

中文核心期刊 CSCD核心期刊 中科双效期刊 中国科技核心期刊 Caj-cd规范获奖期刊

福建盐田海水补给型地热系统地球化学特征及其成因

刘春雷,李亚松,洪炳义,曹胜伟,王婉丽,李剑锋

Geochemical characteristics and formation mechanisms of the seawater-recharged geothermal systems in Yantian of Fujian, China

LIU Chunlei, LI Yasong, HONG Bingyi, CAO Shengwei, WANG Wanli, and LI Jianfeng

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202205017

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

川藏铁路康定隧址区地热水成因及其工程影响分析

An analysis of the genesis and engineering influence of geothermal water in the Kangding tunnel site of the Sichuan-Tibet Railway 张云辉, 李晓, 徐正宣, 常兴旺, 黄, 多吉 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 46-53

沉积型和火山型地热流体的同位素水文地球化学对比研究

A comparative study of isotopic hydrogeochemistry of geothermal fluids of sedimentary basin type and volcanic type 马致远,李嘉祺,翟美静,吴敏,许勇 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 9-18

四川巴塘地热田水文地球化学特征及成因

Hydrogeochemical characteristics and genesis of the geothermal fields in Batang of Sichuan 赵佳怡, 张薇, 张汉雄, 屈泽伟, 李曼, 岳高凡 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 81-89

岩溶矿区水文地球化学特征及其水源指示意义

Groundwater source identification incarbonate-hosted deposit using hydrogeochemistry, hydrogen and oxygen isotope method 黄荷,陈植华,王涛,罗朝晖,张亮,王剑,项彩娟,孙帮涛,王勇 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 19-19

西藏加查象牙泉水文地球化学特征及成因

Hydrogeochemical characteristics and formation of the Ivory Spring in Jiacha County of Tibet 章旭, 郝红兵, 刘康林, 毛武林, 肖尧 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 1–9

西宁盆地地热水特征及回灌结垢风险

Characteristics of geothermal water in the Xining Basin and risk of reinjection scaling 赵振, 秦光雄, 罗银飞, 晁嘉豪, 耿松鹤, 张亮 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 193-204



关注微信公众号,获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202205017

刘春雷,李亚松,洪炳义,等.福建盐田海水补给型地热系统地球化学特征及其成因 [J].水文地质工程地质,2023,50(1):158-167.

LIU Chunlei, LI Yasong, HONG Bingyi, *et al.* Geochemical characteristics and formation mechanisms of the seawater-recharged geothermal systems in Yantian of Fujian, China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(1): 158-167.

福建盐田海水补给型地热系统地球 化学特征及其成因

刘春雷^{1,2},李亚松^{1,2},洪炳义³,曹胜伟^{1,2},王婉丽¹,李剑锋^{1,2}

 (1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所,河北石家庄 050061;2. 福建省水循环与生态地质过 程重点实验室,福建厦门 361021;3. 闽东南地质大队,福建泉州 362000)

摘要:海水补给型地热系统具有补给资源量大,但温度低、水质咸化等特点,查明沿海地热水循环补给条件和成因机制,对 东南沿海地热资源的合理开发利用和保护具有重要意义。在泉州官桥盐田地热区分别采集了地热水、地下水和海水样品 14个,利用水化学同位素特征分析和地球化学温标法,揭示了官桥盐田地热水循环补给和地热资源成因机制。结果表明: 地热水水化学类型为 Cl-Na型水,与海水水化学类型一致;H01和 H02的溶解性固体总量(TDS)分别为 2 610 mg/L和 3 090 mg/L,地下水以 TDS小于 400 mg/L的HCO₃—Na型水为主;地热水富集 Br,地下水中 Br 未检测,表明盐 田地热水存在现代海水或者海相沉积层古海水补给。根据盐田地热田 H01和 H02地热水 Cl 混合模型计算,地热水 H01海 水混入比为 9.13%, H02海水混入比为 10.76%,显示 H01在出露于第四系地层后混入了更多的地下水。综合分析认为,海水 是盐田地热水的重要补给资源,地热水化学组分受海水混合作用影响明显,深层热水上升过程中存在两次或者多次地下水 或者海水混入从而形成浅层热储,采用 SiO₂地热温标和多矿物平衡法估算的浅层热储温度在 89~121℃之间。 关键词:地热水;水文地球化学;环境同位素;地球化学温标;海水补给

中图分类号: P314 文献标志码: A 文章编号: 1000-3665(2023)01-0158-10

Geochemical characteristics and formation mechanisms of the seawater-recharged geothermal systems in Yantian of Fujian, China

LIU Chunlei^{1,2}, LI Yasong^{1,2}, HONG Bingyi³, CAO Shengwei^{1,2}, WANG Wanli¹, LI Jianfeng^{1,2}

 (1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Science, Shijiazhuang, Hebei 050061, China; 2. Fujian Provincial Key Laboratory of Water Cycling and Eco-Geological Processes, Xiamen, Fujian 361021, China; 3. Southeastern Fujian Geological Brigade, Quanzhou, Fujian 362000, China)

Abstract: Seawater-recharged geothermal systems are characterized by abundant recharge, low temperature and salinization. Ascertaining the circulation recharge conditions and genetic mechanisms of geothermal water in coastal areas of southeast China is of important significance in the rational exploration, utilization and protection

收稿日期: 2022-05-07; 修订日期: 2022-08-05 投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(DD20190303; DD20221773)

