

杨选, 马晓静. 2023年2月5日三水  $M_L$  4.0级矿山地震震相特征与发震构造[J]. 华南地震, 2023, 43(4): 107–118. [YANG Xuan, MA Xiaojing. Seismic Phase Characteristics and Seismogenic Structure of the Sanshui  $M_L$  4.0 Mining-induced Earthquake on February 5<sup>th</sup>, 2023 [J]. South China journal of seismology, 2023, 43(4): 107–118]

## 2023年2月5日三水 $M_L$ 4.0级矿山地震 震相特征与发震构造

杨 选, 马晓静

(广东省地震局, 广州 510070)

**摘要:** 2023年2月5日广东三水发生了  $M_L$  4.0级地震, 佛山、广州、深圳等地区有感, 有感范围广泛, 且震中位于盐矿开采区, 因此特别引人关注。通过收集震中 800 km 范围内质量较高的 342 个测震记录和 410 个强震记录, 经过人工仔细分析, 识别出了 967 个震相, 统计分析发现: 所有台站记录都在 Sg 波之前有丰富的高频成份, 有 75 个台站记录中在 Sg 波之后出现了周期变化 (周期在 1.1~1.5 s 之间)、毛刺少、振动规则的短周期面波, 其持续时间大致在 5~20 s 之间; 面波振幅整体随震中距增大而减小, 但在部份台站存在突然增大数倍的现象, 最大峰值的视速度约为 2.85 km/s, 在垂直向比较明显, 符合 Rg 面波的特征; 用深度震相 sPn 测定的震源深度约为  $3.8 \pm 0.39$  km, 重新修订的震中位置为: 经度  $112.958^\circ$  N, 纬度  $23.271^\circ$  E; 初动呈四象限分布, 确定的发震构造为走向  $334.90^\circ$ , 倾角  $54.04^\circ$ , 滑动角  $-18.84^\circ$ , 错动类型以左旋走滑为主, 兼少量正断。综合分析认为, 这是由长期的抽取卤水采盐活动引起的。采空区的应力变化导致矿体的应力分布发生调整, 沿 F7 断层的应力超过了其承载能力, 在区域应力主控制下使上盘发生破裂和滑动, 从而引发了与采矿活动密切相关的矿山地震。

**关键词:** 三水地区; 矿山地震; 震相特征; 震源定位; 发震断裂

中图分类号: P315.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2023)04-0107-12

DOI: 10.13512/j.hndz.2023.04.14

## Seismic Phase Characteristics and Seismogenic Structure of the Sanshui $M_L$ 4.0 Mining-induced Earthquake on February 5<sup>th</sup>, 2023

YANG Xuan, MA Xiaojing

(Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510070, China)

**Abstract:** On February 5<sup>th</sup>, 2023, an  $M_L$  4.0 earthquake occurred in Sanshui, Guangdong, which was felt in Foshan, Guangzhou, Shenzhen and other areas. The feeling range is wide, and the epicenter is located in the salt mining area, so it attracts significant attention. This article collected and carefully analyzed 342 high-quality seismic records and 410 strong-motion records within a 800 km of the epicenter. Through manual analysis, a total of 967

收稿日期: 2023-04-29

基金项目: 广东省省级科技计划协同创新与平台环境建设重点项目(2019B020208014)

作者简介: 杨选(1978-), 男, 高级工程师, 主要从事地震观测及数字地震资料应用研究。

E-mail: 27960687@qq.com

seismic phases were identified. The statistical analysis reveals that: All station records exhibits substantial high-frequency components before the arrival of the Sg wave. After the Sg wave, there are 75 stations recorded short-period surface waves with periodic changes (period between 1.1–1.5 s), less burrs and regular vibration, and their duration is about 5–20 s. Overall amplitude of surface waves decreases with the increase of the epicenter distance, but there is a sudden increase of several times at some stations. The apparent velocity of the maximum peak is about 2.85 km/s, which is more obvious in the vertical direction, and consistent with the characteristics of Rg surface wave. The focal depth determined by the depth phase sPn is about  $3.8 \pm 0.39$  km, and the revised epicentral location is:  $112.958^{\circ}\text{N}$ ,  $23.271^{\circ}\text{E}$ . The initial motion is distributed in four quadrants, and the determined seismogenic structure is: strike  $334.90^{\circ}$ , dip angle  $54.04^{\circ}$ , and a slip angle  $-18.84^{\circ}$ . The dislocation type is mainly left-lateral strike-slip, with a small amount of normal fault. Through comprehensive analysis, it is believed that this earthquake is induced by long-term brine extraction and salt mining activities. The stress variations within the mined-out area leads to the adjustments in the stress distribution of the ore body. The stress along the F7 fault exceeded its load-bearing capacity, resulting in rupture and sliding of the hanging wall under the predominant control of regional stress, which leads to the mining-induced earthquake closely related to the mining activity.

**Keywords:** Sanshui region; Mining-induced earthquake; Seismic phase characteristics; Source location; Seismogenic fault

## 0 引言

2023年2月5日,广东省佛山市三水区乐平镇附近发生了 $M_L 4.0$ 级地震,中国地震台网中心(CENC)正式目录的发震时间是11:38:15.27,震源位置是经度 $112.953^{\circ}\text{E}$ ,纬度 $23.279^{\circ}\text{N}$ ,深度11 km。佛山、广州、深圳等地区有感,有感范围广泛,且震中位于自1988年3月开始注水采盐的隔坑盐矿矿区<sup>[1]</sup>,引起了广大群众及政府部门的高度关注。这次地震部分台站记录波形中出现规则正弦形面波,震中周边20 km范围内,震前5年仅发生过3次地震,分别是2020年1月20日 $M_L 1.0$ 、2022年5月13日 $M_L 1.6$ 和2023年1月23日 $M_L 0.9$ 地震。震后一个月内没有记录到余震活动,地震波形及地震活动类型均较为独特。利用现有观测资料深入剖析此次地震的特征和发震构造背景,对于认识本区域特殊类型地震、地震活动性以及浅源地震灾害风险防治等具有一定意义。

## 1 地震记录资料及特征

为研究这次地震的特征,本文收集了震中800 km范围内广东(包括广州和佛山等地方台网以及新建成尚未验收的40个加密台)、广西、湖南、福建、江西和海南等台网<sup>[2]</sup>的2000多个台站的记录,从中挑选出质量较高的342个测震记录和410个强

震记录,共计752个(见图1)。经过人工仔细分析,识别出了967个震相(见图2),包括Sg震相280个、Pg震相264个、Pn震相199个、Sn震相123个、PmP震相23个、SmS震相34个和Pb震相24个。

震中距30 km内的8个台均有多组反射波,Sn与Sg走时曲线交点对应的震中距在150 km左右,相对较大(据华南走时表中的数据推测:震源深度为0、5、10、15和20 km时,此交点对应的震中距分别为164.5、151.7、136.4、119.2和100.0 km),是典型的上地壳事件。

