

# 粤中隐伏岩体区地热赋存特征及热异常成因分析

甘浩男<sup>1,2)</sup>, 蔺文静<sup>1,2)</sup>, 闫晓雪<sup>1,2)</sup>, 岳高凡<sup>1,2)</sup>, 张薇<sup>1,2)</sup>, 王贵玲<sup>1,2)</sup>

1) 自然资源部地热与干热岩勘查开发技术创新中心, 石家庄, 050000;

2) 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄, 050000

**内容提要:**地热资源的本质是能量的表现形式,资源的赋存过程,本质上是地球内部热量向地表传递的过程。东南沿海地区是我国重要的地热活动区,但东南沿海地温场分布特征如何,以及热传递的介质物性如何响应地温场的分布尚未有结论。本文通过对在从化—永汉地区采集的地热水和地下冷水样品分析,结果表明研究区地下水普遍具有偏碱性、溶解氧含量低、相对地下冷水偏还原环境的特点,热水水化学类型以  $\text{Na-HCO}_3$  和  $\text{Ca} \cdot \text{Na-HCO}_3$  为主,热储温度范围为  $83 \sim 146^\circ\text{C}$ 。总结了从化—永汉地区的水热成因模式,周边低山区的大气降水渗入地下后沿断裂向深部运移,并不断接受来自地球深部地幔热量和花岗岩中放射性元素衰变产生的热量,与围岩热交换并升温,热水以北西向断裂与北东向主干断裂交汇部位作为升流通道向上运移,出露地表或被钻孔揭露形成温泉或地热井。结合东南沿海莫霍面埋深、酸性岩体分布和岩石圈结构等区域地质地球物理背景条件分析,菲律宾板块的NW向挤压作用对包括研究区在内的东南沿海地区地热系统的形成起到了重要作用。本文研究可为今后东南沿海地区地热资源勘查评价提供基础依据。

**关键词:** 水热活动;从化—永汉地区;热储温度;成因分析

地热异常成因是地热资源调查研究的关键问题之一(Chen Moxiang et al., 1995; Hu Shengbiao et al., 2013; Lin Wenjing et al., 2013)。东南沿海地区是我国改革开放的前哨,能源消费所占全国比重很大,但地热资源十分丰富,具有良好的勘查开发前景(Li Fu, 2010; Lin Wenjing et al., 2016)。前人学者对于东南沿海地区广泛分布的水热系统开展了构造地质、地球物理、水文地质和同位素地球化学等方面的众多研究,基本形成共识,认为东南沿海典型裂隙水热系统主要表现为低渗透性花岗岩基底中发育断裂,大气降水通过断裂深循环加热并升流至地表的模式(Pang Zhonghe, 1987; Han Qingzhi et al., 1988; Xiong Liangping, 1990; Hu Shengbiao et al., 1990; Liao Zhijie, 2012; Lin Wenjing et al., 2013, 2016; Gan et al., 2017; 2019)。

从化—永汉地区温泉广泛出露,在大地构造背

景、基础地质、水文地质和地热地质等方面,具备一定的研究基础。Yuan Jianfei (2013)对粤西和粤东沿海地下水、地表水、地下热水等水化学和同位素特征进行了研究,初步总结了流体的主要离子含量、空间分布和影响水化学过程的因素。Zhou Haiyan et al. (2007, 2008)分析了从化地热田热水的水化学特征,认为研究区热水具有滞留时间短,循环快的特点。Ye Qing (2012)根据从化新温泉区热水地球化学资料进行了锶氢测年、热储温度估算、补给高程计算和地下热水循环深度计算,得到从化新温泉地下热水年龄为 40 a 左右,热储温度  $80.38 \sim 86.12^\circ\text{C}$ ,补给高程约 533m,地下热水循环深度为 1483~1626 m。Yan Xiaoxue (2019)将从化热田与惠州黄沙洞地热田进行了对比,分析了研究区热水的补给来源及其经历的深部地热过程。然而前人主要集中在对从化地热田的水化学特征热储温度估

注:本文为中国地质科学院基本科研业务费项目(编号 SK201906)和中国地质调查项目(编号 DD20190128、DD20160191)资助的成果。

收稿日期:2020-05-08;改回日期:2020-05-13;网络发表日期:2020-05-19;责任编辑:邱楠生;责任编辑:周健。

作者简介:甘浩男,男,1988年生。助理研究员,从事东南沿海地热资源勘查及岩石圈热结构研究。Email:348008416@qq.com。通讯作者:王贵玲,男,1964年生。研究员,俄罗斯自然科学院外籍院士,长期从事地热资源的探测、评价与开发利用研究。Email:guilingw@163.com。

**引用本文:** 甘浩男, 蔺文静, 闫晓雪, 岳高凡, 张薇, 王贵玲. 2020. 粤中隐伏岩体区地热赋存特征及热异常成因分析. 地质学报, 94(7): 2096~2106, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020215.

Gan Haonan, Lin Wenjing, Yan Xiaoxue, Yue Gaofan, Zhang Wei, Wang Guiling. 2020. Analysis of geothermal occurrence characteristics and origin of the thermal anomalies in the hidden igneous rock area in the central Guangdong. Acta Geologica Sinica, 94(7): 2096~2106.

算等研究,对于从化—永汉整个区域内水热活动特征和热异常成因机制方面仍存在欠缺。本文分析了从化—永汉地区地热资源的赋存背景,总结了粤中典型隐伏岩体区的地热资源水热活动、水化学特征和热异常分析,为今后东南沿海地区地热资源勘查评价提供基础依据。

## 1 地质构造背景

地热、地震、火山以及断裂的分布,都严格受控于大地构造特征,东南沿海地区也不例外。东南沿海位于亚洲大陆东部边缘南段,全区分布有大量的晚中生代火山-侵入杂岩,是濒太平洋地区构造-岩浆带的重要组成部分(Li Xianhua et al., 2003)。晚中生代以来太平洋板块俯冲以及菲律宾板块的碰撞对控制整个亚洲大陆东部的古新世以至第四纪岩浆-火山活动至关重要(Zhou Xinmin et al., 2000; Guo et al., 2019),这直接关系到东南沿海地区是否具有类似台湾的高温地热资源。Faure et al. (2017)认为东亚地区晚中生代俯冲带的位置在日本中央构造线—台湾纵谷带—菲律宾民都洛—巴拉望带(图 1)。现今台湾海峡地区 P 波层析成像的结果证明,现今东南沿海地区以欧亚大陆与菲律宾板

的碰撞挤压作用为主(Zheng et al., 2013)。

研究区位于粤中部佛冈岩体地区,地热异常区主体位于燕山晚期花岗岩体中,主要出露地层为第四纪砂土沉积与残积层、晚中生代沉积岩层和燕山晚期岩体,研究区内白垩纪至更新世地层全部缺失,侏罗纪至白垩纪时期酸性岩体广泛分布(图 2)。

## 2 样品采集与测试

2017 年 6~9 月对粤中从化—永汉地区进行野外勘查和系统采样(图 2),选取天然出露温泉、地热井及冷水井/泉为研究对象,采样时,水温和 pH 值采用便携式测定仪器现场测定。用于 SiO<sub>2</sub> 测定的水样,采集后立即稀释 5 倍,置于 100 mL 聚乙烯瓶中保存待测。用于其他测试的水样,先用 0.45 μm 的微孔滤膜进行抽滤,去除水样中的悬浮物,然后分别装入 3 个用去离子水润洗两遍并干燥的 100 mL 聚乙烯瓶中,水样必须装满采样瓶,防止气体进入,向其中一个水样瓶中加入 14 mol/L 的纯硝酸试剂直至水样 pH 值低于 2.0,此水样用于常规阳离子和微量金属元素测试;其他两个采样瓶中不添加任何试剂,用于无机阴离子的测定。样品采集完后在 4℃ 环境中保存并于 2 周内完成测试。样品测试完