第一作者:刘春雷(1984-),男,硕士,助理研究员,主要从事水文地质、地热地质方面的研究。E-mail: chunleiliu-dn@163.com

通讯作者: 李亚松(1983-), 男, 博士, 研究员, 主要从事区域地下水污染、环境地质方面的研究。E-mail: liyasong@mail.cgs.gov.cn

of geothermal resources in these areas. In this study, 14 samples of geothermal water, groundwater and seawater are collected from the Yantian geothermal field near Guangiao Town in Fujian Province, China and the hydrochemical and isotopic characteristics are analyzed. The circulation recharge of the geothermal water and the genetic mechanisms of the geothermal resources in the geothermal field are revealed using geothermometers. The results show that hydrochemical type of the geothermal water in the Yantian geothermal field is of Cl-Na type, which is similar to that of the seawater. Total dissolved solids of geothermal water samples H01 and H02 are 2 610 mg/L and 3 090 mg/L, respectively. By contrast, the groundwater in the geothermal field is dominated by the HCO₃—Na type, and the groundwater samples have TDS of less than 400 mg/L. Moreover, the geothermal water is rich in Br-, which is not detected in the groundwater. These results indicate that modern seawater or ancient seawater in marine sedimentary layers is a recharge source of the geothermal water. As shown by the results of H01 and H02 calculated using the Cl⁻ mixing model, geothermal water samples H01 and H02 have seawater mixing ratios of 9.13% and 10.76%, respectively, and H01 is mixed with more groundwater after being exposed to Quaternary sediments. The comprehensive analyses show that the geothermal water in the Yantian geothermal field is primarily recharged by seawater and its chemical composition is significantly affected by seawater mixing. Furthermore, the comprehensive analyses also suggest that the deep geothermal water is mixed with groundwater or seawater twice or more times as it rises upward, thus forming shallow geothermal reservoirs with a temperature of 89 °C to 121 °C, as estimated by using the SiO₂ geothermometer and the multi-mineral equilibrium method.

Keywords: geothermal water; hydrogeochemistry; environmental isotope; geothermometer; seawater recharge

水热型地热系统中地热水与围岩发生的物质交换,决定了地热水的水化学同位素特征^[1]。地热水化 学同位素特征富含丰富的地热水形成和转化信息, 该方法已被广泛运用于水热型地热系统成因模式研 究^[2]。通常地热水成因机制与地热水补给来源、围岩 岩性特征、水岩作用、冷水混入比、热储温度等密切 相关^[3-9],但沿海地区地热水存在接受海水补给源影响 大,地热水中阳离子成分和微量元素组分可能产生较 大的改变,无法真实反映水岩相互作用程度和热储特 征^[10-12]。针对海水补给型地热系统开展地热水化学 组分分析,确定地热水循环演化规律和地热热储特 征,可为沿海海水补给型地热资源成因机制分析提供 依据,探讨海水补给型地热水化学成因和热储特征有 助于丰富地热资源成因模式理论。

热储温度是地热资源评估的关键影响指标,也 是地热水水岩作用的关键影响要素,热储温度的估 算一般采用地球化学温标法。地热温标法是利用地 下热水的化学组分质量浓度计算地下热储温度的方 法^[13-16],包括 SiO₂温标、气体温标、同位素温标和阳 离子温标^[17],其中,阳离子温标和气体温标对溶液平 衡后的再次反应过程响应敏感。SiO₂地热温标是 根据 SiO₂ 矿物石英、玉髓和非晶质硅的溶解度建立 的^[18-19],在 0~250 °C 温度变化范围内十分接近于溶 液蒸汽压石英的溶解度^[20-21],温标计算结果比较准 确。多矿物平衡法通过假设某种含铝矿物的水岩交 互作用处于平衡状态,比较其余含铝与不含铝矿物饱 和指数(*SI*)随温度的变化曲线,取多种矿物共同达到 平衡状态(*SI*=0)的相交点作为热储温度^[22-23]。多矿物 平衡法估算热储温度受海水混入的影响较小,因此, 本次研究采用 SiO₂ 地热温标和多矿物平衡法估算盐 田地热热储温度。

盐田地热田属于福建闽东南地区,区域内中生代 火山岩和花岗岩分布广泛^[24-25],具有酸性岩体放射性 生热一断裂导热一盖层保热的三元聚热模式^[26]。区域 地热资源分布特征和构造地质条件显示闽东南地区 地热田处于 NNW 与 NE、NEE 向断裂交汇区域^[27-31], NE 向深大断裂为区域主要控热构造,NW 和 EW 向张 性断裂为区域性导水构造^[32-33]。区域性 NW 和 EW 向 张性断裂构成了由山区向沿海的径流通道,同时也构 成了海水由沿海向陆地的运移通道。闽东南地区漳 州地热水化学和同位素研究表明,地热田深部地热水 和海水发生了混合作用,导致地热水的溶解性固体总 量(TDS)大幅增加,形成热咸水。蔺文静等^[34]、Liu 等^[35]利用 SiO₂ 温标和多矿物溶解平衡计算的漳州一 厦门温泉热储温度为 106~149°C, 循环深度为 3 400~ 5 100 m。

已有研究成果揭示了官桥盐田地热田区域控热 构造、导水构造特征和热储层分布特征,但是围绕盐 田地热水补给条件和地热水咸化成因一直存在争议, 特别地热田远离海湾,是否存在海水补给的可能及海 水补给对地热资源的影响均不清楚。本文利用地热 水和地下水的水化学和同位素特征保留的地热系统 形成和演化过程中的重要地球化学和氢氧同位素信 息,揭示了官桥盐田地热水化学特征和地热资源成 因,提升对福建闽东南地区海水补给型地热系统的形 成过程和演变规律认识。

