

鞍山市倪家台地热田水化学特征及其演化机制^{*}

杨 维¹ 郭亚伟¹ 康志勇² 李仁峰² 孙浩然¹ 陈森琚¹

(1 沈阳建筑大学市政与环境工程学院, 沈阳, 110168 2 辽宁省冶金地质勘察局地质勘察研究院, 鞍山, 114038)

摘 要 水化学分析结果表明, 鞍山市倪家台地下热水属于 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Na}$ 和 $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3\text{-Na}$ 型水, 且含有氟、锶和二氧化硅等多种矿物成分. 由构建的硅-焓混合模型得出倪家台地区地下热水已有大量冷水混入, 且混入比例介于 67%—83% 之间, 水温下降的诱因是该区域过量开采地热水, 在这种人为的长期干扰作用下, 增大了上部含水层冷水对下部地热水的补给量, 对今后可持续利用该区域地热资源构成了严重的威胁.

关键词 地热田, 水化学, 混合模型, 冷水混入, 水温下降.

千山倪家台位于鞍山市东南方向, 距鞍山市区 12 km, 距千山风景区正门 3 km. 位置为东经 $123^{\circ}09'30''$ — $123^{\circ}08'25''$, 北纬 $41^{\circ}02'30''$ — $41^{\circ}03'10''$, 面积 3.9 km². 该区东北部出露有少量的太古界鞍山群和下元古界辽河群变质岩系^[1], 岩性主要为片岩, 千枚岩和磁铁石英岩. 西南部为燕山晚期千山花岗岩. 中部和东南部地区主要为太古代花岗岩大面积出露. 第四系粘土、亚粘土及砂砾卵石层沿山间谷地分布, 厚度 5—15 m. 太古代花岗岩为粉红—灰白色, 主要由长石、石英、黑云母等组成. 千山花岗岩为肉红色, 主要为黑云母花岗岩. 该区自 1981 年开始建井以来, 由于超量开采地下热水, 使地下热水动态发生了极大变化, 致使水位急剧下降, 水量不断变小, 水温明显下降. 自 1981 年以来, 静止水位平均每年下降 7.17 米, 水温平均每年下降 1.8℃.

本文采用样品测试资料, 分析鞍山市倪家台温泉热水的水化学特性, 以及水温水质的变化情况, 通过对地热水水质研究, 探究人为因素干扰下的倪家台地热水的演化机制.

1 地下热水、冷水的物理化学特征

于 2008 年 9 月 25 日—29 日现场采集地下冷水样 4 件 (J₁, J₂, J₃, J₄), 地热水样 6 件 (N₁₋₄, N₂₋₁, N₂₋₂, N₄₋₁, N₅₋₁, N₈₋₁), 采用 GPS 定位, 在研究区内使采样点位均匀分布, 水样的化学分析结果见表 1.

根据水样的分析结果表 1 可知: 倪家台地热田的地下热水可表征为水的温度范围 36℃—68℃, pH 值范围在 8.3—9.4 之间, 矿化度一般在 0.3 g·L⁻¹—0.6 g·L⁻¹ 之间, 属于弱碱性的低矿化度水; 含有可溶性二氧化硅、氟和锶等多种对人体有益的矿物成分, 其中可溶性二氧化硅的含量在 33.6 mg·L⁻¹—85.0 mg·L⁻¹ 之间, 氟离子的含量在 4.0 mg·L⁻¹—9.0 mg·L⁻¹ 之间, 锶含量在 0.02 mg·L⁻¹—0.15 mg·L⁻¹ 之间, 已达到医疗热矿水水质标准; K⁺ 和 Na⁺ 是地下热水的主要阳离子, 含量介于 103.75 mg·L⁻¹—164.86 mg·L⁻¹ 之间, 其次是 Ca²⁺ 含量介于 2.49 mg·L⁻¹—20.89 mg·L⁻¹ 之间; 阴离子均以 HCO₃⁻ 为主, 其含量在 97.49 mg·L⁻¹—192.21 mg·L⁻¹ 之间, Cl⁻ 浓度介于 34.26 mg·L⁻¹—62.09 mg·L⁻¹, SO₄²⁻ 浓度在 80.49 mg·L⁻¹—122.19 mg·L⁻¹ 之间.

