

王新伟, 张漓黎, 李善民. 广西杨梅冲地热田成因模式分析[J]. 中国岩溶, 2024, 43(4): 876-888, 921.

DOI: 10.11932/karst20240407

广西杨梅冲地热田成因模式分析

王新伟¹, 张漓黎², 李善民¹

(1. 中国有色桂林矿产地质研究院有限公司, 广西 桂林 541000; 2. 广西壮族自治区
区域地质调查研究院, 广西 桂林 541000)

摘要: 广西贺州地热资源丰富, 所蕴含的地热能潜力巨大, 极具开发前景和研究价值, 但该地区地热资源存在补给来源、循环演化过程及成因机制不清的问题。本研究通过地热地质调查、地球物理、地球化学和环境同位素等方法探究贺州杨梅冲地热水的热储特征、补给来源、循环深度和成因模式, 初步建立地热资源温度、组分、深度、磁性等参数与地质认识一致的地质—地球物理模型和隆起山地断裂对流型地热概念模型。结果显示, 杨梅冲地热田属带状热储, 姑婆山断层是杨梅冲地热田主要导水、控热构造。杨梅冲地热田地热流体水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型。氢氧同位素显示区内地热水的补给来源于降水入渗。降雨在水力和热力的驱动下沿着断裂带和岩石孔隙循环交替水热对流, 形成了杨梅冲断裂对流型地热模型。研究结果为广西杨梅冲地热资源的勘查和合理利用提供理论依据。

关键词: 杨梅冲地热田; 流体地球化学; 热储循环深度; 地热概念模型

创新点: 揭示广西杨梅冲地热田补给来源、循环演化过程和成因机制, 提出杨梅冲地热田隆起山地断裂对流型地热概念模型。

中图分类号: P314 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810 (2024) 04-0876-13

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

我国是世界上地热资源丰富的国家之一, 资源量约占全球的 1/6。目前, 我国地热资源开发利用多以浅层和中深层的水热型地热为主, 开发潜力巨大。在能源短缺、环境污染严重的背景下, 开发利用地热资源有利于缓解能源危机和改善能源结构, 促进经济的可持续发展^[1-2], 对落实 2030 年“碳达峰”与 2060 年“碳中和”目标具有重要意义。

广西位于欧亚板块、太平洋板块和印度板块的交界部位, 岩石圈厚度较薄, 构造裂隙发育, 岩浆岩大面积出露且放射性元素含量较高, 具有较好的生

热和储热条件^[3]。然而, 广西地热资源勘察程度不高, 针对其赋存规律、分布特征、运移机理和资源潜力的系统性研究还较少。目前, 在干热型地热资源研究方面, 吴少斌等^[4]、康志强等^[5]利用地热地质分析、地质类比、广西航磁勘查数据反演等技术和方法对广西合浦盆地干热岩资源成热条件及潜力进行评价; 孙明行等^[6]采用区域地质调查、热物性测定、放射性元素测量、地热地球化学和地球物理勘查等综合研究方法对钦州、合浦盆地干热型地热资源潜力区的热源机制、运移和聚热模式进行了系统总结。在浅层地热资源和水热型地热资源研究方面, 主要有莫亚军等^[7]采用重力测量及可控源音频大地电磁法

资助项目: 2021 年广西重点研发计划项目“漓江流域废弃采石场生态修复技术集成与示范”(桂科 AB21220049); 国家重点研发计划课题“漓江流域喀斯特自然景观修复与植被生态功能提升关键技术研发及试验示范”(2019YFC0507503)

第一作者简介: 王新伟(1988—), 男, 高级工程师, 程硕士, 研究方向: 水工环地质及地质环境修复治理。E-mail: wangxinwei1012@163.com。

通信作者: 张漓黎(1988—), 女, 高级工程师, 硕士, 研究方向: 水工环地质及地质环境修复治理。E-mail: 148389477@qq.com。

收稿日期: 2023-12-29

(CSAMT)等手段调查广西柳州北部地区地热成藏条件。廖海吉等^[8]通过对贺州市汤水寨地热田进行详查,研究了带状热储特征并评价了其热储资源量。吴伟志等^[9]通过对南乡镇大汤温泉地理环境和地质条件分析来探讨温泉的形成条件,并对温泉水质的化学成分进行了测定。朱思萌等^[10]研究了贺州热泉的水文地球化学特征,估算了热储温度及循环深度。王建超等^[11]探讨了浅层地温、氦气、土壤汞气测量和可控音频大地电磁法(CSAMT)测深等多种物化探方法在贺州某地热温泉中的应用。

据统计,广西现有温泉(井)52处,主要分布于桂东北、桂东南,均属于中低温型^[12]。广西贺州杨梅冲地热田位于桂东南地热富集区,地处萌渚岭南缘,位于南岭东西向构造岩浆岩成矿带中段,具有地质构造复杂、岩浆活动频繁以及地热资源丰富等特征^[3]。贺州市温泉资源具有分布点多、储量大、水温稳定、水质好等特点。为了科学高效利用该地区地热资源,开展杨梅冲地热资源的地热储量、赋存规律和成因模式的研究具有重要意义^[13]。目前,围绕贺州地热

已取得丰富的研究成果。然而,对杨梅冲地热田赋存特征和成因机制研究还较少,造成对该地热田地热资源还没全面了解。特别是对该地热田的赋存规律和成因模式还缺乏科学解释。鉴于此,本研究旨在利用水文地质调查、地球物理勘查、地温测量、地热钻探工程和水文地球化学分析等方法 and 手段来揭示杨梅冲地热资源的地热储量、地温梯度、地热流体流量等地热矿赋存特征和分布规律,探索地热田的成因模式。通过本研究能减少地温开发风险、取得最大的社会效益和环境效益,并最大限度地地保持资源的可持续利用。

1 区域地热地质环境背景

杨梅冲地热田位于广西贺州市平桂区黄田镇,属于低山丘谷地貌,地势呈东西高、南北低的格局(图 1a)。矿区气候属亚热带季风气候区,年均降雨量为 1 579.07 mm。黄田镇地表河流为自东北向西南向的马尾河,年平均流量约 $15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

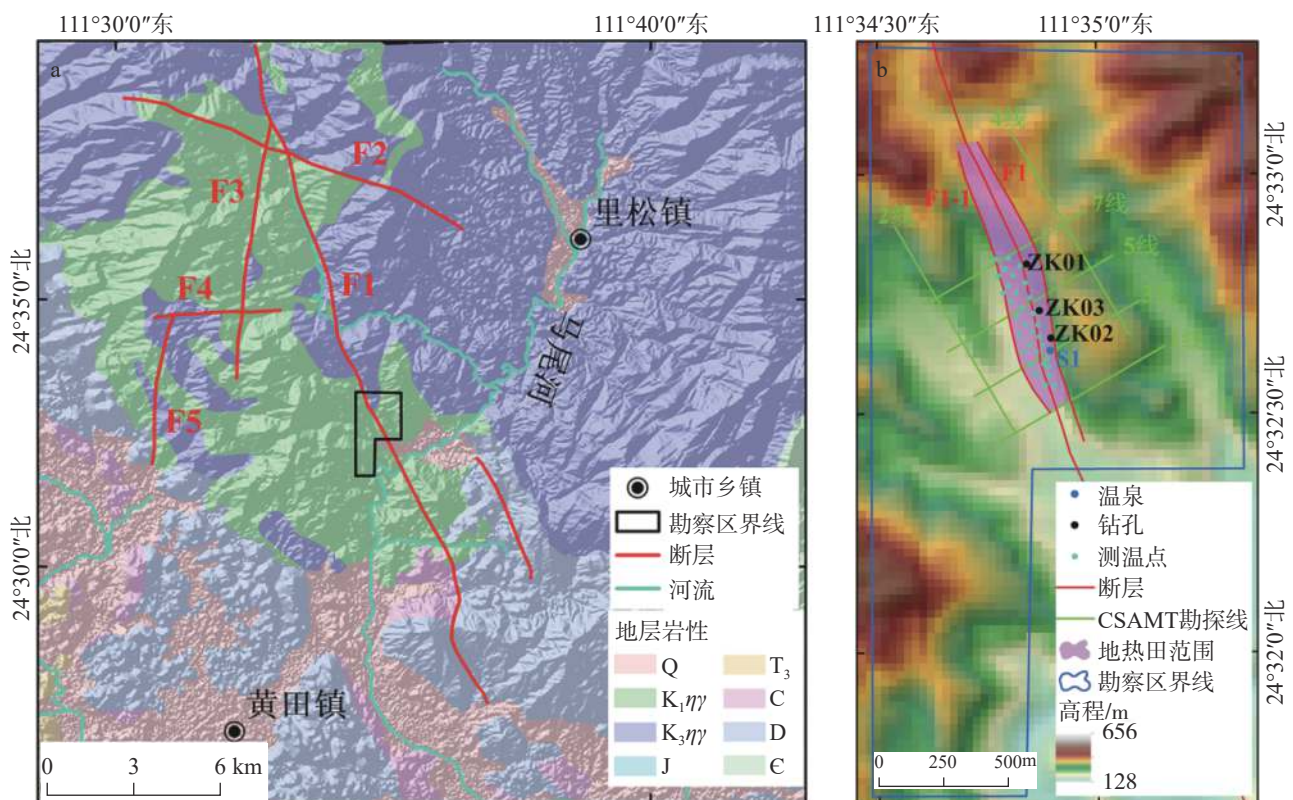


图 1 研究区地质简图与地热田分布图(Q: 第四系冲洪积层; $K_1\eta\gamma$: 早白垩世新路岩体; $J_3\eta\gamma$: 晚侏罗世里松岩体、姑婆山岩体; D: 泥盆系砂岩、白云岩)