1 研究区概况

官桥盐田地热田位于泉州市南安市官桥镇九十 九溪上游山间沟谷地带,地形总体南西高、北东低,呈 山间沟谷盆地,东距泉州湾约30km,南距围头湾约 20km。区域上最高点为南西侧的尖山,高程为340m, 最低点为前溪沟谷,高程为20m。气候为亚热带海洋 性季风气候,年平均气温21.9℃,年降水量1675mm, 区内河流主要为前溪,先向南东径流,途经盐田村转 向东径流,最终流入九十九溪。

盐田地热田位于平潭一东山北东向断裂带和永 安一晋江北西向断裂带交汇处。区内总体构造格架 以北东向为主,北西向、东西向次之,控制着晚侏罗世 以来岩浆岩侵入、火山喷发活动。区内出露的地层较 简单,主要有上侏罗统南园组第二段(J,n²)、晚侏罗世 正长花岗岩(J, čy)、第四系更新统残积层(Qp^{el})、上更 新统冲洪积层 (\mathbf{Qp}_{3}^{apl}) 、全新统冲洪积层 $(\mathbf{Qh}^{apl})(\mathbf{图 1})$ 。 研究区地下水分为松散岩类孔隙潜水、风化带孔隙裂 隙潜水、基岩裂隙承压水。松散岩类孔隙潜水含水岩 组以第四系冲洪积层为主,接受大气降水和溪沟地表 水的侧向补给,单孔涌水量大于150m³/d。风化带孔 隙裂隙潜水含水岩组以第四系残积层和基岩风化裂 隙为主,接受大气降水和上部砂砾卵石含水层的补 给,单孔涌水量小于 50 m³/d。基岩裂隙承压水主要为 构造裂隙承压水,地下水赋存于构造裂隙中,接受大 气降水和第四系孔隙潜水、风化带孔隙裂隙潜水的侧 向补给,单孔涌水量小于100m3/d。在构造复合部位 存在局部富水地带,单孔涌水量可达 338.86 m³/d。

研究区热储以带状热储为主,由具有能上下贯通



Fig. 1 Geological sketch of Yantian and the distribution of sampling points

张性裂隙的断裂、构造角砾岩的构造带以及与它们相 通的张性节理裂隙组成,形成了地热水赋存的有利空 间、径流和排泄的有利通道。层状热储由Qp^{av/}砂砾卵 石层和强风化岩层等强含水、透水层组成。层状热储 上部覆盖有不透水盖层(粉质黏土、砂质黏土等),厚 1.30~2.50 m。带状热储和层状热储具有明显的水力 联系,且深层热储水力联系密切,研究区地热井深部 热储为同一构造带热储层。

2 样品采集与测试

采集研究区典型的地热井水样 2 组(H01—H02), H01 井深为 50 m, H02 井深为 500 m; 在地热井所处水 文地质单元内按地下水径流方向采集地下水 8 组(C01C08), 井深 90~164 m; 海水样品 4 组(S01—S04), 如 图 1 所示。水温、pH、电导率均使用便携水质分析仪 (Manta2)现场测试; 水样采用 0.45 μm 的微孔滤膜过 滤后, 储存在洁净的聚乙烯瓶, 送至自然资源部地下 水科学与工程重点实验室测试阴离子、阳离子的质量 浓度(ρ)和氢氧同位素含量。阳离子测试仪器为 ICP-OES(ICAP-6 300), 阴离子 SO₄⁻和 Br·测试仪器为离子 色谱仪 ICS1500, 测试精度为 1%, 电荷平衡误差在 5% 以内; Cl·测试采用滴定法; SiO₂测试采用硅钼黄分光 光度法, 仪器型号 UV2550。氢氧同位素利用波长扫 描一光腔衰荡光谱法, 采用 L2130-i 同位素分析仪进 行检测, 测试不确定度 δ¹⁸O 为 0.2‰, δD为 2‰。测试 结果见表 1。

表 1 官桥盐田地下水化学测试结果表 Table 1 List of hydrochemical characteristics of groundwater in Yantian