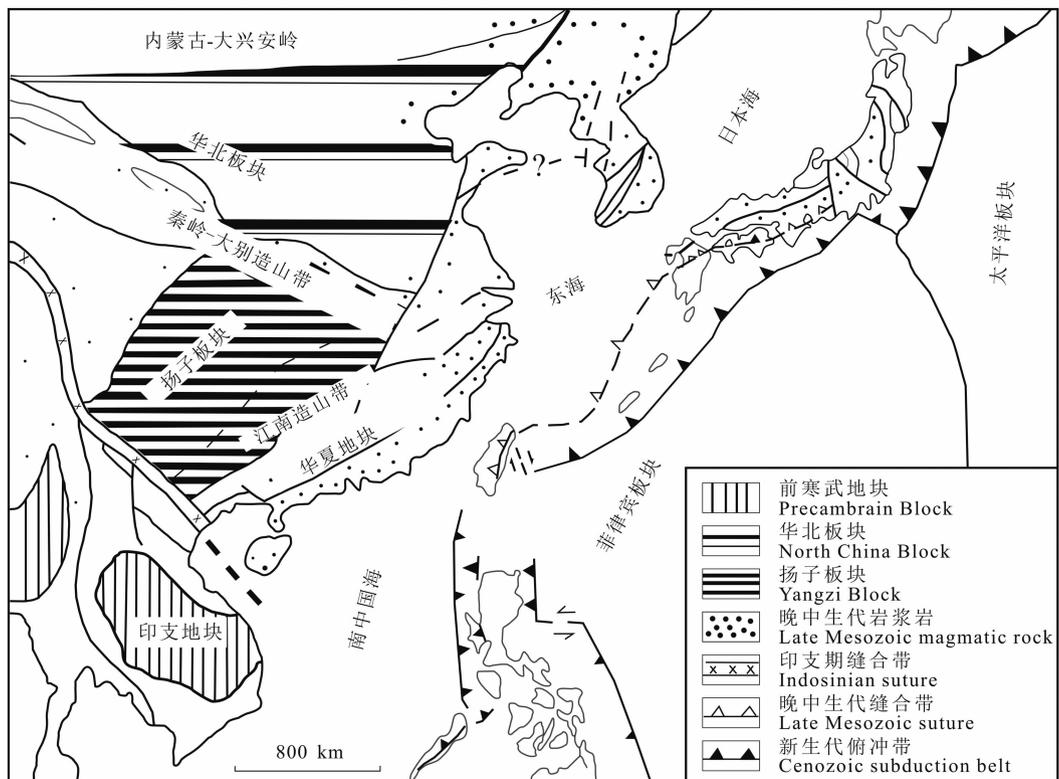


图 1 亚洲东部构造框架图(据 Faure et al., 2017 修改)

Fig. 1 Tectonic structure map of East Asia(modified from Faure et al., 2017)

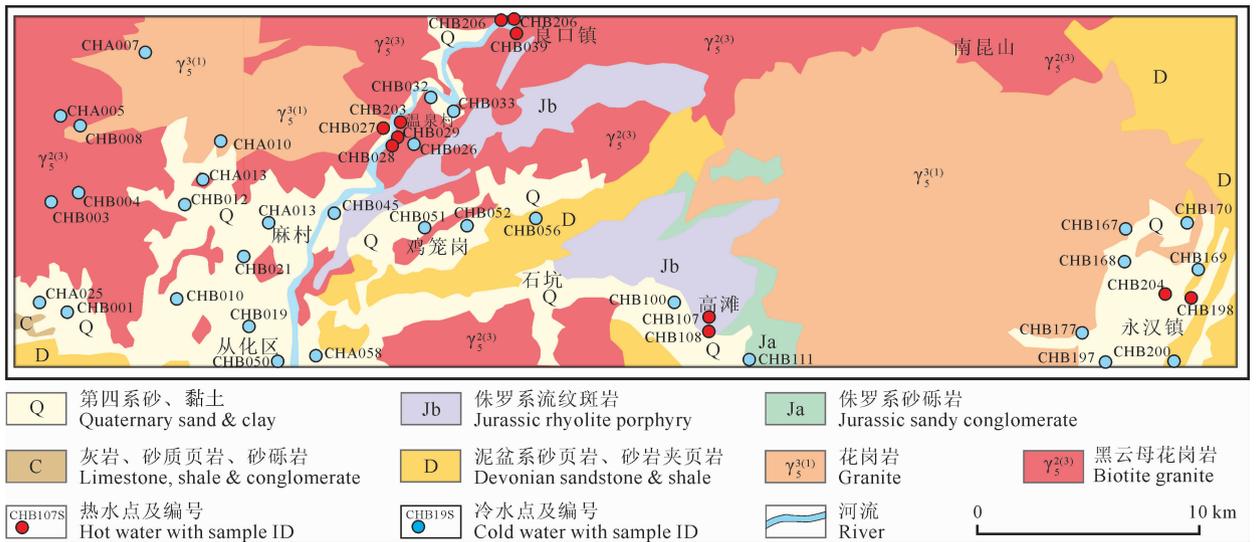


图2 从化—永汉地区地质简图(据 Yan Xiaoxue et al., 2019 修改)

Fig. 2 Simplified geological map of Conghua-Yonghan area (modified from Yan Xiaoxue et al., 2019)

成于国土资源部地下水科学与工程重点实验室。

主要阳离子的含量采用电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES)(ICAP-6300)来测定,微量元素的含量采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS 7500C)来测定,主要阴离子的含量采用离子色谱仪(DX-120)来测定。对本次收集的地下热水水化学数据进行阴阳离子平衡检验,误差均在 $\pm 5\%$ 范围内,多数在 $\pm 2\%$ 范围内,可保证数据的可靠性。具体取样检测方法见 GB8535-2008(饮用天然矿泉水检验方法)、DZ/T0064-93(地下水水质检验方法)以及 GB/T5750-2006(生活饮用水标准检验方法)。采集样品的温度及测试结果见表1。

### 3 水热活动特征

#### 3.1 浅层水热特征

从研究区温泉、冷泉、地热井和机民井调查的现场测试结果(表1),进行投点,利用 surfer8 软件进行处理,生成温度(T)、pH、溶解氧(DO)、氧化还原电位(Eh)及 TDS 系列等值线图(图3)。从出口温度等值线图上看,高温区域主要集中在从化以北至南昆山—永汉一带,由出露的温泉/地热井控制;研究区 pH 值分布与出口温度近似一致,说明 pH 值与地下水温度具有正相关性。研究区内地下水溶解氧高值区出现在从化东北部以及南昆山—永汉镇地区,与地热异常区分布相近,最高值可达 8.41mg/L;氧化还原电位最高值为 300mV,氧化还原电位的低值区往往对应着 pH 值的高值区,这点从 pH-Eh 对比曲线上可以看出,氧化还原电位与 pH 值呈

明显负相关性。研究区地下水溶解性总固体(TDS)含量介于 28~411mg/L,变化相对较大。地下热水相对冷水并未普遍具有更高的 TDS 值,而是 TDS 值与溶解氧含量具有较明显的负相关性,即溶解氧含量高地区,往往溶解性总固体含量偏低。

联合多参数等值线图总结出,研究区地下热水普遍具有偏碱性、溶解氧含量低、相对地下冷水偏还原环境(仍属于氧化环境)的特点。

#### 3.2 水化学特征

将研究区内所采集的水样按其主要组分 K、Na、Ca、Mg、 $\text{SO}_4$ 、Cl、 $\text{HCO}_3$  的毫克当量百分比投影到 Piper 图解(表1,图4),对其水化学类型进行分类。热水温度  $40^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$ , TDS 平均为 178mg/L,非热水中平均为 94mg/L, TDS 值与深度成正比例,说明水岩作用随深度的增加而更加充分。热水水样中阳离子以  $\text{Na}^+$  为主,阴离子以  $\text{HCO}_3^-$  为主,仅在部分埋藏较浅的热水中存在相当数量的  $\text{Ca}^{2+}$ ,可能是受与浅部冷水混合作用的影响。冷水中阳离子以  $\text{Ca}^{2+}$  为主,阴离子以  $\text{HCO}_3^-$  为主。热水水化学类型以 Na- $\text{HCO}_3$  和 Ca·Na- $\text{HCO}_3$  为主,冷水水化学类型主要为 Ca- $\text{HCO}_3$  和 Ca·Na- $\text{HCO}_3$ 。

