

穹窿控制型地热流体质量评价

贾伍慧¹⁾, 刘 凯^{1)*}, 张垚垚¹⁾, 张寿川¹⁾, 何庆成¹⁾,
孙军亮^{1, 2)}, 余廷溪^{1, 2)}, 郭骏瀚¹⁾, 王路瑶^{1, 3)}

1)中国地质科学院, 北京 100037; 2)中国地质大学(北京), 北京 100083;
3)中国矿业大学(北京), 北京 100083

摘 要: 地热流体是主要的地热资源之一。地热流体质量评价是地热流体开发利用的关键环节。本文利用地热水的现场测试和实验室全分析数据, 对江西武功山穹窿区 17 处地热水进行了质量评价, 主要包括理疗热矿水评价、饮用天然矿泉水评价、农业灌溉用水评价、渔业用水评价、腐蚀性及结垢趋势评价。评价结果显示, 82%的地热水达到理疗热矿水标准, 主要达标元素为氟和硅; 18%的地热水达到天然矿泉水标准, 达标成分为偏硅酸; 化学组分适用于农业灌溉直接用水的地热水占 82%, 需经梯级利用后使尾水温度低于 35 °C; 适用于渔业用水的地热水占 76%; 所有地热水均无腐蚀性和结垢趋势。以上结果可为该地区地热流体资源开发利用提供有效的参考价值。

关键词: 地热资源; 地热流体; 武功山; 质量评价

中图分类号: P314 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2022.113001

Quality Evaluation of Dome-controlled Geothermal Fluid

JIA Wuhui¹⁾, LIU Kai^{1)*}, ZHANG Yaoyao¹⁾, ZHANG Shouchuan¹⁾, HE Qingcheng¹⁾,
SUN Junliang^{1, 2)}, YU Tingxi^{1, 2)}, GUO Junhan¹⁾, WANG Luyao^{1, 3)}

1) Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;
2) China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083;
3) China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083

Abstract: Geothermal fluid is one of the main geothermal resources. Quality evaluation is vital for the exploitation and utilization of geothermal fluid. Therefore, this study evaluated the quality of 17 samples in the vault area of Wugongshan in Jiangxi province based on the corresponding criteria. The evaluation included medical geothermal water evaluation, natural mineral water evaluation, agricultural irrigation water evaluation, fishery water evaluation, corrosion and scaling trend evaluation. Results showed that 82% of samples reached the standard of medical geothermal water, and the main elements were fluorine and silicon; 18% of samples reached the standard of natural mineral water with metasilic acid. The samples suitable for agricultural irrigation accounted for 82%, and the tail water temperature should be lower than 35°C after step utilization; samples suitable for fisheries accounted for 76%; and all samples had no corrosion and scaling tendency. Groundwater quality evaluation results showed that 6% of samples was class I, suitable for various uses; 18% of samples belongs to class III, which is mainly suitable for centralized drinking water sources and industrial and agricultural water; 76% of samples is class IV, which can be used for drinking water after proper treatment except for agricultural and some industrial water. The results of this study can provide effective reference for the exploitation and utilization of geothermal fluid resources in this area.

Key words: geothermal resources; geothermal fluid; Wugongshan area; quality evaluation

本文由中国地质调查局地质调查项目(编号: DD20201165)资助。

收稿日期: 2022-10-05; 改回日期: 2022-11-18; 网络首发日期: 2022-12-01。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 贾伍慧, 男, 1992 年生。博士, 助理研究员。主要从事水文地质相关研究。E-mail: jiawh@cags.ac.cn。

*通信作者: 刘凯, 男, 1983 年生。正高级工程师。主要从事水文地质相关研究。E-mail: liukai@cags.ac.cn。

地热水是富含热、水和矿的热矿水资源, 其形成与环境化学元素的迁移、演变和再分配等因素有关, 在我国分布广泛(汪洋等, 2001; 王贵玲等, 2017)。同时, 地热水还是一种国内外公认的清洁、环保、具有多功能性的绿色资源, 不仅可用于发电、供热、渔业等, 而且地热水富含对人体健康有益的特殊化学组分、矿物盐类、微量元素、气体组分、放射性元素和适宜的水温, 还会具有一定的理疗价值(Cerón et al., 2000; 王贵玲等, 2000; Baradács et al., 2001; 孟宇平, 2020)。因此, 地热水具有广泛开发用于洗浴、康养、饮用和旅游潜力(周训等, 2006)。

地热水开发利用之前需对水质进行分析测试, 并依据《地热资源地质勘查规范》(GB 11615—2010)等相关标准对其做出相应评价, 以确定地热水的理疗功效和其他适用途径(路明, 2017; 刘慧等, 2020)。通过地热水的用途评价和腐蚀性结垢性评价, 可为地热水的开发利用提供科学依据(孙杰夫等, 2018)。

罗霄山脉北支武功山为花岗岩穹窿构造, 其形成所需的构造热动力效应以及穹窿周边的断裂带为地热水的形成、赋存与活动提供了良好条件(张垚垚等, 2022)。因此, 环武功山地区分布较多地热井, 如温汤地热、万龙山地热、洪江地热等(辛田军等, 2016;

刘凯等, 2020; 高胜强等, 2022)。然而, 该区地热水总体的理疗功效和适用途径尚未明确, 亟需依据相关标准开展地热流体质量评价。为此, 本次研究通过对环武功山地区多处地热水水质的分析研究, 依次对地热水的用途、腐蚀性、结垢性进行了评价, 为环武功山地区地热资源的开发利用提供有力支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于我国江西省境内, 罗霄山脉北支武功山一带($E113^{\circ}57'—114^{\circ}28'$; $N27^{\circ}18'—27^{\circ}46'$), 为典型的中生代花岗岩穹窿伸展构造。该区经历多期次、多阶段的岩浆和构造活动, 断裂构造发育, 以北东向断裂为主(图 1), 次级断裂为北北东向和北西向, 两组断裂交汇的上盘位置岩石破碎, 易形成热异常通道。因此, 该区域地热井较多, 以中低温地热水为主。

此外, 研究区地属中亚热带季风气候, 并具有山地气候特征。其中, 年平均降雨量约为 1 700 mm, 平均蒸发量约为 1 300 mm, 平均气温约 15 $^{\circ}\text{C}$, 平均相对湿度约为 82%。该区水源以大气降水补给为主, 地表水多为冲沟水系, 地下水主要源于花岗岩体断裂带、基岩裂隙含水层。