样品	井深	$ ho(\mathrm{K}^{\scriptscriptstyle +})$	$ ho(\mathrm{Na}^{\scriptscriptstyle +})$	$\rho(\mathrm{Ca}^{2^+})$	$ ho(\mathrm{Mg}^{2+})$	$\rho(\mathrm{Cl}^{\scriptscriptstyle -})$	$\rho(\mathrm{SO}_4^{2\text{-}})$	$\rho(\rm HCO_3^-)$	$\rho(\mathrm{CO}_3^{2\text{-}})$	$\rho(\mathrm{Br}^{-})$	TDS	$\rho(SiO_2)$	nH	δD	$\delta^{_{18}}\mathrm{O}$
编号	/m	$/(\mathrm{mg} \cdot \mathrm{L}^{-1})$	$/(\mathrm{mg} \cdot \mathrm{L}^{-1})$	$/(\text{mg} \cdot L^{-1})$	$/(\text{mg} \cdot L^{-1})$	$/(\mathrm{mg} \cdot \mathrm{L}^{-1})$	$/(mg \cdot L^{-1})$	$/(mg \cdot L^{-1})$	$/(mg \cdot L^{-1})$	$/(\mathrm{mg} \cdot \mathrm{L}^{-1})$	$/(mg \cdot L^{-1})$	$/(\mathrm{mg} \cdot \mathrm{L}^{-1})$	pm	/‰	/‰
H01	50.0	19.67	534.90	415.10	2.53	1 418.00	109.20	67.12	0.00	4.51	2 610.0	69.60	7.03	-41.00	-6.20
H02	500.0	22.57	683.20	456.70	3.73	1 667.00	115.30	76.41	0.00	4.29	3 090.0	74.11	7.15	-39.75	-5.82
C01	100.0	5.60	17.80	13.78	3.99	26.55	2.26	54.92	0.00	< 0.10	167.9	57.00	6.51	-40.00	-6.10
C02	100.0	6.11	42.56	41.27	12.85	65.32	14.65	56.14	0.00	0.13	369.5	45.54	6.47	-41.00	-6.20
C03	100.0	2.25	23.81	27.27	6.26	12.92	12.02	115.90	0.00	< 0.10	212.3	45.03	6.81	-45.00	-6.70
C04	90.0	0.95	31.91	35.77	2.68	22.70	9.58	151.30	0.00	< 0.10	244.0	62.45	7.55	-46.00	-6.80
C05	164.0	0.98	70.32	32.04	3.30	11.53	64.47	183.10	0.00	< 0.10	314.1	34.39	7.79	-41.00	-6.30
C06	110.0	0.92	32.43	47.12	0.87	22.70	4.05	170.20	0.00	< 0.10	245.0	36.69	7.22	-37.00	-5.10
C07	109.0	2.20	21.35	31.72	9.85	26.20	2.28	102.50	0.00	< 0.10	259.0	49.93	7.17	-41.00	-6.30
C08	100.0	5.17	19.10	25.27	5.66	31.78	3.47	73.83	0.00	< 0.10	217.0	57.25	6.62	-37.00	-5.10
S01	-	279.70	7 645.00	309.90	942.00	14 233.00	1 750.00	1 240.00	0.00	32.35	25 310.0	5.47	7.24	-	-
S02	-	322.50	8 590.00	349.50	1 077.00	16 154.00	1 900.00	135.90	0.00	30.94	29 000.0	3.92	7.63	-	-
S03	-	274.20	7 355.00	303.30	912.00	13 535.00	1 582.00	141.80	0.00	24.86	24 050.0	7.13	7.24	-	-
S04	-	344.40	9 435.00	374.30	1 176.00	17 115.00	2 116.00	135.90	0.00	37.51	31 160.0	3.24	7.84	-	-

注:"-"表示无数据;"0.00"表示低于检出限;ρ表示质量浓度。

3 结果

研究区地下水以基岩裂隙水为主, Piper 三线图 (图 2)显示地下水 TDS 在 167.9~369.5 mg/L 之间, 阳 离子以 Na⁺、Ca²⁺为主, 阴离子以HCO₃⁻、Cl⁻、SO₄²⁻为主, 水化学类型为HCO₃—Na·Ca、HCO₃·Cl—Na·Ca、HCO₃· SO₄—Na·Ca型。地热水 H01和 H02的 TDS 分别为 2 610.0 mg/L、3 090.0 mg/L, 阳离子以 Na⁺为主, 阴离子 以 Cl⁻为主, 水化学类型为 Cl—Na型。海水样品的 TDS 在 24 050.0~31 160.0 mg/L之间, 阳离子以 Na⁺为 主, 阴离子以 Cl⁻为主, 水化学类型为 Cl—Na 型。地下 水中 Br⁻质量浓度低于检出限 0.010 mg/L, 仅 C02 检出 为 0.13 mg/L; 地热水 H01 中 Br⁻质量浓度为 4.51 mg/L, 地热水 H02 中 Br⁻质量浓度为 4.29 mg/L; 海水中 Br⁻质 量浓度平均为 31.42 mg/L。研究区地热水 H01、H02 的 $\delta^{18}O$ 和 δD 分别为-6.20‰、-5.82‰和-41.00‰、 -39.75‰。地下水中 $\delta^{18}O$ 和 δD 的值分别为-6.80‰~ -5.10‰和-46.00‰~-37.00‰。地下水化学特征显 示区内地下水具有径流途径短、循环交替较快的特 征。地热水化学类型为 Cl—Na 型,地热水 H01 和 H02 中 Br⁻质量浓度分别为 4.51 mg/L、4.26 mg/L(表 1),地 热水与地下水地球化学特征存在明显的突变,表明地 热水存在其他的 TDS 和富 Br⁻补给来源。

4 讨论

4.1 地下水水化学特征

地热水水化学特征受地热水补给源的水化学特征、地热水径流途中的岩性、排泄过程中其他地下水





的混入以及地貌单元等的控制。盐田温泉水化学类型为 Cl-Na 型, TDS 高达 3.09 g/L。研究区地下水系统较小,地下水的补给、径流至排泄途径较短,天然状态下水岩作用不具有形成 Cl-Na 型水的地质条件,推测 Cl-Na 型水的形成与断裂带远距离的第四系海积层中古海水或者现代海水补给有关。

在自然水岩系统中, Cl⁻不形成矿物盐也不被吸附 到矿物表面,即使是在高温环境下,水岩相互作用影 响也极难影响 Cl⁻的存在状态,因此 Cl⁻常用于示踪地 下热水及系统中与其有较好相关性的其他物质的来 源。研究区 SiO₂与 Cl⁻质量浓度分布图(图 3)显示,地 下水和地热水 SiO₂与 Cl⁻质量浓度明显不同,推断丘 陵山区、山前冲洪积平原冷水中 SiO₂与 Cl⁻质量浓度 受水岩作用控制,呈现一定的正相关关系,而地热水 中 SiO₂由温度控制的水岩作用影响,温度增高,SiO₂ 质量浓度不断增加; Cl⁻质量浓度主要受海相沉积层中 古海水或者现代海水混入影响¹³⁰。

