

关中盆地南部含水层间相互关系的环境同位素水文地球化学证据

马致远¹, 钱 会¹, 黄建勋², 苏 艳¹, 范基娇¹

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 内蒙古自治区地质调查院, 内蒙古 呼和浩特 010020)

[摘要] 应用环境同位素水文地球化学方法对关中盆地南部各主要含水层间的水力联系进行了探讨。研究结果表明, 关中盆地南部各含水层间不同程度存在水力联系, 所调查井泉中半数以上的第三系和上覆第四系下部更新统含水层发生了水力联系。环境同位素水文地球化学研究证实, 盆地边缘深大断裂是沟通关中盆地南部各含水层间水力联系的关键因素。在山前断裂带出露的地下热水是地壳内部的热热水与各含水层冷水混合的结果, 冷水的组成以深层冷水为主, 参与混合的冷水为古水, 与净热水形成时代相差不大。

[关键词] 关中盆地; 环境同位素; 水文地球化学; 地下热水; 含水层; 陕西省

[中图分类号] P641.3 [文献标识码] A [文章编号] 1672-6561(2006)02-0069-06

Isotope and Geochemistry Constraints on Hydraulic Relationship of Groundwater Among Different Aquifers in Southern Area of Guanzhong Basin, Shaanxi Province

MA Zhi yuan¹, QIAN Hui¹, HUANG Jian xun², SU Yan¹, FAN Ji jiao¹

(1. School of Environmental Sciences and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. Geology Institute of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010020, Inner Mongolia, China)

Abstract Isotope and geochemistry techniques are increasingly used in evaluating the hydraulic connecting between groundwater in different aquifers to improve the hydrogeology database. In the studied area, the low Quaternary may have hydraulic connecting with the lower aquifer, the Tertiary aquifer, the thermal water is the mixture of net thermal water and normal groundwater based on geological analyses. T, D, ¹⁸O, ¹⁴C and chemistry compositions data of groundwater samples provide further evidence for the existence of the hydraulic connecting among groundwater in different aquifers.

Key words: Guanzhong Basin; environment isotope; geochemistry; thermal water; aquifers; Shaanxi Province

0 前言

关中盆地南部第四系地下水是关中地区经济发展十分重要的供水水源, 而第三系含水层广泛分布的地下热水具有极高的开发利用价值。目前, 这两个重要的地下水和地热水资源的开发利用受到

供水水源面临地表水和浅层含水层的污染, 影响水源的安全和热水资源面临与浅层水冷水的混合, 影响宝贵的热水资源可利用程度两个因素的制约。因此, 研究各个含水层与地表, 各个含水层之间的水力连通程度对于关中地下水资源的评价和管理至关重。笔者提供了关中盆地南部含水层之间, 尤其是第四系和第三系含水层间相互关系的环境同

[收稿日期] 2005-12-21

[基金项目] 陕西省自然科学基金项目(2005D03); 国家自然科学基金项目(40372114)

[作者简介] 马致远(1956-), 女, 天津人, 副教授, 从事水资源与环境的教学与研究。

位素及水文地球化学证据。

1 地质背景

研究区位于关中盆地的南部地区,南倚秦岭,北临渭河,东起蓝田县和临潼县,西至眉县。区内蕴藏有丰富的地下热水资源。关中盆地第四系含水层由洪积、冲积沉积物组成,上覆沙质、粉沙粘土层。第四系沉积物在西安以北厚达数千米,在盆地隆起处仅为百米。第四系更新统地下热水主要分布在秦岭北坡山前的长安县一带,地下热水赋存于下更新统中粗砂、中砂及含砾中粗砂层孔隙中。热储层埋藏浅为 250~500 m。第三系地下热水主要赋存于断裂两侧一定范围内的砂砾石(岩)层孔隙或构造裂隙内,在厚 1 000~5 000 m 的整个第三系中,分布多个热储层,加之隔水层颗粒细、隔水性能好,属封闭条件较好的热储层。热储层埋深因所处的构造部位不同差异较大。在骊山凸起区,一般埋深 500~1 000 m。在西安凹陷区内,热储层埋深小于 1 000 m。

下古生界奥陶系岩溶含水层主要分布在渭河以北,多为隐伏岩溶含水层。前新生界含水层主要分布于骊山及秦岭山麓以及渭河以北。其特点是:受断裂构造控制呈条带状分布,如蓝田东汤峪、眉县西汤峪、宝鸡上马营温泉等,均位于秦岭山前断裂带上。在骊山地区为太古界变质岩。秦岭北麓主要为中-下元古界宽坪群。