所有台站记录都在Sg波之前有丰富的高频成份,有75个台站记录中在Sg波之后出现了周期变化(周期在1.1~1.5s之间)、毛刺少、振动规则的短周期面波,其持续时间大致在5至20 s之间;面波振幅振幅整体随震中距增大而减小,但部份台存在突然增大数倍的现象(见附图2),最大峰值的视速度约为2.85 km/s,在垂直向比较明显,符合Rg面波的特征<sup>[3]</sup>。Rg波是短周期的地壳瑞利波,因为天然地震有一定的深度,所以极少出现Rg波。正是因为出现Rg波,同时又有较多的高频成份,所以三水地震的类型争议较大,图3给出了DOG台记录到的本次地震与2016年10月28日广东连平 $M 3.0$ 塌陷的波形,两者差异较为明显,塌陷滑坡高频成份不发育,爆破通常具有各向同性,S波不发育的特征,据此可排除此次事件为塌陷、滑坡或爆破的可能。

从能观测到Rg波的台站空间分布看：多数台站分布在江河流域或出海口，这些区域沉积层相对较厚，由此推断Rg波的发育程度似乎还与沉积层厚度有一定关联。

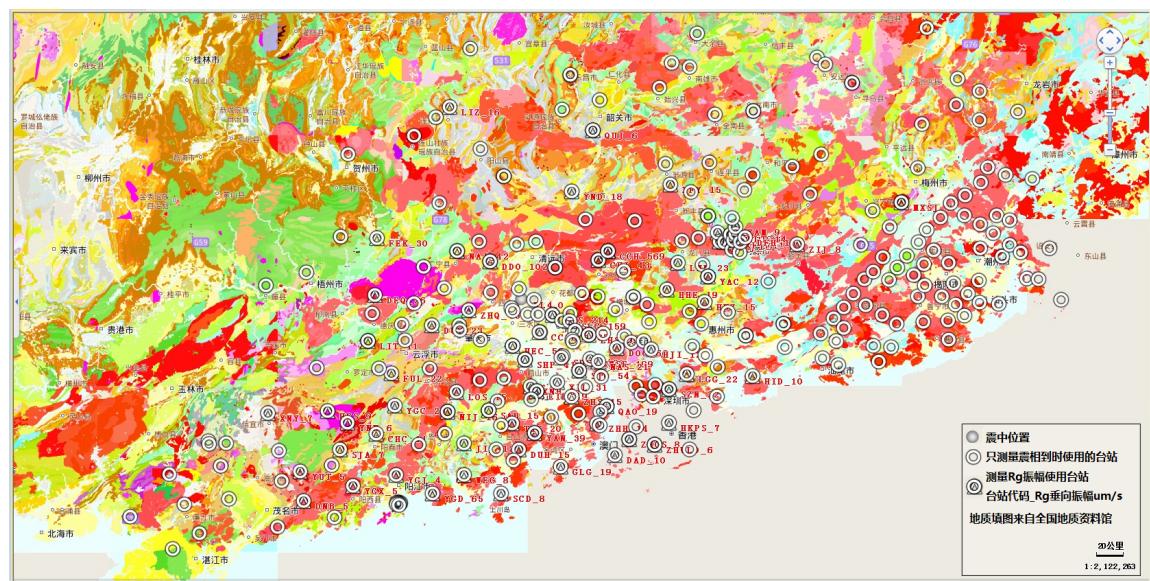


图1 台站分布图  
Fig.1 Distribution map of stations

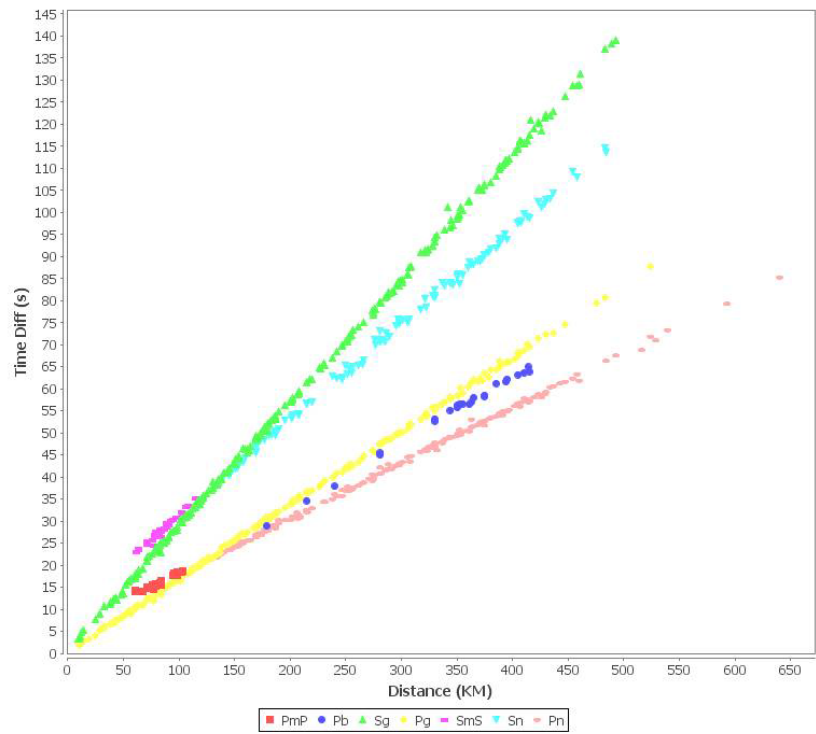


图2 震相走时曲线  
Fig.2 Travel time curve of seismic phase

2 地震深度及精确确定位

在没有较精细地壳模型的情况下，即使有较多的近台记录，深度搜索仍然还是不稳定，特别是JOPENS-MSDP提供的几种定位算法没有对近台

资料特别增加权重设置，使得精确测量震源深度更困难。但是，在有较近的台站(震中距小于两倍震源深度)记录时，通过增加测量视出射角，进行单台射线追踪，能对深度起到一定的约束作用，可改善对震源深度的分辨效果<sup>[4]</sup>。

