卢国平，黄雷辉，陈幸莲，等 . 广西北流—广东化州 M_S 5.2 级地震前后阳江新洲深部地热关联地下水异常研究 [J]. 华南地震 , 2020, 40（2）:13-18. [LU Guoping, HUANG Leihui, CHEN Xinglian, et al. Guangdong Yangjiang's Xinzhou Groundwater Abnormal Well Water Relevant to Deep Geothermal System Prior to and post Guangxi's Beiliu-Guangdong's Huazhou 2019 M_S5.2 Earthquake [J]. South China Journal of Seismology, 2020, 40（2）:13-18]

广西北流—广东化州 M_S 5.2 级地震前后阳江新洲深部地热关联地下水异常研究

卢国平[1]，黄雷辉[2]，陈幸莲[3]，胡虹羽[1]，胡晓农[1]

（1. 暨南大学地下水与地球科学研究院，广州 510632；2. 广东省地球物理探矿大队，广州 510800；
3. 广东省阳江地震局，广东 阳江 529500）

摘要：介绍了广东阳江新洲地热田深部地下水关联井水显著异常，广西北流—广东化州 M_S 5.2 级地震发震前，新洲地热田监测井中两次延续数十小时的水位上涌现象，该现象解析是由于地热田东西向断层被挤压，引起深部地下水上升受阻而向地热田周边浅层地下水排泄，最终导致监测井中水位上涨。这意味着新洲地热田浅层地下水受深部地下水的影响，这种地下水体系对地应力活动引起的应变更敏感。研究结果对地震先兆、深部水文、深部地热均有参考意义。

关键词：地下水监测；地震先兆；断层；深部地热；广西地流—广东化州地震
中图分类号：P315.7　**文献标志码**：A　**文章编号**：1001-8662（2020）02-0013-06
DOI：10.13512/j.hndz.2020.02.02

Guangdong Yangjiang's Xinzhou Groundwater Abnormal Well Water Relevant to Deep Geothermal System Prior to and post Guangxi's Beiliu-Guangdong's Huazhou 2019 M_S 5.2 Earthquake

LU Guoping[1], HUANG Leihui[2], CHEN Xinglian[3], HU Hongyu[1], HU Xiaonong[1]

(1.*Institute of Groundwater and Earth Sciences*, *Jinan University*, *Guangzhou* 510632, *China*; 2.*Guangdong Provincial Geophysics and Deposit Exploration Brigade*, *Guangzhou* 510800, *China*; 3. *Yangjiang Seismic Bureau*, *Yangjiang* 529500, *China*)

Abstract: This paper introduced the significant abnormality of well water related to the Xinzhou geothermal field in Yangjiang, Guangdong. Before the Beiliu-Huazhou M_S 5.2 earthquake in the junction of Guangxi and Guangdong, the monitoring well in Xinzhou geothermal field recorded twice water-level upswellings, which lasted for several tens of hours. This phenomenon occurred probably as a result of squeezing in the east-west fault of the geothermal field, leading up to the deep groundwater to rise and being drained to the shallow groundwater

收稿日期：2020-01-30
基金项目：国家自然科学基金（41572241）；暨南大学教师启动资金联合资助。
作者简介：卢国平（1963- ），男，教授，博士，主要从事水文地质、深部水文及地热、地下水污染、热 - 水 - 力 - 化 THMC 耦合研究
E-mail：guopinglu@yahoo.com
通信作者：胡晓农（1962- 至今），男，教授，博士，主要从事水文地质、溶质迁移、地下水污染治理等研究。
E-mail：bill.x.hu@gmail.com

around the geothermal field, eventually surging of water levels in the monitoring well. This means that the shallow groundwater in the Xinzhou geothermal field is affected by the deep groundwater. This groundwater regime is particularly sensitive to strains due to in-situ geo-stress activities. The research results have implication significant for earthquake precursors, deep hydrology and deep geothermal.