#### 3.3 热储温度

##### 3.3.1 热储温度计算温标判别

地热地球化学方法是热储温度计算的有效手段,目前有多种方法可用于热田的深部热储温度计算,包括阳离子温标法和硅温标法等。其中,阳离子温标法需要地热流体达到水岩平衡,且避免海水等富含离子成分流体混入的影响。根据从化—永汉地

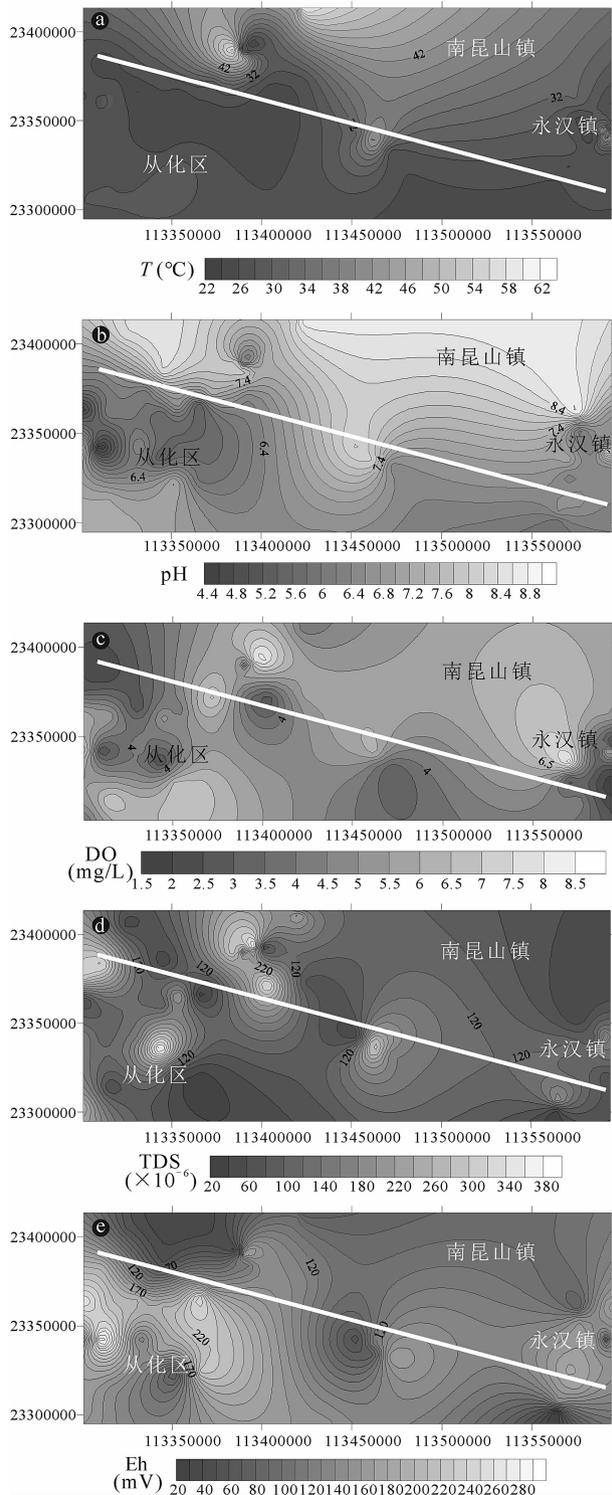


图 3 从化—永汉地区地下水特征等值线图

Fig. 3 Contour maps of geochemical characteristic and temperature of groundwater in Conghua-Yonghan area

(a)—出口温度等值线图; (b)—pH 等值线图; (c)—溶解氧等值线图;

(d)—TDS 等值线图; (e)—氧化还原电位等值线图

(a)—Contour map of emerge temperature; (b)—contour map of pH;

(c)—contour map of dissolve oxygen; (d)—contour map of TDS;

(e)—contour map of oxidation-reduction potential

区热水水化学特征,并未发生与海水的混合作用,因此只需要对热水的水岩平衡状态进行判别。Na-K-Mg 三角图解可以在同一个图上判断大量水样的平衡状态和是否适合离子温度计估算热储 (Giggenbach, 1988)。通过水温泉水化学组分计算,将研究区水样点投影于 Na-K-Mg 三角图上(图 5),可以看出研究区冷水点均落在三角图 Mg 端元附近,属于未平衡水;而热水点均位于部分平衡或未成熟水部分,因此并不适合使用阳离子温标法进行计算。并且从图 5 中可以看出,热水点呈明显线性关系,也说明了具有冷水的混入作用。因此本文采用基于溶解度的石英温标对混合水温度进行计算,并通过硅熔混合图解来估算深部热储温度,识别冷水混入过程。

### 3.3.2 地热地球化学温标计算结果

石英温标包括包括石英温度计、玉髓温度计和 amorphous 温度计 (Arnórsson et al., 1982; Chen, 1985; Karingithi, 2009; Liu et al., 2015),其中 amorphous 温度计一般适用于 100℃ 以下热储 (Fournier and Marshall, 1983),而石英溶解度普遍认为是控制热储温度高于 120~180℃ 的主要因素 (Fournier and Rowe, 1977)。根据研究区热储温度普遍大于 120℃ 的研究结果 (Pang, 2001),因此本研究选择使用石英温度计。石英温度计分为无蒸汽损失与最大蒸汽损失两类,由于地热井/泉口温度明显低于当地沸点,因此本研究使用无蒸汽损失石英温标进行计算 (Fournier, 1977)。

对于基于交换反应的阳离子地热温标,由于具有冷水混入作用,阳离子温标计算的热储温度可能会具有误差,为验证判断,本研究采用 Na/K 和 K/Mg 温标对热储温度进行计算,结果见表 2。

温泉/地热井的地热地球化学温标计算结果显示,从化—永汉地区的热储温度对于不同温标计算结果差异较大(图 6,表 3)。石英温标热储温度范围为 79~130℃,主要集中在 118℃。石英温标相对温度偏低的原因,一是石英温标最佳温度区间为 150~225℃,温度偏低使用该温标可能会因为石英以外的其他 SiO<sub>2</sub> 矿物控制可溶性 SiO<sub>2</sub> 含量而带来误差;二是从前文知道热流体浅部遇到冷水混合,对流体发生稀释作用;三是与冷水混合前发生蒸汽损失,也会对 SiO<sub>2</sub> 溶解度造成影响;四是 pH 值大于 8 时 SiO<sub>2</sub> 温标受 pH 值影响显著 (Arnórsson et al., 1982; Arnórsson, 2000),根据 Nitschke et al. (2018) 计算,相同 SiO<sub>2</sub> 浓度条件下,pH=9 时石英

表1 从化—永汉地区地下水水化学特征一览表

Table 1 Geochemical characteristic and temperature of groundwater in Conghua-Yonghan area