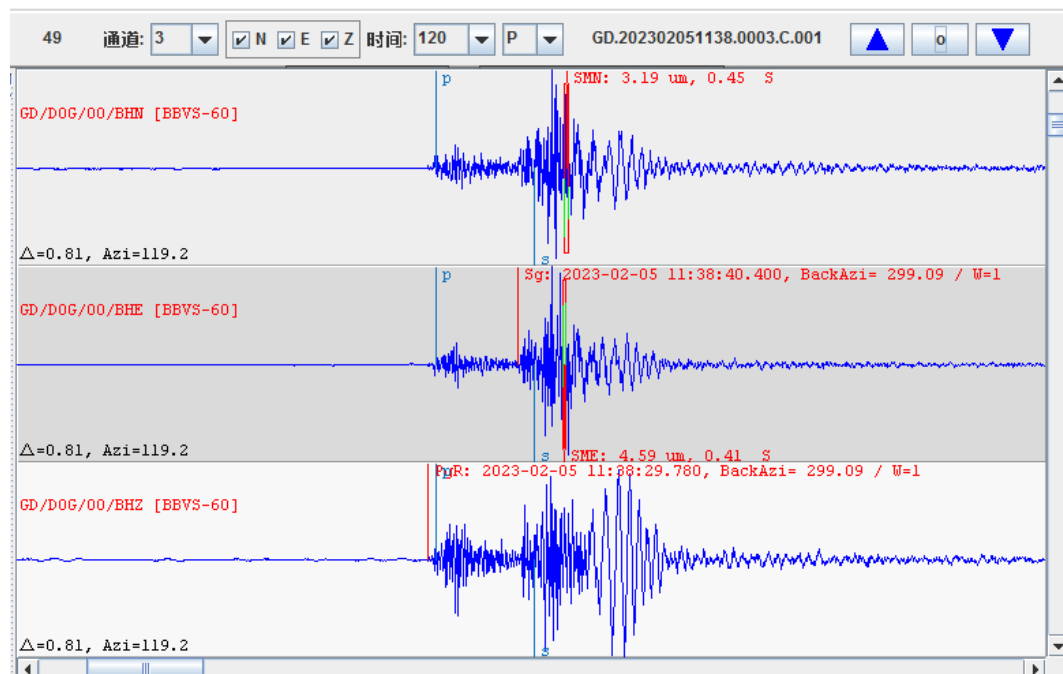
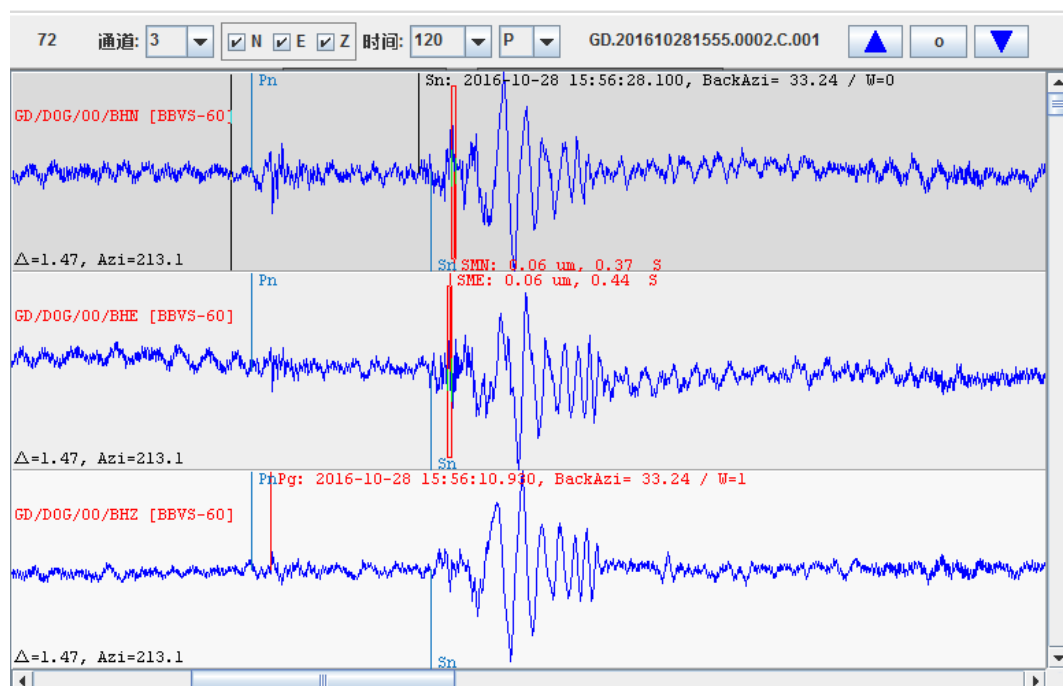
(a) 2023年2月5日广东三水  $M_{3.4}$ 地震(b) 2016年10月28日广东连平  $M_{3.0}$ 塌陷

图3 DOG台记录到的本次地震与一次塌陷波形

Fig.3 Waveforms of this earthquake and a collapse recorded by the DOG station

## 2.1 视出射角法

地震波入射到地面时,总位移矢量和地面之间的夹角称为视出射角,常用 $\bar{e}$ 表示;而入射波与地表的夹角称为真出射角,常用 $e$ 表示。由于地震波在地面上形成了反射波,所以视出射角不等于入射波的真出射角。若将地球表面视为自由表面,则视

出射角和真出射角的关系与地壳介质的泊松比有关<sup>[5]</sup>。在有三分向记录到清晰初动的近台记录时,可根据记录到的地面位移的垂直分量 $A_{UD}$ 和两个水平分量 $A_{EW}$ 与 $A_{NS}$ 按(1)式先确定视出射角,再根据真出射角和视出射角的关系(2)式计算真出射角,测量出直达P和S波的到时 $t_s$ 和 $t_p$ 即可按(3)式,估计出震源深度<sup>[5-6]</sup>,式中 $t_s-t_p$ 是直达S与直达P波的



到时差,  $U$  为虚波速度,  $e$  为真出射角。

$$\bar{e} = a \tan \left( \frac{A_{UD}}{\sqrt{A_{NS}^2 + A_{EW}^2}} \right) \quad (1)$$

$$\cos e = \frac{V_P}{V_S} \cos \left( \frac{90^\circ + \bar{e}}{2} \right) \quad (2)$$

$$h = (t_s - t_p) U \sin e \quad (3)$$

在收集到的记录中, Pg 较早达到 HWG( $t_p=11:38:16.590$ )和 SSSE( $t_p=11:38:17.160$ )两台, Sg 波的到时使用质点运动轨迹分析, 较精确地找出质点运动轨迹明显改变的起跳点(图 5), 分别是 GZ/HWG( $t_s=11:38:17.290$ )和 FS/SSSE( $t_s=11:38:17.970$ ), 仿真成位移记录测量三分向初动, 据范玉兰等人的研究, 华南地区直达 P 波速度  $V_{Pg}=6.01$  km/s, 直达 S 波速度  $V_{Sg}=3.55$  km/s, 虚波速度  $U=8.673$  km/s, 可估算出本次地震的震源深度在 4.3

km 左右, 见表 1。

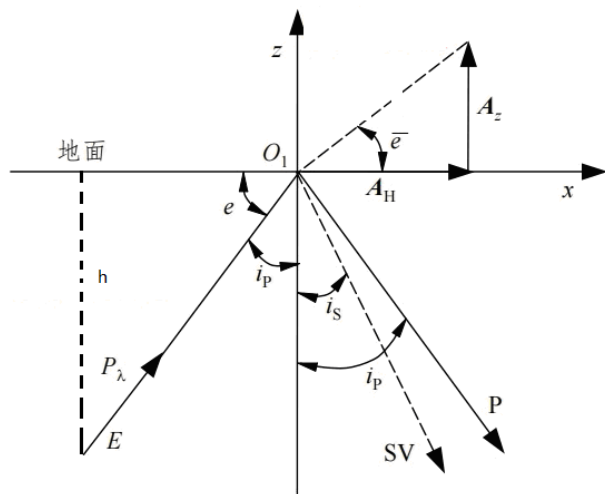


图4 视出射角与真出射角示意图  
Fig.4 Schematic diagram of apparent and true dip angles

表1 视出射角法估算本次地震震源深度结果

测量值 台站	UD 分向初动位移		EW 分向初动位移		NS 分向初动位移		$t_s-t_p/s$	视出射角/ $^\circ$	真出射角/ $^\circ$	震源深度/km
	参考基线/ $\mu m$	最大位移/ $\mu m$	参考基线/ $\mu m$	最大位移/ $\mu m$	参考基线/ $\mu m$	最大位移/ $\mu m$				
HWG	0.002	1.676	-0.003	-0.273	0.001	-2.596	0.70	32.74	35.79	3.55
SSSE	-0.008	-68.226	-0.049	-74.316	-0.013	18.164	0.81	41.74	46.20	5.07

