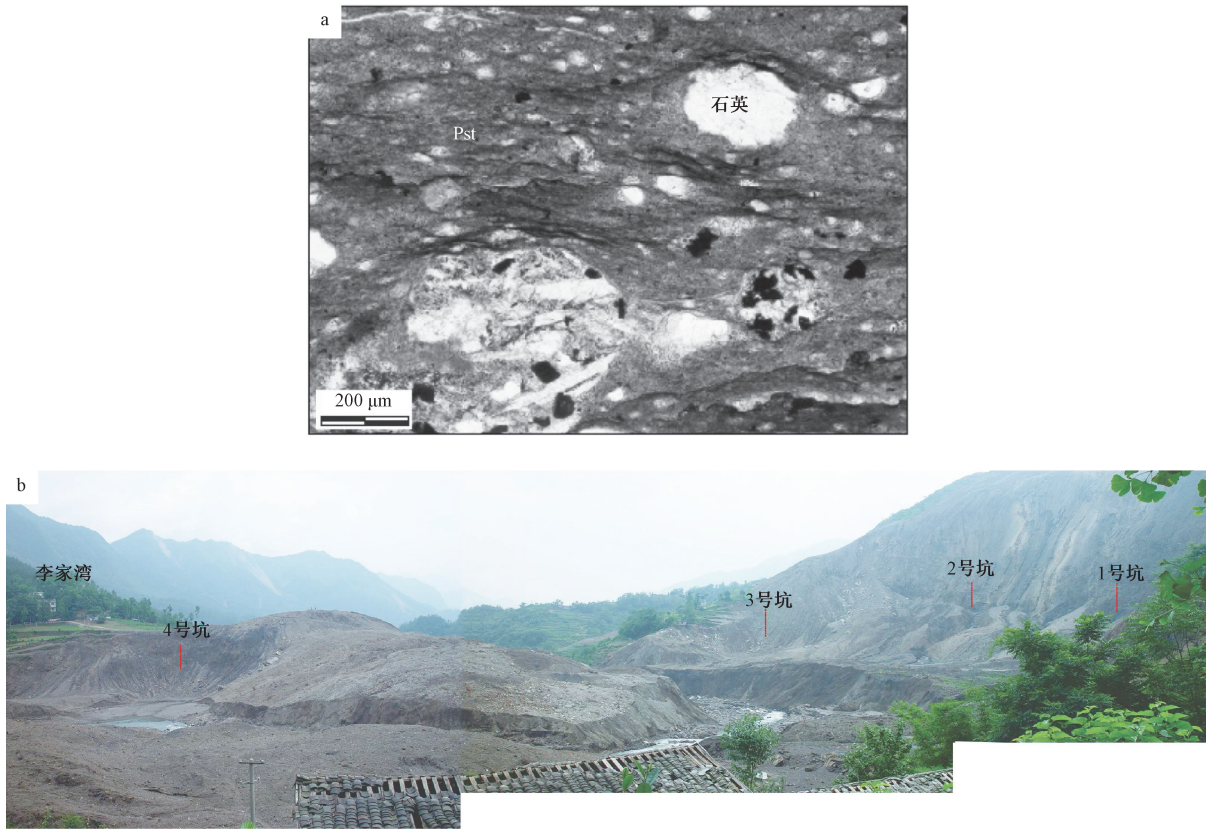


a—连续时频分析频谱; b—分时段离散频谱; c—三个分量正振幅波动曲线及包络线; d—地震波射线路径
S—强振幅事件; P—单个强振幅事件; A—初始破裂; H—震源; Ps—转换横波

图8 卧龙地震台接收到的地震信号振幅包络线及地震射线路径示意图

Fig. 8 Amplitude envelope and seismic ray path of seismic signal received by the Wolong station. (a) Continuous time-frequency spectrum analysis. (b) The discrete spectrum of different periods. (c) The positive amplitude curves and envelopes of the three components. (d) Ray path of the seismic wave.