关中地区在地质构造上属地堑式断陷,其断裂构造大多属活动性断裂,对关中盆地地下水的形成与分布起着控制作用。

2 水文地球化学和同位素特征

2.1 水文地球化学基本特征

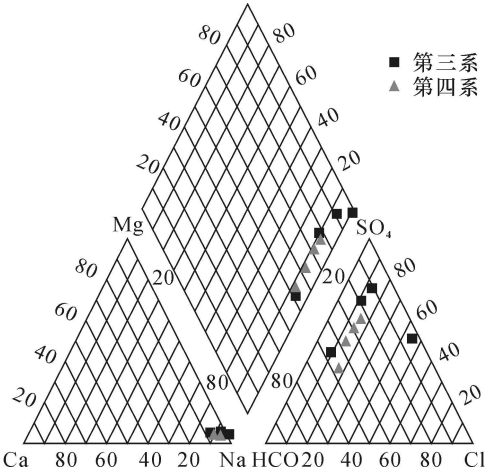
研究区第四系浅层地下水以低矿化度为特征。然而,第四系下部及第三系地下热水的水文地球化学特征更为复杂(表 1,图 1)。第四系更新统地下水多为低矿化弱碱性水。低温热水为重碳酸硫酸钠型水。中温热水多为硫酸重碳酸钠型水。第三系孔隙裂隙热水地下化学特征在不同部位有较大差异。影响化学成分的主要因素有构造、岩性、地貌及与深部热水混合程度。沿宝鸡-咸阳断裂带上的地下水为低矿化(小于 1 g/L)的重碳酸钠型水。盆地南缘地热井,热储层岩性较粗,径流条件好,常形成低矿化度重碳酸硫酸钠型或硫酸重碳酸氯化钠型水。盆地东南缘斜坡带上热水并以硫酸钠型水为主。向盆地中部逐渐过度到河湖相沉积,含水层岩性变细,径流条件变差,致使地下水的地球化学作用以盐分堆积为主,水化学类型亦变复杂,多为硫酸钠或氯化钠型水。

图 1 为研究区第三系和第四系地下热水 Piper 图^[1~4]。图中第三系与第四系下更新统地下水的主要阴阳离子成分十分接近,约 50%的水样点达到重合。第三系含水层阴离子的变化范围较大,SO₄²⁻和 Cl⁻的含量较高。

秦岭山前断裂到渭河断裂附近第四系及第三系热水温度为 78℃~25℃,化学成分仍以重碳酸根离子为主,含盐量变化不大(表 1),图 1 显示两者化学成分相近(图 1),说明第四系下部及第三系地下水之间发生了混合。

表 1 研究区地热水第四系及第三系水文地球化学特征

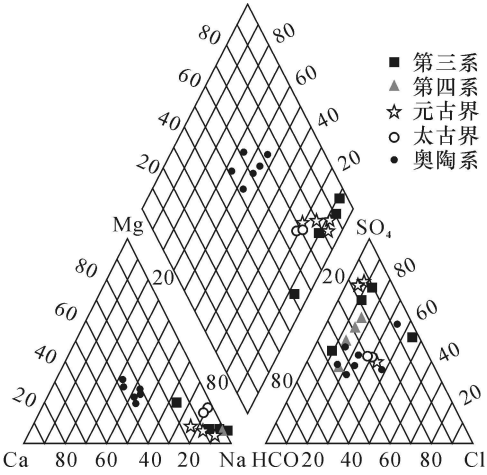
Tab. 1 Geochemistry Characteristics of Geothermal Water of Quaternary and Tertiary Period in the Studied Area						
储水层	年代	位置	深度/m	温度/℃	水化学类型	矿化度
沙卵石	第四纪(Q ₁)	秦岭山前	120~360	59~70	SO ₄ ·HCO ₃ -Na; HCO ₃ ·SO ₄ -Na; SO ₄ -Na	0.39~1.10
黏土	第三纪	渭河以南	500~1 000 西安东	55~70	HCO ₃ ·SO ₄ -Na; SO ₄ -Na; SO ₄ ·HCO ₃ ·	
沙卵石		秦岭以北	1 000~1 500 西安西		CL-Na; SO ₄ ·CL-Na	
变质岩 断裂	第三纪	秦岭山 前断裂		50~71	SO ₄ -Na; SO ₄ ·HCO ₃ -Na	0.52~0.64
断裂带	第三纪	临潼长 安断裂		43~57	HCO ₃ -Na; HCO ₃ ·SO ₄ -Na; SO ₄ -Na	0.35~1.00
断裂带	第三纪	渭 河		20~26	HCO ₃ ·CL·SO ₄ -Na; HCO ₃ ·SO ₄ -Na	<1.00