Keywords: Ground water monitoring; Earthquake precursor; Fault; Deep geothermal; Beiliu-Huazhou earthquake

0 前言

震源隐伏在地壳深部，人们不可能直接进入也不可直接观测地球深部，造成地震认识的极大困难 [1-2]。大地震造成的重大人员伤亡和财产损失，对地震预测提出了迫切要求。然而，地震预测至今仍然是公认的世界性科学难题 [3-5]。

地震是由地球内岩石的突然断裂或摩擦滑动引起的。地震发生的时候，岩石破裂地表断裂，发出地震波 [6-7]，困住在岩石中的应力突然释放 [8]。在断裂滑动的过程中，断层带上产生高温高压条件可以形成长石纳米晶体。在缺乏断层滑动的地震中如隐爆型古地震震源，隐爆时估计静岩压力 286 MPa，温度在 247 ºC ~468ºC[9]。类似的摩擦高温热分解，可出现在高速远程类型的滑坡，过程中既引发高速滑动又产生超前气浪 (冲击波)。重庆武隆县铁矿乡鸡尾山滑坡 2009 年 6 月 5 日高速滑动，底部摩擦温度可达 790ºC，产生高温热分解，滑石高温分解产生顽火辉石 [10]。

地球上约 90％的地震和破坏性最大的地震都属于 “ 构造成因地震 ”(或 “ 构造地震 ”、“ 断层地震 ”)[11]。非构造成因地震包括相变地震 [12]，地幔对流地震 [13]，温度应力地震 [14]，火山地震等。

构造地震成因理论已被主流接受，但地震预测一直未能实现。非构造地震成因和在此基础之上的地震预测途径缺少依据 [9]。

对比地震发生时能量释放，震前能量积聚也是应力应变、热力、地下裂隙孔隙水即空隙水、物理化学因素状态改变过程。其中空隙水的变化往往是区域应力变化缘故，因为应力作用使得矿物基质及裂隙介质骨架发生形变，从而使空隙水发生变化。因此，地下水变化是地震先兆反映。我国成功捕捉地震前兆并预测地震的是 1975 年海城地震，震中附近地下水位升高或降低发生地点在时间上由先到后规律性往震中方向逼近 [15]；但对于逐个井位的水位升降特定原因不明，地下水作用的整体原理也缺乏了解。

广西北流 — 广东化州地震震级 M_S5.2，发震时间是 2019 年 10 月 12 日。发震构造为北西向巴马 — 博白断裂。震前在化州地区出现重力异常变化 [16]。

本论文研究广西北流 — 广东化州地震引发的地下水动态异常，解析为什么地热田关联井孔更有可能指示深部水文环境条件，从而反映地应力作用程度，以便更好了解地震孕育过程中发生的地下水环境与变化，为地震先兆与预测研究提供科学例子与数据。

本论文采用的研究方法是地下水实际观测与异常成因讨论，建立地下水位升高与震前地应力因素的关系。广东省阳江市新洲地热田的关联地下水井，安置有水位仪监测，取得密集间隔的数据序列；本研究对有关数据序列进行讨论，并对水位异常提出概念模型。

本研究是首次探讨深部地热田关联地下水异常作为地震先兆，提出地应力作用影响深部地下水流动，从而引起浅层地下水的变化。本文提出深部水文力学效应机制，深部地下水受地震活动影响敏感，通过断裂影响浅层地下水动态，意义涵及深部水文学、深部地热、地震先兆。

1 场地背景

本研究场地是广东省阳江市新洲地热田 (图 1)。该场地基底是燕山期花岗岩岩基，场地北西侧边缘与山上震旦系岩系接触。横穿场地有近东西向延伸向南倾斜高角度断层。该断层在场地东头出露地表，排泄地热水，形成冒水池。