地下冷水的温度范围在 10.6℃—15.2℃ 之间, pH 值在 6.0—7.0 之间, 呈弱酸性; 可溶性二氧化硅的含量在 14.67 mg·L⁻¹—33.8 mg·L⁻¹ 之间; 氟离子的含量在 0.17 mg·L⁻¹—3.13 mg·L⁻¹ 之间, 低于地下热水的含量; Ca²⁺ 是地下冷水的主要阳离子, 含量介于 30.46 mg·L⁻¹—59.12 mg·L⁻¹ 之间, 阴离子以 SO₄²⁻ 和 HCO₃⁻ 为主, 其含量分别介于 36.50 mg·L⁻¹—112.87 mg·L⁻¹ 和 60.41 mg·L⁻¹—131.19 mg·L⁻¹ 之间.

2009 年 3 月 6 日收稿.

^{*} 辽宁省自然科学基金项目 (20072012), 辽宁省冶金局科技项目 (20071207).

从地下热水、冷水的 Piper图中(图 1)可以看出, 地下热水的化学类型存在着部分差异, 其主要的阳离子是 Na^+ , 这也是地下热水的主要特征; 主要阴离子是 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} , 个别含 Cl^- , 这些也是作为地下热水的典型特性. 尽管对于个别热水井还存在细微的差别, 但可将倪家台地热田的热水归为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Na}$ 和 $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3\text{-Na}$ 型水. 地下冷水的化学类型差别较大, 其中 J_1 和 J_6 水的化学类型为 $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3\text{-Ca}$ J_3 为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{ClCa}$ J_9 为 $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3\text{-Na}$ J_9 水样水化学类型与地下热水相同.

表 1 鞍山市倪家台地热田水样测试结果 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
Table 1 Water sample test results of geothermal field in Nijia Tai of Anshan city ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

编号	N ₁₋₄	N ₂₋₁	N ₂₋₂	N ₄₋₁	N ₅₋₁	N ₈₋₁	J ₁	J ₃	J ₆	J ₉
pH	9.2	8.3	9.4	8.6	8.3	9.2	6.0	6.92	6.57	7.0
水温 /℃	52	41	68	52	36	68	10.7	13.2	10.6	15.2
矿化度	544.43	514.38	538.01	499.92	396.18	517.33	—	—	—	—
SiO ₂	76.0	52.0	85.0	59.2	33.6	81.6	14.67	24.42	19.3	33.8
氟 (F)	8.6	6.0	9.0	6.7	4.0	8.7	0.23	0.17	0.57	3.13
锶 (Sr)	0.05	0.15	0.04	0.11	0.12	0.02	—	—	—	—
K ⁺ + Na ⁺	164.86	153.13	158.49	144.65	103.75	153.41	17.70	57.27	21.62	72.42
Ca ²⁺	2.98	13.93	2.49	11.96	20.89	2.98	59.12	59.12	30.46	31.64
Mg ²⁺	0.01	1.81	0.03	1.51	2.41	0.02	16.29	3.53	7.54	6.44
Fe ³⁺	0	0.016	0	0	0	0	0	0.01	0	0.02
Cl ⁻	59.95	49.25	57.81	44.96	34.26	62.09	46.44	35.81	13.47	33.33
SO ₄ ²⁻	109.10	121.02	109.10	122.19	80.49	106.71	104.71	36.50	60.52	112.87
NO ₃ ²⁻	2.0	9.0	1.0	6.0	10.0	0.00	70.42	33.84	17.20	23.60
NO ₂ ⁻	0.08	0.08	0.04	0.12	0.04	0.00	0.01	0.01	0.011	0.051
HCO ₃ ⁻	144.92	192.21	128.14	158.65	97.49	125.09	131.19	113.49	60.41	96.41
CO ₃ ²⁻	57.0	18.0	60.01	30.0	12.0	48.0	—	—	—	—

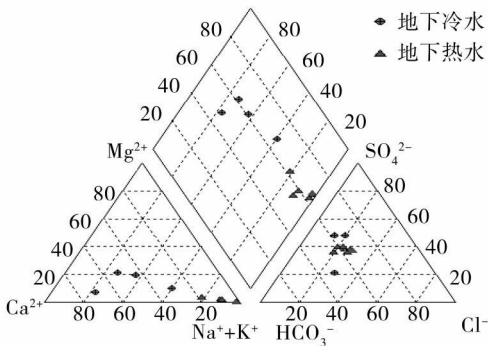


图 1 地下热水、冷水水化学性质 Piper图
Fig 1 Piper diagram of geothermal and cold water hydrochemistry