S—strong amplitude event; P—single strong amplitude event; A—initial fracture; H—hypocenter; Ps—converted shear wave



a—八角庙露头中假玄武玻璃 (Pst) 流动构造特征 (Wang et al., 2015); b—北川桂溪镇水井岩滑坡和堰塞体表面不同位置的 4 个爆炸坑 (拍摄日期 2008-06-20; 镜向 S; 104.603°E, 31.973°N; Shang et al., 2015)

图 9 在汶川地震时流体活动与爆炸现象

Fig. 9 Fluid activity and explosion during the Wenchuan earthquake. (a) Characteristics of the flow structure of pseudobasaltic glass in the outcrop of Bajiaomiao (Wang et al., 2015). (b) Four explosion pits at different positions on the surface of the shuijingyan landslide and weir plug in Guixi Town, Beichuan (shot date: June 20, 2008, lens direction: S, 104.603°E, 31.973°N) (Shang et al., 2015)

流体活动不仅是在强震阶段起作用, 在初动前也起作用。初动前的流体活动产生的振动信号弱, 地震台站一般观测不到, 但却产生了地电场异常, 并可被观测到。地电场异常现象近年来也越来越受到关注, 可能是今后进行地震预报、预警的重大突破口。李一丁等 (2017) 报道了在离汶川地震震中 58 km 处观测到了大气电场异常。Varotsos and Alexopoulos (1984) 应用地电场观测数据探寻前兆地震电信号。郝建国 (1998) 统计了 21 个地震前的大气电场, 均有很强的负异常 ($-400 \sim -936$ mV/m), 时间比地震初动提前 3~38 天。Korsunova et al. (2013) 等大量学者也观察到类似现象。陈涛等 (2021) 研究了该负异常的特点及影响因素, 并建立了监测网进行临震预报。

一些学者认为这种电场扰动是压电效应 (Finkelstein and Powell, 1970) 或沉积地层拉伸产

生的 (Marapulets and Rulenko, 2019), 但相比流体所产生的电场异常而言小。Finkelstein et al. (1973) 用实验否定了压电效应导致地光的说法。流体流动时会产生流动电位, 其大小与驱动流体流动的压力差成正比 (Fitterman, 1978)。石油生产过程中注水-采油过程会产生流动电位效应, 且很早就被证实, 并可在地面观测到 (Wurmstich and Morgan, 1994)。Lorne et al. (1999) 提出储集层骨架与流体之间存在双电层现象, 振动或流体流动会破坏双电层并产生电流。

根据前述流体活动的思路认为, 一旦发生断层的错动, 垂向多套储集层会连通; 因不同深度的流体有较大的压力差, 使有一定矿化度的流体带着正电荷向上高速喷射到浅层; 正电荷在接近地表时抵消了原地表的负电荷而放电, 并让地表呈正电荷 (图 5b), 这样就能观测到前述的大气电

场反转, 变成负值。由此推测, 在初动前的负大气电场是由微破裂产生的小规模流体活动所产生。微破裂的突然性和随机性所产生的大气电位的瞬时变化也被 Varotsos and Alexopoulos (1984) 的观测信号所证实。当然, 大气电场异常也会持续到初动之后的强震阶段, 只是这种动电效应更加强烈, 甚至出现地光 (Finkelstein et al., 1973; Ohtsuki et al., 2005; Fidani, 2010) 这种强烈的放电现象。显然, 只有沉积地层具备流体活动并产生电场异常这一条件。

(5) 证据 5: 地震亲历者看到的爆炸现象

从地震灾区民众反馈的信息看, 该地震经历了 3 次历程, 发生了连贯的巨大爆炸, 持续约 120 s, 爆炸声音沉闷, 喷爆物高出原地面约 50 m, 这些爆炸并非城市天然气管线或其他人为因素所致。事实上, 在长度约 200 km 的龙门山断裂带上, 可明显地观察到较大的爆炸现场至少有 5 处, 图 9b 是其中一个。从西向东有 4 个烟黑色大坑, 一个大坑对应一个喷爆位置。喷出来干净的黑色石头, 伴随有热浪和气浪 (Shang et al., 2015)。这些信息和图 6 第 1 条曲线所记录的地震信号是一致的。