新洲地热田天然地热水早期成片出露，形成泽地。在 1983 年有详细勘探工作，实施有若干钻探井孔排泄热水 [17]；后来增加 2 个浅孔，其中 1 孔揭露达 1000 m^3/d 的流量，孔口溢流温度达 98ºC。2013 年新增一个千米钻孔，穿过上述地热田断层，在 750 m 深处截取断层带地热水 [18-19]。该场地断层构成地热水快速流动通道 [20]。

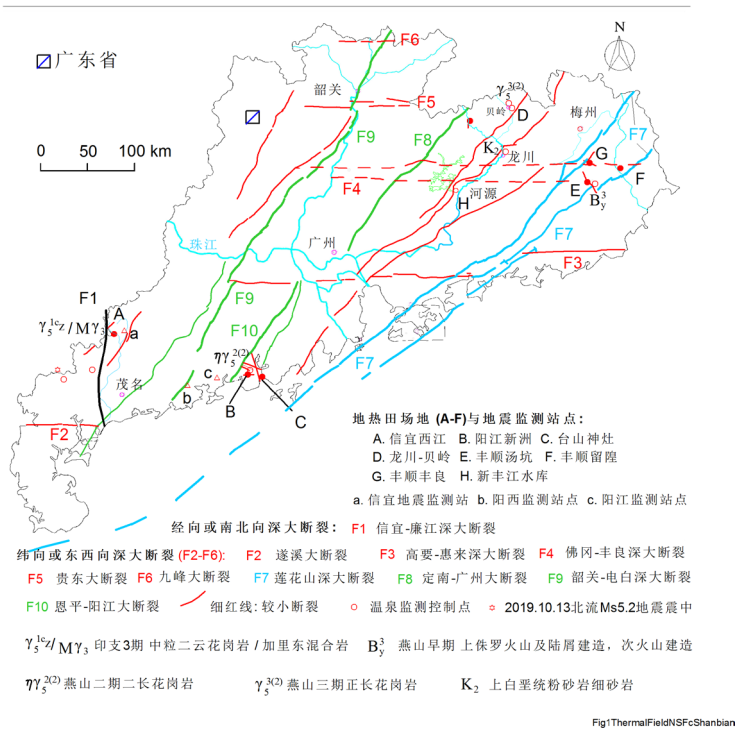


图 1 广东省典型深大断裂地热田新洲温泉位置示意图 [21-22]

Fig.1 Location map for Xinzhou geothermal spring in the typical deep fault geothermal fields, Guangdong Province[21-22]

2 方法或手段

水位监测井位于地热田场地北侧山脚。水位监测采用美国 HOBO 水位计 U20 系列探头。压力精度 1 Pa，温度精度 0.001°C。监测设定时间间隔为 10 min。监测起始时间为 2019 年 8 月 31 日。探头放置于井底，有外层夹套塑料硬壳保护，以免井底淤积物堵塞探头孔眼。

3 结果

监测井水位数据显示震前两次水位上涌 (图 2)。第一次 2019 年 9 月 14 日的上涌峰值拔高 4.0 kPa，第二次 2019 年 10 月 7 日峰值拔高 5.5 kPa。第一次 9 月 14 日的上涌时长 34 h，第二次稍长达 40 h。以广西北流—广东化州 M_S 5.2 级地震发地震时间 (2019 年 10 月 12 日 22:55) 计算 [16]，第一次上涌在震前 27 d，第二次在震前 5 d。