Fig. 1 Geological map and distribution of geothermal fields in the study area (Q: Quaternary alluvial eluvium; $K_1\eta\gamma$: early Cretaceous Xinlu pluton; $J_3\eta\gamma$: late Jurassic Lisong rock mass and Gupo mountain rock mass; D: Devonian sandstone and dolomite)

区域内的岩浆岩广泛分布,主要产出于加里东期和燕山期的岩浆活动,多期的岩浆侵入活动在该地区形成了姑婆山复式岩体,导致深部岩浆岩余热丰富,为地热田的生成提供良好的热源条件。姑婆山复式岩体主要包括晚侏罗世里松岩体($J_3\eta\eta^{Ihb}$)、姑婆山岩体($J_3\eta\eta^2$ 或 $J_3\xi\gamma^2$)和早白垩世新路岩体($K_1\eta\eta$ 或 $K_1\xi\gamma$)。杨梅冲地热矿区岩性主要为中—细粒斑状黑云母二长花岗岩和细粒斑状黑云母正长花岗岩($K_1\eta\eta$ 或 $K_1\xi\gamma$)。矿区以断裂构造运动为主,具有右行平移性质的姑婆山断裂(F_1)近南北向穿过矿区,断层带切割深度较大,深部的水热交换作用较为强烈,为地热田的生成提供良好的储存条件。现在矿区内有有泉点一个(S1),平均涌水量 $3.84\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 、平均水温 $38.4\text{ }^\circ\text{C}$ 。地热钻孔(井)3个(ZK-01~ZK-03),平均涌水量 $14.82\sim45.79\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 、平均水温 $37.2\sim46.0\text{ }^\circ\text{C}$,达到温热水级别,水中氟、偏硅酸、氨含量达到医疗价值浓度,具有较高的开发利用价值。目前地热井处于全封闭状态,未开采使用。

2 数据与方法

地热田勘查区面积约 3.11 km^2 (图 1b),共布置地质钻孔 3 个(ZK-01~ZK-03)和温泉点 1 个(S1)。其中 ZK-01(孔深 315 m)、ZK-02(孔深 423 m)为前人施工钻孔,ZK-03 为本次勘查施工的探采结合孔(孔深 1 200.44 m)。

地球物理勘查采用可控源音频大地电磁测深

(CSAMT)测点 163 个,点距 30 m,共 6 条测线以掌握该地热田深部地层结构、构造展布及含水特性^[14]。其中 1、3、5、7 测线横向控制热储带,2、4 测线纵向控制热储带。土壤汞气和氦气测量样品分别是 162 个,点距 30 m,采样点与可控源测深点重合。

为了探明地热异常区,在杨梅冲地热资源勘查区温泉露头附近重点布置 32 个浅层测温(水位)钻孔,孔深 11.0~15.6 m,浅孔主要以杨梅冲温泉露头为中心,沿着南北向展布的杨梅冲沟谷布置,成孔后统一进行地下水位、15.6 m 深度水温测量。

此外,对 S1 温泉、ZK-01 至 ZK-03 井水点、地表水点(X1)进行定期采样,共取样 15 件,密封后送广西壮族自治区地质矿产测试研究中心、自然资源部岩溶地质资源环境检测中心、广西壮族自治区三一〇核地质大队检测中心、桂林市产品质量检验所作水化学全分析、微量元素、放射性元素、稳定同位素、特殊成分等水质分析。对 ZK-03 进行取岩屑样 2 件,在有色金属桂林矿产地质测试中心作硅酸盐全分析。地热水和地表水常规组分和特征组分测试结果见表 1,硅酸盐岩矿检测结果见表 2,地热水与雨水中同位素含量如表 3 所示。

3 结 果

3.1 热储分布及特征

通过地热钻探及物探工作成果综合分析可知,在平面上,杨梅冲地热田边界受姑婆山断层 F_1 及伴

表 1 地热水和地表水常规组分和特征组分

Table 1 Conventional and characteristic components of geothermal water and surface water

样品	热储带 深度/m	常规组分/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$							特征组分/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$			
		Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	H_2SiO_3	F	Rn	H_2S
ZK01	308~315	22.90	0.87	18.30	0.20	95.50	5.86	1.06	51.80	5.22	601.35	—
ZK02	418~423	23.90	1.00	18.00	0.18	94.70	6.77	1.08	53.30	5.48	195.24	0.22
ZK03	905~918	32.40	1.06	17.60	0.088	91.30	14.70	1.90	53.90	6.66	1 369.30	0.42
S1(温泉)	—	22.40	1.02	18.20	0.18	94.30	6.02	1.03	51.60	5.03	338.27	—
X1(溪流)	—	9.96	1.16	10.60	0.49	47.60	6.08	1.00	—	—	—	—

表 2 硅酸盐岩矿检测结果(单位: %)

Table 2 Testing results of silicate rocks and minerals (Unit: %)

样品	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	K_2O	Na_2O	CaO	MgO	MnO	P_2O_5	TiO_2	H_2O^+	烧失量
ZK03-1	78.68	10.89	1.11	0.53	4.59	2.32	0.51	0.071	0.026	0.014	0.092	0.96	0.89
ZK03-2	77.51	11.40	1.49	0.84	4.61	2.45	0.71	0.093	0.034	0.017	0.10	1.40	1.14

表 3 地热水与雨水中同位素含量

Table 3 Isotope contents in geothermal water and rainwater

检测项目	ZK03	ZK02	雨水
$\delta\text{D}/\text{‰}$	-42.70	-39.80	-8.90
$\delta^{18}\text{D}/\text{‰}$	-7.06	-6.54	-2.55
$^3\text{H}(\text{TU})$	<2	<2	5.42

生的 F_{1-1} 次级断层控制,属于带状热储,面积约 0.15 km^2 。 F_1 为北西向分布,呈舒缓波状特征,为区内导水控热的主要断裂构造。 F_{1-1} 断层位于 F_1 断裂破碎带以西,与 F_1 走向大体一致,是其伴生的次级断层构造,为区内次级导水构造。

在剖面上,杨梅冲地热田热储带主要由浅层至深层发育的三层断层破碎带组成(图 2)。第一层破碎带由 ZK01 揭露其埋藏深度为 308~315 m,厚度为 7 m;钻孔 ZK02 揭露其埋藏深度为 418~423 m,厚度为 5 m;钻孔 ZK03 揭露其埋藏深度为 403~413 m,厚度为 10 m。破碎带北高南低,平均厚度为 7.3 m。结

合物探成果分析(图 3),第一层破碎带埋藏深度位于地热田断裂破碎带(F_1)与次级断层 F_{1-1} 的交汇处(物探低阻反映),因此,第一层破碎带的特征是岩石破碎,含水层水力连通性较好。当 ZK03 孔钻进至第一层破碎带时,现场巡视发现 ZK01、ZK02 孔均有一定的流量衰减现象,说明 ZK03 孔与 ZK01、ZK02 孔水力连通性较好,ZK03 孔在下了套管和水泥止水后,ZK01 与 ZK02 自流量恢复如初,后期动态监测过程中,ZK01、ZK02 孔流量稳定,未受 ZK03 成井影响。

第二层破碎带由 ZK03 钻孔揭露,埋藏深度为 801~814 m,厚度为 13 m。根据第一层破碎带埋藏深度与物探低阻反映位置较为吻合的特征,第二层破碎带北端可由相对应的 7 号物探剖面低阻反映深度推测,其埋藏深度约为 710~720 m,厚度约为 10 m。南端则由相对应的 3 号物探剖面低阻反映深度推测,其埋藏深度约为 815~820 m,厚度约为 5 m。破碎带北高南低,平均厚度为 9.3 m。