(6) 证据 6: 汶川地震多震源特性

汶川地震总破裂长度为 200 km, 但实际其单个子震源所涉及的破裂并不长。据断层错断后所产生的应力降来计算所释放的弹性能达不到很高的震级, 一定有其他因素参与。从波形上看, 推测产生汶川地震的多个震源的间距只有 5~20 km, 这显然不能用断裂错断释放弹性能来解释汶川地震的巨大能量。从图 6 的地震波形上看至少存在 3 次不同地点的强震。

3.3 间接证据及一些地震例子

(1) 证据 1: 全球到处发育的隐爆角砾岩表明爆炸现象的普遍性 (Pope et al., 1997; He and Qiao, 2015; van Loon et al., 2016)。

(2) 证据 2: 初动和强震之间这种滞后现象在很多地震事件中均能观察得到。意大利 6.2 级地震, 在前震和主震之间时长居然达到 7 天 (Marzocchi et al., 2014)。2001 年昆仑 8.1 级地震的滞后是 3 天 (Hu, 2018)。遗憾的是, 他认为该地震的前驱波是北大西洋极端风暴引起的, 同时, 该类地震被认为是一种慢地震, 即断裂蠕滑造成的 (Beroza and Jordan, 1990; Gao and Wang, 2017)。事实上, 该地震的前驱波最大震级相当于

3.5 级左右的地震活动, 极有可能是地震前的断层缓慢破裂所致, 且尚未刺穿储集层。该地震主震的震源深度为 12 km, 很有可能就位于沉积层内。2018 年在青藏高原北羌塘双湖县所钻探的“羌参 1 井”, 钻至 4 km 深, 未钻穿二叠系地层。

(3) 证据 3: 全球较大的地震均发生在有沉积地层的地区, 如环太平洋带的地震几乎位于大陆架或陆坡, 且深 30 km 以内的浅源 6 级以上的地震约占 65% (2012 年至今; 信息来自中国地震台网中心官网 news.ceic.ac.cn)。日本 311 地震震中位于盆地内部 (38.1°N; 142.6°E), 即北上盆地 (Kitakami basin) 南部 (Arai et al., 2014), 该盆地具有丰富的油气资源。全球最大的地震 1960 年 9.5 级 Valdivia (智利) 地震发生于离大陆很近的大陆架上, 震源上覆的地幔楔体可观察到地震速度的局部降低, 可能是由沉积物的水化作用或底侵引起的 (Dzierma et al., 2012)。该震中北部后来发生的两次大地震 8.8 级地震和 8.3 级地震 (Ruiz et al., 2016) 也位于大陆架相似的位置上。Olsen et al. (2020) 用多条高精度地震剖面证实沿智利中南部边缘 (地震发生的地点) 流入的沉积物几乎全部由沟槽楔状浊积岩组成, 其厚度为 8~10 km。这些地震通常被认为是板块俯冲的结果, 但 1976 年所发的唐山 7.8 级地震却没法用板块运动来解释, 在该地震震源顶部有奥陶系、寒武系风化壳 (刘保金等, 2011), 也同样具有高孔高渗储集层, 用流体压力释放的观点可以很好地解释。

证据 4: 井喷现象可以用储集层内流体的压力释放来解释。鲁西泥火山的喷发被认为不是 Yogyakarta 6.3 级地震所引发, 而是旁边的钻井井喷所致 (Tingay et al., 2008)。事实上, 从 BJP-1 钻探结果显示, 在深度 900~1900 m 处为黏土盖层, 直接盖在 1000 m 厚的火山碎屑之上, 具有高孔隙度, 含高压水, 符合文中的流体压力释放的条件。地震、井喷及泥火山喷发均为刺穿了高压储集层的不同表现而已。

证据 5: 根据文中的模型推测, 在同一地区再次发生强震的最短距离为极限动用半径 r (250 m), 因为远离原断层超过 r 的储集层仍会保持较高的流体压力, 一旦有破裂, 仍会有强震。如 1976 年 8 月 16 日至 9 月 2 日共 18 天在 $16 \times 53 \text{ km}^2$ 的范围内的四川松潘地区共发生了 11 次地震 (Jones et al., 1984), 两次最大为 7.2 级的地震各相隔 7 天