4.2 地热水海水混合比

深部地热水在升流过程中与浅层地下水的混合 是地热系统内的常见过程,混合过程一方面会导致地 热水温度降低,另一方面地下水特别是海水的混入, 可能大幅改变地热水的水化学组成。因此,确定深层 地热水与浅层地下水的混合比对地热资源开发利用 具有重要意义。研究区地下水 Piper 三线图和地下水 同位素特征均显示近岸地区地热水受海水影响。从 地热水的 Cl、Br 质量浓度分布图(图 4)也可以看出 研究区地下水中 Br 质量浓度较低,大部分低于检出 限,但地热水中 Br 较为富集,地热水、海水中 Br 质量



浓度和 CF之间存在线性关系,揭示了研究区地热水部分来自海水并受海水混入量控制的实质。



取泉州湾海域海水样品 CL质量浓度平均值为 15 260 mg/L,混合作用前地下水 CL质量浓度采用研究 区地下水 CL质量浓度平均值 25.50 mg/L,计算得出地热 水 H01 海水混入比为 9.13%, H02 海水混入比为 10.76%。 根据已有试验数据, H01 和 H02 深部热储层为同一热 储,且研究区浅层无高 TDS 的咸水分布,表明出露于 第四系地层的地热水 H01 在浅层混入了较多的地下水。 4.3 地下水的环境同位素特征

泉州大气降雨氢氧同位素缺少相关测试数据,当

地大气降水线参考厦门地区降水线(LMWL)^[37],本地 降水线与全球降水线(GMWL)^[38]近似,研究区地下 水和地热水的氢氧同位素值分布在本地降水线右侧 (图 5),表示其补给来源主要为大气降水。根据盐田 地热田水文地质试验,地热水 H01 和 H02 热储层为同 一热储层。H01 地热井深 50 m,地热水揭露地层较 浅,浅层冷水混入比例较大,地热水氢氧同位素值特 征与浅层地下水相近;H02 地热井深 500 m,地热水氢 氧同位素值在本地地下水和东部地下水之间,且地热 水存在东部古海相沉积海水或者现在海水补给,富集 重同位素。





4.4 水-岩平衡状态

Na-K-Mg 三角图(图 6)可以从地热水平衡状态的 角度将不同类型水样分为完全平衡、部分平衡、未成 熟水 3个区域,其原理为 K⁺、Na⁺质量浓度的平 衡调整较为缓慢,但 Mg²⁺、K⁺质量浓度的平衡调整较 快^[39-40]。研究区地热水处于部分平衡状态,水岩作用 尚未达到完全平衡,溶解作用还在继续。地热水可能 来自较热的环境,在地热水深部循环上升的过程中, 受到了浅层冷水的混合、稀释作用,使得热水中的化 学组分质量浓度变化。地热水的高 TDS 和高 CF质量 浓度源于海水的混入,这是由于海水的混入带来大量 的 CF,还带来了大量的 Na⁺和 K⁺等成分。同时,从图 6 可以看出研究区地热水均靠近右下角顶点处 Mg 端 元,反映水岩平衡的温度较低,热水中的钠、钾矿物均 未达到饱和状态。地热水分布的区域,热水完全平衡 温度为 160 ℃,说明经深循环的高温地热水在浅层与 冷水混合,原本达到溶解平衡的热水受到冷水的强烈 稀释而形成部分平衡水。



4.5 热储温度估算

利用 Phreeqc(Version 3.7.3)中的劳伦斯-利弗莫尔 国家实验室(LLNL)热力学数据库,根据地热水的实 测数据以及研究区地质背景,选取花岗岩中主要矿物 钾微斜长石作为平衡相,假设其处于溶解平衡状态, 以 5 ℃ 为步长,计算 50~200 ℃时各主要矿物的矿物 饱和指数(*SI*)值。本次研究采用阳离子温标法、SiO₂ 地热温标和矿物溶解平衡法进行热储温度的估算和 比较,综合讨论阳离子温标、SiO₂温标和多矿物溶解 平衡法在海水补给型地热系统热储温度估算的适用 性问题。

根据图 7 中各矿物饱和曲线的收敛温度判断流体-岩石反应的平衡状态及流体在储层中达到的最高温度。在各地热田不同温度(*T*)下矿物 *SI* 的计算过程中,主要考虑钠长石、钾长石、三水铝石、高岭土、伊利石等含铝矿物以及石英、玉髓、无水石膏等不含铝矿物以及石英、玉髓、无水石膏等不含铝矿物^[41]。各矿物在 50~200 ℃ 区间内均能实现较好的收敛(图 7)。H01 和 H02 地热水为同一热储层地热水,H01 在上升过程中混入更多的地下水,影响了地热水的矿物平衡,玉髓与高岭土、伊利石均在 *SI*=0 附近相交,所得热储温度相对保守;H02 在上升过程中混入较少的地下水,石英与高岭土、伊利石均在 *SI*=0 附近相交,石英与其他矿物 *SI* 相交时所对应的温度较高,且相交时 *SI* 多处于小于 0 的不平衡状态,表明石