图中单位为离子所带电荷摩尔百分数
图 1 研究区第三系和第四系与早更新统地下水水化学成分 Piper 三线图

Fig. 1 A Trilinear (Piper) Diagram for Southern Guanzhong Basin Groundwater Between Tertiary Period and Early Pleistocene Epoch in Quaternary Period

前新生界基岩裂隙地下热水分布于秦岭北麓和骊山北麓的深断裂附近, 由于断裂带透水性能较好, 多形成微矿化或低矿化的硫酸或硫酸氯化钠型水(图 2)。



图中单位为离子所带电荷摩尔百分数
图 2 研究区不同地层地下热水 Piper 三线图

Fig. 2 A Trilinear (Piper) Diagram for Southern Guanzhong Basin Groundwater Among Different Aquifers

2.2 环境同位素基本特征

研究区地下热水的环境同位素组成图 3。根据高陵县气象站 1991 年以来月降水同位素测试结果, 关中盆地大气降水线方程为: $\delta(D) = 7.85 \delta(^{18}O) + 12.94$ 。该雨水线与全球降水方程 $\delta(D) = 8 \delta(^{18}O) + 10$ 接近, 其斜率稍小和截距偏大, 与本区地处内陆, 降水量偏小, 空气干燥的气候

类型有关。表明大气降水在落到地表时已经过一定的蒸发作用。研究区地表水、地下水, 包括浅层冷水和各类地下热水的样点均沿关中大降水线呈线性趋势, 表明大气降水是区内各类水体的补给水源。图 3 中水温最高的 B 点位于降水线下端, 说明热水中不存在任何海水成分, 热水中的盐分主要来自岩石矿物的溶解。热水的 δ 值在 $(\delta D) - (\delta^{18}O)$ 相关图未显示其 $\delta^{18}O$ 向右漂移现象。说明研究区南部地热水是大气降水成因的, 且未受水-岩同位素交换明显影响^[5]。

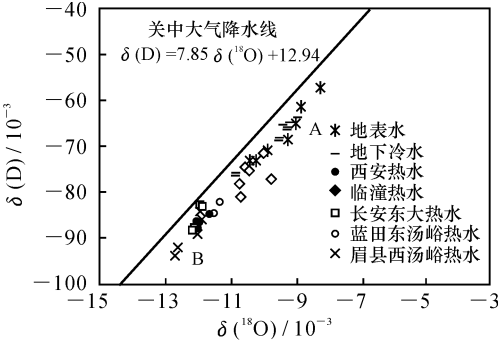


图 3 研究区各类水体 δ 值直方图
Fig. 3 Cross plot of $\delta(^{18}O)$ and $\delta(D)$ for Different Water of Southern Guanzhong Basin

3 讨论

图 3 中含水层热水中 δ 值最低的 B 点温度最高 (78 $^{\circ}C$), 而 δ 最高的 A 点温度最低 (20 $^{\circ}C$)。AB 连线为一条与大气降水线平行的直线。在 AB 连线上, 从 δ 低值到高值各含水层水点的水温由高到低, 反映了地下热水与各个含水层混合的过程。

3.1 第四系和第三系含水层的联系

第四系和第三系地层为关中盆地内部主要地层, 沉积厚度约 6 000 ~ 7 000 m。在关中盆地第四系和第三系含水层之间存在隔水层。如果隔水层是完整的, 则两含水层的同位素和水化学组成是不同的, 否则, 两个含水层将发生混合。

在图 4 中, 第三系热水的 $\delta^{18}O$ 和 $\delta(D)$ 部分与第四系更新统热水的 δ 值重合, 重合部位约 50%, 部分高于第四系热水的 δ 值。高出部分的第三系热水井泉位于长安-临潼断裂与北西向断层交汇部位。图 4 中, 无论是第三系热水还是第四系更新统热水均明显低于第四系浅部全新统的冷水, 指示研究区第四系更新统含水层与第四系浅部全新