(104.3°E; 32.5°N), 两对相隔一周的地震震中距离仅5 km; 2021年7月15日在2008年汶川大地震震中西南4.3 km处再次发生了4.8级地震。

4 结论

文章结合了地震学、地球化学、地质学、钻探等多学科进行了分析, 得出以下结论。

(1) 来自深部变质基底的流体数量可能不少, 但因其丰度低, 且多数为结构水, 不可能引发天然地震。

(2) 沉积地层中的高压流体的压力释放可能是引发破坏性强震的重要能量来源。高孔隙储集层含有海量流体, 当自然界构造运动产生的断层破开储集层后, 这些高压流体的进入断裂带形成高压流体囊, 当断至地表时, 其弹性可以释放出来, 所释放的能量可以超过8级的地震所释放的能量。地震过程的实质是断裂刺穿了一个沉积地层的“高压封存箱”。

(3) 从汶川地震近震信号在时间域和频率域中的分析可知, 强震波形是来自于纵波的振动, 而不是横波振动。

(4) 地震过程可分为3个阶段, 微破裂Ⅰ、初动后的断层破裂过程Ⅱ、流体物理爆炸过程Ⅲ。阶段Ⅰ可接收到地表电场异常信号, 但接收不到振动信号; 过程Ⅱ伴随整个地震过程, 为高频弱振幅; 过程Ⅲ为低频强振幅。

值得进一步讨论的科学问题是, 如何利用流动运动的动电效应产生的大气电场扰动来定量评价微破裂的位置和深度, 从而进行地震预报。

致谢: 感谢四川省地震局提供的汶川地震波形数据; 感谢国家地震局赵永教授、黄辅琼教授、四川地震局的刘玉发专家及中国科学地国家空间科学中心的陈涛教授提出较好的意见。

References

ARAI K, INOUE T, IKEHARA K, et al., 2014. Episodic subsidence and active deformation of the forearc slope along the Japan Trench near the epicenter of the 2011 Tohoku Earthquake [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 408: 9-15.

BELL D R, ROSSMAN G R, 1992. Water in Earth's mantle: the role of nominally anhydrous minerals [J]. *Science*, 255 (5050): 1391-1397.

BEROZA G C, JORDAN T H, 1990. Searching for slow and silent

earthquakes using free oscillations [J]. *Journal of Geophysical Research; Solid Earth*, 95 (B3): 2485-2510.

BRACE W F, BYERLEE J D, 1966. Stick-slip as a mechanism for earthquakes [J]. *Science*, 153 (3739): 990-992.

BYERLEE J D, 1970. The mechanics of stick-slip [J]. *Tectonophysics*, 9 (5): 475-486.

CHEN T, ZHANG X X, ZHANG X M, et al., 2021. Imminent Estimation of Earthquake Hazard by regional network monitoring the near surface vertical atmospheric electrostatic field [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 64 (4): 1045-1054. (in Chinese with English abstract)

CURRAY J R, 1991. Possible greenschist metamorphism at the base of a 22-km sedimentary section, Bay of Bengal [J]. *Geology*, 19 (11): 1097-1100.

DU J G, SI X Y, CHEN Y X, et al., 2008. Geochemical anomalies connected with great earthquakes in China [M] // *Geochemistry research advances*. New York: Nova Science Publishers, Inc., 57-92.

DZIERMA Y, THORWART M, RABBEL W, 2012. Moho topography and subducting oceanic slab of the Chilean continental margin in the maximum slip segment of the 1960 Mw 9.5 Valdivia (Chile) earthquake from P-receiver functions [J]. *Tectonophysics*, 530-531: 180-192.

FANG S N, ZHANG Z S, WANG Z, et al., 2020. Principal Slip Zone determination in the Wenchuan earthquake Fault Scientific Drilling project-hole 1: considering the Bayesian discriminant function [J]. *Acta Geophysica*, 68 (6): 1595-1607.

FIDANI C, 2010. The earthquake lights (EQL) of the 6 April 2009 Aquila earthquake, in Central Italy [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10 (5): 967-978.

FINKELSTEIN D, POWELL, J. 1970. Earthquake lightning. *Nature*, 228 (5273), 759-760.