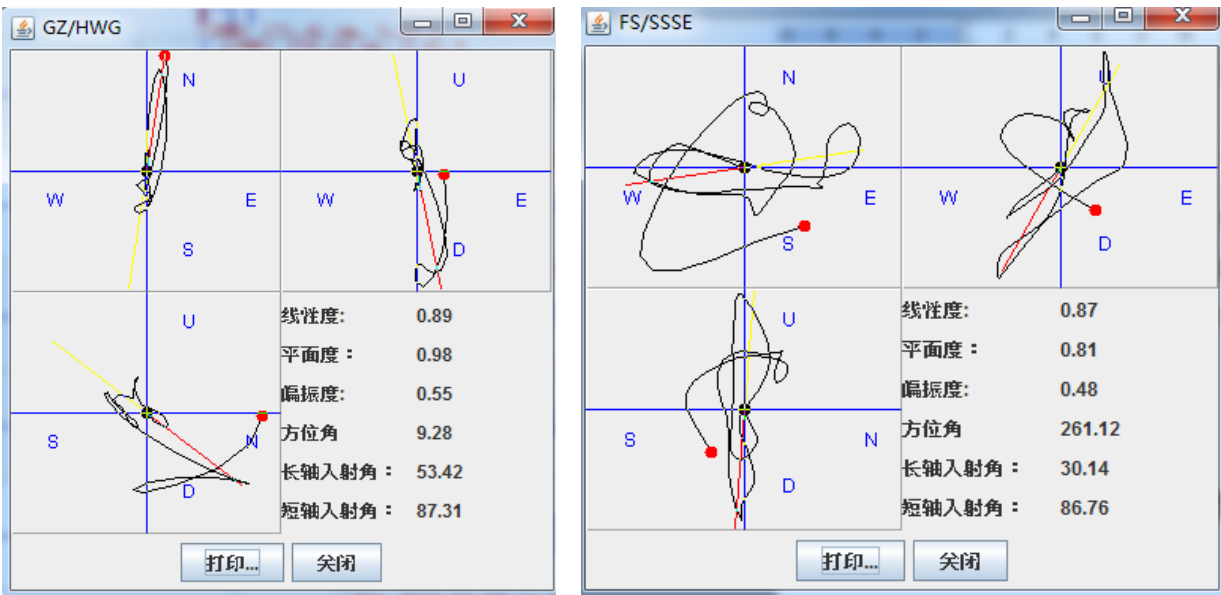


图5 HWG 台(左)和 SSSE 台(右)的质点运动轨迹图(Pg 波到达时刻为时间零点, 轨迹突变起点对应时刻为 Sg 到时)  
Fig.5 Trajectory plots of particle motion for HWG station(left)and SSSE station(right)(time zero corresponds to the arrival time of Pg wave, and the starting point of the abrupt change in trajectory corresponds to the arrival time of Sg wave).

由于地壳岩石各层介质密度不同,波速亦会不同。波在不同介质的分界面上按折射定理产生折射,使地震波射线向上弯曲,呈曲线状<sup>[7]</sup>。因此,视出射角法估计出的震源深度多数会偏深,特别是随着震中距增大,估计的误差也会越大。

## 2.2 深度震相

对于地壳结构相对简单的区域,近震深度震相 sPg、sPmP 和 sPn,以及它们的参考震相 Pg、PmP 和 Pn 在近震记录上通常可以清楚地观测到。在近震地震图上识别出这些深度震相及其参考震相后,可以利用测量它们之间的到时差或通过波形对比的方法相对精确地确定震源深度<sup>[8]</sup>。1956 年苏联学者 A. A. 维琴斯卡雅,提出在近震中可观测 sPn 震相。之后, H. B. 康道尔斯卡娅给出双层地壳中近震的 sPn-P 的走时方程<sup>[9]</sup>。Saikia 在实际数据和理论波形中都发现在确定的震源深度下 sPn 相对 Pn 的到时差很稳定的特征,因此可以用来约束震源深度<sup>[10]</sup>。国内自上世纪 70 年代初开始张诚、房明山、任克新、王登伟等人先后研究了 sPn 震相,认为采用 sPn 和 Pn 波的走时差来测定地震深度的方法简便准确<sup>[11-16]</sup>。

sPn 波是指发生在地壳内的地震产生的 S 波入射到地表经地面反射时,其中 SV 成分会转换为 P 波,之后转换 P 波入射到莫霍面,当入射角为临界角时,在地幔顶部沿着 Moho 界面向前滑行,形成 Pn 波。拾取 sPn 的方法基本上是在同一时间窗内,将不同震中距的 Pn 震相对齐,则 sPn 震相也大致对齐了,再根据其动力学特征,即周期和振幅都比 Pn 大的特征,可拾取 sPn。洪星,蔡杏辉,吴国瑞等人给出了华南地区的 sPn 震相动力学的初步特征,深度与 sPn-Pn 的关系满足(4)式<sup>[15-18]</sup>。依据这些特征我们识别出 12 个台的 sPn(见表 2 及图 6a),sPn 和 Pn 的到时差最大 1.55 s,最小 1.17 s,平均 1.36 s,对应的深度为 3.75 km,标准偏差是 0.39 km(见表 2)。

$$h = \begin{cases} \text{上地壳: } 2.764\,4(T_{\text{sPn}} - T_{\text{Pn}}) \\ \text{下地壳: } 3.388\,7(T_{\text{sPn}} - T_{\text{Pn}}) \end{cases} \quad (4)$$

由于 sPn 震相易受噪音和尾波的影响,单台挑选的可靠性不高。为了提高 sPn-Pn 测定的准确性,采用滑动时窗相关法读取 sPn 震相。滑动时窗相关法常用来估计信号之间相关性大小随时间变化的程度。移动时窗相关法的具体方法如下:对于一个地震事件的两条波形记录,从某一起始时间,

计算一定时窗范围内其相关性的。然后时窗向前推移(重叠),计算新时窗内对应波形的相关值。对于一个地震的  $N$  条波形记录,每两个波形记录进行互相关计算,然后再进行总体叠加。互相关系数的大小反映了波形的相似度。把 Pn 波初至对齐后,可利用互相关峰值的时移值来确定 sPn 和 Pn 的到时差<sup>[19]</sup>。