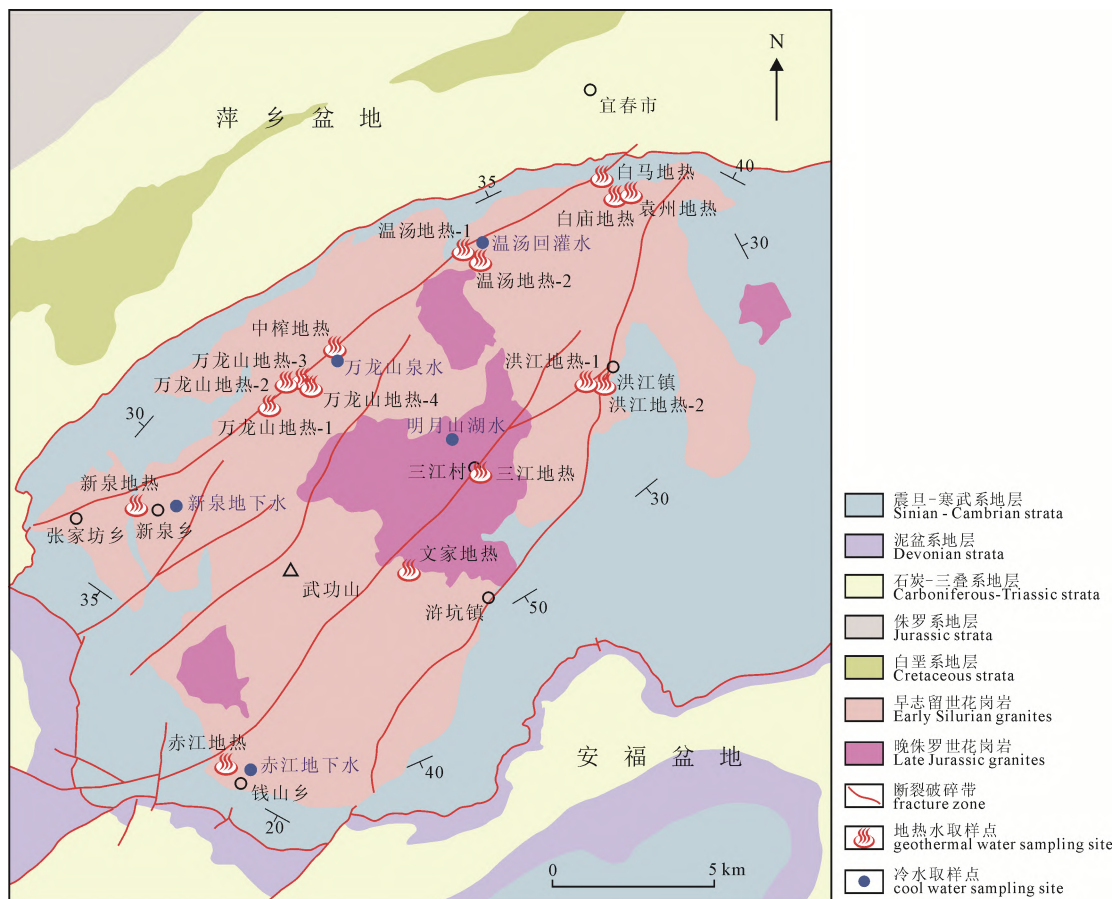


图 1 研究区地质背景与地热井位置

Fig. 1 Geological background and location of geothermal wells in the study area

1.2 样品采集与测试方法

本次地热流体质量评价共采集 16 个地热水水样、2 个地下水水样、2 个地表水水样和 1 个雨水水样(图 1), 分别进行了现场测试和实验室水质全分析测试。其中, 现场测试指标有水温、pH、溶解性总固体(TDS)、电导率和氧化还原电位, 分别采用 SX-620 型笔式 pH 计($\pm 0.01\text{pH}$; $\pm 0.1^\circ\text{C}$)、SX-630 型笔式 ORP 计($\pm 1\text{ mV}$)、SX-650 型笔式电导率/电阻率/TDS/盐度计($\pm 1.0\%\text{FS}$)测试。实验室测试水样采用棕色玻璃瓶和聚乙烯瓶采样。其中, 挥发酚类、氰化物测试采样利用棕色玻璃瓶加氢氧化钠保护剂; 锰、铜、锌、铝等金属元素测试采样利用棕色玻璃瓶加硝酸保护剂; 其他离子测试均利用聚乙烯瓶直接采样。实验室全分析指标由圭瑞测试科技(北京)有限公司测试, 测试执行标准为《水质 65 种元素的测定电感耦合等离子体质谱法》(HJ 700—2014)、《水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法》(HJ 535-2009)、《地质矿产实验室测试质量管理规范》(DZ/T 0130-2006)及其它现行有效的国家、行业标准。基于水样现场测试和水质全分析数据, 本次地热流体质量评价包括理疗热矿水评价、饮用天然矿泉水评价、农业灌溉用水评价、渔业用水评价、腐蚀性及其结垢趋势评价。

1.3 评价方法

1.3.1 地下水用途评价方法

地下热水的理疗保健功能在于天然形成的 25 $^\circ\text{C}$ 以上的温泉, 并含有一定的矿物和气体成分。以《地热资源地质勘查规范》(GB 11615-2010)附录 E “理疗热矿水水质标准”为依据(表 1), 对是否达到理疗热矿水水质标准作出评价, 并对达标的热矿水进行命名。

饮用天然矿泉水是指从地下深处自然涌出的

或经钻井采集的, 含有一定量的矿物质、微量元素或其他成分, 在一定区域未受污染并采取预防措施避免污染的水; 在通常情况下, 其化学成分、流量、水温等动态指标在天然周期波动范围内相对稳定。本次以《食品安全国家标准 饮用天然矿泉水》(GB 8537—2018)为依据对研究区内地热水进行评价(表 2)。

我国对农田灌溉用水的水质控制标准为《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2021), 该标准规定的汞、镉、砷、铬、铅、铜、锌、硒等微量元素在区内地热水中均小于检出浓度。参照《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2021)农业灌溉用水的控制项目为溶解性总固体(TDS)、氯化物、碳酸盐、钠吸附比(SAR)、硼、砷及氰化物, 灌溉用水水质分级如表 3 所示。此外, 渔业用水的水质评价标准参照《渔业水质标准》(GB11607-89)中的有关内容(表 4)。

1.3.2 腐蚀性评价方法

地热水腐蚀性是地热水通过其化学组分、温度、流速及压力等诸多因素与所用材料相互作用的复杂结果, 其中地热水的化学组分对金属材料的腐蚀性起关键作用。根据中国能源研究会地热专业委员会的理论研究成果, 当地热水中氯离子含量超过 25%毫克当量百分数时, 采用拉申(Larson)腐蚀指数评价较为合理。拉申(Larson)指数表达式为:

$$LI = \frac{Cl+SO_4}{ALK} \tag{1}$$

式中: LI 为拉申指数; Cl 为氯化物或卤化物浓度(mg/L); SO_4 为硫酸盐浓度(mg/L); ALK 为总碱度(mg/L); 以上三项以等当量的 $\text{CaCO}_3(\text{mg/L})$ 表示。地热水按 LI 划分腐蚀程度, 其中, $LI < 0.5$ 为无腐蚀性水; $0.5 \leq LI < 3.0$ 为轻微腐蚀性水; $3.0 \leq LI < 10$ 为中等腐蚀性水; $LI \geq 10$ 为强腐蚀性水。

表 1 理疗热矿水水质标准
Table 1 Water quality standard of physiotherapy hot mineral water

成份	有医疗价值浓度	矿水浓度	命名矿水浓度	矿水名称
二氧化碳	250	250	1 000	碳酸水
总硫化氢	1	1	2	硫化氢水
氟	1	2	2	氟水
溴	5	5	25	溴水
碘	1	1	5	碘水
锶	10	10	10	锶水
铁	10	10	10	铁水
锂	1	1	5	锂水
钡	5	5	5	钡水
偏硼酸	1.2	5	50	硼水
偏硅酸	25	25	50	硅水
氡/(Bq/L)	37	47.14	129.5	氡水
温度/ $^\circ\text{C}$	≥ 34			温水
溶解性总固体	$< 1\,000$			淡水