点号	水温 (°C)	pH	溶解氧 (mg/L)	氧化还 原电位(mV)	TDS (mg/L)	K (mg/L)	Na (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Cl (mg/L)	SO <sub>4</sub> (mg/L)	HCO <sub>3</sub> (mg/L)
CHA007	32.1	8.34	—	59	50.93	2.87	3.55	3.23	0.37	3.49	5.25	14.78
CHA010	30.8	8.42	—	49	41.37	1.81	2.74	1.87	0.14	2.1	4.03	16.56
CHA013	26.5	6.05	—	118	114	6.16	7.43	21.91	1.28	12.92	13.26	41.39
CHA025	28	7.45	6.78	147	155.8	9.98	10.92	33.39	1.58	12.22	17.17	94.6
CHA058	27.5	5.92	6.63	225	41.26	1.73	2.46	3.5	0.35	7.33	2.09	11.83
CHB001	27	4.23	2.31	300	111.7	5.19	7.2	10.27	1.54	9.08	3.05	2.96
CHB003	25.6	4.56	5.61	262	55.17	0.7	4.75	5.71	0.41	8.73	2.41	7.1
CHB004	27	5.34	6.23	251	28.34	0.33	2.01	2.52	0.18	5.24	2.24	15.37
CHB005	27.1	6	2.81	220	301	20.41	25.38	49.97	3.73	43.66	17.91	94.6
CHB007	29	6.24	5.45	213	122.2	3.68	7.91	26.94	0.93	10.83	12.77	60.9
CHB008	24.5	6.37	2.14	195	328.8	34.93	26.08	58.47	3.85	33.53	43.52	168.5
CHB108	40	8.04	4.25	73	297.6	4.71	31.81	53.06	1.61	7.68	27.42	192.1
CHB010	25.5	6.52	4.3	129	164.5	10.63	17.67	25.39	2.03	17.11	17.87	59.13
CHB012	23.8	6.11	2.56	201	120.7	1.18	16.8	22.96	0.56	14.32	4.6	67.99
CHB013	24.7	6.72	4.08	189	219.5	10.44	13.34	54.55	2.49	12.57	28.84	150.8
CHB019	25.1	5.38	2.24	177	389.6	15.79	34.51	82.66	7.38	40.17	47.01	234.17
CHB021	26	5.61	5.33	201	98.18	3.46	6.1	18.76	1.44	5.59	10.74	56.17
CHB026	25	5.98	3.4	188	134.2	5.45	15.26	19.96	2.45	8.73	22.53	65.04
CHB027	57.8	7.61	—	42	304.2	2.54	72.16	15.04	0.08	6.64	9.52	198.1
CHB028	56.2	7.94	—	-7	291.8	2.47	66.94	17.84	0.08	6.99	9.33	192.2
CHB029	56	8.12	5.63	90	296.9	2.57	67.73	19.25	0.07	6.64	10.15	195.1
CHB032	23.4	6.44	8.07	162	411.9	55.95	23.65	41.67	10.83	50.65	8.73	29.56
CHB033	27.7	7.25	8.06	148	51.21	2.4	3.72	5.55	0.49	2.1	3.94	29.56
CHB039	43	8.17	4.49	105	249.6	2.45	61.46	10.11	0.15	8.03	11.17	152.5
CHB045	28.5	7.22	7.18	147	63.5	2.24	3.84	9.07	0.91	2.79	5.18	41.39
CHB050	29.4	7.27	6.82	62	60	2.15	3.61	8.48	0.85	2.1	5.01	38.43
CHB051	29.2	6.44	3.5	151	206	7.38	12.21	48.19	3.26	12.22	25.84	124.2
CHB052	26.1	6.75	2.6	149	341.9	15.06	23.16	77.98	5.9	19.56	42.84	224.7
CHB056	27.4	7.44	5.67	133	76.22	9.49	3.8	11.67	1.41	5.24	5.27	35.48
CHB097	26.5	6.58	—	154	70.12	2.73	7.69	8	1.42	5.94	4.2	47.3
CHB100	31.3	8.25	—	52	42.3	1.2	2	6.91	0.3	2.1	4.34	26.61
CHB107	43.8	7.83	6.24	120	281.6	3.59	20.09	65.91	1.94	6.99	28.57	201
CHB111	26.2	6.51	3.06	171	165.3	21.41	16.05	18.36	1.75	16.42	24.21	41.39
CHB167	32.1	8.91	—	75	42	1.16	1.29	4.93	0.39	2.1	3.68	23.65
CHB168	25.2	6.08	—	161	40.98	0.98	1.7	7.07	0.35	2.79	5.61	23.65
CHB169	27.5	6.64	1.88	143	137.7	8.38	11.14	23.44	3.64	13.97	17.2	82.78
CHB170	26.1	6.86	5.46	176	62.24	0.74	2.16	12.17	0.79	5.24	3.43	38.43
CHB177	30.3	7.18	8.41	170	134.5	11.89	14.25	21.92	1.54	16.07	10.78	79.82
CHB189	24.8	6.61	—	140	201.9	37.9	12.37	26.82	3.14	15.37	32.79	100.51
CHB190	24.9	5.82	—	17.6	27.77	0.007	0.49	1.94	0.8	2.1	2.5	17.74
CHB194	25.8	6.26	2.67	183	99.38	4.66	4.45	20.83	1.56	5.24	11.98	68.59
CHB195	27.5	6.75	4.53	170	133.7	1.15	6.4	33.06	1.97	13.97	7.82	82.78
CHB197	25.1	6.32	2.81	156	95.14	0.91	5.83	19.9	2.22	7.68	13.46	59.13
CHB198	42.8	8.37	5.97	121	152.8	2.27	28.5	16.91	0.47	3.49	10.24	112.3
CHB200	26.7	6.5	2.14	155	131.5	4.5	6.82	27.17	2.35	10.48	9.7	70.95
CHB203	46	7.95	5.83	110	234.3	2.68	48.95	18.1	0.13	6.99	9.6	153.7
CHB204	70	8.73	6	63	238.7	2.12	63.65	7.92	0.39	5.94	16.37	154.9
CHB206	58	8.72	3.92	77	196.6	2.06	43.99	13.74	0.16	6.99	9.83	127.1
CHB207	51.5	8.2	4.54	79	119.2	1.82	18.67	11.39	0.56	4.89	6.18	76.86

注：—指未取得样品溶解氧数值。

温标计算的热储温度比 pH=8.5 时要低 5~20℃ 不等。

Na/K 温标两种计算公式得到热储温度趋势相同, 相对其他温标计算结果偏高, 热储温度范围分别

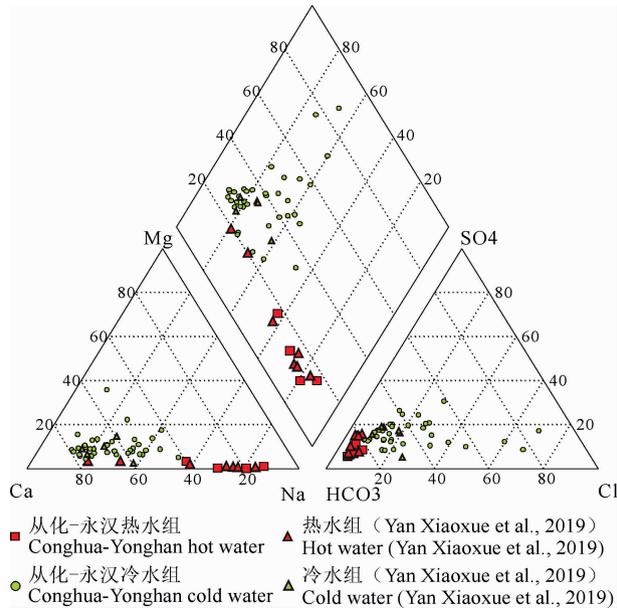


图 4 从化—永汉地区地下水样品 Piper 图  
Fig. 4 Piper diagram of underground water samples in Conghua-Yonghan area

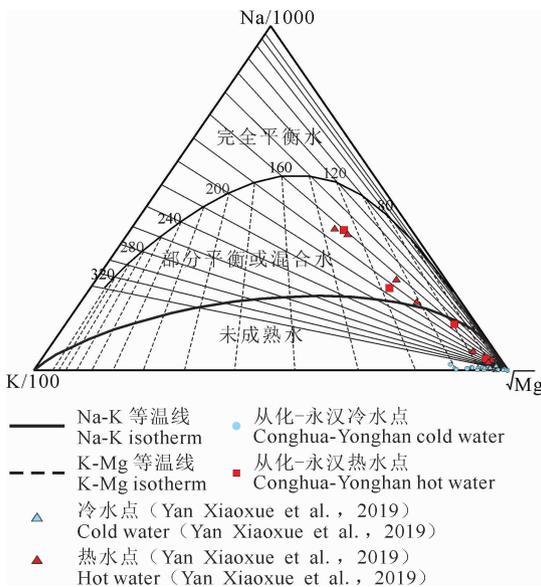


图 5 从化—永汉地区地下水样品 Na-K-Mg 三角图  
Fig. 5 Na-K-Mg diagram for geothermal water samples in Conghua-Yonghan area