本次地震短周期面波比较发育,初步判断不可能太深,结合实际的波形看:震中距在 200~300 km 的台站,信噪比较高,且这个范围内 Pb 和 Pg 等续至震相与初至震相 Pn 的到时差已超过 3 s,结合视出射角法估计的结果初步推测,此范围的资料可用于搜索本次地震的 sPn 震相。对符合条件的台站资料进行 0.1 至 1.5 Hz 带通滤波,以其中 Pn 到时最小的台站记录为基准,此到时时为零时,取 0.2 秒为窗长的数据为参考波形,其余的每个台站记录以相同窗长按 1 个采样点滑移与参考波形做互相关,使 Pn 对齐之后叠加即获得高信噪比的波形记录;同时滑移相关系数也对齐叠加,叠加互相关系数在零时刻附近两个峰值的时差就是所要提取的 sPn 和 Pn 的到时差。最终搜索到 sPn 和 Pn 的到时差为 1.53 s,对应深度是 4.2 km,详细结果见图 6(b)。

利用人工分析识别出的 sPn 和 Pn 到时差确定的本次地震震源深度为:  $3.8 \pm 0.39$  km,通过移动时窗相关方法搜索获取的 sPn 与 Pn 的到时差,估算出震源深度是 4.2 km,两种方法基本一致,因此可确定这次地震的震源深度为 3.8 km,相对误差约 10%。

## 2.3 微观震中位置的精确测定

在震源深度由深度震相确定的情况,采用固定深度,只反演发震时刻和震中经纬度,减少反演参数提高定位的稳定性和精度。将震源深度固定为 3.8 km,使用华南走时表,利用单纯型、hyposat 和 LocSAT 进行重新定位,3 种方法的定位结果间两两相距约 0.7 km,与国家台网中心 CENC 正式目录发震时刻分别提前 0.50 s、0.43 s 和 0.36 s,水平位置沿东南向分别偏移 1.1 km、0.8 km 和 1.1 km,都在麦家村与隔坑村连线上,更靠近隔坑村一侧。为减小误差和不确定性,提高结果的可靠性取 3 种定位方法的定位结果的平均值作为最终结果。即:此次地震的发震时刻 11:38:14.84,经度  $112.958\,3^\circ\text{N}$ ,纬度  $23.271\,6^\circ\text{E}$ ,深度 3.8 km,震级  $M_L 4.0$ ,详见表 3 和图 7。从图 7 可以看出本次地震发生在隔坑矿区北东边缘处的 F7 断层上。

表2 本次地震识别出的sPn震相  
Table 2 sPn seismic phases identified in this earthquake

台站	震中距/(°)	震相	Pn震相到时/mm:ss.FF	sPn震相到时/mm:ss.FF	sPn-Pn到时差/s	深度/km
HK.HKYN	1.54	Pn	38:41.6	38:42.8	1.17	3.23
GD.HYJ	1.55	Pn	38:42.1	38:43.6	1.51	4.17
GD.SHG	1.68	Pn	38:43.5	38:44.8	1.25	3.46
GD.HLB02	1.88	Pn	38:45.5	38:46.6	1.17	3.23
GD.GAZ	2.18	Pn	38:50.8	38:52.4	1.55	4.28
GD.DNB	2.3	Pn	38:51.8	38:53.1	1.32	3.65
GD.LHXT	2.36	Pn	38:44.5	38:46.1	1.57	4.34
GD.LFXN	2.37	Pn	38:53.4	38:54.8	1.36	3.76
GD.WHGT	2.75	Pn	38:59.4	39:00.8	1.36	3.76
GD.FSTN	2.94	Pn	39:02.0	39:03.4	1.47	4.06
GD.PNDB	2.95	Pn	39:02.2	39:03.4	1.21	3.34
GD.FSHJ	3.22	Pn	39:05.4	39:06.7	1.32	3.65
平均震源深度/km		3.75	标准偏差		0.39	