注: 根据《地热资源地质勘查规范》(GB 11615—2010)附录 E “理疗热矿水水质标准”, 单位为 mg/L 。

表 2 饮用天然矿泉水标准
Table 2 Standards of natural mineral water for drinking

界限指标		限量指标				污染物指标	
项目	指标	项目	指标	项目	指标	项目	指标
锂/(mg/L) ≥	0.20	硒/(mg/L)	0.05	硼酸盐(以 B 计)/(mg/L)	5	挥发酚/(mg/L)	0.002
锶/(mg/L) ≥	0.20	锑/(mg/L)	0.005	氟化物(以 F ⁻ 计)/(mg/L)	1.5	氰化物/(mg/L)	0.010
锌/(mg/L) ≥	0.20	铜/(mg/L)	1.0	耗氧量(以 O ₂ 计)/(mg/L)	2.0	亚硝酸盐/(mg/L)	0.1
偏硅酸/(mg/L) ≥	25.0	钼/(mg/L)	0.7	挥发酚(以苯酚计)/(mg/L)	0.002	总 β 放射性/(Bq/L)	1.50
硒/(mg/L) ≥	0.01	总铬/(mg/L)	0.05	氰化物(以 CN ⁻ 计)/(mg/L)	0.010	矿物油/(mg/L)	0.05
游离二氧化碳/(mg/L) ≥	250	锰/(mg/L)	0.4	矿物油/(mg/L)	0.05	阴离子合成洗涤剂/(mg/L)	0.3
溶解性总固体/(mg/L) ≥	1000	镍/(mg/L)	0.02	阴离子合成洗涤剂/(mg/L)	0.3	微生物指标	
		银/(mg/L)	0.05	²²⁶ Ra 放射性/(Bq/L)	1.1	项目	指标
		溴酸盐/(mg/L)	0.01	总 β 放射性/(Bq/L)	1.50	大肠杆菌/(MPN/100 mL)	0
						粪链球菌/(CFU/250 mL)	0
						铜绿假单胞菌/(CFU/250 mL)	0
						产气荚膜梭菌/(CFU/50 mL)	0

注: 界限指标应有一项(或一项以上)指标符合; 限量指标、污染物和微生物指标均应小于对应值。

表 3 灌溉用水水质评价分级
Table 3 Classification of irrigation water quality evaluation

评价指标	优 (I)	良 (II)	一般 (III)	较差 (IV)	差 (V)	极差 (VI)
氟化物	1	3	10	15	20	25
溶解性总固体(TDS)	175	500	1 500	2 000	5 000	7 000
氯化物	150	250	450	750	1 000	1 500
硫酸盐	150	250	450	750	1 000	1 500
硼	0.75	2	4	10	12	15
钠吸附比(SAR)	2	4	6	9	15	20

注: 单位为 mg/L。

表 4 渔业用水水质评价标准
Table 4 Water quality evaluation standards for fishery water

评价指标	优 (I)	良 (II)	一般 (III)	较差 (IV)	差 (V)	极差 (VI)
氟化物	1	2	5	9	12	15
硫化物	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	>1.0
酚	0.015	0.05	0.07	0.1	0.2	0.3
砷	0.05	0.1	0.3	0.5	1.3	2.3
汞	0.000 1	0.000 2	0.000 5	0.000 6	0.000 8	0.001

注: 单位为 mg/L。

当地热流体中 Cl⁻的毫克当量百分含量均低于 25%, 一般不能采用拉申指数进行评价。依据《地热资源地质勘查规范》(GB/T11615—2010), 可参照工业上用腐蚀系数 K_k 来衡量地热水用于锅炉的腐蚀性。酸性水和碱性水的腐蚀性系数分别由公式(2)和公式(3)计算。

$$K_k = 1.008 \times (rH^+ + rAl^{3+} + rFe^{2+} + rMg^{2+} - rHCO_3^- - rCO_3^{2-}) \quad (2)$$

$$K_k = 1.008 \times (rMg^{2+} - rHCO_3^-) \quad (3)$$

式中: r 表示离子含量的每升毫克当量数。若腐蚀系数 $K_k > 0$, 称为腐蚀性水; 腐蚀系数 $K_k < 0$, 并且 $K_k + 0.050 \ 3Ca^{2+} > 0$, 称为半腐蚀性水; 腐蚀系数 $K_k < 0$, 并且 $K_k + 0.050 \ 3Ca^{2+} < 0$, 称为非腐蚀性水; 式中, Ca^{2+} 为离子含量(mg/L);

1.3.3 结垢性评价方法

(1) 碳酸钙垢

影响碳酸钙结垢的主要因素有 pH 值、压力、温度及共存盐的浓度。关于碳酸钙结垢的问题, 有各种预测指数来判断其结垢的趋势, 目前地热系统中普遍采用的是雷兹诺指数(RI), 表达式如下:

$$RI = 2pH_s - pH_a \quad (4)$$

式中: pH_s 为计算出的 pH 值(高于此值时, 水中的碳酸钙就会沉积出来); pH_a 为实测 pH 值。其中, pH_s 的计算公式如下:

$$pH_s = -\log([Ca^{2+}]) - \log([ALK]) + K_c \quad (5)$$

式中: $[Ca^{2+}]$ 为钙离子的摩尔浓度; $[ALK]$ 为 HCO_3^- 离子摩尔浓度; K_c 为常数, 是包括两个与温度

有关的平衡常数和活度系数的复杂常数,其值可根据水的温度及溶解性总固体量从图 2 中查出。则基于 RI 的碳酸盐结垢趋势评价标准见表 5。

(2)硫酸钙垢

硫酸钙垢主要以二水硫酸钙(CaSO₄·2H₂O)的形态沉淀。在中、低温状况下(小于 100 ℃),热流体中硫酸钙离子溶积超过二水硫酸钙的溶解度,二水硫酸钙就沉淀。影响硫酸钙沉积的主要因素为温度和水中的总固形物的含量。地热流体中硫酸钙生成趋势定性估算采用相对饱和度(R.S)计算,计算公式如下:

$$R.S = \log(\text{Ca}^{2+}) + \log(\text{SO}_4^{2-}) - \log k \quad (6)$$

式中:Ca²⁺为 Ca²⁺离子的浓度(mg/L);SO₄²⁻为 SO₄²⁻离子的浓度(mg/L);k 是与温度和水中的总固形物含量有关的常数,可在相关图上查出 logk 值(图 3)。当 R.S≤0 时,无 CaSO₄·2H₂O 垢生成;当 R.S>0 时,可生成 CaSO₄·2H₂O 垢。

2 结果与讨论

2.1 水化学特征

水质分析主要离子结果如表 6 所示,阴阳离子平衡分析水质检测结果均达标。利用舒卡列名法

表 5 根据 RI 判断碳酸结垢趋势标准
Table 5 Criteria for judging carbonate scaling trend according to RI