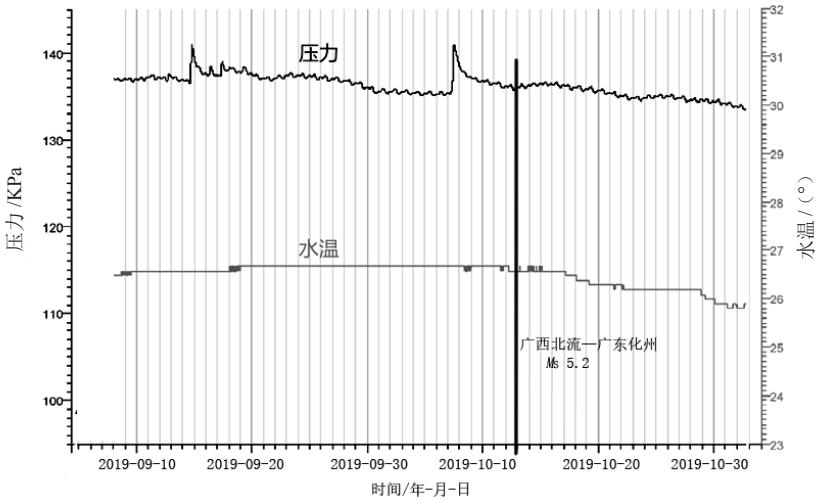


图 2 广东省新洲地热田关联井水水位异常监测结果。

Fig.2 Monitoring results for the ground water abnormality at shallow well relevant to Xinzhou geothermal field of Guangdong Province

地下水上涌形成不对称波峰，水位变化具有对数正态分布的特点。上涌曲线上升段均变化陡峭，下降段较缓而且回落终点水位比上涌始点的水位高。

震前相对应的水温响应是总体上升 0.3ºC。在第二次水位上涌的下落时段，有约 12 h 的 0.1ºC 小幅温度下降。直至震前约 8 h，有一次约 4 h 类似温度下降。

发震前约 2 h 水位指示局部最小值，发震后缓慢微弱上升并在 2 d 后达到局部小峰值，接着震后水位则显示缓慢下降趋势，一周后无明显累计下降。与此对应，水温在发震前约 13 h 即出现下降，在发震前水温已下降 0.2℃。发震后的 7 d 时段，水温下降约 0.5℃，降幅明显。

4 讨论

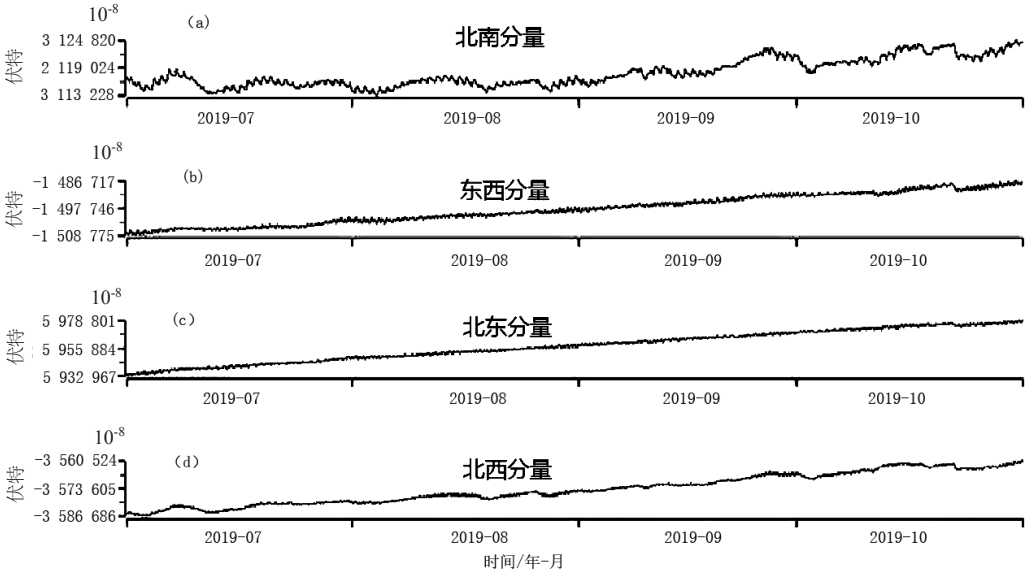
广东新洲地热田有条件接受区域应力应变而改变深部水文状态环境。来自北西方向区域地应力形变作用，有利于对地热田内东西走向断层产生效应，继而引起地热田深部水文响应，从而影响浅层地下水。有关区域性环境条件及地热田体系的特征与地震前兆的联系讨论如下。