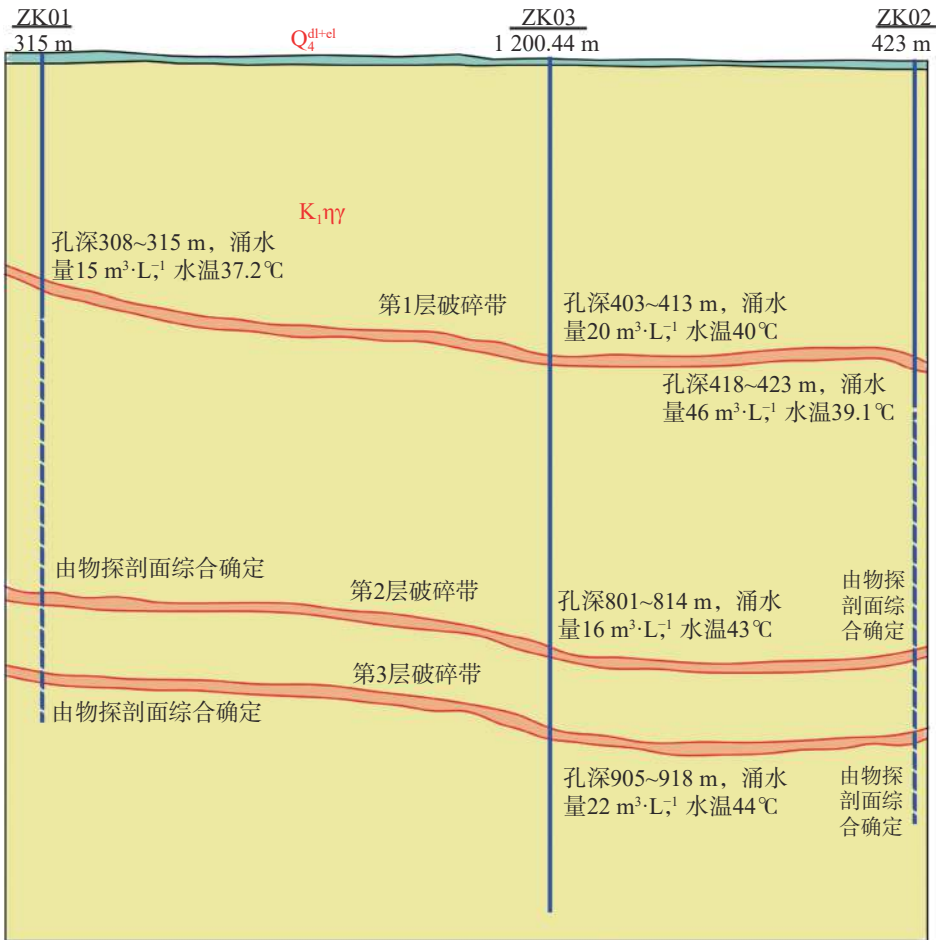


图 2 热储构造纵向剖面图

Fig. 2 Longitudinal profile of thermal storage structure

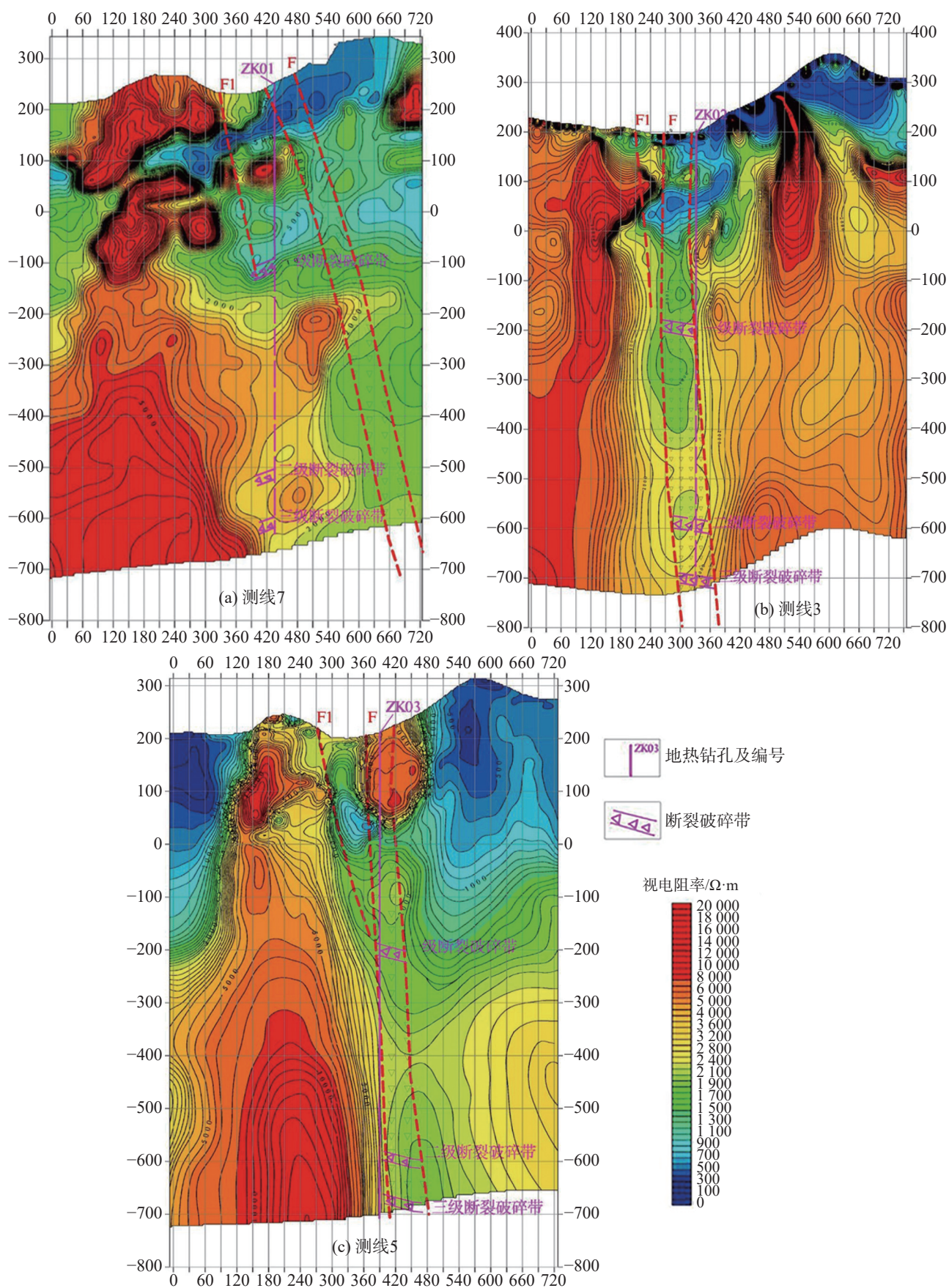


图3 CSAMT 电阻率剖面图

Fig. 3 Profile of CSAMT resistivity

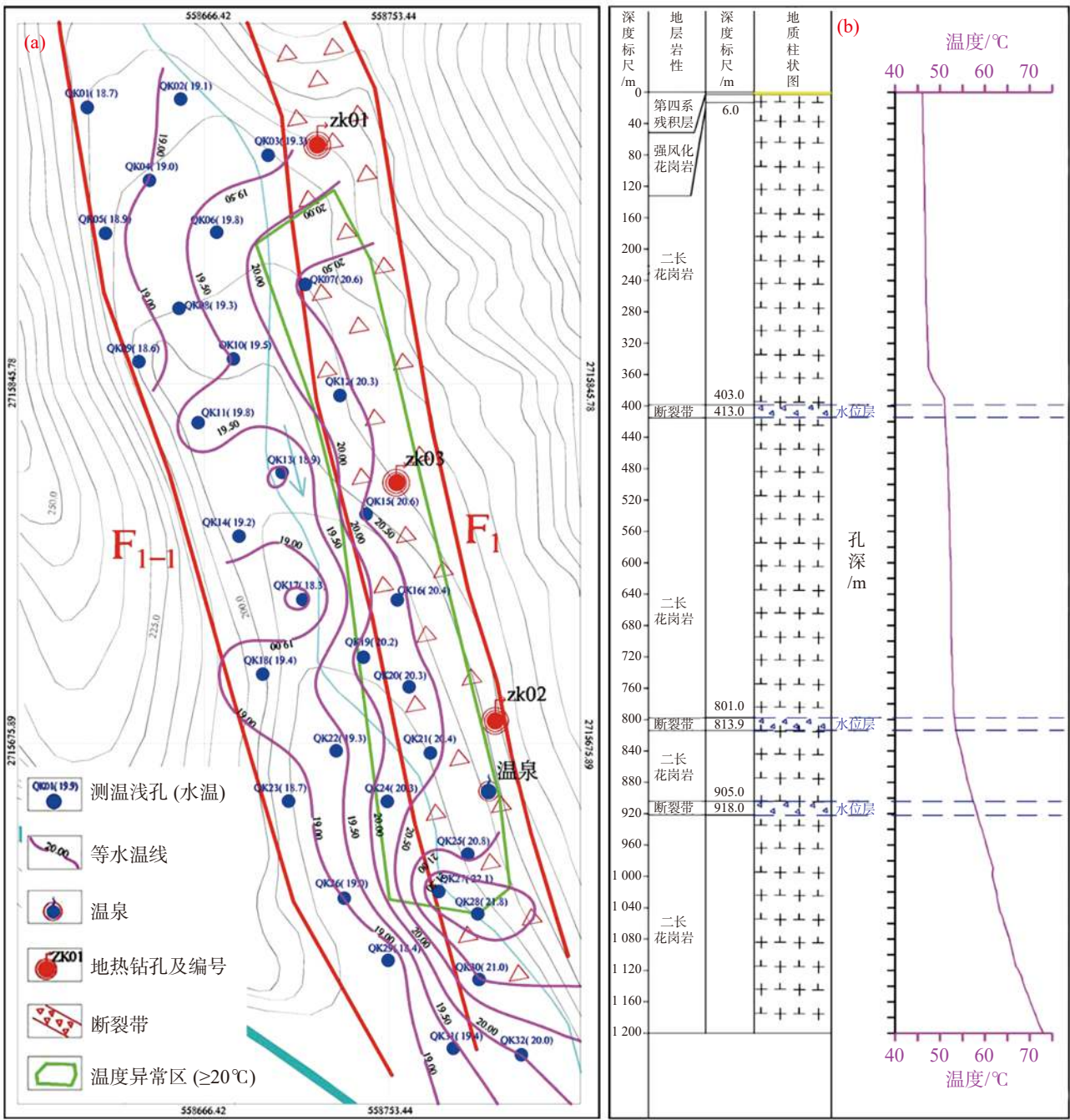


图 4 浅层地下水水温等值线图 (a) 和 ZK03 水温剖面图 (b)

Fig. 4 Contour map of shallow groundwater temperature (a) and water temperature profile of ZK03 borehole (b)

第三层破碎带由 ZK03 钻孔揭露, 埋藏深度为 905~918 m, 厚度为 13 m。同样地, 第三层破碎带南端和北端分别由相对应的 3 号和 7 号物探剖面低阻反映深度推测其埋藏深度约为 920~825 m 和 810~820 m。该破碎带北高南低, 平均厚度为 9.3 m。

根据断层带含水层倾角可将上述破碎带(含水层)铅直厚度计算出含水层的真厚度, 带状含水层并

非平面分布, 而是受断裂控制呈倾斜状分布, 倾角取姑婆山断层倾角 70°, 需计算出倾斜延伸深度。计算公式如下:

$$L = (D - d) / \sin \alpha \tag{1}$$
$$M = m \cos \alpha \tag{2}$$

式中: L 为含水层倾斜延伸深度(m); D 为地热水循环深度(m), 取 3 180 m; d 为含水层顶板埋深(m); α 为含水层倾角(°), 取 70°; M 为含水层真厚度(m); m

为含水层铅直厚度(m),即钻孔出水段厚度。

根据式(1)和(2)计算得出地热储带(含水层)空间几何特征见表 4。第一到三层热储带的体积分别

是 4.58×10^8 、 3.80×10^8 和 $3.63\times 10^8\text{ m}^3$,总体积合计 $1.20\times 10^9\text{ m}^3$ 。

表 4 热储带(含水层)空间几何参数

Table 4 Spatial geometric parameters of thermal storage zones (aquifers)

热储带	计算基准 高度D/m	顶板埋 深d/m	含水层 倾角 $\alpha/^\circ$	含水层平均 铅直厚度m/m	含水层真 厚度M/m	含水层倾 斜深度/L $\cdot\text{m}^{-1}$	地热田 面积A/m ²	体积V /m ³	总体积 V _总 /m ³
第一层	3 180	308	70	7.3	2.48	3 055		4.58×10^8	
第二层	3 180	801	70	9.3	3.16	2 530	150×10^3	3.80×10^8	1.2×10^9
第三层	3 180	905	70	9.3	3.16	2 420		3.63×10^8	

3.2 地温场特征

3.2.1 浅部地温场特征