RI	结垢趋势
(0, 4.0)	非常严重
[4.0, 5.0)	严重
[5.0, 6.0)	中等
[6.0, 7.0)	轻微
[7.0, +∞)	不结垢

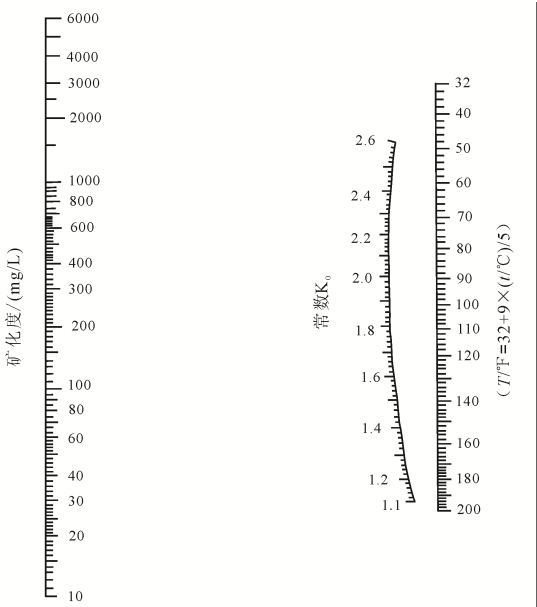


图 2 矿化度小于 6 g/L 时的 K₀ 常数
Fig. 2 Constant K₀ for total solids less than 6 g/L

对研究区水样进行了分类命名。结果显示,研究区地热水的水化学类型主要为 HCO₃-Na 型,部分地热水为 HCO₃-Ca 型(中榨地热)和 SO₄-Na 型(温汤地热-2),地下冷水主要为 HCO₃-Ca 型。由于所处地区地质构造、地热地质和水文地质条件差异,地热水水化学类型出现不同亚型。其中,部分地热水水化学类型为 HCO₃-Na·Ca 和 HCO₃-Ca·Na 型水,如洪江地热-2、三江地热、万龙山地热-1、袁州地热和中榨地热等地热井,此类地热水溶解性总固体多为 40~140 mg/L,推测是受浅层地下冷水混合影响。此外还有部分地区地热水出现了 HCO₃·SO₄-Na 型水(赤江地热、新泉地热等)、HCO₃·SO₄-Na·Ca 型水(温汤地热-1、万龙山地热-3 等)和 SO₄·HCO₃-Na(温汤地热-2)型水,此类地热水溶解性总固体多为 80~250 mg/L,推测是由于地热水向浅部运移过程中 H₂S 的氧化作用,使得地热水中 SO₄²⁻ 浓度增加。Piper 三线图同样体现了研究区水质类型的差异性(图 4),图中总体水样分布较为集中,部分偏离较大水样均为地表水或地下冷水,如赤江地下水、明月山湖水和温汤回灌水,水质类型均为 HCO₃-Ca 型。

研究区发育穹窿状地质体(刘细元等, 2016; 柴乐等, 2022)。区内热储呈带状分布,为断层控制的破碎带,受构造热动力效应以及穹窿周边的断裂带控制(张垚垚等, 2022)。此外,区内地热水水温介于 30~60 ℃(表 6),因此研究区地热水属低裂隙率中低温断裂带型地热水。

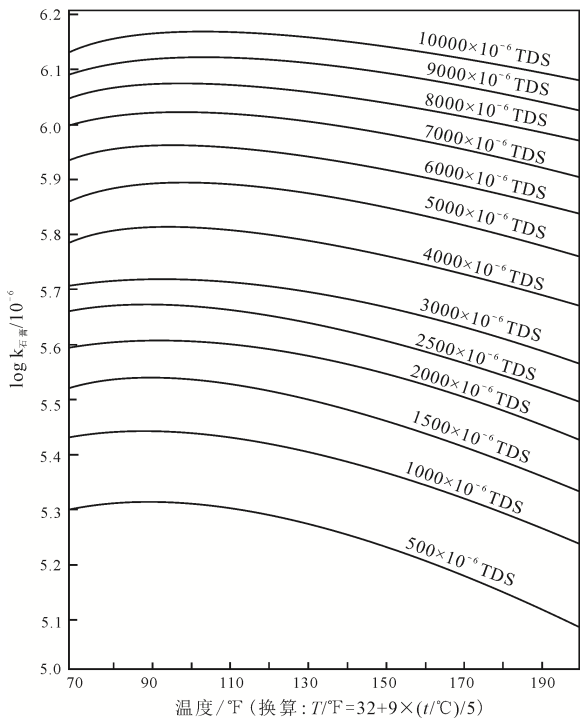


图 3 地热水中 CaSO₄·2H₂O 的溶解度积
Fig. 3 Solubility product of CaSO₄·2H₂O in geothermal water

2.2 地热水用途评价

2.2.1 理疗热矿水评价

研究区地热井中,新泉地热、中榨地热和三江地热的水温低于 25 ℃,未达到理疗热矿水标准。14 处地热水达到理疗热矿水标准,占比 82%,主要达标的元素为氟和硅(表 7)。其中,赤江地热、万龙山地热-3、万龙山地热-4 和文家地热的氟含量大于 2 m/L,且偏硅酸含量大于 50 mg/L,均达到命名浓度,命名为硅水、氟水。其余地热水

偏硅酸均达到矿水浓度,6 处达到命名浓度;大部分地热水均含氟,3 处达到命名浓度。此外,赤江地热水中锂含量达到医疗价值浓度标准。

硅和氟都是人体必需的微量元素之一(黄作明等, 2010)。地热水中富含氟和偏硅酸具有杀菌消毒、消肿止痛的功效。并且对治疗关节炎、龋齿、风湿病、皮肤病等具有显著疗效,还具有滋阴养颜、安神解乏的作用(姜宝良等, 2016)。

表 6 水样主要离子含量与平衡分析结果
Table 6 Main ion content and equilibrium analysis results of water samples

	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	F ⁻	NO ₃ ⁻	水温/℃	平衡分析
白马地热	1.19	50.40	4.02	0.02	99.50	8.16	2.34	8.20	1.76	0.48	32.00	3.93%
白庙地热	4.30	44.30	4.82	0.27	102.00	0.00	0.32	19.39	0.92	0.23	40.50	3.42%
赤江地热	1.64	75.90	3.68	0.11	68.20	10.50	15.40	45.80	10.90	0.50	47.80	1.33%
洪江地热-1	1.30	19.20	3.51	0.72	53.20	0.00	0.83	5.94	1.84	0.27	30.00	-2.14%
洪江地热-2	1.05	27.00	10.40	0.75	94.00	0.00	1.20	10.00	1.69	0.65	38.00	-3.59%
三江地热-1	2.47	11.70	8.40	0.15	47.70	0.00	1.96	4.94	0.16	0.38	19.00	2.23%
万龙山地热-1	2.22	44.30	28.20	0.07	149.00	0.00	0.00	11.50	3.21	0.01	34.50	8.72%
万龙山地热-2	1.65	35.80	14.50	0.85	93.10	0.00	5.38	13.80	3.95	0.92	36.90	3.77%
万龙山地热-3	3.63	53.30	12.50	0.28	105.00	0.00	5.52	34.95	9.70	0.00	56.00	-1.11%
万龙山地热-4	1.96	57.30	9.70	0.14	122.00	6.00	4.31	21.30	7.81	0.37	51.00	-2.41%
温汤地热-1	2.52	19.90	6.33	0.59	40.60	0.00	0.72	22.78	0.00	0.41	50.60	4.25%
温汤地热-2	2.03	32.00	4.71	0.38	40.30	0.00	2.87	44.60	1.51	1.36	54.50	-2.23%
文家地热	0.77	17.60	2.60	0.00	35.40	3.60	0.76	3.88	2.78	0.97	60.00	-2.64%
新泉地热	0.98	92.50	6.04	0.09	105.90	5.14	17.30	56.00	9.34	0.45	24.90	3.48%
袁州地热	4.37	45.30	10.10	0.24	124.00	0.00	0.69	14.88	1.10	0.10	37.40	3.48%
中榨地热	3.09	5.11	6.33	0.70	25.40	0.00	1.09	2.91	2.33	0.54	23.80	0.63%
明月山湖水	0.95	1.27	9.93	0.45	31.80	0.00	0.75	2.31	0.02	0.73	21.80	-0.70%
万龙山泉水	4.60	5.20	3.70	0.88	20.30	0.00	2.47	1.91	0.00	5.66	23.20	2.94%
温汤回灌水	1.72	3.00	6.00	1.52	24.20	0.00	1.07	5.37	0.07	0.37	24.70	-0.98%
新泉地下水	1.79	4.83	4.34	1.09	21.20	0.00	2.36	2.85	0.06	4.31	12.00	-2.58%
赤江地下水	2.10	6.34	27.10	3.56	75.10	0.00	7.52	15.30	0.00	13.20	12.90	-3.72%