为 157.5~283.3℃ (Giggenbach, 1988) 和 137.9~272.4℃ (Fournier, 1981)。原因可能是热水中富含 Ca 会对热储温度计算造成异常。K/Mg 温标的计算结果在几种温标计算结果中最低,可能是由于冷水中 Mg 含量较高,因此热流体混合冷水后同样会造成离子浓度变化和温标结果的偏差。该温度可能是混合冷水后热流体温度。

需要指出的是, CHB027、CHB028、CHB029、

CHB039 样品在不同的温标计算条件下热储温度都比较相近。尤其是 Na/K 温标 (Fournier, 1981) 和硅焓值 C2 区间基本重合,这可能代表了该处样品接近真实的热储温度,为 144℃ 左右。

表 2 本文采用的地热地球化学温标计算公式  
Table 2 Formulas of chemical geothermometers used in this study

地热温标类型	计算公式	公式出处
石英温标 (无蒸汽损失)	$t = \frac{1309}{5.19 - \log \text{SiO}_2} - 273.15$	Fournier, 1977
Na/K 温标	$t = \frac{1217}{\log(\text{Na}/\text{K}) + 1.483} - 273.15$	Fournier, 1981
	$t = \frac{1390}{\log(\text{Na}/\text{K}) + 1.750} - 273.15$	Giggenbach, 1988
K/Mg 温标	$t = \frac{4410}{13.95 - \log \frac{\text{K}^2}{\text{Mg}}} - 273.15$	Giggenbach, 1988

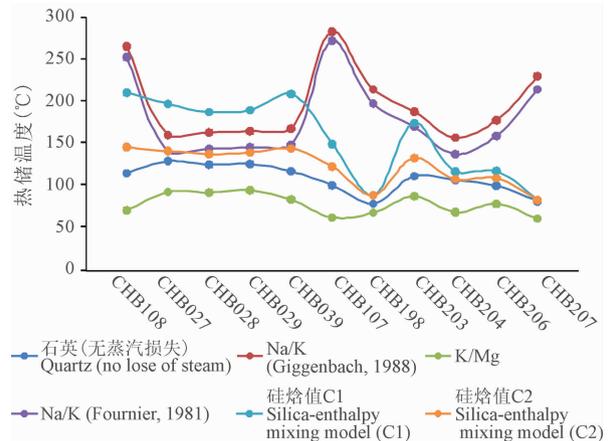


图 6 从化—永汉地区地下热水样品不同温标方法热储温度计算结果对比

Fig. 6 Contrast of calculation results for reservoir temperature of thermal water samples in Conghua-Yonghan area

根据氢氧同位素特征,地下水来源于大气降水的补给,相比冷水样品,热水的氢氧同位素显著偏负,表明热水不是直接来源于当地大气降水线的就近补给,而是来源于海拔稍高的补给区,经历过较长时间的径流过程。

由于降水的氢氧同位素具有高程效应,在研究补给来源的基础上进一步计算热水的补给高程。计算公式为:

$$H = H_g + \frac{D_p - D_g}{gradD}$$

式中:  $H$  为地下水补给高程(m);  $H_g$  为地下水参考点地面高程(m);  $D_p$  为研究区大气降水的  $\delta D$  值(‰);  $D_g$  为热水  $\delta D$  值(‰);  $gradD$  为研究区大气

表3 从化—永汉地区地下热水热储温度计算结果

Table 3 Calculation results for reservoir temperature of thermal water samples in Conghua-Yonghan area

样品编号	取样温度(°C)	SiO <sub>2</sub> 含量(mg/L)	石英温标(°C, 无蒸汽损失)	Na/K 温标(Fournier, 1981)	Na/K 温标(Giggenbach, 1988)	K/Mg 温标	硅無图解计算热储温度 C1(°C)	硅無图解计算热储温度 C2(°C)
CHB108	40	66.35	115.49	265.71	253.11	71.09	211.05	146.39
CHB027	57.8	87.15	129.65	160.76	141.29	93.02	197.50	141.64
CHB028	56.2	80.69	125.55	163.55	144.20	92.29	187.99	138.07
CHB029	56	81.85	126.30	165.22	145.95	95.11	190.37	139.97
CHB039	43	69.23	117.63	168.20	149.06	84.00	209.39	144.49
CHB107	43.8	49.18	101.04	283.32	272.37	62.78	149.96	123.09
CHB198	42.8	29.82	79.15	214.77	198.22	68.44	89.34	89.34
CHB203	46	61.75	111.93	188.40	170.26	88.10	174.92	133.31
CHB204	70	55.89	107.08	157.53	137.93	69.02	117.39	108.35
CHB206	58	48.46	100.36	178.22	159.56	78.91	117.86	109.54
CHB207	51.5	31.87	81.92	230.28	214.81	61.50	83.39	83.39

降水中  $\delta D$  随高程递减的梯度值(取  $-2\text{‰}/100\text{m}$ )。

采用 Yan Xiaoxue(2019)在研究区氢氧同位素结果,选取没有地热显示区的冷水水样的平均值( $-34\text{‰}$ )作为基准参考值  $D_p$ ,通过计算得到,从化—永汉地区热水的补给高程为 280~650 m,通过高程范围判断,补给区为周边低山区域。

## 4 地热异常成因分析

### 4.1 地球物理揭示的深部热结构

(1)莫霍面深度:莫霍面是地壳与地幔的分界面,其深度表征了地壳厚度。深部地幔的对流引起莫霍面局部起伏,在地幔流的汇聚和发散处形成莫霍面的抬升。由于莫霍面上隆,导致深部热流上涌,高温熔融物质向上地壳侵位,其结果是相应部位升温,并可能形成局部熔融,使地壳深部具有较高的温度。从图 7 可以看出从化—永汉地区位于东南沿海莫霍面等值线梯度带上。

(2)酸性岩体分布:从化—永汉地区出露的花岗岩尤其是燕山期花岗岩分布具有特定的展布方向特征,燕山早期及印支期花岗岩以东西向展布为主,而燕山晚期花岗岩则具有显著的北东向展布特征(Wang et al., 2007;图 8)。从我国东南沿海来看,花岗岩的年龄具有自西向东、自内陆(南岭地区)向沿海地区年轻化的趋势(Li and Li, 2007)。同时,花岗岩与各种类型的沉积盆地密切共生(Zhao Ping et al., 1995; Wang R Y et al., 2010),这种形成环境的变化,可能伴随着能量和物质的转移。

根据东南沿海两条近垂直长剖面结果,近 E-W 向的台湾海峡—河源—文山岩石圈尺度波速剖面图反映出漳州盆地以东地区在 0~100km 存在大范围低速体(Zhao Dapeng et al., 2009),梧州至来宾—

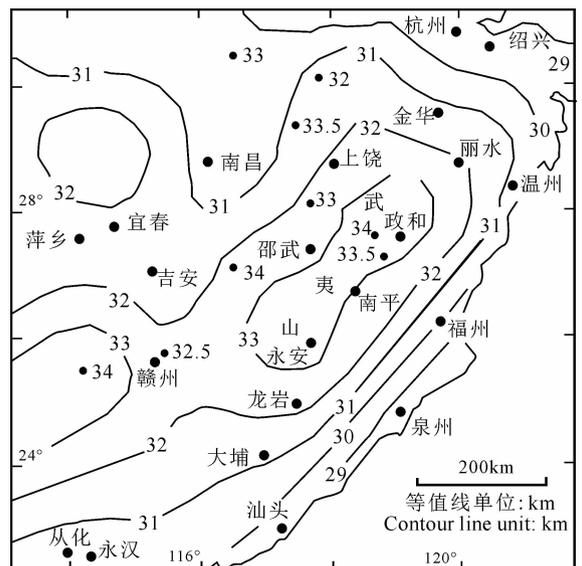


图 7 东南沿海地区莫霍面等深图(据郝天姚等,2014 修改)  
Fig. 7 Moho depth of southeast coast of China mainland (modified from Hao Tianyao et al., 2014)