4.1 区域地应力作用

广东省信宜地震台 (图 1) 地应力观测表明，粤西地区地壳应变有增加的趋势，主要表现在北东向稳定增加与北向有跳跃式逐渐上升 (图 3)。该北东向应变程度远远大于北向，因此应变的主方向为北北东方向。

该北北东主应变方向，大致平行信宜 — 廉江深大断裂 [23] 走向，但却指向震中以东地区，可能相对震中及发震构造巴马 — 博白深大断裂形成一定扭矩作用 [16]。信宜地震台 (图 1) 相距震中大约 35 km，能够近似北流地震震中近邻地区的地壳应变。

新洲地热田的断裂呈东西走向，与北西向区域主应力方向构成压缩 — 剪切条件。对于地热田张性断裂，压缩 — 剪切起到缩小断层破裂面间距作用，因而影响地下水循环流动。



（数据来源于广东省信宜地震台 RZB 型电容式钻孔应变仪）

图 3 广东省信宜地壳应变观测数据

Fig.3 Crustal strain observation data in Xinyi, Guangdong

4.2 深部地热水循环与浅层地下水

广东阳江新洲地热田 (图 1) 地热水体系的等势测压水位面呈穹隆状 [18-19]。穹隆面在地热田中部塔井为顶点，高出地面 7.5 m，而在东部的冒水池水面在地面下约一米多，而在本文的监测井冷水水位埋深则可达 5 m 多。穹隆面上每点的水位相同，因此，地热井水位降低，冷水井地下水可以向地热田中部流动；反之，地热田中部压力增大，地热田地热水往冷水井流动。

监测井冷水水位出现上涌，是由于深部地下水压力。受到区域地应力影响，深部地下水

遭受挤压而压力上升。另一种解释是断层受到地应力而压缩，流动通道变窄，地下水压力增大。地下水受到挤压和流动通道变窄都合理解释监测井地下水上涌。

4.3 地下水水位异常与水温

观测井对应温度变化是有微弱的升高，在异常时段总体升幅大约为 0.2°C。升幅不突出，但是升高趋势明显。该时段大气温度呈下降的趋势，从 8 月 10 日的日平均气温 31.9°C 到 25.1°C。该监测井井筒口径达 0.65 m 宽，从水面到井底水柱达 3.7 m，对温度有明显缓冲作用。

对地热田地下水流，地热水对围岩压力的变化尤其敏感。地应力增加，使得断层受到压缩，导水通道受到挤压。因此，地热水的上升受到阻碍而四周发散流动加强。换句话来说，地热田边缘受到地热水的影响增加，温度有所上升，对浅层地下水顶托或甚至补给。地热水处于上覆浅层地下冷水的下方，处于不稳定状态。在此过程中，地热水中上升后压力降低，溶解于其中气体成分释放成气相。气体积聚到一定程度后与地下水一起上涌排泄到井孔中。

地热水上升到浅层部位，停留若干天时间之后，温度差别明显消失[18]。这解析为什么上涌的地下水没有显示显著的增加。这有别于一般的地下水受地震活动影响而温度有所增加的情形[24-25]。

4.4 深部地下水与地震先兆关联灾害研究

本文讨论的浅层地下水水位变化直接受深大断裂地热水的控制。新洲地热田深部地热水体系受地壳深部高温软流圈带的热力的影响[19]。热力作用使得深部地热水在浮力的驱动下沿断裂带这样的优先流动通道快速上升。

在应力变动的条件下，地热水的水位变动尤为明显。对深度达 500 m 的地热水体系，累加效应使得浮力发生显著变化[18]。这也是地热水与冷水的明显差别之处。

对于观测到的上涌水量，有待通过水文地质试验确定。水文地质试验可以是抽水试验或注水试验。有关试验可以确定地下水变化具有可观测性的水文地质环境条件。换句话说，地下水异常出现要求满足什么水文地质体系特征。