注: 单位为 mg/L。

表 7 理疗热矿水评价结果
Table 7 Evaluation results of physiotherapy hot mineral water

编号	游离 CO ₂	氟化物	锶	锂	偏硅酸	水温/℃	矿化度	水质类型
赤江地热	<0.2	10.90	0.037 9	1.230 0	57.0	47.8	203	含锂的硅水、氟水
万龙山地热-1	< 0.2	3.21	0.166 0	0.166 0	42.0	34.5	142	含硅的氟水
万龙山地热-2	<0.2	3.95	0.067 9	0.569 5	41.0	36.9	136	含硅的氟水
万龙山地热-3	< 0.2	9.70	0.071 4	0.558 0	64.0	56.0	176	硅水、氟水
万龙山地热-4	0	7.81	0.000 1	0.000 8	65.5	58.5	220	硅水、氟水
文家地热-1	0	2.78	0.000 0	0.000 1	60.7	60.0	98	硅水、氟水
温汤地热-1	< 0.2	<0.01	0.131 0	0.131 0	54.0	50.6	83	硅水
温汤地热-2	3.5	1.51	0.000 0	0.000 1	60.6	54.5	157	含氟的硅水
洪江地热-1	6.9	1.84	0.050 9	0.123 0	62.6	30.0	64	含氟的硅水
洪江地热-2	8.8	1.69	0.000 1	0.000 1	54.9	38.0	142	含氟的硅水
白马地热	<0.2	1.76	0.041 4	0.219 0	34.0	32.0	127	含氟、硅的温水
白庙地热	< 0.2	0.92	0.026 6	0.109 0	69.0	40.5	148	硅水
袁州地热	< 0.2	1.10	0.048 2	0.121 0	71.0	37.4	140	含氟的硅水
文家地热-2	<0.2	2.68	0.014 1	0.097 2	42.0	44.3	51	含硅的氟水

注: 单位为 mg/L。

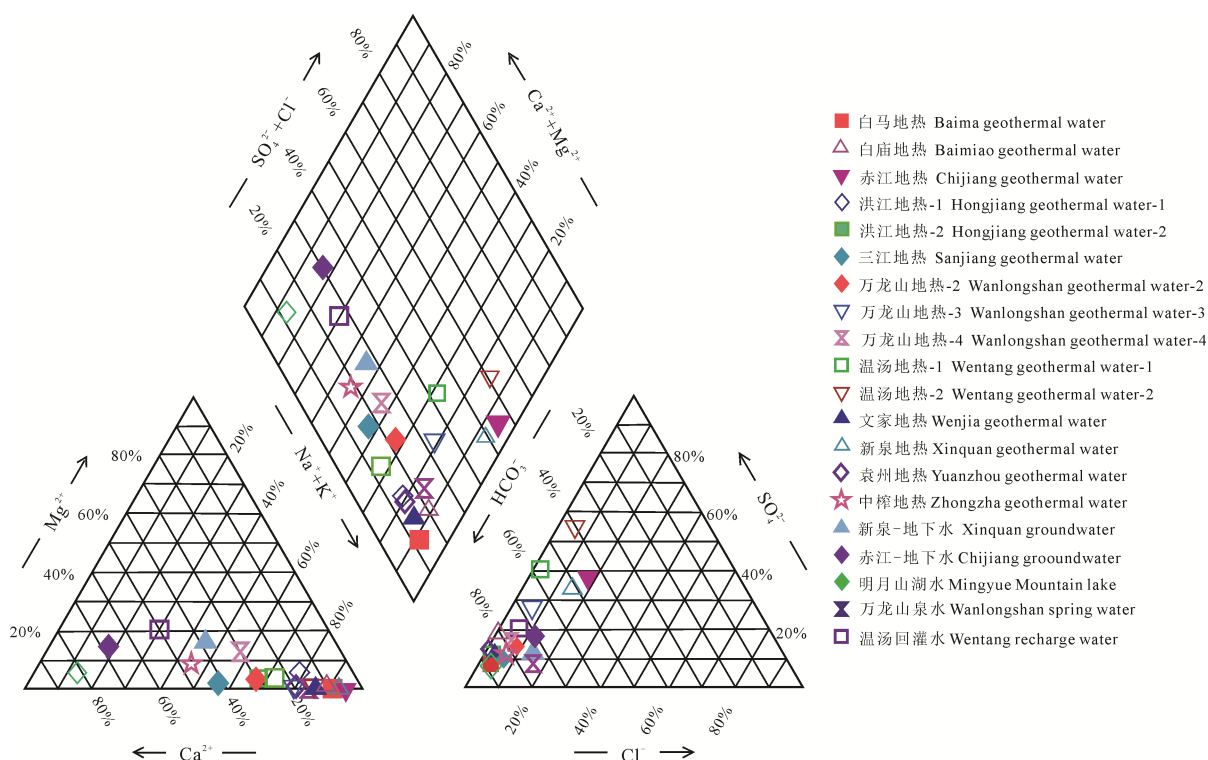


图4 研究区地热水化学 Piper 三线图

Fig. 4 Geochemical Piper ternary map of geothermal water in the study area

2.2.2 饮用天然矿泉水评价

本次以《食品安全国家标准 饮用天然矿泉水》(GB 8537—2018)为依据对研究区内地热水进行评价,结果显示研究区地热水中有 16 处水化学成分达到饮用天然矿泉水界限指标标准,包括锂、偏硅酸和硒。然而,界限指标达标的地热水中有 13 处地热井中存在限量指标氟化物超标情况,其他 3 处(研究区温汤地热-1、白庙地热和袁州地热)无超标指标。因此,研究区温汤地热-1、白庙地热和袁州地热的地热水均达到了饮用天然矿泉水标准,达标成分为偏硅酸。偏硅酸是机体生长必不可少的元素,也是骨骼钙化不可缺少的元素(姜宝良等, 2016)。

2.2.3 农业灌溉用水评价

研究区地热井水质资料(表 8)显示,氟化物含量小于 1 mg/L 的优质农业灌溉水有 3 处,分别为温汤地热-1、三江地热-1 和白庙地热;含量为 1~3 mg/L 的良好农业灌溉水有 8 处;含量为 3~10 mg/L 的一般农业灌溉水有 5 处;含量为 10~15 mg/L 的不适用于农业灌溉的 IV 类水仅有 1 处,为赤江地热。因此,按照氟含量标准,研究区 94% 的地热水适用于农业灌溉直接用水。