带低速体延伸可达 200km。表现出东南沿海近 E-W 向具有明显的岩石圈不均一现象。NW-SE 向的台湾—龙岩—赣南岩石圈结构剖面图表现出从台湾向 NW 至内陆存在一系列铲状断裂,规模达到地壳尺度,受板块俯冲影响,在靠近板块边缘部位大陆岩石圈发生伸展作用减薄,壳内普遍存在的 15~20km 的低速带,可能是受产状断裂和壳幔活动综合影响形成。

### 4.2 流体升流过程分析

东南沿海地区由于具有切穿地壳的深断裂(图 9,图 10),局部熔融或深部热流的热能可以通过深断裂直接传递至浅部,因此会形成地温等值线的上扬。从地表显示统计,深断裂与浅部张性断裂交汇周围往往具有温泉出露,说明了研究区断裂构造对

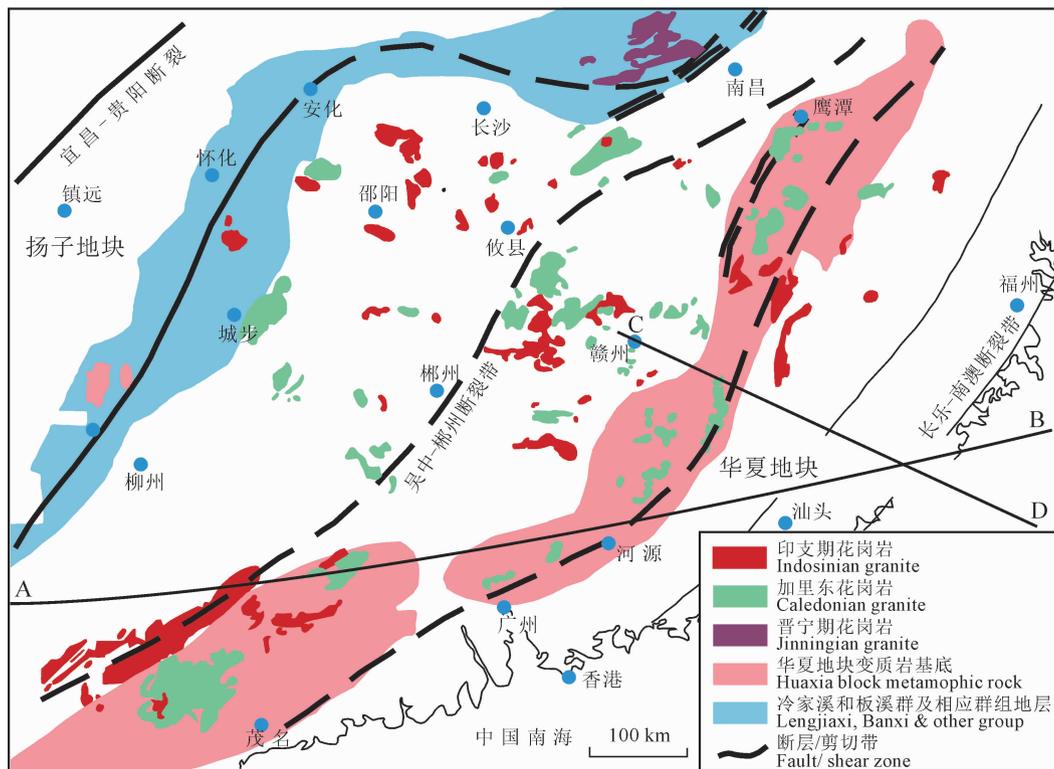


图 8 华南晋宁期、加里东期和印支期花岗岩分布特征(据 Wang et al. , 2007)

Fig. 8 Distribution characteristics of granites in the Jinning, Caledonian and Indosinian periods in South China mainland (after Wang et al. , 2007)

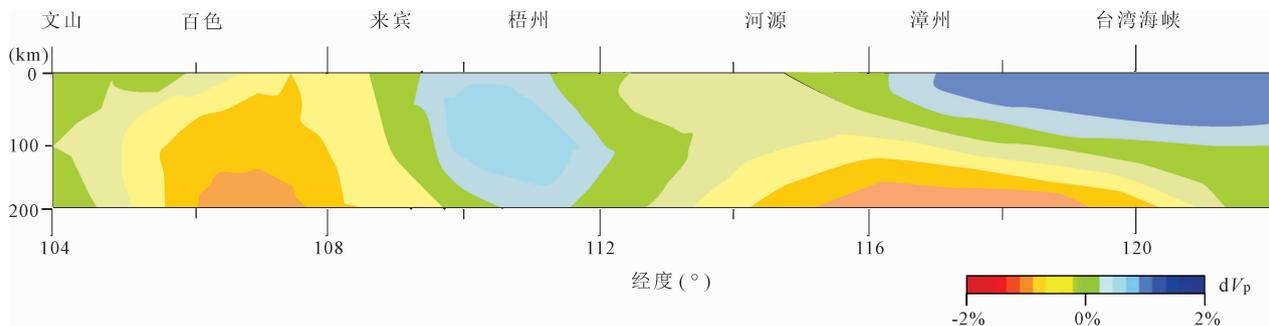


图 9 台湾海峡—河源—文山的近 E-W 向岩石圈尺度波速剖面图(剖面位置见图 8 中 A—B)

Fig. 9 E-W section of lithospheric scale velocity profile of Taiwan Strait-Heyuan-Wenshan (location see A—B in Fig. 8)

水热活动的显著控制作用。地下热水的氢氧同位素结果显示来源于大气降水(Yan Xiaoxue et al. , 2019)。综合断裂构造控制和大气降水来源,可以推断研究区属于东南沿海较为典型的裂隙深循环型水热系统,类似系统在福建、江西、海南和广东其他地区均有研究报道(如 Zhou Haiyan et al. , 2008; Yuan Jianfei, 2013)。通过高程效应推测补给来源为周边低山的大气降水入渗,并随裂隙下渗到较深区域,与较高温度围岩发生热交换,随后在断裂构造提供的通道升流至地表附近。

从前文获得热储温度范围 83~146 °C 得出,地

下热水的循环深度不同,且同区的热水和冷水从水化学分析上来看具有一定继承性。因此流体的升流过程可以推测为:大气降水随裂隙入渗到深部后,根据裂隙发育不同条件下渗与围岩发生热交换,根据循环深度的不同,可被围岩加热温度从 83 °C 至 146 °C 不等。随后通过区域北东向与北西向断裂交汇提供的通道升流至地表,并在升流过程中与浅部冷水发生混合,最终出露地表形成温泉,或被钻孔揭露。

### 5 结论

(1)从化—永汉地区地下热水普遍具有偏碱性、

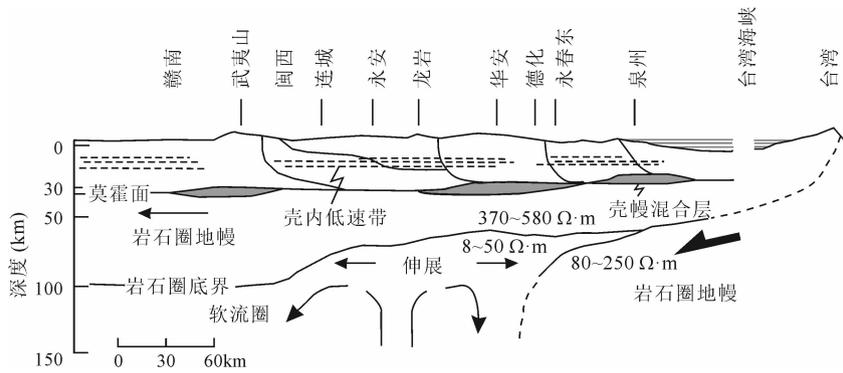


图 10 台湾—龙岩—赣南的 NW-SE 向岩石圈结构剖面图(剖面位置见图 8 中 C—D)(据 Zhou and Li, 2000)