5 结语

本文讨论广西北流 — 广东化州 M_S 5.2 级地震前，广东阳江新洲地热田关联井水位的异常情况。研究结果表明：水位异常说明深部水文环境状态改变，导致浅层地下水改变。广西北流 — 广东化州 M_S 5.2 级地震发震前北西向的应力积聚影响新洲地热田东西向断层导水，引起浅层地下水受到增强的深层地下水上升流动所影响而导致井水位升高。表明井孔地下水位动态受深部水文地质体系影响，深部水文状态条件受到地应力作用而改变，因此合适布置的井孔能够监测地下水的地震先兆信号。目前缺乏该井孔的水文地质参数，待在将来工作实现水文地质试验补充。

参考文献：

[1] 陈学忠 . 对地震预测有关问题的看法 [J]. 国际地震动态 , 2010(2) : 8-12.

[2] 滕吉文 . 地震预测存在三大困难 [N]. 科学时报 , 2008-05-26.

[3] Geller , R.J., D.D. Jackson , Y.Y. Kagan, et al. Earthquakes cannot be predicted[J]. Science , 1997, 275: 1616-1617.

[4] 丁鉴海，卢振业，余素荣. 地震地磁学概论 [M]. 合肥：中国科学技术大学出版社 , 2011.

[5] 杨马陵，丰晓，万永芳，等 . 1999 年河源 2 次 4 ～ 5 级地震的中短期前兆异常及其思考 [J]. 华南地震 , 2003 , 23(3) : 16-24.

[6] Kolsky, H.. Stress waves in solids[J]. Journal of Sound and Vibration , 1964, 1(1) : 88-110.

[7] Zhang , Zongxian. Rock fracture and blasting[M]. Butterworth-Heinemann : Elsevier , 2016.

[8] Shelly , David R.. Complexity of the deep San Andreas fault zone defined by cascading tremor[J]. Nature Geoscience , 2015 , 8(2) : 145-151.

[9] 陈志耕 . 东秦岭 216.8*M*a 前 7.0 级隐爆成因大地震的震源遗迹 [J]. 地质学报 , 2015 , 89(8) : 1495-1529.

[10] Hu , W., R.Q. Huang , M. McSaveney , et al. Mineral changes quantify frictional heating during a large low-friction landslide[J]. Geology , 2018 , 46(3) : 223-226.

[11] 陈运泰，吴忠良，吕苑苑. 地震的分类 [J]. 城市与减灾 , 2003(1) : 13-15.

[12] Evison , F. F.. Earthquakes and fault[J]. BSSA , 1963 , 5: 873-892.

[13] Sornette , D.. Earthquakes from chemical alteration to mechanical rupture[J]. Physics Reports, 1998, 313(5) : 237-291.

[14] Zoback , M D, M L Zoback , V S Mount , et al. New evidence on the state of stress of the San Andreas fault zone[J].Science, 1987, 238: 1105-1111.

[15] 杨成双 .1975 年海城地震前地下水异常的时空分布 [J]. 地震学报 , 1982, 4（1）:84-89.

[16] BI Lisi, LU Banghua, YANG Xuan, et al. Study of the Seismogenic structure of the M_S5.2 Beiliu Earthquake[J]. Earthquake Research in China , 2020 , 34（2）:227-239.

[17] Liang, C.S.. Geochemical characteristics of Xinzhou geothermal field, Guangdong Province[J]. Guangdong Geol. 1993, 8（3）:55–61（in Chinese）.

[18] Lu Guoping , Xiao Wang , Fusi Li , et al. Deep geothermal processes acting on faults and solid tides in coastal Xinzhou geothermal field , Guangdong , China[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors , 2017 , 264: 76–88. http://dx.doi.org/10.1016/j.pepi.2016.12.004.