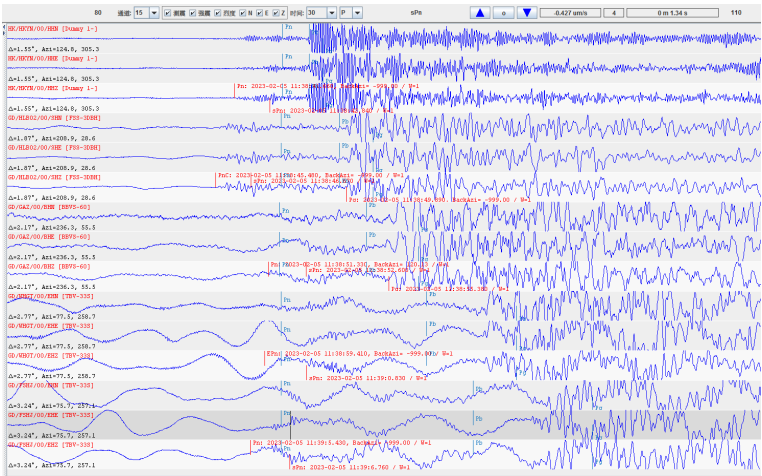


图6(a)原始记录图中识别出的sPn

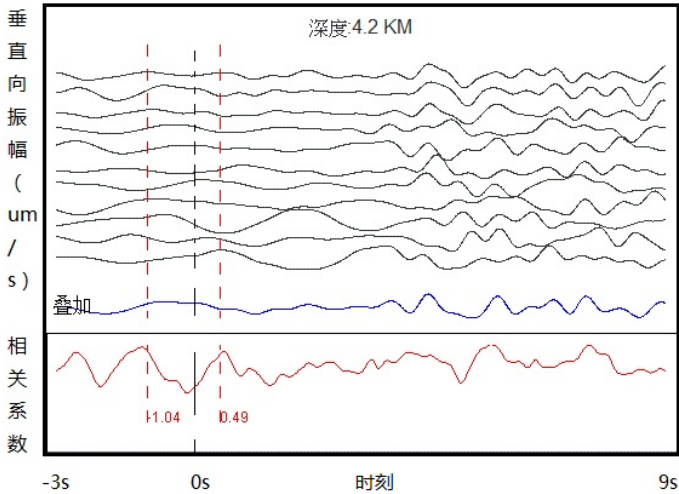


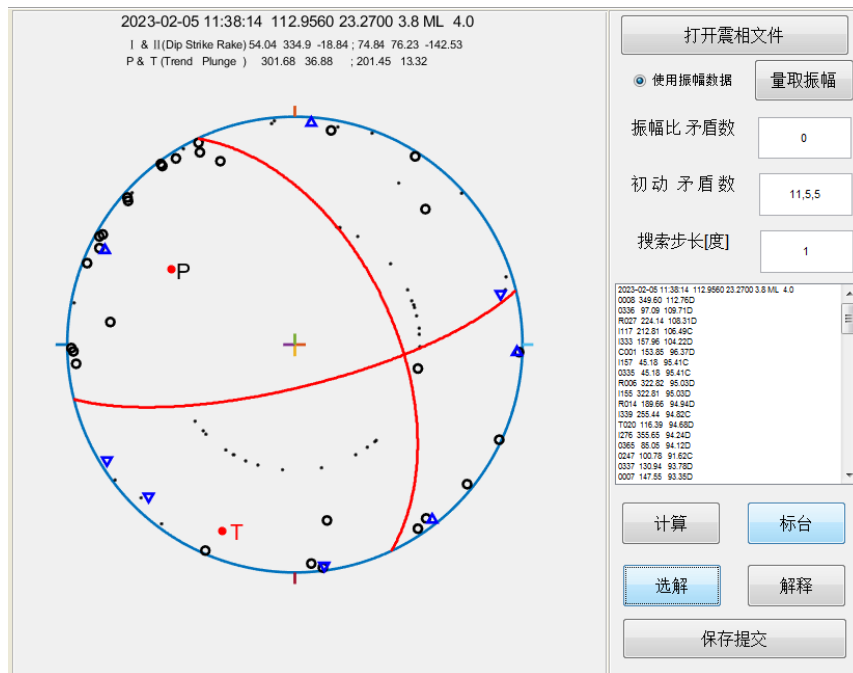
图6(b)震中距在200至300 km的台站垂向Pn对齐叠加(黑色为预处理后的波形,蓝色为叠加波形,红色为相关系数,频带:0.1~1.5 Hz)

图6 原始记录图中识别出的sPn(a)及台站(震中距200~300 km)垂向Pn的叠加图(b)  
Fig.6 sPn identified in the original record(a)and the overlay map of vertical Pn of stations  
(epicentral distance between 200 and 300 km km)(b)







图8 三水 $M_L$ 4.0级地震的震源机制解Fig.8 Focal mechanism solution of the Sanshui  $M_L$ 4.0 earthquake

活动,其活动性亦明显减弱。早第三纪的喷出岩比较广泛地见于三水狮山、南海市王借岗等地,其地表露头或地质钻探常显示属于基性的玄武岩被酸性或中性的粗面岩、安山岩所披覆,说明受上地幔上冲影响的火山岩活动已明显地随时间推移而减弱<sup>[22]</sup>。

震中区主要控制断层处于北西向西江断裂和白坭—沙湾断裂之间,被东西的广三断裂切割,见图9(a)。

西江断裂基本沿西江下游的北西向河道发育,南东段由磨刀门入南海,北西段可能沿绥江断续延伸至广宁、怀集一带,全长近200 km。断裂以九江为界,北西段基本沿西江右岸(西岸)发育,南东段则沿左岸(东岸)发育,总体产状是走向 $NW30^\circ \sim 50^\circ$ ,倾向NE,倾角大于 $70^\circ$ <sup>[23]</sup>。基于浅层地震探测,西江断裂未发现切穿第四系地层,该区已有第四系底部沉积物年龄40 000 a左右,可见,该断裂晚更新世中期以来(40 000.BP)未发生明显活动<sup>[23]</sup>。

白坭—沙湾断裂部分地控制了三水盆地及珠江三角洲第四纪沉积的北东边界。断裂北起花县白坭向南东经南海县官窑、松岗至番禺沙湾沿蕉门出伶仃洋断裂走向 $NW30^\circ \sim 40^\circ$ ,倾向SW,倾角大于 $50^\circ$ ,是一条第四纪以来活动的断裂<sup>[24-25]</sup>。

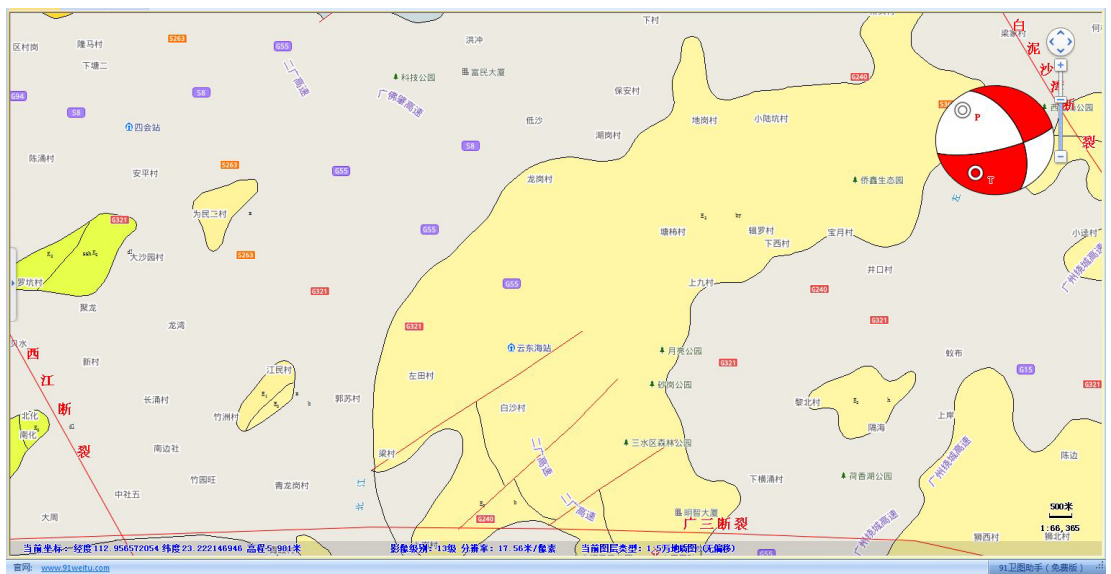
广州—三水隐伏断裂东段称罗浮山断裂(含瘦狗岭断裂)<sup>[26]</sup>。该断裂部分地控制了晚更新世以来

珠江三角洲的北界,沿断层岩石硅化、糜棱岩化、挤压破碎等。在广州以西至三水附近该断裂带虽然被第四纪沉积隐伏,但在MSS6波段的卫星像片上,该断裂以明显的东西向深色线性条带清晰地显示出来,并与三水以西的东西向断裂相连,说明了该断裂全新世以来的活动<sup>[25-26]</sup>。

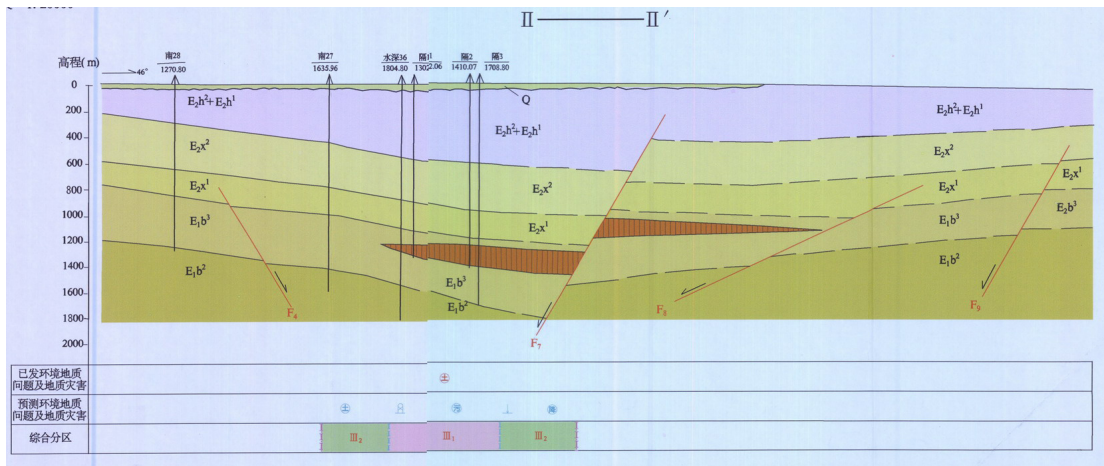
这次地震发生在三水区以北约20 km处的南边镇麦家村与隔坑村之间,靠近隔坑村一侧,从图7和图8看震中位于隔坑盐矿矿区北东边缘与F7断层交汇处。据广东省地质工程公司的技术报告,F7断层与白坭—沙湾断裂相距不足2 km,是一条正断层,其切割深度超过2 km,走向为 $NNW345^\circ$ ,倾向SW,倾角约 $50^\circ \sim 60^\circ$ <sup>[27]</sup>。与震源机制解的节面I吻合较好,据此推断本次地震应该是F7断层错动引起的,结合反演出滑动角认为其错动类型为:左旋走滑为主,兼少量正断。