由 32 个浅层测温孔绘制的地热田 15.6 m 深度的地下水水温等值线图 4 可知:实测温度范围 18.3~22.1 ℃,从地热田西边到东边越靠近姑婆山断层带水温越高;从地热田北边到南边浅孔最高温度由 20.6 ℃ 升到 22.1 ℃;地热田不同位置浅层地温梯度也不相同,北边至南边平面上的地温梯度也逐渐增大。

地热田从西侧边界(F₁₋₁)到东侧边界(F₁)以及从北侧边界到南侧边界温度、地温梯度逐渐增大,说明断层带南边的地热释放量大于北边,南边的水热活动要更加强烈。从第一层热储地热水的南边 ZK02 孔自流量 45.79 m³·h⁻¹,水温 39 ℃,北边的 ZK01 孔自流量 14.82 m³·h⁻¹,水温 37.2 ℃。比较可知,南边水量、水温明显大于北边也可映证前述特征。

3.2.2 深部地温场特征

对钻孔 ZK03 进行了一次完井全孔水温测量,孔口水温 46 ℃,孔底(1 200 m)水温 73 ℃。根据测温数据,垂向上,0~360 m 深度内的温度为 46.0~47.5 ℃,地温梯度为 0.42 ℃·100m⁻¹;360~400 m 深度内的温度为 47.5~51.0 ℃,地温梯度为 8.75 ℃·100 m⁻¹;400~800 m 深度内的温度为 51.0~53.5 ℃,地温梯度为 0.63 ℃·100m⁻¹;800~1 200 m 深度内的温度为 53.5~73.0 ℃,地温梯度为 4.88 ℃·100m⁻¹。加权平均地温梯度为 2.25 ℃·100m⁻¹。

热储带盖层:0~360 m,400~800 m 地温梯度低(0.42~0.63 ℃·100m⁻¹),温度变化小,说明盖层花岗岩

体较为完整,裂隙不发育,热导率低;热储带:360~400 m,800~1 200 m 地温梯度高(4.88~8.75 ℃·100 m⁻¹),温度变化明显,说明热储带构造裂隙发育,导热导水性好。

3.3 地热水地球化学特征

3.3.1 地热流体化学特征

杨梅冲地热水 pH 为 7.91~8.24,属偏碱性水;总溶解固体为 188~211 mg·L⁻¹,属于低矿化度的淡水;总硬度为 44.3~46.5 mg·L⁻¹,属于软水。根据地热水和地表水的常量组分含量分析(表 1),绘制了 Piper 三线图(图 5)。地热水和地表水各种常量组分的浓度很低,阳离子 Na⁺,Ca²⁺占优势,阴离子中 HCO³⁻占优势。总体而言,Mg²⁺浓度随着深度的增加而降低,Na⁺、Cl⁻浓度随着深度的增加而增加。根据库尔洛夫式,地热水样的水质类型为 HCO₃-Na 型水。地表水的水质类型为 HCO₃-Ca 型水。

由地热水的特征组分含量(表 2)可知:地热水和地表温泉的偏硅酸含量均超过 50 mg·L⁻¹,ZK03 钻孔内偏硅酸含量最高,按《医疗热矿水水质标准》,地热水可定名为“硅水”。根据硅酸盐全岩分析结果(表 3)可知:本区花岗岩体中 SiO₂ 的含量占到 78% 左右,其次为 Al₂O₃ 约占 11%,钾、钠、铁的矿物元素约为 8%,其他矿物元素只占 2%。由此可知,地下热水中偏硅酸和钠离子含量较高,是由于深部地下水对花岗岩体的溶滤作用造成的。地热水和温泉的氟含量均超过 2 mg·L⁻¹,地热水可定名为“氟水”^[15]。地热水和温泉中氡的浓度范围在均已超过 195.24~1 369.30 Bq·L⁻¹,浓度均超过 129.50 Bq·L⁻¹,其医疗价值明显,可定名为“氡水”。杨梅冲地热水中的 H₂S