溶解性总固体小于 175 mg/L 的优质农业灌溉水有 13 处;溶解性总固体在 175~500 mg/L 的良好农业灌溉水有 4 处。按照溶解性总固体含量评价研究区地热水均适用于农业灌溉直接用水。此外,分别从氯化物和硫酸盐含量两方面评价,研究区地

水均属于优质农业灌溉水。

基于硼含量评价的地热水,仅新泉地热水硼含量在 0.75~2 mg/L,属于 II 类良好的农业灌溉水;其他地热水硼含量均为小于 0.75 mg/L 的 I 类优质农业灌溉水。依据钠吸附比评价的地热水有 2 处优质农业灌溉水(中榨地热和三江地热-1),9 处良好农业灌溉水,3 处一般农业灌溉水和 3 处 IV、V 类不适用于农业直接灌溉的地热水(新泉地热、赤江地热和白马地热)。根据水温资料分析,研究区 17 处地热水有 6 处地热水水温小于 35 ℃,其余 11 处地热水水温均大于 35 ℃。而大于 35 ℃的地热水需要经过梯级利用后使其水温降至 35 ℃以下方可用于农业灌溉。

综上所述,依据农业灌溉用水的控制项目(氟化物、溶解性总固体、氯化物、碳酸盐、硼和钠吸附比)评价,研究区 82% 的地热水均适用于农业灌溉直接用水,仅有 3 处不适用于农业灌溉直接用水,分别为新泉地热、赤江地热和白马地热。然而由于研究区地热水温度多大于 35 ℃,故地热水不能直接用于农业灌溉,需经梯级利用后使尾水温度低于 35 ℃方可用于农业浇灌。

2.2.4 渔业用水评价

研究区地热水水质资料显示(表 9),有 3 处地热水氟含量小于 1 mg/L,属于 I 类优质渔业用水;5 处地热水氟含量介于 1~2 mg/L,属于 II 类良好的渔业用水;5 处地热水氟含量介于 2~5 mg/L,属于 III 类一

般渔业用水; 1 处地热水(万龙山地热-4)氟含量介于 5~9 mg/L, 为 IV 类较差的渔业用水; 3 处地热水(新泉地热、赤江地热和万龙山地热-3)氟含量为 9~12 mg/L, 为 V 类差的渔业用水; 其中, IV、V 类地热水不适用于渔业。地热水中硫化物、酚、砷和汞含量均未超过优质渔业用水限定值。因此依据以上指标分析, 16 处地热水均为优质渔业用水。综上所述,

研究区仅有 4 处不适合直接用于渔业, 分别为新泉地热、赤江地热、万龙山地热-3 和万龙山地热-4; 其余地热水均可直接用于渔业用水, 占比 76%。

2.3 地热水腐蚀性、结垢性评价

2.3.1 腐蚀性评价

研究区 16 处地热水中 Cl^- 的毫克当量百分数均小于 25%, 因此均需利用腐蚀系数 K_k 来衡量地热水

表 8 研究区灌溉用水水质评价结果
Table 8 Evaluation results of irrigation water quality in the study area

原编号	F^-	TDS	Cl^-	SO_4^{2-}	B	SAR	水温/ $^{\circ}\text{C}$
新泉地热	9.340	251	17.300	56.0	1.250 00	10.22	24.9
赤江地热	10.900	203	15.400	45.8	0.487 80	10.62	47.8
万龙山地热-1	3.210	142	<0.007	11.5	0.013 00	2.29	34.5
万龙山地热-2	3.950	136	5.380	13.8	0.058 00	2.47	36.9
万龙山地热-3	9.700	176	5.520	35.0	0.161 00	4.07	56.0
万龙山地热-4	7.810	220	4.310	21.3	0.000 10	5.00	58.5
中榨地热	2.330	38	1.090	2.9	<0.001 25	0.51	23.8
文家地热	2.780	98	0.760	3.9	<0.000 01	3.00	60.0
温汤地热-1	<0.006	83	0.725	22.8	0.016 10	2.02	50.6
温汤地热-2	1.510	157	2.870	44.6	<0.000 01	3.81	54.5
三江地热-1	0.161	60	1.960	4.9	0.003 10	1.09	19.0
洪江地热-1	1.840	64	0.833	5.9	0.013 40	2.43	30.0
洪江地热-2	1.690	142	1.200	10.0	<0.000 01	2.18	38.0
白马地热	1.760	127	2.340	8.2	0.046 60	6.88	32.0
白庙地热	0.916	148	0.324	19.4	0.044 90	5.31	40.5
袁州地热	1.100	140	0.695	14.9	0.047 20	3.84	37.4
明月山-湖水	0.018	36	0.750	2.3	0.006 40	0.11	21.8
万龙山-泉水	<0.006	33	2.470	1.9	<0.001 25	0.63	23.2
温汤-回灌水	0.069	34	1.070	5.4	0.002 90	0.28	24.7

注: 单位为 mg/L。

表 9 研究区渔业用水评价水质成分
Table 9 Water quality components for fishery water use evaluation in the study area

编号	氟化物	硫化物	挥发酚	砷	汞
新泉地热	9.34	<0.005	< 0.000 3	0.001 44	<0.000 04
赤江地热	10.90	<0.005	< 0.000 3	0.000 79	<0.000 04
万龙山地热-1	3.21	<0.005	< 0.000 3	0.007 44	<0.000 04
万龙山地热-2	3.95	<0.005	< 0.000 3	0.001 96	<0.000 04
万龙山地热-3	9.70	<0.005	< 0.000 3	0.001 53	<0.000 04
万龙山地热-4	7.81	<0.05	<0.001 0	<0.000 001	<0.000 000 1
中榨地热	2.33	<0.005	< 0.000 3	0.000 42	<0.000 04
文家地热	2.78	<0.05	<0.001 0	<0.000 001	<0.0000 001
温汤地热-1	<0.006	<0.005	< 0.000 3	0.002 06	<0.000 04
温汤地热-2	1.51	<0.05	<0.001 0	<0.000 001	<0.000 000 1
三江地热-1	0.16	<0.005	< 0.000 3	<0.000 12	<0.000 04
洪江地热-1	1.84	<0.005	<0.000 3	0.000 38	<0.000 04
洪江地热-2	1.69	<0.05	<0.001 0	<0.000 001	<0.000 000 1
白马地热	1.76	<0.005	< 0.000 3	0.003 81	<0.000 04
白庙地热	0.92	<0.005	< 0.000 3	0.006 22	<0.000 04
袁州地热	1.10	<0.005	< 0.000 3	0.005 88	0.000 04
文家地热	2.68	<0.005	< 0.000 3	0.000 62	<0.000 04
明月山-湖水	0.02	<0.005	<0.000 3	0.000 65	<0.000 04
万龙山-泉水	<0.006	<0.005	< 0.000 3	0.000 37	<0.000 04
温汤-回灌水	0.07	<0.005	< 0.000 3	0.000 58	<0.000 04

注: 单位为 mg/L。

用于锅炉的腐蚀性。评价结果如表 10 所示, 研究区地热水的腐蚀系数 $K_k < 0$, 并且 $K_k + 0.050 \text{ } 3\text{Ca}^{2+} < 0$, 表明研究区地热水均为非腐蚀性水。