Fig. 10 NW-SE section of lithospheric scale velocity profile of Taiwan-Longyan-Gannan (location see C—D in Fig. 8) (after Zhou and Li, 2000)

溶解氧含量低、相对地下冷水偏还原环境(仍属于氧化环境)的特点,热水水化学类型以  $\text{Na-HCO}_3$  和  $\text{Ca} \cdot \text{Na-HCO}_3$  为主,同区冷水水化学类型主要为  $\text{Ca-HCO}_3$  和  $\text{Ca} \cdot \text{Na-HCO}_3$ 。热储温度范围为  $83 \sim 146^\circ\text{C}$ 。地下热水来源于大气降水的补给,且补给高程为  $280 \sim 650 \text{ m}$ ,通过高程范围判断,补给区为周边低山区。

(2)通过我国东南沿海莫霍面埋深、酸性岩体分布和岩石圈结构等区域地质地球物理背景条件分析,菲律宾板块的 NW 向挤压作用对包括研究区在内的东南沿海地区地热系统的形成起到了重要作用。江西南部到福建沿海均分布距地表约  $15 \text{ km}$  的中上地壳低速层,可能代表着东南沿海地区中地壳普遍存在部分熔融的岩浆体,或中下地壳韧性流动层。

(3)从化—永汉地区在其周边低山区接受大气降水补给,大气降水渗入地下后沿多条断裂向深部运移,并不断接受来自地球深部地幔热量和花岗岩中放射性元素衰变产生的热量,与围岩热交换并升温,热水以北西向断裂与北东向主干断裂交汇部分作为升流通道向上运移,出露地表或被钻孔揭露形成温泉和地热井。

## References

Arnórsson S, Sigurdsson S, Svavarsson H. 1982. The chemistry of geothermal waters in Iceland. I. Calculation of aqueous speciation from  $0^\circ\text{C}$  to  $370^\circ\text{C}$ . *Geochim. Cosmochim. Acta*, 46: 1513~1532.

Arnórsson S. 2000. Isotopic and chemical techniques in geothermal exploration, development and use. International Atomic Energy Agency, Vienna.

Chen Chaohsia. 1985. Water-rock interaction chemical characteristics of thermal waters in the central range of Taiwan. *R. O. C. Chemical Geology*, 49: 303~317.

Chen Moxiang, Wang Jiyang, Deng Xiao. 1995. Advances in

geothermics in China. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 20(4): 367~372 (in Chinese with English abstract).

Gan Haonan, Lin Wenjing, Yue Gaofan, Wang Xiao, Ma Feng, and Wang Guiling. 2017. Research on the fault controlling mechanism of geothermal water in Zhangzhou Basin. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 5: 326~335.

Gan Haonan, Wang Guiling, Wang Xiao, Lin Wenjing, Yue Gaofan. 2019. Research on the hydrochemistry and fault control mechanism of geothermal water in northwestern Zhangzhou Basin. *Geofluids*, vol. Article ID 3925462.

Guo Lianghui, Gao Rui, Shi Lei, Huang Zhangrong, Ma Yawei. 2019. Crustal thickness and Poisson's ratios in South China revealed by joint inversion of receiver function and gravity data. *Earth and Planetary Science Letters*, 510: 142~152.

Faure M, Chen Yan, Feng Zhuohai, Shu Liangshu, Xu Ziqin. 2017. Tectonics and geodynamics of South China: an introductory note. *Journal of Asian Earth Sciences*, 141: 1~6.

Fournier R O. 1977. Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems. *Geothermics*, 5: 41~50.

Fournier R. O. 1981. Application of water geochemistry to geothermal exploration and reservoir engineering. In: Rybach L, Muffler L J P, eds. *Geothermal Systems: Principles and Case Histories*. New York: John Wiley and Sons Ltd., 109~143.

Fournier R O, Marshall W L. 1983. Calculation of amorphous silica solubilities at  $25^\circ\text{C}$  to  $300^\circ\text{C}$  and apparent cation hydration numbers in aqueous salt solutions using the concept of effective density of water. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 47: 587~596.

Fournier R O, Rowe J J. 1977. Solubility of amorphous silica in water at high temperatures and high pressures. *Am. Mineral.*, 62: 1052~1056.

Giggenbach W F. 1988. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52: 2749~2765.

Han Qingzhi, Zhuang Qingxiang. 1988. On the source and pathway of hot water in Zhangzhou Basin, Fujian. *Earth Science*, (03): 271~277 (in Chinese with English abstract).

Hao Tianyao, Hu Weijian, Xing Jian, Hu Litan, Xu Ya, Qin Jingxin, Liu Shaohua, Lei Shoumin. 2014. The Moho depth map ( $1: 5000000$ ) in the land and seas of China and adjacent area and its geological implications. *Chinese J. Geophys.*, 57(12): 3869~3883 (in Chinese with English abstract).

Hu Shengbiao, Xiong Liangping. 1990. Reservoir modelling of Zhangzhou low temperature fracture zone system, Fujian, China. *Geological Science and Technology Information*, 04: 65~71 (in Chinese with English abstract).

Hu Shengbiao, Huang Shaopeng, He Lijuan, Pang Zhonghe, Wang Jiyang. 2013. The heat structure of rock circle and geothermal