2 地下热水水温下降的水文地球化学机制

运用 $\text{Cl}^- \text{-SO}_4^{2-} \text{-HCO}_3^-$ 三角图可以将地热水分成 4 种类型^[2-3]: ①成熟水(富集 Cl^-); ②蒸汽水(富集 SO_4^{2-}); ③外围水(富集 HCO_3^-); ④火山水(富集 Cl^- 和 SO_4^{2-}). 分析图 2 可知, 倪家台地热田大部分的地下热水都接近 HCO_3^- 一侧, 属于外围水. 倪家台热储层的岩石是由千山花岗岩组成, 水从这种岩石中流出自然可溶性二氧化硅含量就高, 热水中的 SO_4^{2-} 的浓度也相对较高. 这表明与水中的 Cl^- 含量相比, 在倪家台地热田热水中 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 含量相对丰富, 是外围水属性的反映.

应用 Schoeller图可以研究处于不同地点的水样的水化学变化. 许多水样的组分浓度可以连成一条曲线. 同稀释水混合的效果具有垂向移动曲线而不会改变其形状的特点^[4]. 倪家台热田地区冷水水样

点和热水水样点列在 Schoeller(图 2)中, 交错连成线, 从这些点中可以看出, 各曲线形状变化趋势大致不变, 这表明地下热水同地下冷水具有同一补给来源.

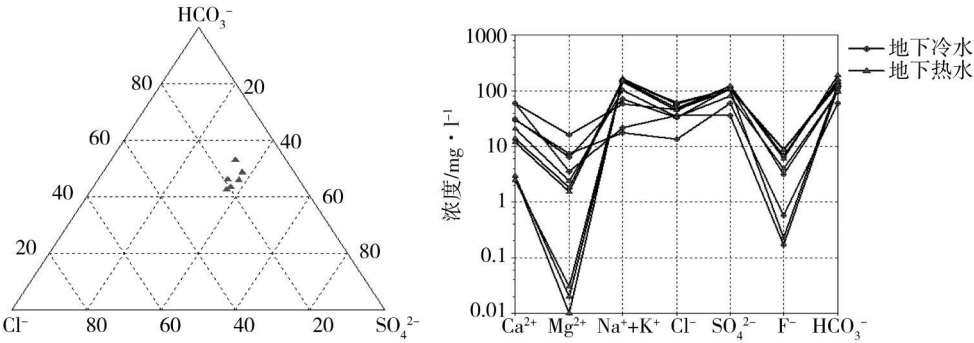


图 2 $\text{Cl}^- - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-$ 三角图和 Schoeller图

Fig 2 $\text{Cl}^- - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-$ Triangular diagram and Schoeller diagram

应用 SiO_2 地热温标可以作为热储温度的估算. 已知玉髓温标适合于中低温地下热储温度的计算, 选择玉髓-无蒸汽损失的地热温标^[5]经验公式如下:

$$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{1031}{4.69 - \lg \text{SiO}_2} - 237.15$$

根据玉髓地热温标计算的热储温度介于 $53.4^{\circ}\text{C} - 100.8^{\circ}\text{C}$, 其计算结果均高于区内地热井实测温度 $17.4^{\circ}\text{C} - 32.8^{\circ}\text{C}$, 计算的热储温度相对于实测温度是比较合理的, 这样的温度结果也表明倪家台地热田属于中低温地热田.

3 硅-焓混合模型

地下热水在上升过程中存在着与浅部冷水发生混合(稀释)的可能. 利用硅-焓模型可以确定混合水中热水组分的温度和冷热水份额^[6]. 硅-焓混合模型的假设条件包括热水在混合前没有蒸汽损失和热损耗, 混合后无热损耗, 深部热水 SiO_2 含量只受玉髓溶解度的控制, 混合前后无 SiO_2 溶解和沉淀发生^[7]. 于是, 混合后发生的化学反应并不会改变水的组成.

从溶解性硅-焓图(图 3)中, 可以得出 3 条直线^[8]: ①连接冷水点和水样 N_{1-4} 的最上端直线与玉髓溶解度曲线相交, 得出推测温度为 183.9°C ; ②连接冷水点和水样 N_{2-1} 的位于中间位置的直线与玉髓溶解度曲线相交, 得出热储温度为 136.6°C ; ③通过冷水点和 N_{5-1} 的直线与玉髓溶解度曲线的交点得出热储温度为 89.6°C . 所以, 地下热水的热储温度范围为 $89.6^{\circ}\text{C} - 183.9^{\circ}\text{C}$. 此预测的热储温度比通过地热温标计算得到的温度值 ($53.4^{\circ}\text{C} - 100.8^{\circ}\text{C}$) 要高, 这表明该热储中大部分的地下热水同地下冷水存在混合.