Fig. 7 SI-T diagram of minerals from Geothermal water in Yantian

英反映的是热储理论上的最高温度。

地热地球化学温标计算结果显示,不同温标计算 热储温度结果差异较大(表 2)。SiO₂地热温标和多矿 物溶解平衡法相近,阳离子温标计算温度明显高于 SiO₂地热温标和多矿物溶解平衡法。推测是地热水 中海水混入对阳离子组成影响巨大,海水混入后地热 水水岩作用未达到平衡状态,不适用阳离子温标法,

表 2 官桥盐田地热水热储温度估算结果
 Table 2
 Estimated results of geothermal reservoir temperature
 of geothermal water in Vantian

		01 500	Junei mai watei	in rantia		
廿日	水温 /℃	钾钠温标	钾钠温标	石英温标	工廠油扫	多矿物
作印		$(Fournier^{[17]})$	$(Giggenbach^{[39]})$	(无蒸汽)	玉腿血竹	溶解平衡
洲马		/°C	/°C	/°C	70	/°C
H01	44	144	163	118	89	90
H02	47	137	157	121	93	110

因此,在海水补给型地热系统热储估算中 SiO, 地热温 标和矿物溶解平衡法具有更好的适用性。

4.6 地热成因分析

研究区中低温地热系统受深层幔源物质影响有 限,氦同位素比率表现出典型的地壳变质特性^[42],热 源主要为东西向深大断裂导热和花岗岩放射性生 热。地热异常区周边浅层地下水或海水沿北西向构 造裂隙下渗,下渗过程中不断吸收热量(加温、体积膨 胀、比重变小),当入渗一定深度位置到达深部热源 时,因其温度较外围高,形成压力差,推动地热水沿张 性裂隙上升,并释放热能,周边低温地下水又源源不 断渗入补给,导致浅层热储温度在89~121℃之间, 温度差继续推动地热水源源不断上涌,即形成东南沿 海滨海火成岩区海水补给型地热系统(图8)。





Fig. 8 Diagram of the genetic model of seawater recharge geothermal resources in the southeast coast of China

5 结论

(1)泉州官桥盐田出露热水温度 44~47 ℃,地 下水 TDS小于 400 mg/L,水化学类型主要为HCO₃— Na、HCO₃·Cl—Na·Ca、Cl·HCO₃—Na, TDS 由山前至沟 谷台地不断增加。地热水 H01和 H02的 TDS 分别为 2 610 mg/L 和 3 090 mg/L,水化学类型为 Cl—Na 型,与 研究区地下水呈现突变关系。

(2)地热水化学类型、同位素特征及地热水ρ(CΓ)/ ρ(Br)(质量浓度比)显示地热水存在部分海水补给 现象。根据 Cl-混合模型, 官桥盐田地热水存在海水 混入的影响, 其中 H01 海水混入比为 9.13%, H02 海水 混入比为 10.76%, 地热水 H01 较 H02 混入了较多的第 四系浅层地下水。

(3)海水的混入造成阳离子温标产生较大误差, SiO₂地热温标和矿物溶解平衡法具有更好的适用性。 盐田地热石英温标热储温度范围为118~121℃,玉髓 温标相对温度偏低,玉髓温标热储温度范围为89~ 93℃;多矿物平衡法估算的热储温度为90~110℃。

(4)官桥盐田地区 EN 断裂构成深部热量上升通 道, NW 和近 EW 向断裂构成了地热水补给、径流、排 泄的循环通道,海水或者海相沉积层古海水沿 EW 断 裂径流至 EN 向断裂, EN 断裂深部导热致地下水温度 升高形成压力差,地热水沿张性裂隙上升过程中周边 冷水源源不断渗入补给,浅层热储温度在 89~121 ℃ 之间。

参考文献(References):

- [1] 沈照理, 王焰新, 郭华明.水-岩相互作用研究的机遇 与挑战[J].地球科学, 2012, 37(2): 207-219. [SHEN Zhaoli, WANG Yanxin, GUO Huaming. Opportunities and challenges of water-rock interaction studies[J]. Earth Science, 2012, 37(2): 207-219. (in Chinese with English abstract)]
- [2] KONG Yanlong, PANG Zhonghe, SHAO Haibing, et al. Recent studies on hydrothermal systems in China: A review[J]. Geothermal Energy, 2014, 2: 19.
- [3] 史杰,汪美华,马小军,等.新疆塔什库尔干县曲曼地 热田地下热水同位素研究[J].地球学报,2022,43(5):
 645-653. [SHI Jie, WANG Meihua, MA Xiaojun, et al. Isotope and hydrogeochemical characteristics of the Quman high temperature geothermal field in Taxkorgan, Xinjiang[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2022, 43(5): 645-653. (in Chinese with English abstract)]