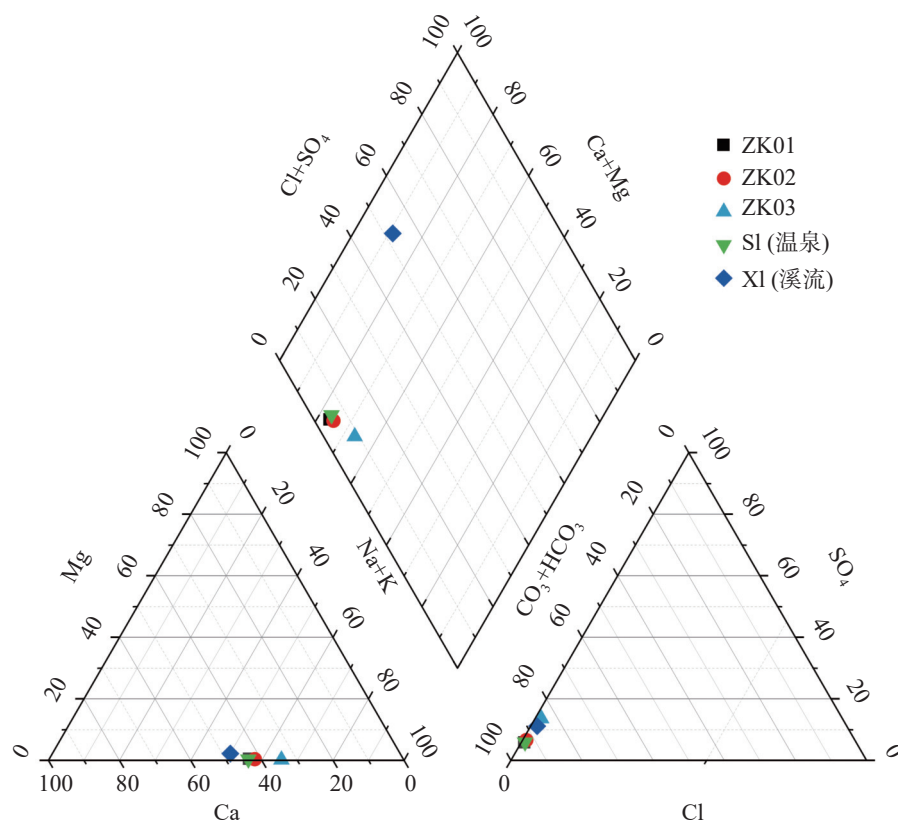


图 5 杨梅冲地热水化学类型 Piper 图

Fig. 5 Piper diagram of hydrochemistry of of geothermal water in Yangmeichong

含量在 $0.22\sim 0.42\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 含量过低, 小于 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 未达到医疗价值指标。

3.3.2 地下热水同位素特征

由杨梅冲地热水与雨水中氘(δD)、氧同位素($\delta^{18}\text{O}$)、氚(^3H)检测结果(表 3)可以看出, 本区内地热水氢氧稳定同位素值总体波动较小, δD 值为 $-39.8\text{‰}\sim -42.7\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $-6.54\text{‰}\sim -7.06\text{‰}$, 均分布在中国大陆大气降水线、全球大气降水线附近, 说明区内地热水的补给直接或间接来源于当地降水入渗补给^[16]。

氚同位素的半衰期是 12.3 年, 而在 1960 年左右人类进行了大量的热核试验导致氚同位素含量突增, 所以 1960 年前后形成的地下水中氚含量差别十分明显, 利用这一特征可以大致判断地下水形成的年龄^[17]。本次取样分析的地热水氚含量均小于 2 TU, 杨梅冲地热水主要由 1960 年之前的大气降水入渗补给, 经断裂带深部循环, 五十多年以后由本次的地热勘查钻孔揭露姑婆山断裂带出露成温泉, 这也就是该温泉水的形成时间。

3.4 深部热储温度及循环深度

3.4.1 冷热水混合过程分析

图 6 展示了杨梅冲地热田热水平衡状态, 可以发现所有水样位于靠近 Mg^{2+} 处的未平衡区, 表明研究区水-岩作用相对较低, 溶解作用仍在进行^[18]。据此判断研究区深部地热流体在向上运移的过程中受到了不同程度浅部冷水的混入。

3.4.2 地热温度计估算深部热储温度

地热系统热储温度对划分地热成因模型及地热资源潜力评价意义重大。地热温标可有效评估深部热储温度^[19]。根据《地热资源地质勘查规范》(GB/11615-2010)和地热田地热形成的地质条件和地热水化学特征, 深部热储层温度可采用二氧化硅地热温标和钾镁地热温标进行估算^[20]。

(1) 二氧化硅地热温标法

根据各温泉(钻孔)水化学分析中偏硅酸的含量(表 2), 可计算出 SiO_2 的质量浓度, 来估算深部的热储温度。计算公式如下^[21]:

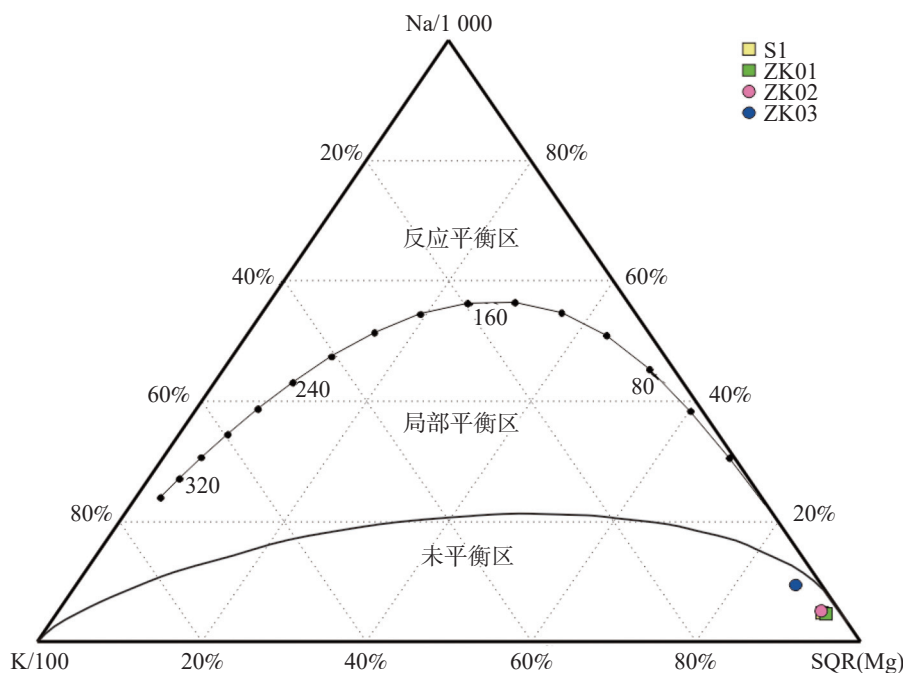


图 6 热水 Na-K-Mg 平衡图
Fig. 6 Na-K-Mg equilibrium diagram of geothermal water

$$t_a = 1309 / (5.19 - \lg c) - 273.15 \quad (3)$$

式中： t_a 为热储温度 ($^{\circ}\text{C}$)； c 为溶解 H_2SiO_3 形式的 SiO_2 的含量 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。

经计算，杨梅冲地热田热储温度在 $91.47\sim 93.52^{\circ}\text{C}$ ，深部平均热储温度 t_a 为 92.24°C 。由此可以判断杨梅冲地热田地下热水的深部热储为中低温热储。

(2) 钾镁地热温标法

根据各温泉(钻孔)的水化学分析中钾离子、镁离子的含量，估算深部的热储温度。钾镁地热温标法的计算公式为^[22]：

$$t_a = 4410 / [13.95 - \lg (c_2^2 / c_3)] - 273.15 \quad (4)$$

式中： t_a 为热储温度 ($^{\circ}\text{C}$)； c_2 为水中钾离子浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)； c_3 为水中镁离子浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。

根据式(4)计算结果见表 5，由钾镁地热温标法计

算的杨梅冲地热田深部热储平均温度 t_a 为 87.22°C 。

3.4.3 热矿水循环深度的估算

根据杨梅冲地热田内地热井测温资料，地热田地温增温梯度 $2.25^{\circ}\text{C}\cdot 100\text{ m}^{-1}$ ，恒温带温度 18.5°C ，恒温带深度 15 m 。通过式(5)可计算地下热水的循环深度^[23]：

$$H = (t_a - t_b) / g + h \quad (5)$$

式中： H 为热矿水循环深度 (m)； g 为地温梯度 ($^{\circ}\text{C}\cdot 100\text{ m}^{-1}$)； t_a 为深部平均热储温度 ($^{\circ}\text{C}$)，其值由二氧化硅地热温标和钾镁地热温标法确定； t_b 为基准温度 ($^{\circ}\text{C}$)； h 为恒温带深度 (m)。