FINKELSTEIN D, HILL R D, POWELL J R, 1973. The Piezoelectric Theory of earthquake lightning [J]. *Journal of Geophysical Research*, 78 (6): 992-993.

FITTERMAN D V, 1978. Electrokinetic and magnetic anomalies associated with dilatant regions in a layered Earth [J]. *Journal of Geophysical Research; Solid Earth*, 83 (B21): 5923-5928.

GAO J Y, LIU X F, YAN R, 2020. Time-frequency analysis of seismic records generated by natural earthquakes, blasts, and collapses near Pingmei mine based on STFT [J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 41 (3): 67-74. (in Chinese with English abstract)

GAO X, WANG K L, 2017. Rheological separation of the megathrust seismogenic zone and episodic tremor and slip [J]. *Nature*, 543 (7645): 416-419.

GILAT A, VOL A, 2005. Primordial hydrogen-helium degassing, an overlooked major energy source for internal terrestrial processes [J]. *Hait Journal of Science & Engineering B*, 2 (1-2): 125-167.

GOMBERG J, BODIN P, LARSON K, et al., 2004. Earthquake nucleation by transient deformations caused by the $M = 7.9$ Denali, Alaska, earthquake [J]. *Nature*, 427 (6975): 621-624.

- HAO J G, 1988. Near earth surface anomalies of the atmospheric electric field and earthquakes [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 10 (2): 206-212. (in Chinese with English abstract)
- HARMS U. 1994. New achievements of (KTB) in 7 km ultra-deep drilling in Germany-fluids in the Variscan basement and their passageways. *Geological science translation cluster*, 11 (2): 91-93. (in Chinese)
- HE B Z, QIAO X F, 2015. Advances and overview of the study on paleo-earthquake events: a review of seismites [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 89 (5): 1702-1746.
- HEINICKEA J, STEPHAN T, ALEXANDRAKIS C, et al., 2019. Alteration as possible cause for transition from brittle failure to aseismic slip: the case of the NW-Bohemia/Vogtland earthquake swarm region. *Journal of Geodynamics*, 124: 79-92.
- HONDA H, 1962. Earthquake Mechanism and Seismic Waves [J]. *Journal of Physics of the Earth*, 10 (2): 1-97.
- HU X G, 2018. Secondary microseisms of North Atlantic windstorms in Central Eurasia-an understanding of an anomalously big bulge of seismic noise before the 2001 November 14 M_w 7.8 Kunlun earthquake [J]. *Geophysical Journal International*, 214 (3): 2084-2097.
- HUBBARD J, SHAW J H, 2009. Uplift of the Longmen Shan and Tibetan plateau, and the 2008 Wenchuan ($M = 7.9$) earthquake [J]. *Nature*, 458 (7235): 194-197.
- HUENGES E, ERZINGER J, KÜCK J, et al., 1997. The permeable crust: geohydraulic properties down to 9101 m depth [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102 (B8): 18255-18265.
- JAMTVEIT B, BEN-ZION Y, RENARD F, et al., 2018. Earthquake-induced transformation of the lower crust [J]. *Nature*, 556 (7702): 487-491.
- JONES L M, HAN W B, HAUKSSON E, et al., 1984. Focal mechanisms and aftershock locations of the Songpan earthquakes of August 1976 in Sichuan, China [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89 (B9): 7697-7707.
- KORSUNOVA L P, KHEGAI V V, MIKHAILOV Y M, et al., 2013. Regularities in the manifestation of earthquake precursors in the ionosphere and near-surface atmospheric electric fields in Kamchatka [J]. *Geomagnetism and Aeronomy*, 53 (2): 227-233.
- KURZ J H, JAHR T, JENTZSCH G, 2004. Earthquake swarm examples and a look at the generation mechanism of the vogtland/western bohemia earthquake swarms [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 142 (1-2): 75-88.