- potential of mainland China. *Acta Geologica Sinica*, 87(z1): 36 (in Chinese with English abstract).
- Karingithi C W. 2009. Chemical geothermometers for geothermal exploration. Short course IV on exploration for geothermal resources. In: United Nations University, Geothermal Training Program. Lake Vaivasha, Kenya, 1~22.
- Li Fu. 2010. Siteselection of HDR power station project of Lingshui area of Hainan Province. *Geothermal Energy*, (3): 21~27 (in Chinese with English abstract).
- Li Xianhua, Li Zhengxiang, Ge Wenchun, Zhou Hanwen, Li Wuxian, Liu Ying, Wingate M T D. 2003. Neoproterozoic granitoids in South China; crustal melting above a mantle plume at ca. 825 Ma? *Precambrian Research*, 122: 45~83.
- Li Zhengxiang, Li Xianhua. 2007. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model. *Geology*, 35(2):179~182.
- Liao Zhijie. 2012. Deep-circulation hydrothermal systems without magmatic heat source in Fujian Province. *Geoscience*, 26(1): 85~95 (in Chinese with English abstract).
- Lin Lefu, Sun Zhanxue, Wang Andong, Liu Jinhui, Wan Jianjun, Li Xiacong, Luo Xianwen. 2017. Radioactive geochemical characteristics of Mesozoic granites from Nanling region and southeast coastal region and their constraints on lithospheric thermal structure. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 36(4):488~500 (in Chinese with English abstract).
- Lin Wenjing, Liu Zhiming, Wang Wanli, Wang Guiling. 2013. Assessment of China's geothermal resources and its potential. *Geology in China*, 40(1): 312~321 (in Chinese with English abstract).
- Lin Wenjing, Gan Haonan, Wang Guiling, Ma Feng. 2016. Occurrence prospect of HDR and target site selection study in southeastern of China. *Acta Geologica Sinica*, 90(8): 2043~2057.
- Liu Meichia, Chiang Hsiehtang, Kuo Chinghui, Song Shengrong, Tsai Yuwei. 2015. Integrating geothermometer and high resolution thermometer to characterize the geothermal characteristics of Ilan Plain, Taiwan. In: 40th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University, Stanford, California, 1~6.
- Nitschke F, Held S, Neumann T, Kohl T. 2018. Geochemical characterization of the Villarrica geothermal system, Southern Chile, part II: Site-specific re-evaluation of SiO<sub>2</sub>, and Na-K solute geothermometers. *Geothermics*, 74: 217~225.
- Pang Zhonghe. 1987. Zhangzhou basin geothermal system-Genesis model, energy potential and the occurrence of thermal water. Ph.D thesis of Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English abstract).
- Wang Ruiyi, Wang Zhengqi, Chen Guosheng, Han Changqing, Wu Lieqin. 2010. Analysis on characteristics and its geologic origin of potassium increment-field in Xiazhuang area, northern Guangdong Province. *Uranium Geology*, 2010~04.
- Wang Yuejun, Fan Weiming, Sun Min, Liang Xinquan, Zhang Yanhua, Peng Touping. 2007. Geochronological, geochemical and geothermal constraints on petrogenesis of the Indosinian peraluminous granites in the South China Block: A case study in the Hunan Province. *Lithos*, 96(3~4): 475~502.
- Xiong Liangping, Wang Jiyang, Pang Zhonghe. 1990. Convective and conductive heat flows in Zhangzhou geothermal field, Fujian Province, China. *Acta Geophysica Sinica*, 06: 702~711 (in Chinese with English abstract).
- Ye Qing. 2012. Geologic features of the geothermal fields and assessment of geothermal resources in the New Conghua hot spring area in Guangdong. Master's thesis of China University of Geosciences (Beijing), 1~69.
- Yan Xiaoxue, Gan Haonan, Yue Gaofan. 2019. Hydrogeochemical characteristics and genesis of typical geothermal fields from Huangshadong to Conghua in Guangdong. *Geological Review*, 65(03): 225~236 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Jianfei. 2013. Hydrogeochemistry of the geothermal systems in coastal areas of Guangdong Province, South China. China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Zhao Ping. 1995. The distribution features of heat generation rate of southeastern China. *Journals of Rocks*, 11(3): 292~305 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Dapeng, Ohtani E. 2009. Deep slab subduction and dehydration and their geodynamic consequences: evidence from seismology and mineral physics. *Gondwana Research*, 16(3~4):401~413.
- Zhou Haiyan, Zhou Xun, Liu Chunhui, Yu Lan, Li Juan, Liang Yongguo. 2008. Hydrochemical and isotopic characteristics of Conghua hot mineral springs in Guangdong. *Journal of Natural Resources*, 23(4): 705~712.
- Zhou Haiyan, Zhou Xun, Yao Jinmei. 2007. Hydrogeochemical modeling of the Conghua hot spring in Guangdong. *Geoscience*, 21(4): 619~624.
- Zhou X M, Li W X. 2000. Origin of late Mesozoic igneous rocks in southeastern China: implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas. *Tectonophysics*, 326(3): 269~287.
- Zheng Hongwei, Gao Rui, Li Tingdong, Li Qiusheng, He Rizheng. 2013. Collisional tectonics between the eurasian and philippine sea plates from tomography evidences in southeast China. *Tectonophysics*, 606: 14~23.

## 参 考 文 献

- 陈墨香, 汪集旸, 邓孝. 1995. 中国地热学研究之进展. *地球科学——中国地质大学学报*, 20(4): 367~372.
- 韩庆之, 庄庆祥. 1988. 漳州盆地地下热水的来源和运移途径的初步研究. *地球科学*, (03): 271~277.
- 郝天兆, 胡卫剑, 邢健, 胡立天, 徐亚, 秦静欣, 刘少华, 雷受旻. 2014. 中国海陆 1: 500 万莫霍面深度图及其所反映的地质内涵. *地球物理学报*, 57(12): 3869~3883.
- 胡圣标, 熊亮萍. 1990. 福建漳州低温断裂带地热系统数学模拟研究. *地质科技情报*, 04: 65~71.
- 林乐夫, 孙占学, 王安东, 刘金辉, 万建军, 李小聪, 罗贤文. 2017. 南岭地区与东南沿海地区中生代花岗岩放射性地球化学特征及岩石圈热结构对比研究. *岩石矿物学杂志*, 36(4): 488~500.
- 蔺文静, 刘志明, 王婉丽, 吴庆华, 马峰. 2013. 中国地热资源及其潜力评估. *中国地质*, 40(1): 312~321.
- 蔺文静, 甘浩男, 王贵玲, 马峰. 2016. 我国东南沿海干热岩赋存前景及与靶区选址研究. *地质学报*, 90(8): 2043~2057.
- 庞忠和. 1987. 漳州盆地地热系统一成因模式、热能潜力与热水分布规律的研究. 中国科学院地质与地球物理研究所博士学位论文.
- 熊亮萍, 汪集旸, 庞忠和. 1990. 漳州热田的对流热流和传导热流的研究. *地球物理学报*, (06): 702~711.
- 闫晓雪, 甘浩男, 岳高凡. 2019. 广东惠州-从化典型地热田水文地球化学特征及成因分析. *地质论评*, 65(03): 225~236.
- 叶青. 2012. 广东从化新温泉地热地质特征及地热资源评价. 中国地质大学硕士学位论文, 1~69.
- 袁建飞. 2013. 广东沿海地热系统水文地球化学研究. 中国地质大学博士学位论文.
- 周海燕, 周训, 姚锦梅. 2007. 广东从化温泉的水文地球化学模拟. *现代地质*, 21(4): 619~624.
- 周海燕, 周训, 柳春晖, 虞岚, 李娟, 梁永国. 2008. 广东省从化温泉热矿水水化学与同位素特征. *自然资源学报*, 23(4): 705~712.

## Analysis of geothermal occurrence characteristics and origin of the thermal anomalies in the hidden igneous rock area in the central Guangdong

GAN Haonan<sup>1,2)</sup>, LIN Wenjing<sup>1,2)</sup>, YAN Xiaoxue<sup>1,2)</sup>, YUE Gaofan<sup>1,2)</sup>,  
ZHANG Wei<sup>1,2)</sup>, WANG Guiling<sup>\*1,2)</sup>

1) *Technology Innovation Center of Geothermal & Hot Dry Rock Exploration and Development, Ministry of Natural Resources, Shijiazhuang, 050000;*

2) *Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang, 050000*

*\* Corresponding author: guilingw@163.com*

### Abstract

The geothermal resources are a manifestation of energy, and their occurrence is essentially the process of transferring heat from the earth's interior to the surface. The southeast coast of China mainland shows significant geothermal activity. However, there are no conclusions about the distribution characteristics of the geothermal field, and how the physical properties of the heat transfer medium respond to the distribution of the geothermal field. In this study, the hot water and underground cold water samples from the Conghua-Yonghan research area were collected. The hot water in the research area is generally alkaline, low in dissolved oxygen, and shows relatively reducing environment compared to the underground cold water. The characteristics of hot water samples are mainly Na-HCO<sub>3</sub> and Ca • Na-HCO<sub>3</sub>, with a reservoir temperature range of 83 ~ 146 °C. This study summarizes that the meteoric water in the surrounding low mountainous area penetrates underground and migrates along the fault to the deep; and continuously receives heat from the deep mantle heat of the earth and from the decay of radioactive elements in granite by heat exchange with surrounding rock. Subsequently, the hot water migrates upward from the intersection of the northwest-trending fault and the northeast-trending main fault as an ascending channel, that are exposed or bored in the form of hot spring or geothermal well respectively. Combining the analysis of regional geological and geophysical background conditions, such as the Moho depth, the igneous rock distribution and the lithosphere structure in the southeast coast of China, we conclude that the NW main stress effect of the Philippine plate played an important role in the formation of the geothermal system. This study provides a framework for the future exploration and evaluation of the geothermal resources in the southeast coastal area of China.

**Key words:** hydrothermal activities; Conghua-Yonghan area; reservoir temperature; origin analysis