由二氧化硅地热温标和钾镁地热温标法计算杨梅冲地热田的地下热矿水循环深度 H 分别是 $3\ 292\text{ m}$ 和 $3\ 069\text{ m}$ 。

表 5 二氧化硅和钾镁地热温标法热储温度计算结果

Table 5 Thermal storage temperatures measured by silica geothermal temperature scale and potassium magnesium geothermal temperature scale

样品	水温 / $^{\circ}\text{C}$	计算指标浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		二氧化硅地热温标法 热储温度/ $^{\circ}\text{C}$	计算指标浓/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		钾镁地热温标法 热储温度/ $^{\circ}\text{C}$
		H_2SiO_3	SiO_2		K^+	Mg^{2+}	
ZK01	37.2	51.8	39.84	91.47	0.87	0.20	81.64
ZK02	39.0	53.3	41.00	92.49	1.00	0.18	85.81
ZK03	46.0	53.9	41.46	93.52	1.06	0.088	95.20
S1 (温泉)	38.3	51.6	39.69	91.47	1.02	0.18	86.24

4 讨论

4.1 热储构造及热源分析

杨梅冲地热田热储层主要由燕山期花岗岩断裂破碎带组成,属于带状热储。姑婆山断层(F_1)是杨梅冲地热田主要导水、控热构造,断层(F_{1-1})是次级导水构造。姑婆山断层为区域深大断裂,断层带岩石破碎,切割深度大,尤其是中生代以来区内多期构造运动产生的多级断裂,对地壳深部热源起了重要的传导传递作用。地热田第一层热储带赋存深度在海拔-400 m以上,与勘查区浅层花岗岩风化带网状裂隙水交替循环密切,其特点是地热水水量大($3.84\sim 45.29\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$),水温偏低($37.2\sim 39.0\text{ }^\circ\text{C}$),受季节影响大。地热田第二、三层热储带赋存深度在海拔-500 m以下,与勘查区浅层花岗岩风化带网状裂隙水水力联系差,其特点是地热水水量偏小($19.94\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$),水温偏高($46\text{ }^\circ\text{C}$),受季节影响小。

此外,地热田在中、新生代受到太平洋板块的影响,整个上地幔受到了扰动,上地幔、地壳深部的热量(幔热流)及地壳浅部的放射性元素衰变产生的热(壳热流)是地热田大地热流的来源,为深循环地下水形成提供了热源。

综上所述认为,杨梅冲地热田的热源为断裂带水热对流传导传递深部热流为主,上地幔热以面状大地热流向浅部传导传递为辅。

4.2 地热流体补给来源

据本次地面调查及氢氧同位素分析资料,深部断裂的构造裂隙水主要来自于地表水和大气降水的直接补给,其次为花岗岩风化带裂隙水的间接补给。

姑婆山断层带穿过杨梅冲地热田,沿北北西向发育,沿着断层具有较大的地形切割深度,岩层呈破碎状,地面形成直线状分布的大沟谷,本区中上游姑婆山地区的地表水沿着沟谷径流,地表水与地下水具有良好的补给接触关系,构造裂隙和张性节理裂隙可作为水分传输通道,将地表水补给至热储层地下水。大气降水在花岗岩山区内通过重力作用、毛细作用等方式不断下渗,以此补给至热储层地下水。研究区的主要浅层地下水为花岗岩风化带裂隙水,以花岗岩构成的姑婆山中、高山为补给区,含水层具

有较高的地势和水头压力以及一定的渗透性,平面上地下水向沟谷和排泄基准面马尾河径流排泄,垂向上向深层热储层地下水补给排泄。

4.3 地热地质模型

杨梅冲地热田在面上包括降雨补给区、断裂导水径流区和排泄区。在垂向上热储层主要由燕山期花岗岩断裂破碎带组成,属于带状热储。姑婆山断裂的倾角大、断裂发育位置较深(错动了寒武、泥盆及中生代燕山期姑婆山岩体、新路岩体)^[24-25]、长度较大(总长度超过77 km,为区域性大断裂)。次级断裂多为张扭性断裂,为地下热水形成提供了深循环通道。热储断层带上盘和断层面是舒缓波状起伏的,断层带压紧密实的地段可作为相对隔水的盖层,对地热流体进行封闭和蓄积,构成相对隔热的保温层。

地热水直接补给来源于地表水和大气降水,间接补给来源于花岗岩风化带裂隙水。泉域内地势高差较大,西侧的一级分水岭标高达1 032 m,而泉水出露点的地面标高在200 m左右,两者之间具有超过800 m的高差,为地下水的上升提供了强劲的水头压力,提供了深循环的条件。降雨入渗至裸露地表的热储层(带)区域后,浅层地下水由北向南径流往最低排泄基准面——马尾河排泄,处于最低排泄基准面以下的地下水,以断裂带和岩石孔隙作为导水通道,在水力、热力的共同驱动下向深部运移,经过缓慢的循环交替水热对流运动后被加热,形成地热水^[26-27]。地下水顺着姑婆山断层由北至南,由下(深)到上(浅)的对流,形成了杨梅冲断裂对流型带状热储地热田,属典型的隆起山地断裂对流型地热模型(图7)。

5 结论

(1)杨梅冲地热田热储层由燕山期花岗岩断裂破碎带组成,属带状热储。姑婆山断层(F_1)是杨梅冲地热田主要导水、控热构造。地热田大地热流的来源是上地幔、地壳深部的热量(幔热流)及地壳浅部的放射性元素衰变产生的热(壳热流),为深循环地下水形成提供了热源。

(2)杨梅冲地热田从西侧边界(F_{1-1})到东侧边界(F_1)以及从北侧边界到南侧边界温度、地温梯度逐

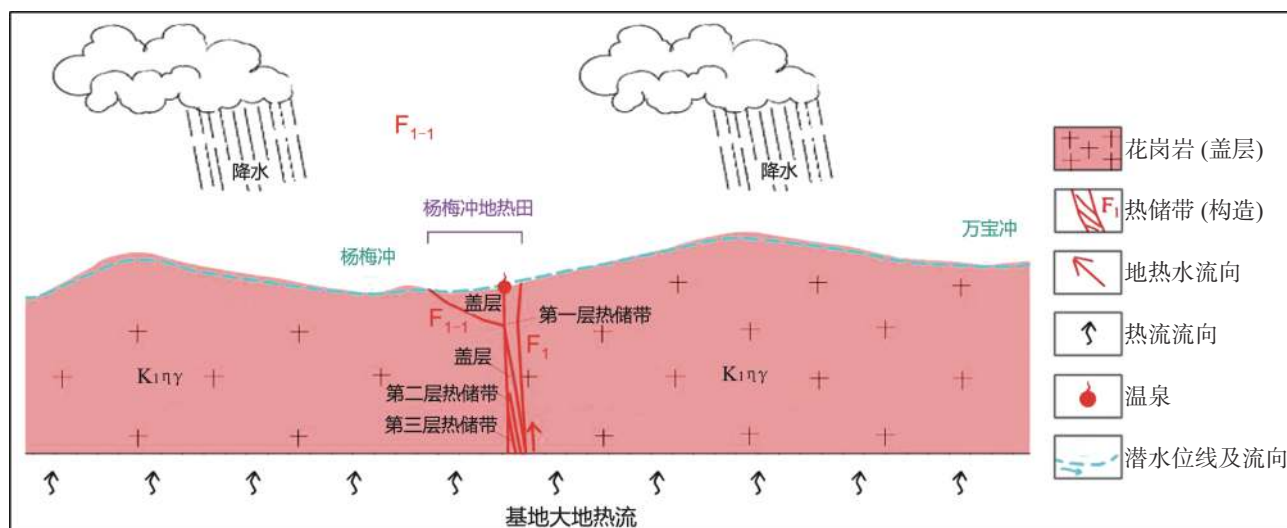


图7 杨梅冲地热田热储概化模型

Fig. 7 Thermal storage conceptual model of the geothermal fields in Yangmeichong

渐增大。在垂向上,随着深度的增大,地温梯度增高,800~1 200 m 深度内的温度为 53.5~73.0 °C,地温梯度为 4.88 °C·100m⁻¹。由二氧化硅地热温标和钾镁地热温标法计算杨梅冲地热田深部热储温度分别为 92.24 °C 和 87.22 °C,由此计算的地下热矿水循环深度分别是 3 292 m 和 3 069 m。

(3)杨梅冲地热田地热流体水化学类型为 HCO₃-Na。由于深部地下水对花岗岩体的溶滤作用,造成地下热水中偏硅酸和钠离子含量较高。同位素的检测结果表明区内地热水的补给来源于降水入渗,地热水氟含量小于 2 TU,推测杨梅冲地热水来源于 1960 年之前的大气降水。