[19] 王焰新，杜海燕，祁士华，等 . 珠江三角洲及周边地区控热构造调查报告 [D]. 北京 : 中国地质调查局项目 , 2015.

[20] Chunmiao Zheng, Gordon D. Bennett. 地下水污染物迁移模拟 [M]. 孙晋玉，卢国平，译 . 北京 : 高等教育出版社 , 2010.

[21] 广东省地质矿产局区域地质调查队 . 广东省地质构造图一比一百万附图 [M]. 北京 : 地质出版社 , 1988.

[22] 中国科学院地质所 . 中国大地构造概要之中国主要构造体系图 1:1200 万 [M]. 北京 : 地图出版社 1959

[23] Lu , G.P., Liu , R.F.. Aqueous chemistry of typical geothermal springs with deep faults in Xinyi and Fengshun in Guangdong Province[J]. China. J. Earth Sci, 2015, 26（1）, 60−72.

[24] 王广才，沈照理 . 地震地下水动态监测与地震预测 [J]. 自然杂志 , 2010,（02）:90-93.

[25] Wang , G. C., Zhang , Z. C., Wang , M. Implications of ground water chemistry and flow patterns for earthquake studies[J]. Ground Water , 2005 , 43（4）:478−484.

华南地区地震目录（M_L≥3.0，2020-01~2020-06）

发震时间						震中位置			震级 /	震源深度
年	月	日	时	分	秒	北纬	东经	地点	M_L	km
2020	01	05	06	55	37	22°05′	113°52′	广东珠海海域	4.0	15
2020	01	20	04	17	11	23°51′	116°01′	广东丰顺	4.2	7
2020	01	20	04	28	01	23°51′	116°01′	广东丰顺	3.0	8
2020	01	27	16	40	28	21°44′	111°49′	广东阳江	3.0	13
2020	02	05	10	03	19	23°19′	118°35′	台湾海峡	3.3	9
2020	02	06	12	23	38	21°56′	119°21′	南海	3.5	27
2020	02	14	06	18	37	22°55′	106°43′	广西大新	3.0	6
2020	02	15	21	31	07	24°45′	119°48′	福建莆田海域	3.3	7
2020	02	19	17	27	02	22°55′	106°43′	广西大新	3.3	6
2020	03	13	11	30	24	23°23′	118°37′	台湾海峡	4.0	11
2020	03	16	15	23	25	24°40′	104°54′	广西隆林	3.1	6
2020	03	24	16	20	53	20°02′	113°04′	南海	4.0	19
2020	03	29	19	31	07	23°51′	116°02′	广东丰顺	3.0	7
2020	04	01	22	06	02	23°51′	116°01′	广东丰顺	3.2	7
2020	04	23	09	56	49	24°02′	137°07′	广东英德	3.1	10
2020	04	25	08	26	31	23°22′	118°29′	台湾海峡	3.4	10
2020	04	26	11	15	09	23°22′	118°30′	台湾海峡	3.2	6
2020	04	28	06	51	37	25°14′	115°31′	江西安远	3.3	8
2020	05	06	03	03	00	22°56′	106°43′	广西大新	3.3	6
2020	05	22	22	40	36	23°55′	114°28′	广东东源	3.3	9
2020	05	25	11	24	49	23°52′	116°02′	广东丰顺	3.6	7
2020	05	28	21	20	03	23°52′	118°20′	福建漳浦海域	3.1	8
2020	06	03	06	53	26	27°16′	111°41′	湖南邵东	3.3	7
2020	06	15	04	11	35	24°50′	114°48′	江西龙南	3.1	6
2020	06	23	16	08	48	25°11′	110°00′	广西临桂	3.0	7
2020	06	27	01	00	15	23°11′	106°10′	广西靖西	3.1	9
2020	06	30	16	33	19	25°02′	113°09′	广东乳源	3.0	10