- [4] 熊亮萍,汪集旸,庞忠和.漳州热田的对流热流和传导热流的研究[J].地球物理学报,1990,33(6):702-711. [XIONG Liangping, WANG Jiyang, PANG Zhonghe. Convective and conductive heat flows in zhangzhou geothermal field, Fujian province, China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1990, 33(6):702 711. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 张七道,刘振南,尹林虎,等.深变质岩区地热流体化 学特征及成因——以滇西陇川盆地温泉为例[J].吉 林大学学报(地球科学版),2021,51(6):1838-1852.
 [ZHANG Qidao, LIU Zhennan, YIN Linhu, et al. Chemical characteristics and genesis of geothermal fluid in deep metamorphic rock area: A case of hot springs in Longchuan Basin, Western Yunnan[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(6): 1838-1852. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 甘浩男, 蔺文静, 闫晓雪, 等. 粤中隐伏岩体区地热赋 存特征及热异常成因分析[J]. 地质学报, 2020, 94(7): 2096 - 2106. [GAN Haonan, LIN Wenjing, YAN Xiaoxue, et al. Analysis of geothermal occurrence characteristics and origin of the thermal anomalies in the hidden igneous rock area in the central Guangdong[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(7): 2096 - 2106. (in Chinese with English abstract)]
- [7] ÁRMANNSSON H. The fluid geochemistry of Icelandic high temperature geothermal areas[J]. Applied Geochemistry, 2016, 66: 14 – 64.
- [8] 孙红丽,马峰,蔺文静,等.西藏高温地热田地球化学 特征及地热温标应用[J]. 地质科技情报, 2015, 34(3): 171 - 177. [SUN Hongli, MA Feng, LIN Wenjing, et al. Geochemical characteristics and geothermometer application in high temperature geothermal field in Tibet[J]. Geological Science and Technology Information, 2015, 34(3): 171 - 177. (in Chinese with English abstract)
- [9] 汪洋,张旭虎,蒲丛林,等.河北廊坊南部地区地热水 化学特征及成因机制[J].地质通报,2022,41(9): 1698-1706. [WANG Yang, ZHANG Xuhu, PU Conglin, et al. The hydrochemical characteristics of geothermal water and its formation in the south Langfang, Hebei Province[J]. Geological Bulletin of China, 2022, 41(9): 1698-1706. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 史猛,张杰,殷焘,等.胶东半岛中低温对流型地热资 源水化学特征分析[J].地质学报,2019,93(增刊1):
 138 - 148. [SHI Meng, ZHANG Jie, YIN Tao, et al. Hydrochemistry characteristic analysis of low-medium

temperature convective geothermal resources in Jiaodong Peninsula[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(Sup 1): 138 – 148. (in Chinese with English abstract)]

- [11] 徐钫一鸣, 卢国平. 广东海岸带型新洲地热田水化学及海水入侵水动力特征[J]. 安全与环境工程, 2017, 24(1): 1 10. [XU Fangyiming, LU Guoping. Hydrochemical characteristics of Xinzhou geothermal field, coastal Guangdong and the hydrodynamic characteristics of seawater intrusion in the field[J]. Safety and Environmental Engineering, 2017, 24(1): 1 10. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 林韵,高磊,李绍恒,等.广东江门地热水水文地球化 学特征及来源分析[J].环境化学,2020,39(2):512-523. [LIN Yun, GAO Lei, LI Shaoheng, et al. Hydrogeochemical characteristics and source identification of geothermal waters in Jiangmen, Guangdong Province[J]. Environmental Chemistry, 2020, 39(2): 512-523. (in Chinese with English abstract)]
- [13] LIU Yanguang, LIU Bing, LU Chuan, et al. Reconstruction of deep fluid chemical constituents for estimation of geothermal reservoir temperature using chemical geothermometers[J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 2017(2): 87 – 95.
- [14] 王晓翠,孙海龙,袁星芳.胶东典型花岗岩热储地下 热水水化学特征及热储研究[J].水文地质工程地质, 2022, 49(5): 186 - 194. [WANG Xiaocui, SUN Hailong, YUAN Xingfang. A study of the hydrochemical characteristics and geothermal water of typical granite geothermal reservoir in the Jiaodong area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(5): 186-194. (in Chinese with English abstract)]
- [15] CRAIG H. The geochemistry of the stable carbon isotopes[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1953, 3(2/3): 53 - 92.
- [16] 郑西来,郭建青.二氧化硅地热温标及其相关问题的 处理方法[J].地下水,1996,18(2):85-88. [ZHENG Xilai, GUO Jianqing. Silica geothermometer and related methods of dealing with problems[J], Groundwater. 1996,18(2):85-88. (in Chinese)]
- [17] FOURNIER R O. Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems [J]. Geothermics, 1977, 5(1/2/3/4): 41 50.
- [18] FOURNIER R O, ROWE J J. Estimation of underground temperatures from the silica content of water from hot springs and wet-steam wells[J]. American Journal of Science, 1966, 264(9): 685 - 697.

- [19] FOURNIER R O, TRUESDELL A H. An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1973, 37(5): 1255 – 1275.
- [20] FOURNIER R O, THOMPSON J M, AUSTIN C F. Interpretation of chemical analyses of waters collected from two geothermal wells at Coso, California[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1980, 85(B5); 2405 – 2410.
- [21] ARNORSSON S. Application of the silica geothermometer in low temperature hydrothermal areas in Iceland[J]. American Journal of Science, 1975, 275(7): 763 – 784.
- [22] REED M, SPYCHER N. Calculation of pH and mineral equilibria in hydrothermal waters with application to geothermometry and studies of boiling and dilution[J].
 Geochimica et Cosmochimica Acta, 1984, 48(7); 1479 1492.
- [23] PANG Zhonghe, REED M. Theoretical chemical thermometry on geothermal waters: Problems and methods[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1998, 62(6): 1083 – 1091.
- [24] 熊绍柏,金东敏,孙克忠,等.福建漳州地热田及其邻近地区的地壳深部构造特征[J].地球物理学报, 1991,34(1):55-63. [XIONG Shaobai, JIN Dongmin, SUN Kezhong, et al. Some characteristics of deep structure of the Zhangzhou geothermal field and it's neighbourhood in the Fujian Province[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1991, 34(1):55 - 63. (in Chinese with English abstract)]
- ZHANG Ying, LUO Jun, FENG Jianyun. Characteristics of geothermal reservoirs and utilization of geothermal resources in the southeastern coastal areas of China[J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 2020, 8(2): 134 142.
- [26] 李亭昕, 蔺文静, 甘浩男, 等. 东南沿海干热岩资源 成因模式探讨及勘查进展[J]. 地质力学学报, 2020, 26(2): 187 - 200. [LI Tingxin, LIN Wenjing, GAN Haonan, et al. Research on the genetic model and exploration progress of hot dry rock resources on the southeast coast of China[J]. Journal of Geomechanics, 2020, 26(2): 187 - 200. (in Chinese with English abstract)]
- LIN Wenjing, WANG Guiling, GAN Haonan, et al. Heat generation and accumulation for hot dry rock resources in the igneous rock distribution areas of southeastern China[J]. Lithosphere, 2022, 2021(Special 5): 2022.2039112.