(4)杨梅冲地热是断裂对流地热模型。地热水由大气降水直接补给,以断裂带和岩石孔隙作为导水通道,在水力、热力的共同驱动下向深部运移,经循环交替水热对流运动后,形成地热水。随后顺着姑婆山断层由北至南,由深到浅对流,形成了杨梅冲断裂对流地热模型。本文丰富了贺州地区地热成因模式研究,为今后在该区进一步开展地热资源勘查和研究起到较大的借鉴作用。

参考文献

- [1] Xing Y, Yu H, Liu Z, et al. Study on chemical genesis of deep geothermal fluid in Gaoyang geothermal field[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 9: 787222.
- [2] Huang Junpeng, Wu Xiyong, Ling Sixiang, et al. A bibliometric and content analysis of research trends on GIS-based landslide susceptibility from 2001 to 2020[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29: 86954-86993.
- [3] 康志强, 张起钻, 管彦武, 刘德民, 袁金福, 杨志强, 陆济璞, 王新宇, 张勤军, 张美玲, 冯民豪. 广西干热岩地热资源赋存条件分析[J]. *地学前缘*, 2020, 27(1): 55-62.
KANG Zhiqiang, ZHANG Oizuan, GUAN Yanwu, LIU Demin, YUAN Jinfu, YANG Zhiqiang, LU Jipu, WANG Xinyu, ZHANG Qinjun, ZHANG Meiling, FENG Minhao. Analysis on the occurrence condition of geothermal resources of hot dry rock in Guangxi[J]. *Earth Sciences Frontiers*, 2020, 27(1): 55-62.
- [4] 吴少斌, 欧业成, 卢进林, 钱小鄂. 广西合浦盆地地热资源及其开发利用初步评价[J]. *桂林工学院学报*, 2005, 25(2): 155-160.
WU Shaobin, OU Yecheng, LU jinlin, QIAN Xiaoe. Exploration and assessment of the geothermic resources at Hepu basin in Guangxi[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2005, 25(2): 155-160.
- [5] 康志强, 张起钻, 管彦武, 冯波, 袁金福, 孙明行, 刘德民, 王新宇, 杨志强, 陆济璞, 张勤军, 冯民豪. 广西合浦盆地干热岩资源成热条件及潜力评价[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2020, 50(4): 1151-1160.
KANG Zhiqiang, ZHANG Qizuan, GUAN Yanwu, FENG Bo, YUAN Jinfu, SUN Minghang, LIU Demin, WANG Xinyu, YANG Zhiqiang, LU Jipu, ZHANG Qinjun, FENG Minhao. Evaluation of thermal conditions and potential of dry hot rock resources in Hepu basin, Guangxi[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2020, 50(4): 1151-1160.
- [6] 孙明行, 张起钻, 刘德民, 孙兴庭, 林珊, 吴祥珂, 梁国科, 李玉坤, 管彦武, 李叶飞. 广西干热型地热资源成因机制与赋存模式[J]. *地质科技通报*, 2022, 41(3): 330-340.
SUN Minghang, ZHANG Qizuan, LIU Demin, SUN Xingting, LIN Shan, WU Xiangke, LIANG Guoke, LI Yukun, GUAN Yanwu, LI Yefei. Genesis and occurrence models of hot-dry geothermal resources in Guangxi[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 41(3): 330-340.

- [7] 莫亚军, 区小毅, 朱国器, 杨富强, 卢胜辉, 黎海龙. 广西柳州市北部地区地热资源调查及远景分析[J]. 矿产与地质, 2021, 35(6): 1102-1110.
MO Yajun, OU Xiaoyi, ZHU Guoqi, YANG Fuqiang, LU Shenghui, LI Hailong. Investigation and prospective analysis of geothermal resources in the north of Liuzhou City, Guangxi[J]. Mineral Resources and Geology, 2021, 35(6): 1102-1110.
- [8] 廖海吉, 蓝俊康, 洪淑娜, 闫志为, 黄希明. 汤水寨温泉带状热储特征及其热储量评价[J]. 桂林理工大学学报, 2013, 33(3): 449-453.
LIAO Haiji, LAN Junkang, HONG Shuna, YAN Zhiwei, HUANG Ximing. Geothermal reserves evaluation and characteristics of zoned reservoir in Tangshuizhai spring area[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2013, 33(3): 449-453.
- [9] 吴伟志, 莫燕娟, 黄丽霞, 蓝俊康. 贺州大汤温泉的形成条件及其水化学特征[J]. 广西科学院学报, 2013, 29(4): 230-234.
WU Weizhi, MO Yanjuan, HUANG Lixia, LAN Junkang. Forming conditions and hydrochemical characteristics of Datang hot spring, Hezhou City[J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2013, 29(4): 230-234.
- [10] 朱思萌, 梁礼革, 朱明占, 谢先军. 广西贺州热水水文地球化学特征、热储温度与循环深度估算[J]. 桂林理工大学学报, 2015, 35(2): 274-279.
ZHU Simeng, LIANG Lige, ZHU Mingzhan, XIE Xianjun. Hydrogeochemistry, temperatures and circulation depth of geothermal springs from Hezhou, Guangxi[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2015, 35(2): 274-279.
- [11] 王建超, 施玉娇, 曾晖, 敬荣中. 多种物化探方法在贺州某地热温泉勘查中的综合应用[J]. 矿产与地质, 2019, 33(2): 304-309.
WANG Jianchao, SHI Yujiao, ZENG Hui, JING Rongzhong. Combined application of various geophysical and geochemical exploration methods in geothermal hot spring exploration in Hezhou[J]. Mineral Resources and Geology, 2019, 33(2): 304-309.
- [12] 孙明行, 王瑞湖, 梁礼革, 邓宾, 李玉坤, 刘德民, 管彦武. 广西地热资源特征与潜力评价[J]. 中国地质, 2023, 50(5): 1387-1398.
SUN Minghang, WANG Ruihu, LIANG Lige, DENG Bin, LI Yukun, LIU Demin, GUAN Yanwu. Characteristics and potential evaluation of geothermal resources in Guangxi[J]. Geology in China, 2023, 50(5): 1387-1398.
- [13] 钟振楠, 康凤新, 宋明忠, 郎旭娟, 柳禄湧, 傅朋远, 李志杰. 鲁东招远地热田地热通量及地热成因研究[J]. 地质论评, 2021, 67(3): 828-840.
ZHONG Zhennan, KANG Fengxin, SONG Mingzhong, LANG Xujuan, LIU Luyong, FU Pengyuan, LI Zhijie. Study on geothermal flux and geothermal genesis of Zhaoyuan geothermal field in eastern Shandong geothermal area[J]. Geological Review, 2021, 67(3): 828-840.
- [14] 李明辉, 袁建飞, 黄从俊, 刘慧中, 郭镜. 四川广安铜锣山背斜热储性质及地热成因模式[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(6): 36-46.
LI Minghui, YUAN Jianfei, HUANG Congjun, LIU Huizhong, GUO Jing. A study of the characteristics of geothermal reservoir and genesis of thermal groundwater in the Tongluoshan anticline near Guang'an in east Sichuan[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(6): 36-46.
- [15] 潘明, 郝彦珍, 吕勇, 李波. 云南昌宁橄榄河热水水化学特征及复合成因机制研究[J]. 中国岩溶, 2021, 40(2): 281-289.
PAN Ming, HAO Yanzhen, LV Yong, LI Bo. Hydrochemical characteristics and composite genesis of a geothermal spring in Ganlanhe, Changning, Yunnan Province[J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(2): 281-289.
- [16] 杨冬, 胡政, 黄锋, 刘星辰. 尼格高地温隧道地热成因及地温分布特征研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(6): 2326-2339.
YANG Dong, HU Zheng, HUANG Feng, LIU Xingchen. Study on geothermal origin and geothermal distribution characteristics of Nige high geothermal tunnel[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(6): 2326-2339.
- [17] 尹政, 柳永刚, 张旭儒, 李玉山, 冯嘉兴. 张掖盆地地热资源赋存特征及成因分析[J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(1): 168-178.
YIN Zheng, LIU Yonggang, ZHANG Xuru, LI Yushan, FENG Jiaying. An analysis of the endowment characteristics and geneses of geothermal resources in the Zhangye basin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(1): 168-178.
- [18] 白博文, 平建华, 赵继昌, 杨振威, 宁艺武, 熊超凡. 河南淮阳县地热流体化学特征及其成因分析[J]. 中国地质, 2022, 49(3): 956-966.
BAI Bowen, PING Jianhua, ZHAO Jichang, YANG Zhenwei, NING Yiwu, XIONG Chaofan. Chemical characteristics and causes analysis of the geothermal fluid in Huaiyang county, Henan Province[J]. Geology in China, 2022, 49(3): 956-966.
- [19] 赵佳怡, 张薇, 张汉雄, 屈泽伟, 李曼, 岳高凡. 四川巴塘地热田水文地球化学特征及成因[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(4): 81-89.
ZHAO Jiayi, ZHANG Wei, ZHANG Hanxiong, QU Zewei, LI Man, YUE Gaofan. Hydrogeochemical characteristics and genesis of the geothermal fields in Batang of Sichuan[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(4): 81-89.
- [20] 郭本力, 杨鹏, 袁杰. 日照市松柏地热井水化学特征及地热成因分析[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2022, 41(6): 15-23, 31.
GUO Benli, YANG Peng, YUAN Jie. Hydrochemical characteristics and geothermal genesis of Songbai geothermal well in Rizhao City[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2022, 41(6): 15-23, 31.
- [21] 李小林, 吴国禄, 雷玉德, 李重阳, 赵继昌, 白银国, 曾昭发, 赵振, 张珊珊, 赵爱军. 青海省贵德扎仓寺地热成因机理及开发利用建议[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(1): 220-