- LENG J G, YANG K M, YANG Y, 2011. Relationship between natural gas accumulation and overpressure in Xujiahe formation, Xiaoquan-Fenggu structural belt, western Sichuan depression [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 33 (6): 574-579, 586.
- LI M J, ZHOU J, LU Y, et al., 2017. Limit drainage radius for different types of wells in a shale reservoir [J]. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 53 (4): 548-556.
- LI T, CAI M F, ZHANG S Q, et al., 2015. Mining-induced seismicity in China [J]. *Seismological Research of Northeast China*, 21 (3): 1-26. (in Chinese with English abstract)
- LI X T, SHI W R, GUO M Y, et al., 2014. Characteristics of marine shale gas reservoirs in Jiaoshiba area of Fuling shale gas field [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 36 (11): 11-15. (in Chinese with English abstract)
- LI Y D, ZHANG L, ZHANG K, et al., 2017. Research on the atmospheric electric field abnormality near the ground surface before "5.12" Wenchuan earthquake [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 37 (1): 49-53. (in Chinese with English abstract)
- LIANG G H, 2016. Summary of research on earthquake and metallogenic process [J]. *Gold Science and Technology*, 24 (6): 8-14. (in Chinese with English abstract)
- LIANG G H, 2017. Preliminary study of the relationship between cryptoexplosion and ore-forming process from Wenchuan earthquake [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33 (2): 326-338. (in Chinese with English abstract)
- LIU B J, QU G S, SUN M X, et al., 2011. Crustal structures and tectonics of Tangshan earthquake area; results from deep seismic reflection profiling [J]. *Seismology and Geology*, 33 (4): 901-912. (in Chinese with English abstract)
- LIU W P, ZHANG C L, GAO G D, et al., 2017. Controlling factors and evolution laws of shale porosity in Longmaxi Formation, Sichuan Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38 (2): 175-184. (in Chinese with English abstract)
- LIU W Y, LI L H, WU J H. 1996. Discussion on the Genesis of the Tangshan Earthquake of MS 7.8 in 1978 from the Geochemical Perspective [J]. *Geochemistry*, 5: 66-69. (in Chinese with English abstract)
- LV Z Y, QIU X L, LV J S, et al., 2020. Crustal structure beneath the east side of Pearl River Estuary from onshore-offshore seismic experiment [J]. *International Geology Review*, 62 (7-8): 1057-1069.
- MA X H, YANG Y, WEN L, et al., 2019. Distribution and exploration direction of medium-and large-sized marine carbonate gas fields in Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 46 (1): 1-15.
- MANDAL P, 2019. A possible origin of intraplate earthquakes in the Kachchh rift zone, India, since the 2001 Mw7.7 Bhuj earthquake [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 170: 56-72.
- MARAPULETS Y, RULENKO O. 2019. Joint Anomalies of High-Frequency Geoaoustic Emission and Atmospheric Electric Field by the Ground-Atmosphere Boundary in a Seismically Active Region (Kamchatka) [J]. *Atmosphere*, 10 (5): 267-282.
- MARZOCCHI W, LOMBARDI A M, CASAROTTI E, 2014. The establishment of an operational earthquake forecasting system in Italy [J]. *Seismological Research Letters*, 85 (5): 961-969.
- OHTSUKI O Y H, 2005. Earthquake light: 1995 Kobe earthquake in Japan [J]. *Atmospheric Research*, 76: 438-444.
- OLSEN K M, BANGS N L, TRÉHU A M, et al., 2020. Thick, strong sediment subduction along south-central Chile and its role in great earthquakes [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 538: 116195.
- PINKSTON F W M, FLEMINGS P B, 2019. Overpressure at the