- [28] 廖志杰. 福建无岩浆热源的深循环水热系统[J]. 现代地质, 2012, 26(1): 85 98. [LIAO Zhijie. Deep-circulation hydrothermal systems without magmatic heat source in Fujian Province[J], Geoscience, 2012, 26(1): 85 98. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 韩庆之, 庄庆祥. 漳州盆地地下热水的来源和运移途径的初步研究[J]. 地球科学, 1988, 13(3): 271-277.
 [HAN Qingzhi, ZHUANG Qingxiang. On the source and pathway of hot water in Zhangzhou Basin, Fujian[J], Earth Science, 1988, 13(3): 271-277. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 范蔚茗, MENZIES M A, 尹汉辉, 等. 中国东南沿海深 部岩石圈的性质和深部作用过程初探[J]. 大地构造 与成矿学, 1993, 17(1): 23 - 30. [FAN Weiming, MENZIES M A, YIN Hanhui, et al. Nature and processes of the lower lithosphere of the southeast China coast[J]. Geotectonica et Metallogenia, 1993, 17(1): 23 - 30. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 裘中良. 厦门地热资源及成因研究[D]. 北京: 中国 地质大学(北京), 2018. [QIU Zhongliang. Study on geothermal resources and its causes in Xiamen[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 陆晨明,刘春雷,李亚松,等.泉州官桥地区地热勘探 靶区及成因模式探讨[J].地质论评,2021,67(5): 1345 - 1356. [LU Chenming, LIU Chunlei, LI Yasong, et al. Exploration target area of geothermal resources in Guanqiao area, Quanzhou, and its genetic model[J]. Geological Review, 2021, 67(5): 1345 - 1356. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 马振波,马艳飞,张平,等.广域电磁法在福建洪塘镇 地热勘查中的应用[J].矿产勘查,2021,12(3):661-667. [MA Zhenbo, MA Yanfei, ZHANG Ping, et al. Application of wide area electromagnetic method in geothermal exploration of Hongtang Town, Fujian Province[J]. Mineral Exploration, 2021, 12(3): 661 -667. (in Chinese with English abstract)]
- [34] 蔺文静,陈向阳,甘浩男,等.东南沿海厦门湾-漳州盆 地地热地质特征及干热岩勘查方向[J].地质学报, 2020,94(7):2066 - 2077. [LIN Wenjing, CHEN Xiangyang, GAN Haonan, et al. Geothermal, geological characteristics and exploration direction of hot dry rocks in the Xiamen Bay-Zhangzhou Basin, southeastern China[J].

Acta Geologica Sinica, 2020, 94(7): 2066 – 2077. (in Chinese with English abstract)]

- [35] LIU Chunlei, LI Yasong, CAO Shengwei, et al. Effects of seawater recharge on the formation of geothermal resources in coastal areas and their mechanisms: A case study of Xiamen City, Fujian Province, China[J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 872620.
- [36] 王大纯,张人权,史毅虹,等.水文地质学基础[M].北京:地质出版社,1986. [WANG Dachun, ZHANG Renquan, SHI Yihong, et al. General hydrogeology[M].
 Beijing: Geological Publishing House, 1986. (in Chinese)]
- [37] 陈衍婷,杜文娇,陈进生,等.厦门地区大气降水氢氧 同位素组成特征及水汽来源探讨[J].环境科学学报, 2016, 36(2): 667 - 674. [CHEN Yanting, DU Wenjiao, CHEN Jinsheng, et al. Composition of hydrogen and oxygen isotopic of precipitation and source apportionment of water vapor in Xiamen area[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(2): 667 - 674. (in Chinese with English abstract)]
- [38] YURTSEVER Y. Worldwide survey of stable isotopes in precipitation[R]. Rep. Sect. Isotope Hydrol., IAEA, 1975.
- [39] GIGGENBACH W F. Geothermal solute equilibria derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1988, 52(12): 2749 – 2765.
- [40] 史杰,乃尉华,李明,等.新疆曲曼高温地热田水文地 球化学特征研究[J].水文地质工程地质,2018,45(3);
 165 - 172. [SHI Jie, NAI Weihua, LI Ming, et al. Hydrogeochemical characteristics of high temperature geothermal field of the Quman geothermal field in Xinjiang[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(3); 165 - 172. (in Chinese with English abstract)]
- [41] SPYCHER N, PEIFFER L, SONNENTHAL E L, et al. Integrated multicomponent solute geothermometry[J]. Geothermics, 2014, 51: 113 – 123.
- [42] TIAN Jiao, LI Yiman, ZHOU Xiaocheng, et al. Geochemical characteristics of hydrothermal volatiles from southeast China and their implications on the tectonic structure controlling heat convection [J]. Frontiers in Earth Science, 2021, 9: 786051.

编辑: 汪美华 实习编辑: 刘真真