## 4 结论及讨论

(1)1997年9月23日和26日隔坑村附近曾分别发生了 $M_L$ 3.3和 $M_L$ 4.4的地震,李纯清等人分析认为其震相特征与一般构造地震不同<sup>[28]</sup>,廖华康认为这两次三水地震,不可能是天然地震,极有可能是一场塌陷地震<sup>[29]</sup>。之后该区域的地震类型一直存在争议。直至本次地震发生后,利用近年来新建的密集观测站网收集到了丰富的波形资料,



(a)主要断裂分布



(b)矿体剖面图(据广东省地质工程公司,2007)

图9 三水 $M_L$ 4级地震震中附近的主要断裂分布

Fig.9 Distribution of main faults near the epicenter of the Sanshui  $M_L$ 4 earthquake

综合分析判断排除此次事件为塌陷、滑坡或爆破的可能。比较两次  $M_L$  4 以上地震在 XNH、ZHQ 和 HUD 三台的记录，发现相似度较高，相关系数分别是 0.90、0.89 和 0.73，它们应该是同类型地震。

(2)依据  $S_n$  与  $S_g$  走时曲线交点对应的震中距较大、近台视出射角以及较远台记录的  $sP_n$  与  $P_n$  的走时差变化等震相特征，修订了 2023 年 2 月 5 日广东三水  $M_L$  4.0 级地震的发震时刻和震源位置为：11:38:14.84，经度 112.958°N，纬度 23.270°E，深度 3.8 km，震级  $M_L$  4.0。震中位于隔坑盐矿矿区北东边缘与 F7 断层交汇处，由深度震相确定的深度比采盐井深 1 km 左右，距最近的隔 4 号开采井水平距离约 500 m。从空间范围上可以确定地震发在开采区，这是典型的与采矿活动密切相关的矿震地震<sup>[27]</sup>。

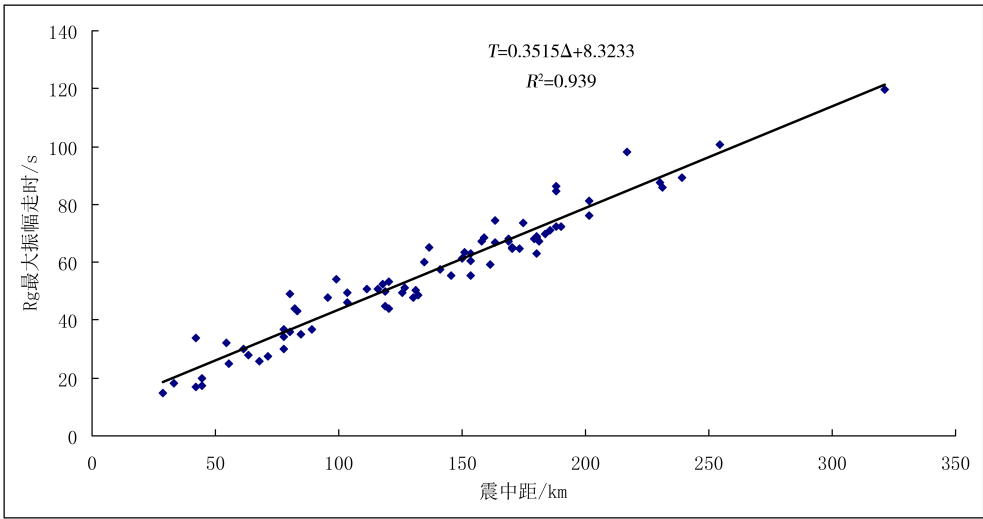
(3)结合震源机制和已探明的小区域地质构造资料，推断这次地震的发震构造走向为 334.90°，倾角为 54.04°，滑动角为 -18.84°，可能是 F7 断层沿断层面发生左旋走滑正断错动而引发的。长期的抽取卤水采盐，采空区应力变化引起矿体的应力分布会发生调整，沿 F7 断层的应力超过了其承载能力，就使上盘发生破裂和滑动，从而引发地震。魏柏林等人研究 1997 年 9 月 2 次三水地震认为地震的最大主压应力轴近于直立，与重力方向一致，产生的是塌陷地震<sup>[30]</sup>。我们研究结果似乎不全支持其结论，虽然都是沿 F7 断层滑动，但最大主压应力轴并非与重力方向一致，而是与该区域的主压力  $\sigma_1$  较一致，即是区域应力主控制下的矿体应力调整。重力主导下矿区应力调整产生的矿震应该多数是孤立的，与周边的中强震时空关系不明显，但区域应

力场控制下的调整则会与周边的中强震存在某种看似巧合的时空关系。

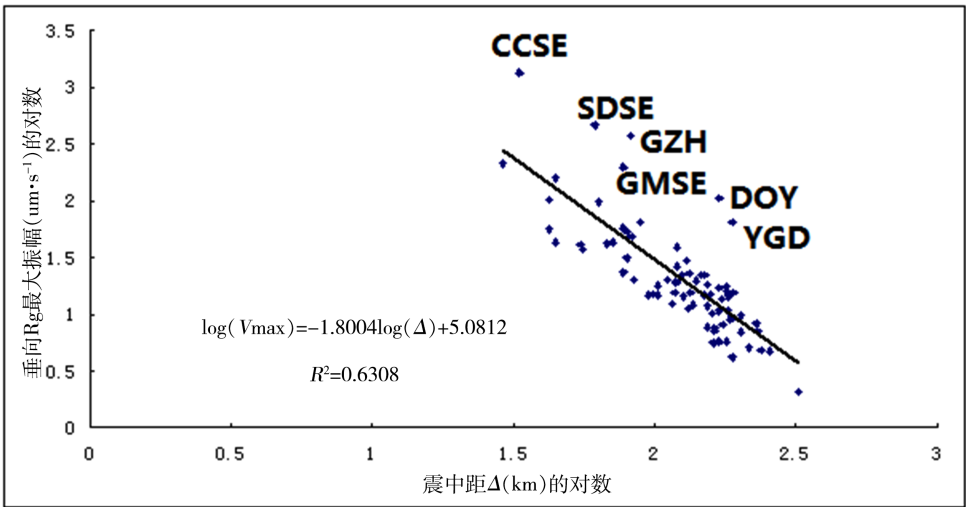
(4)深度为3.8 km是一次罕见的浅源地震。据广州市地震活断层探测与地震危险性评价时深反射地震勘探专题报告给出白坭—沙湾断裂附近的剖面浅部(4 km 以上)成层性较好,层位较多,地层结构简单,总体趋势为西高东低的单斜形态,岩性可能是沉积岩层。震源在沉积层产生的P波与SV波大于临界角入射,由P波与SV波耦合在自由地表形成的波动即为短周期的瑞利面波  $R_g$ ,从观测点的空间分布看  $R_g$  波的发育程度似乎还与震中