- Macondo Well and its impact on the Deepwater Horizon blowout [J]. *Scientific Reports*, 9 (1): 7047.
- POPE M C, READ J F, BAMBACH R, et al., 1997. Late Middle to Late Ordovician seismites of Kentucky, southwest Ohio and Virginia: sedimentary recorders of earthquakes in the Appalachian basin [J]. *GSA Bulletin*, 109 (4): 489-503.
- REYNERS M, EBERHART-PHILLIPS D, STUART G, 2007. The role of fluids in lower-crustal earthquakes near continental rifts [J]. *Nature*, 446 (7139): 1075-1078.
- RUIZ S, KLEIN E, CAMPO F D, et al., 2016. The seismic sequence of the 16 September 2015 Mw8.3 Illapel, Chile, earthquake [J]. *Seismological Research Letters*, 87 (4): 789-799.
- SHANG Y J, LIU J Q, LIU D A, et al., 2015. Observation of explosion pits and test results of ejecta above a rock avalanche triggered by the Wenchuan earthquake, China [J]. *Geomorphology*, 231: 162-168.
- SOKOS E, GALLOVIČ F, EVANGELIDIS C P, et al., 2020. The 2018 Mw6.8 Zakynthos, Greece, earthquake: Dominant strike-slip faulting near subducting slab [J]. *Seismological Research Letters*, 91 (2A): 721-732.
- TETTEH J T, CUDJOE S E, ARYANA S A, et al., 2021. Investigation into fluid-fluid interaction phenomena during low salinity waterflooding using a reservoir-on-a-chip microfluidic model [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 196: 108074.
- TINGAY M, HEIDBACH O, DAVIES R, et al., 2008. Triggering of the Lusi mud eruption: Earthquake versus drilling initiation [J]. *Geology*, 36 (8): 639-642.
- VAN LOON A J, PISARSKA-JAMRO ŹY M, NARTIŠS M, et al., 2016. Seismites resulting from high-frequency, high-magnitude earthquakes in Latvia caused by Late Glacial glacio-isostatic uplift [J]. *Journal of Palaeogeography*, 5 (4): 363-380.
- VAROTSOS P, ALEXOPOULOS K, 1984. Physical properties of the variations of the electric field of the earth preceding earthquakes. II. Determination of epicenter and magnitude [J]. *Tectonophysics*, 110 (1-2): 99-125.
- WANG B S, GE H K, YANG W. 2012. Transmitting seismic station monitors fault zone at depth [J]. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 93 (5): 49-50.
- WANG H, LI H B, SI J L, et al., 2015. Progress in the study of the Wenchuan earthquake faulting [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 36 (3): 257-269. (in Chinese with English abstract)
- WANG S X, JIANG F Y, HAO M, et al., 2013. Investigation of features of present 3D crustal movement in eastern edge of Tibet plateau [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 56 (10): 3334-3345. (in Chinese with English abstract)
- WU H Z, YE T R, ZHAO D, et al., 2015. Fine characterization technique and its application to channel sandstone in continental tight gas reservoirs of western Sichuan Depression [J]. *Oil & Gas Geology*, 36 (2): 230-239. (in Chinese with English abstract)
- WURMSTICH B, MORGAN F D, 1994. Modeling of streaming potential responses caused by oil well pumping [J]. *Geophysics*, 59 (1): 46-56.
- XU T J, CHENG B J, YIAN L I, et al., 2017. Reservoir brittleness and fracture prediction of Member 4, Leikoupo Formation in Jinma-Yazihe nappe tectonic belt, Longmen Mountain [J]. *Petroleum geophysical exploration*, 2017, 52 (3): 562-572.
- YE J Q, SU J R, CHEN H, 2008. Predominant period of the Wenchuan $M_{\text{w}}8.0$ earthquake motion [J]. *Journal of Seismological Research*, 31 (S1): 498-504. (in Chinese with English abstract)
- YUAN S Y, RAN Q Q, XU Z S, et al., 2007. Strategy of high-efficiency development for volcanic gas reservoirs [J]. *Acta Petroli Sinica*, 28 (1): 73-77. (in Chinese with English abstract)
- YUE Z Q, 2013. Cause and mechanism of highly compressed and dense methane gas mass for Wenchuan earthquake and associated rock-avalanches and surface co-seismic ruptures [J]. *Earth Science Frontiers*, 20 (6): 15-20. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG M, WEN L X, 2015. Seismological evidence for a low-yield nuclear test on 12 May 2010 in North Korea [J]. *Seismological Research Letters*, 86 (1): 138-145.
- ZHANG Y N, DENG J R, KE B, et al., 2018. Experimental study on explosion pressure and rock breaking characteristics under liquid carbon dioxide blasting [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2018: 7840125.
- ZHAO D P, KANAMORI H, NEGISHI H, et al., 1996. Tomography of the source area of the 1995 Kobe earthquake: Evidence for fluids at the hypocenter [J]. *Science*, 274 (5294): 1891-1894.
- ZHAO L F, XIE X B, WANG W M, et al., 2014. The 12 February 2013 North Korean underground nuclear test [J]. *Seismological Research Letters*, 85 (1): 130-134.
- ZHAO Z W, XIE J R, LI N, et al., 2013. Gas exploration potential of the 1st, 3rd and 5th members of Xujiahe Fm reservoirs in the Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 33 (6): 23-28. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- Harms U, 1994. 德国7公里超深钻(KTB)的新成果: 华力西基底中的流体及其通道 [J]. 程小久, 译. 地质科学译丛, (2): 91-93.
- 陈涛, 张效信, 张学民, 等, 2021. 利用区域大气静电场监测网临震预估地震灾害 [J]. 地球物理学报, 64 (4): 1045-1054.
- 高家乙, 刘晓锋, 闫睿, 2020. 河南平顶山平煤矿区天然地震、爆破、塌陷时频特征分析 [J]. 地震地磁观测与研究, 67-74.
- 郝建国, 1988. 近地表大气电场异常与地震 [J]. 地震学报, 10 (2): 206-212.
- 冷济高, 杨克明, 杨宇, 2011. 川西坳陷孝泉-丰谷构造带须家河组超压与天然气成藏关系研究 [J]. 石油实验地质, 33 (6): 574-579, 586.
- 李铁, 蔡美峰, 张少泉, 等, 2005. 我国的采矿诱发地震 [J]. 东北地震研究, 21 (3): 1-26.
- 李湘涛, 石文睿, 郭美瑜, 等, 2014. 涪陵页岩气田焦石坝区海相页岩气层特征研究 [J]. 石油天然气学报, 36 (11): 11-15.
- 李一丁, 张亮, 张琨, 等, 2017. “5.12”汶川地震前近地面大气电场异常研究 [J]. 高原山地气象研究, 37 (1): 49-53.
- 梁光河, 2017. 从汶川地震探讨隐爆与成矿过程 [J]. 岩石学报, 33 (2): 326-338.
- 刘保金, 曲国胜, 孙铭心, 等, 2011. 唐山地震区地壳结构和构造:

- 深地震反射剖面结果 [J]. 地震地质, 33 (4): 902-912.
- 刘文平, 张成林, 高贵冬, 等, 2017. 四川盆地龙马溪组页岩孔隙度控制因素及演化规律 [J]. 石油学报, 38 (2): 175-184.
- 刘武英, 李龙海, 吴建华, 等, 1996. 从地球化学角度讨论 1976 年唐山 7.8 级地震的成因 [J]. 地质地球化学, (5): 66-69.
- 王焕, 李海兵, 司家亮, 等, 2015. 汶川地震断裂作用研究新认识 [J]. 地球学报, 36 (3): 257-269.
- 王双绪, 蒋锋云, 郝明, 等, 2013. 青藏高原东缘现今三维地壳运动特征研究 [J]. 地球物理学报, 56 (10): 3334-3345.
- 武恒志, 叶泰然, 赵迪, 等, 2015. 川西坳陷陆相致密气藏河道砂岩储层精细刻画技术及其应用 [J]. 石油与天然气地质, 36 (2): 230-239.
- 徐天吉, 程冰洁, 闫丽丽, 等, 2017. 龙门山金马—鸭子河推覆构造带雷四段储层脆性与裂缝预测 [J]. 石油地球物理勘探, 52 (3): 562-572.
- 叶建庆, 苏金蓉, 陈慧, 2008. 汶川 8.0 级地震卓越周期分析 [J]. 地震研究, 31 (S1): 498-504.
- 袁士义, 冉启全, 徐正顺, 等, 2007. 火山岩气藏高效开发策略研究 [J]. 石油学报, 28 (1): 73-77.
- 岳中琦, 2013. 汶川地震与山崩地裂的极高压甲烷天然气成因和机理 [J]. 地学前缘, 20 (6): 15-20.
- 赵正望, 谢继容, 李楠, 等, 2013. 四川盆地须家河组一、三、五段天然气勘探潜力分析 [J]. 天然气工业, 33 (6): 23-28.

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):

可扫码直接下载文章电子版, 也有可能听到作者的语音介绍及更多文章相关资讯