- 229.
- LI Xiaolin, WU Guolu, LEI Yude, LI Chongyang, ZHAO Jichang, BAI Yinguo, ZENG Zhaofa, ZHAO Zhen, ZHANG Shanshan, ZHAO Aijun. Suggestions for geothermal genetic mechanism and exploitation of Zhacang temple geothermal energy in Guide county, Qinghai Province[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2016, 46(1): 220-229.
- [22] 王治祥, 蒋晶, 邹胜章, 冉瑜, 谢斌, 吕玉香, 杨平恒. 渝东南深部地热温度解析[J]. *中国岩溶*, 2019, 38(5): 663-669.
- WANG Zhixiang, JIANG Jing, ZOU Shengzhang, RAN Yu, XIE Bin, LV Yuxiang, YANG Pingheng. Analysis of deep geothermal temperature in southeast Chongqing[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(5): 663-669.
- [23] 马鑫, 付雷, 李铁锋, 闫晶, 刘廷, 王明国, 邵炜. 喜马拉雅东构造结地区地热成因分析[J]. *现代地质*, 2021, 35(1): 209-219.
- MA Xin, FU Lei, LI Tiefeng, YAN Jing, LIU Ting, WANG Mingguo, SHAO Wei. Analysis of geothermal origin in eastern Himalayan syntaxis[J]. *Geoscience*, 2021, 35(1): 209-219.
- [24] 李善民, 刘红舟, 王新伟, 唐名富, 吴继炜. 广西贺州市杨梅冲温泉热储特征及其资源量评价[J]. *矿产与地质*, 2022, 36(2): 374-379.
- LI Shanmin, LIU Hongzhou, WANG Xingwei, TANG Mingfu, WU Jiwei. Thermal storage characteristics and geothermal resources evaluation of Yangmeichong hot spring in Hezhou City, Guangxi[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2022, 36(2): 374-379.
- [25] 冯佐海. 广西姑婆山-花山花岗岩体侵位过程及构造解析[D]. 长沙: 中南大学, 2003.
- FENG Zuohai. Emplacement process and structural analysis of Guposhan-Huashan granitic pluton, Guangxi[D]. Changsha: Central South University, 2003.
- [26] 罗伟, 杨仕江, 彭静, 袁余洋, 李生红, 曾祥建, 张信. 黔北遵义地区地热水化学特征及成因[J]. *中国岩溶*, 2024, 43(1): 72-83.
- LUO Wei, YANG Shijiang, PENG Jing, YUAN Yuyang, LI Shenghong, ZENG Xiangjian, ZHANG Xin. Hydrochemical characteristics and genesis of geothermal water in the Zunyi area, north Guizhou[J]. *Carsologica Sinica*, 2024, 43(1): 72-83.
- [27] 崔锐, 王学鹏, 冯波, 刘曦遥, 冯守涛, 刘帅. 基于水化学同位素技术的地热储层成因模式对比分析: 以鲁西北埕宁隆起区为例[J]. *中国岩溶*, 2023, 42(5): 969-981, 994.
- CUI Rui, WANG Xuepeng, FENG Bo, LIU Xiyao, FENG Shoutao, LIU Shuai. Comparative analysis of the genesis models of different geothermal reservoirs in Chengning uplift area in northwest Shandong based on hydrochemical isotope technology[J]. *Carsologica Sinica*, 2023, 42(5): 969-981, 994.

Genesis model of geothermal fields in Yangmeichong, Guangxi

WANG Xinwei¹, ZHANG Lili², Li Shanmin¹

(1. China Nonferrous Metals (Guilin) Geology and Mining Co., Ltd., Guilin, Guangxi 541000, China;

2. Guangxi Institute of Regional Geological Survey, Guilin, Guangxi 541000, China)

Abstract Hezhou in Guangxi is rich in geothermal resources with great development prospects and research value. However, there are problems to be addressed in terms of supply sources, cyclic evolution processes, and genesis mechanisms of geothermal resources in this region. Through geothermal geological surveys and analyses of geophysics, geochemistry, and environmental isotopes, this study has explored thermal storage characteristics, supply sources, circulation depths, and genetic models of the geothermal fields in Yangmeichong, Hezhou. A geological geophysical model and a convective geothermal model of uplift mountain faults have been preliminarily established, whose geological parameters such as temperature, composition, depth, and magnetism of geothermal resources are consistent with the understanding of geology. The thermal reservoir of geothermal fields in Yangmeichong is belt shaped and composed of the Yanshanian granite fracture zone. The Guposhan Fault (F_1) is the main water conducting and heat controlling structure in the geothermal fields in Yangmeichong. The source of geothermal heat flow in the geothermal fields is the heat from the upper mantle and deep crust (mantle heat flow), as well as the heat generated by the decay of radioactive elements in the shallow crust (crust heat flow), providing a heat source for the formation of deep circulating groundwater. Temperatures and geothermal gradients gradually increase from the western boundary (F_{1-1}) to the eastern boundary (F_1) and from the northern boundary to the southern boundary of the geothermal fields in Yangmeichong. In the vertical direction, geothermal gradients increase with the increase of depths. Temperatures

(下转第 921 页)

backwatering in closed mines, engineering vibration, rainfall, etc., and the intensities of these factors can affect the time, scope and scale of karst collapses.

In order to strengthen the risk management of karst collapses, it is recommended to establish a monitoring and early warning system for karst collapses, and scientifically develop risk assessment, prevention and control plans and disaster emergency response plans for karst collapses. Besides, controlling the area, method and intensity of engineering construction, prohibiting or limiting the mining of coal, gypsum, groundwater, etc. in karst areas, and maintaining the dynamic balance between rock, soil, cave, water and air are effective measures to prevent and control karst collapses. In this paper, the distinction between the basic factors and inducing factors of karst collapses can provide a scientific basis for their effective prevention and control in karst areas, and can provide a reference for the construction of harmonious and beautiful villages.

Key words karst collapse, genetic model, influence factors, mining activity, Loudi City of central Hunan

(编辑 张玲)

(上接第 888 页)

within the depth range of 800–1,200 m are 53.5–73.0 °C, and the geothermal gradient is 4.88 °C/100 m. The deep thermal storage temperatures of the Yangmeichong geothermal fields have been measured by both silicon dioxide geothermal temperature scale and potassium magnesium geothermal temperature scale, and temperatures are 92.24 °C and 87.22 °C, respectively. Accordingly, the depths of underground thermal mineral water circulation are 3,292 m and 3,069 m, respectively. The hydrochemical type of geothermal fluid in the geothermal fields in Yangmeichong is HCO₃-Na. Due to the leaching effect of deep groundwater on granite bodies, the contents of silicic acid and sodium ions in underground hot water are relatively high.

The isotopic detection results indicate that the supply of geothermal water in the area comes from precipitation infiltration, and the tritium content of geothermal water is less than 2 TU. It is speculated that geothermal water in Yangmeichong was formed by atmospheric precipitation before 1960. The geothermal energy in Yangmeichong is a fault convection geothermal model. Geothermal water is directly supplied by atmospheric precipitation with fault zones and rock pores as water channels, and it flows deep by both hydraulic and thermal forces. After alternating water thermal convection, geothermal water is formed. Subsequently, the convection of geothermal water took place along the fault of Gupo mountain from deep to shallow and from north to south, which formed the fault convective geothermal model in Yangmeichong. The research results provide a theoretical basis for the exploration and rational utilization of geothermal resources in Yangmeichong, Guangxi.

Key words the geothermal fields in Yangmeichong, fluid geochemistry, depth of geothermal reservoir circulation, geothermal conceptual model

(编辑 杨杨)