2.3.2 结垢性评价

影响碳酸钙结垢的主要因素有 pH 值、压力、温度及共存盐的浓度。根据研究区地热水质分析结果(表 11), 研究区地热水雷兹诺指数(RI)均大于 7,

表明研究区内 16 处地热水碳酸钙结垢评价结果均为不结垢。此外, 硫酸钙垢主要以二水硫酸钙($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)的形态沉淀。在中、低温状况下(小于 $100\text{ }^\circ\text{C}$), 热流体中硫酸钙离子溶积超过二水硫酸钙的溶解度即可形成二水硫酸钙沉淀。根据研究区地热水质分析结果(表 11), 研究区地热水水质计算结果均为 $R.S < 0$, 即无 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 硫酸钙垢生成。

表 10 研究区地热水腐蚀性评价结果
Table 10 Corrosion evaluation results of geothermal water in the study area

编号	钙/(mg/L)	pH 值	K_k	$K_k + \text{Ca}^{2+}$	腐蚀性评价
新泉地热	6.04	7.47	-1.74	-1.44	非腐蚀性水
赤江地热	3.68	7.45	-1.12	-0.93	非腐蚀性水
万龙山地热-1	28.20	7.92	-2.46	-1.04	非腐蚀性水
万龙山地热-2	14.50	8.64	-1.47	-0.74	非腐蚀性水
万龙山地热-3	12.50	8.26	-1.71	-1.08	非腐蚀性水
万龙山地热-4	9.70	8.17	-2.00	-1.52	非腐蚀性水
中榨地热	6.33	7.52	-0.36	-0.04	非腐蚀性水
文家地热	2.60	8.11	-0.58	-0.45	非腐蚀性水
温汤地热-1	6.33	7.88	-0.62	-0.30	非腐蚀性水
温汤地热-2	4.71	7.75	-0.63	-0.40	非腐蚀性水
三江地热-1	8.40	7.61	-0.78	-0.35	非腐蚀性水
洪江地热-1	3.51	7.20	-0.82	-0.64	非腐蚀性水
洪江地热-2	10.40	7.49	-1.49	-0.97	非腐蚀性水
白马地热	4.02	8.52	-1.64	-1.44	非腐蚀性水
白庙地热	4.82	8.57	-1.66	-1.42	非腐蚀性水
袁州地热	10.10	8.76	-2.03	-1.52	非腐蚀性水
明月山-湖水	9.93	7.30	-0.49	0.01	半腐蚀性水
万龙山-泉水	3.70	7.62	-0.26	-0.08	非腐蚀性水
温汤-回灌水	6.00	7.98	-0.27	0.03	半腐蚀性水

表 11 研究区地热水结垢趋势评价
Table 11 Evaluation results of geothermal water scaling trend in the study area

编号	Ca^{2+}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	pH _a	TDS	水温/ $^\circ\text{F}$	K_c	pH _s	RI	logK	R.S
新泉地热	6.04	105.9	56.00	7.47	251	76.82	2.14	8.72	9.97	5.22	-2.69
赤江地热	3.68	68.2	45.80	7.45	203	118.04	1.72	8.71	9.97	5.18	-2.95
万龙山地热-1	28.20	149.0	11.50	7.92	142	94.10	1.91	7.67	7.43	5.07	-2.56
万龙山地热-2	14.50	93.1	13.80	8.64	136	98.42	1.88	8.14	7.63	5.06	-2.76
万龙山地热-3	12.50	105.0	34.90	8.26	176	132.80	1.58	7.85	7.44	5.11	-2.47
万龙山地热-4	9.70	122.0	21.30	8.17	220	137.30	1.56	7.87	7.58	5.20	-2.88
中榨地热	6.33	25.4	2.91	7.52	38	74.84	2.06	9.24	10.96	5.00	-3.73
文家地热	2.60	35.4	3.88	8.11	98	140.00	1.50	8.92	9.74	5.05	-4.05
温汤地热-1	6.33	40.6	22.80	7.88	83	123.08	1.69	8.67	9.45	5.04	-2.88
温汤地热-2	4.71	40.3	44.60	7.75	157	130.10	1.61	8.72	9.69	5.13	-2.81
三江地热-1	8.40	47.7	4.94	7.61	60	66.20	2.20	8.98	10.36	5.02	-3.40
洪江地热-1	3.51	53.2	5.94	7.20	64	86.00	1.95	9.07	10.93	5.03	-3.71
洪江地热-2	10.40	94.0	10.00	7.49	142	100.40	1.86	8.26	9.02	5.08	-3.06
白马地热	4.02	99.5	8.20	8.52	127	89.60	1.94	8.73	8.93	5.04	-3.52
白庙地热	4.82	102.0	19.40	8.57	148	104.90	1.82	8.52	8.46	5.09	-3.12
袁州地热	10.10	124.0	14.90	8.76	140	99.32	1.87	8.16	7.56	5.07	-2.89
明月山-湖水	9.93	31.8	2.31	7.30	36	71.24	2.11	9.00	10.70	5.00	-3.64
万龙山-泉水	3.70	20.3	1.90	7.62	33	73.76	2.16	9.67	11.72	4.98	-4.13
温汤-回灌水	6.00	24.2	5.40	7.98	34	76.46	2.20	9.43	10.87	4.98	-3.47

3 结论

环武功山穹窿控制型地热水水化学类型主要为 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型, 部分地热水为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型和 $\text{SO}_4\text{-Na}$ (温汤地热-2), 地下冷水主要为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型。本文依据相关标准规范, 对研究区地热水进行了质量评价。其中, 82%的地热水达到理疗热矿水标准, 主要达标元素为氟和硅; 温汤地热-1、白庙地热和袁州地热的地热水达到天然矿泉水标准, 达标成分为偏硅酸。82%的地热水适用于农业灌溉直接用水, 需经梯级利用后使尾水温度低于 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。适用于渔业用水的地热水有 13 处温泉, 占比为 76%。另外, 研究区所有地热水均无腐蚀性和结垢趋势。

Acknowledgements:

This study was supported by China Geological Survey (No. DD20201165).

参考文献:

- 柴乐, 袁存堤, 黄新曙, 等, 2022. 江西武功山花岗岩地貌特征与成因[J]. 地质论评, 68(3): 965-980.
- 高胜强, 刘凯, 孙文洁, 等, 2022. 花岗岩带状热储水化学与锶同位素地球化学特征[J]. 人民长江, 53(8): 36-42.
- 国家环境保护局, 1989. GB11607-89 渔业水质标准[S]. 北京: 中国标准出版社.
- 国家卫生健康委员会, 2018. 食品安全国家标准 饮用天然矿泉水 GB8537-2018[S]. 北京: 中国标准出版社.
- 国土资源部, 2006. 地质矿产实验室测试质量管理规范 DZ/T 0130-2006[S]. 北京: 中国标准出版社.
- 国土资源部, 2010. 地热资源地质勘查规范 GB/T 11615-2010[S]. 北京: 中国标准出版社.
- 环境保护部, 2009. 水质氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法 HJ 535-2009 [S]. 北京: 中国环境出版集团.
- 环境保护部, 2014. 水质 65 种元素的测定电感耦合等离子体质谱法 HJ 700-2014[S]. 北京: 中国环境出版集团.
- 黄作明, 黄珣, 2010. 微量元素与人体健康[J]. 微量元素与健康研究, 27(6): 58-62.
- 姜宝良, 张石磊, 豆敬磊, 等, 2016. 豫北对流型地热区热矿水的特点及理疗作用[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 37(2): 41-46.
- 刘慧, 赵阳, 隋佳轩, 等, 2020. 吉林省长白山西坡梯子河温泉地热流体质量评价[J]. 吉林地质, 39(4): 29-34.
- 刘凯, 张垚垚, 何庆成, 2020. 圆屋顶下的明珠——环武功山温泉链[J]. 知识就是力量, (10): 66-69.
- 刘细元, 杨细浩, 聂龙敏, 等, 2016. 江西武功山岩脉核杂岩基本特征[J]. 地质学报, 90(3): 468-474.
- 路明, 2017. 北京地区地热流体质量评价[J]. 城市地质, 12(2):

53-59.