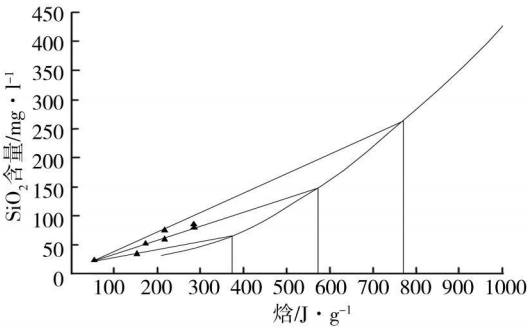


图 3 溶解性硅-焓图

Fig 3 The soluble of silicon-enthalpy diagram

应用 R.O 弗尼埃和 A.H 特鲁斯德尔理论提出的公式^[9]:

$$X1 = \frac{\text{深部热水初焓} - \text{开采热水焓}}{\text{深部热水初焓} - \text{冷水焓}}$$

$$X2 = \frac{\text{深部热水 } \text{SO}_2 \text{ 含量} - \text{开采热水 } \text{SO}_2 \text{ 含量}}{\text{深部热水 } \text{SO}_2 \text{ 含量} - \text{冷水 } \text{SO}_2 \text{ 含量}}$$

可以求出一系列的 X1和 X2 于是, 在冷水混入比例 X-深部热水温度坐标系统中, 可以绘出两条曲线, 得到一个交点, 该点所对应的 X 值和温度值即为所求. 冷水温度取平均温度 12.4℃, 冷水 SO₂ 的含量取冷水井的平均含量 23.05mg·l⁻¹; 开采热水的温度和 SO₂含量取实测值, 计算 X1和 X2值, 据此数据绘制出深部热水温度-混入冷水比例图 4

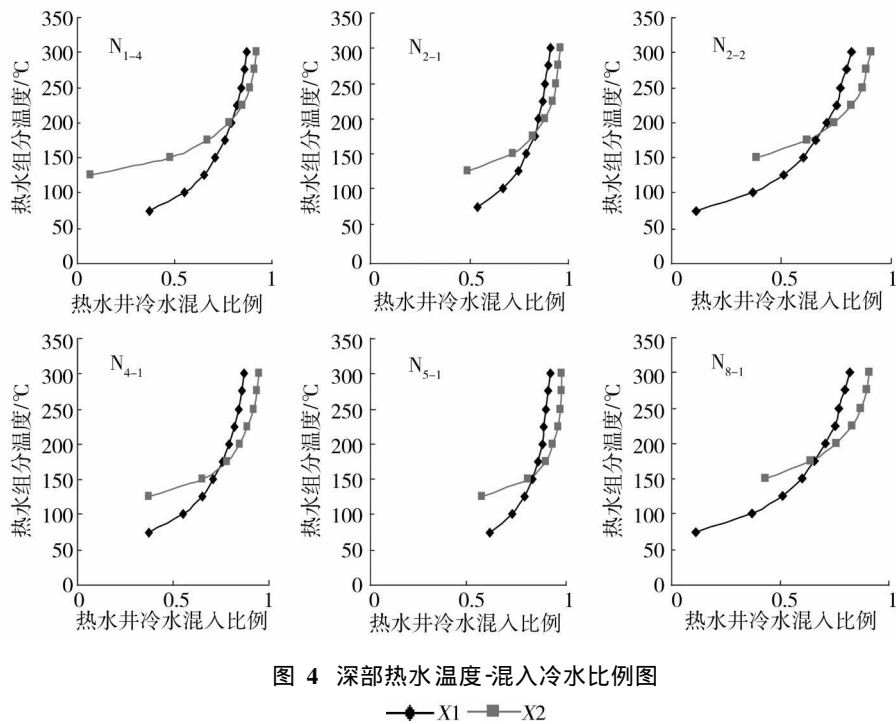


图 4 深部热水温度-混入冷水比例图

Fig 4 Diagram of deep hot water temperature vs. cold water percentage

从图 4中可以看出: 每眼地热井水均有冷水混入, N₁₋₄号热水井混入冷水的比例为 79%, 混合前的热水温度为 204℃; N₂₋₁号热水井混入冷水的比例为 83%, 混合前的热水温度为 178℃; N₂₋₂号热水井混入冷水的比例为 68%, 混合前的热水温度为 186℃; N₄₋₁号热水井混入冷水的比例为 74%, 混合前的热水温度为 166℃; N₅₋₁号热水井混入冷水的比例为 83%, 混合前的热水温度为 153℃; N₈₋₁号热水井混入冷水的比例为 67%, 混合前的热水温度为 180℃. 由此可见, 倪家台地区地下热水已有大量冷水混入, 混入比例介于 67%—83% 之间.