距和台站附近的沉积层厚度相关。本文初步分析广东地区  $R_g$  波的最大峰值的视速度(周期在1.1~1.5 s 间近似的群速度)约为2.85 km/s, 峰值振幅随震中距的衰减关系为:  $\log(V_{\max})=-1.8004\cdot\log(\Delta)+5.0812$ 。从三水地区的震例研究认为极浅源地震激发的  $R_g$  波是造成震级小、震中烈度高、破坏性大和选择性破坏明显为其特征<sup>[21]</sup>的主要因素,在采矿区附近或有定沉积层建设场地的抗震设防工作中应该给予足够的重视。

附 2023年2月5日三水  $M_L4.0$  级地震获取广东地区  $R_g$  波初步特征



附图1 广东三水地震的  $R_g$  波峰值速度对应走时随震中距变化  
Fig.1 Variation of travel time corresponding to peak velocity of  $R_g$  wave with epicentral distance of Sanshui earthquake, Guangdong



附图2 广东三水地震的  $R_g$  波垂向最大振幅随震中距变化  
Fig.2 The variation of vertical maximum amplitude of  $R_g$  wave with epicentral distance in Sanshui earthquake, Guangdong

参考文献

[1] 唐忠驭. 三水盆地隔坑岩盐矿开发前景[J]. 中国井矿盐, 1992,23(5):10-13.  
[2] 林庆西,梁明,杨选,等. 广东地震台网水平定位能力评估[J]. 华南地震, 2020,40(4):49-55.  
[3] 山长仑,张玲,李永红,等. 爆破短周期面波的分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2001,22(6):43-48.

- [4] 李稳. 地震波到时与视出射角联合定位方法研究[D]. 兰州: 中国地震局兰州地震研究所, 2008.
- [5] 傅淑芳, 刘宝诚. 地震学教程[M]. 北京: 地震出版社, 1991: 83-85.
- [6] 韩庆丑. 地震波真出射角及震源深度表[J]. 地震, 1981(5): 22-23.
- [7] 朱海林. 用视出射角法求震源深度的一种近似修正法[J]. 地震学刊, 1985(3): 33-38.
- [8] 范玉兰, 林纪曾, 胡瑞贺, 等. 华南地区近震走时表的研制[J]. 华南地震, 1990, 10(2): 1-16.
- [9] 马淑田(译), 郑斯华(校). 用模拟区域深度震相 sPg、sPmP 和 sPn 确定中小地震的震源深度[J]. 世界地震译丛, 2010(6): 51-73.
- [10] Saikia C. A method for path calibration using regional and teleseismic broadband seismograms: application to the 21 May 1997 Jabalpur, India earthquake ( $M_w 5.8$ ) [J]. Current Science, 2000, 79(9): 1301-1315.
- [11] 崇加军, 倪四道, 曾祥芳. sPL, 一个近距离确定震源深度的震相[J]. 地球物理学报, 2010, 53(11): 2620-2630.
- [12] 张诚. 地震分析基础[M]. 北京: 地震出版社, 1986.
- [13] 房明山, 杜安陆, 董孝平, 等. 用 sPn 震相测定近震震源深度[J]. 地震地磁观测与研究, 1995, 16(5): 13-18.
- [14] 任克新, 邹立晔, 刘瑞丰, 等. 用 sPn 计算内蒙地震的震源深度[J]. 地震地磁观测与研究, 2004, 25(2): 24-31.
- [15] 洪星, 叶雯燕, 邵平荣, 等. 台湾海峡南部一次 5.0 级地震的 sPn 震相分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2006, 27(1): 26-31.
- [16] 王登伟. 用 sPn 与 Pn 波走时差测定近震震源深度的方法[J]. 地震, 2011, 31(1): 12-19.
- [17] 蔡杏辉, 邵平荣. 中国台湾地区地震 sPn 震相分析及其震源深度计算[J]. 山西地震, 2011(1): 25-28.
- [18] 吴国瑞, 杨选, 姜喜娇, 等. 用 sPn 震相计算广东地区地震震源深度[J]. 华南地震, 2018, 38(S1): 74-80.
- [19] 张瑞青, 吴庆举, 李永华, 等. 汶川中强余震震源深度的确定及其意义[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2008, 38(10): 1234-1241.
- [20] 康英, 杨选, 陈杏, 等. 广东及邻区的应力场反演[J]. 地震学报, 2008, 30(1): 59-66105.
- [21] 徐起浩, 左开挺, 吴名彬, 等. 1997 年 9 月三水 4.4 级地震影响场与构造背景[J]. 华南地震, 1998, 18(1): 135-142.
- [22] 陈伟光, 魏柏林, 赵红梅, 等. 珠江三角洲地区新构造运动[J]. 华南地震, 2002, 22(1): 8-18.
- [23] 董好刚. 基于浅层地震勘探的西江断裂第四纪活动性研究[J]. 人民长江, 2016, 47(19): 42-47.
- [24] 梁干, 吴业彪. 广州市活断层探测与地震危险性评价[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [25] 王力伟, 张云鹏, 王伟涛, 等. 甲烷震源和密集台阵观测研究粤港澳大湾区中心城区浅部 P 波三维速度结构[J]. 地球物理学报, 2023, 66(11): 4582-4596.
- [26] 张虎男, 郭钦华, 陈伟光, 等. 西江断裂磨刀门段地质近期活动性研究[J]. 华南地震, 1990, 10(1): 15-26.
- [27] 张冰, 张广伟, 焦明若, 等. 基于密集台阵研究 2019 辽宁抚顺  $M_{2.4}$  矿震震源参数[J]. 地球物理学报, 2021, 64(4): 1227-1235.
- [28] 李纯清, 梁劳, 缪维城, 等. 1997 年 9 月三水地震震相特征与发震构造[J]. 华南地震, 1998, 18(1): 130-134.
- [29] 何宇扬. 佛山地震古迹新探——两“震”隔 3 天, 探究三水隔坑村地震之谜[N/OL]. 网易佛山, 2020-11-02[2023-8-30]. <https://gd.news.163.com/foshan/20/1102/11/FQE4T2R104179HUN.html?f=relatedArticle>
- [30] 魏柏林, 郭钦华, 李纯清, 等. 论三水地震的成因[J]. 中国地震, 1999, 15(3): 247-256.