- 孟宇平, 2020. 石家庄藁城区地热流体质量评价[J]. 中国煤炭地质, 31(S1): 119-121.
- 生态环境部, 2021. 农田灌溉水质标准 GB 5084-2021[S]. 北京: 中国环境出版集团.
- 孙杰夫, 雷晓东, 李晨, 等, 2018. 北京昌平新城地区地热流体质量评价[J]. 城市地质, 13(3): 34-40.
- 汪洋, 汪集旸, 熊亮萍, 等, 2001. 中国大陆主要地质构造单元岩石圈地热特征[J]. 地球学报, 22(1): 17-22.
- 王贵玲, 张发旺, 刘志明, 2000. 国内外地热能开发利用现状及前景分析[J]. 地球学报, 21(2): 134-139.
- 王贵玲, 张薇, 梁继运, 等, 2017. 中国地热资源潜力评价[J]. 地球学报, 38(4): 449-459.
- 辛田军, 陈锡岳, 陈丹, 2016. 江西省温汤地热田地热水资源可持续开发利用前景研究[J]. 西部探矿工程, 28(8): 157-161.
- 张垚垚, 刘凯, 何庆成, 等, 2022. 江西武功山中生代花岗岩的锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其地质意义[J]. 地质论评, 68(4): 1301-1319.
- 周训, 周海燕, 方斌, 等, 2006. 浅析开采条件下地下热水资源的演变[J]. 地质通报, 25(4): 482-486.

References:

- BARADÁCS E, HUNYADI I, DEZSŐ Z, et al., 2001. ^{226}Ra in geothermal and bottled mineral waters of Hungary[J]. Radiation Measurements, 34(1-6): 385-390.
- CERÓN J C, MARTÍN-VALLEJO M, GARCÍA-ROSSELL L, 2000. CO_2 -rich thermomineral groundwater in the Betic Cordilleras, southeastern Spain: Genesis and tectonic implications[J]. Hydrogeology Journal, 8(2): 209-217.
- CHAI Le, ZHONG Cundi, HUANG Xinshu, et al., 2022. Characteristics and formation mechanisms of granite landscapes in Wugong Mountain, Jiangxi Province[J]. Geological Review, 68(3): 965-980(in Chinese with English abstract).
- GAO Sheng-qiang, LIU Kai, SUN Wenjie, et al., 2022. Water chemistry and strontium isotope geochemistry characteristic of granitic banded thermal reservoirs[J]. Yangtze River, 53(8): 36-42(in Chinese with English abstract).
- HUANG Zuoming, HUANG Xun, 2010. Trace elements and human health[J]. Studies of Trace Elements and Health, 27(6): 58-62(in Chinese with English abstract).
- JIANG Baoliang, ZHANG Shilei, DOU Jinglei, et al., 2016. Chemical characteristics and physiotherapy effects of thermal mineral water in convection type geothermal areas in the north of Henan Province[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 37(2): 41-46(in Chinese with English abstract).
- LIU Hui, ZHAO Yang, SUI Jiaxuan, et al., 2020. Evaluation of geothermal fluid quality of Tizihe hot spring in the western

- slope of Changbai Mountains of Jilin Province[J]. *Jilin Geology*, 39(4): 29-34(in Chinese with English abstract).
- LIU Kai, ZHANG Yaoyao, HE Qingcheng, 2020. The pearl under the dome-Wugong Mountain hot spring chain[J]. *Knowledge is Power*, (10): 66-69(in Chinese).
- LIU Xiyuan, YANG Xihao, NIE Longmin, et al., 2016. Basic characteristics of the magma core complex at Wugongshan, Jiangxi[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(3): 468-474(in Chinese with English abstract).
- LU Ming, 2017. Geothermal fluid quality evaluation in Beijing[J]. *Urban Geology*, 12(2): 53-59(in Chinese with English abstract).
- MENG Yuping, 2020. Assessment of geothermal fluid quality in Gaocheng District, Shijiazhuang[J]. *Coal Geology of China*, 31(S1): 119-121(in Chinese with English abstract).
- Ministry of Ecology and Environment, 2021. Standard for irrigation water quality GB 5084-2021[S]. Beijing: China Environmental Publishing Group(in Chinese).
- Ministry of Environmental Protection, 2009. Water quality - Determination of ammonia nitrogen - Nessler's reagent spectrophotometry HJ 535-2009[S]. Beijing: China Environmental Publishing Group(in Chinese).
- Ministry of Environmental Protection, 2014. Water quality-Determination of 65 elements-Inductively coupled plasma-mass spectrometry HJ 700-2014[S]. Beijing: China Environmental Publishing Group(in Chinese).
- Ministry of Land Resources, 2006. The specification of testing quality management for geological laboratories DZ/T 0130-2006[S]. Beijing: Standards Press of China(in Chinese).
- Ministry of Land Resources, 2010. Geologic exploration standard of geothermal resources GB/T 11615-2010[S]. Beijing: Standards Press of China(in Chinese).
- National Health Commission, 2018. National standard for food safety Drinking natural mineral water GB8537-2018[S]. Beijing: China Standard Press(in Chinese).
- State Bureau of Environmental Protection, 1989. GB11607-89, Water quality standard for fisheries[S]. Beijing: China Standard Press(in Chinese).
- SUN Jiefu, LEI Xiaodong, LI Chen, et al., 2018. Geothermal fluid quality evaluation in Changping New Town, Beijing[J]. *Urban Geology*, 13(3): 34-40(in Chinese with English abstract).
- WANG Guiling, ZHANG Fawang, LIU Zhiming, 2000. An analysis of present situation and prospects of geothermal energy development and utilization in the world[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 21(2): 134-139(in Chinese with English abstract).
- WANG Guiling, ZHANG Wei, LIANG Jiyun, et al., 2017. Evaluation of geothermal resources potential in China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 38(4): 449-459(in Chinese with English abstract).
- WANG Yang, WANG Jiyang, XIONG Liangping, et al., 2001. Lithospheric geothermics of major geotectonic units in China mainland[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 22(1): 17-22(in Chinese with English abstract).
- XIN Tianjun, CHEN Xiyue, CHEN Dan, 2016. Study on sustainable development and utilization of geothermal water resources in Wentang, Jiangxi Province[J]. *West-China Exploration Engineering*, 28(8): 157-161(in Chinese).
- ZHANG Yaoyao, LIU Kai, HE Qingcheng, et al., 2022. Zircon U-Pb ages, Hf isotopic characteristics, and geological significance of the Mesozoic granites in Wugong Mountains area, Jiangxi[J]. *Geological Review*, 68(4): 1301-1319(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Xun, ZHOU Haiyan, FANG Bin, et al., 2006. Evolution of thermal groundwater resources under the conditions of exploitation: A preliminary analysis[J]. *Geological Bulletin of China*, 25(4): 482-486(in Chinese with English abstract).