综上所述, 水化学分析结果表明鞍山倪家台地下热水属于 HCO₃·SO₄-Na 和 SO₄·HCO₃-Na 型水, 温度范围在 36℃—68℃, 属于中低温热水. 矿化度 (TDS)一般在 0.3g·l⁻¹—0.6g·l⁻¹之间, 属于低矿化度水. 地下热水的 pH 值范围在 8.3—9.4 之间, 属于弱碱性水. 且含有氟、锶和二氧化硅等多种对人体有益的矿物成分.

通过运用 Cl⁻-SO₄²⁻-HCO₃⁻图法、Schoeller图法、SO₂温标法和构建的硅-焓混合模型得出倪家台地区地下热水已有大量冷水混入, 且混入比例介于 67%—83% 之间. 导致倪家台地热水温度下降的诱因是该区域过量开采地热水, 在这种人为的长期干扰作用下, 增大了上部含水层冷水对下部地热水的补给量, 为今后可持续利用该区域地热资源构成了严重的威胁. 因此, 在地下热水的利用过程中应进行计划开采, 强化地下热水资源的管理, 否则将面临热水资源枯竭的紧迫局面.

参 考 文 献

[1] 辽宁省鞍山市汤岗子倪家台地热田详查报告 [R] . 鞍山: 冶金工业部东北地质勘查局, 地质勘查研究院, 鞍山矿业开发勘查中心, 1997

[2] G iggerbach W F, Chemical Techniques in Geothermal Exploration. In D'Amore F, (coordinator), Application of Geochemistry in Geothermal Reservoir Development UNITAR /LTNDP publication, Rome, 1991, 119—142

[3] Gonzalez-Partida E, Carrillo-Chavez A, Levesse G et al., Hydro-Geochemical and Isotopic Fluid Evolution of the Los Azufres Geothermal Field, Central Mexico, *Applied Geochemistry*, 2005, 20: 3—39

[4] Triesdell A H, Effects of Physical Processes on Geothermal Fluids Application of Geochemistry in Geothermal Reservoir Development UNITAR /CTNDP publication, Rome, 1991, 71—92

[5] Fournier R O, Chemical Geothermometers and Mixing Model for Geothermal Systems *Geothermics*, 1977, 5: 41—50

[6] 王莹, 周训, 于渡, 应用地热温标估算地下热储温度 [J] . 现代地质, 2007, 21 (4): 605—612

[7] 北京大学地质学系地热研究室, 地热资源勘探 [M]. 北京: 地质出版社, 1980, 87—119

[8] 于媛, 北京城区地热田地下水的水化学及同位素研究 [D] . 中国地质大学 (北京) 硕士学位论文, 2006

[9] 柳春晖, 白庙温泉, 赤城温泉及塘子庙温泉的水化学及同位素研究 [D]. 中国地质大学 (北京), 2006

STUDY ON THE HYDROCHEMICAL CHARACTERISTICS
AND EVOLUTION MECHANISM OF GEOTHERMAL
FIELD IN NIJIATAI OF ANSHAN CITY

YANG Wei¹ GUO Ya-wei¹ KANG Zhi-yong² LI Ren-jing² SUN Hao-zan¹ CHEN Miao-zu¹
(1 Municipal and Environmental Engineering College of Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China
2 Liaoning Geological Exploration Organization Research Institute of Metallurgical Geology Exploration Bureau, Anshan, 114038, China)

ABSTRACT

Hydrochemistry analysis results has indicated that the geothermal water in NijiaTai belongs to the types of HCO₃⁻ SO₄²⁻Na and SO₄²⁻ HCO₃⁻Na. It also contains a great deal of minerals such as fluoride, strontium and silicon dioxide. By the silicon2enthalpy mixing model, it was deduced that the geothermal water in NijiaTai has been mixed with the upper cold groundwater and the mix proportion is between 67% and 83%. The over2exploitation to the geothermal water results in its temperature drop. With the long2term disruption by human2beings, the recharging amount of upper cold aquifer to the lower geothermal water is increasing, which, if not changed, would seriously threat the sustainable utilization of geothermal resources in this area.

Keywords geothermal field, hydrochemistry, mixed mode, mixed with cold groundwater, geothermal2water temperature drop