统含水层水力联系较弱,而与第三系含水层存在较密切联系,并接受第三系热储的越流补给。第四系和第三系含水层之间不存在完整的隔水层。第三系和第四系地下水水文地球化学分析结果证实了这一结论。在图 1 中,第三系与第四系下部地下水主要阴阳离子成分十分接近,有约半数以上水样点的化学成分达到重合,与同位素分析的结果一致。第四系含水层水中 SO_4^{2-} 和 Cl^{-1} 的含量较高,变化范围也较大,这是第四系更新统含水层中较为封闭、径流较为滞缓的水化学环境所致。

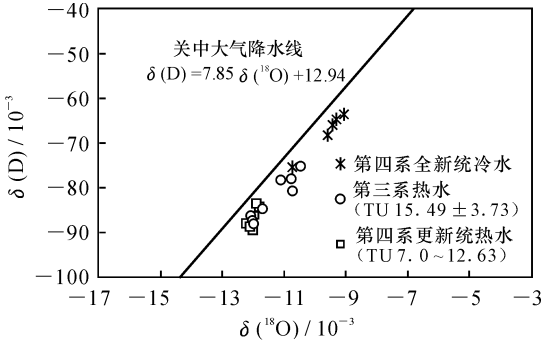


图 4 第四系与第三系 $\delta(^{18}\text{O}) - \delta(\text{D})$ 关系

Fig. 4 Cross plot of $\delta(^{18}\text{O})$ and $\delta(\text{D})$ for Groundwater Between Tertiary Period and Early Pleistocene Epoch in Quaternary Period of Southern Guanzhong Basin

第四系厚度较大,黏土物质较多,沟通深部热源性性能较差,以至部分第四系孔隙热水温度较低,稳定同位素值较低(平均 $\alpha(^{18}\text{O})$ 和 $\alpha(\text{D})$ 分别为 -12.02×10^{-3} 和 -86.88×10^{-3}), SO_4^{2-} 和 Cl^{-1} 的含量较高。在构造破碎、第四系热储层埋藏浅的部位,如秦岭山前子午镇、沔峪—高冠河一带水温、稳定同位素及水化学成分与第三系热储层相当,且埋藏浅,是理想的热水开采地段。

根据 $\delta(^{18}\text{O})$ 、 $\delta(\text{D})$ 和 ^3H 同位素组成(图 4),大气降水是地下冷水和热水明显的补给水源。 ^{14}C 测年结果证实,第四系更新统和第三系含水层的年龄在 10 000 年以上,前者比后者更年轻些。然而,第三系孔隙裂隙热储层的 TU(15.49 ± 3.73)及 ^{18}O ($-10.40 \sim -12.64$)均高于上覆第四系更新统含水层的 TU($7.0 \sim 12.63$)及 ^{18}O ($-10.03 \sim -12.70$),这一事实的合理解释是两个含水层的水样反映了上万年地质历史时期的老水的组分和具有较高氦值的现代水组分的混合。提示大气降水在第三系热储层运移速度较第四系含水层更快,水交替条件更好。根据氦同位素的数学物理模型,第四系含水层和第三系含水层氦的新水平均混合年龄分别为 166 a 和 38 a; ^{14}C 测定老水年龄分别为 14 461 a 和 18 211 a。两种不同的速度说明在垂直方向上第四系和第三系含水层的混合存在两种途径,即老水从上层到下层通过非饱和带到饱和带的缓慢渗入和从下层到上层通过断层的新水相对快速地渗入。第三系含水层的氦年龄大于第四系含水层的事实说明第三系含水层与地表水及深部热水联系密切,并通过断层对第四系下更新统含水层进行了越流补给。这一分析结果得到地质勘探的证实。地质勘探结果表明关中盆地大部分基底断层赋存于第三系及以下地层,第四系地层中基底断裂较少。贯穿各个含水层的秦岭山前大断裂与第三系热储密切相关,沟通了地表与第三系热储的联系。由此可见,研究区第三系和第四系热储的分布首先受构造条件控制,在断裂交汇地带如长安县东大乡热水井泉,第三系和第四系热水的同位素及化学组分达到基本混合(见图 1,图 4)。

图 5 显示,研究区第四系和第三系地下热水的

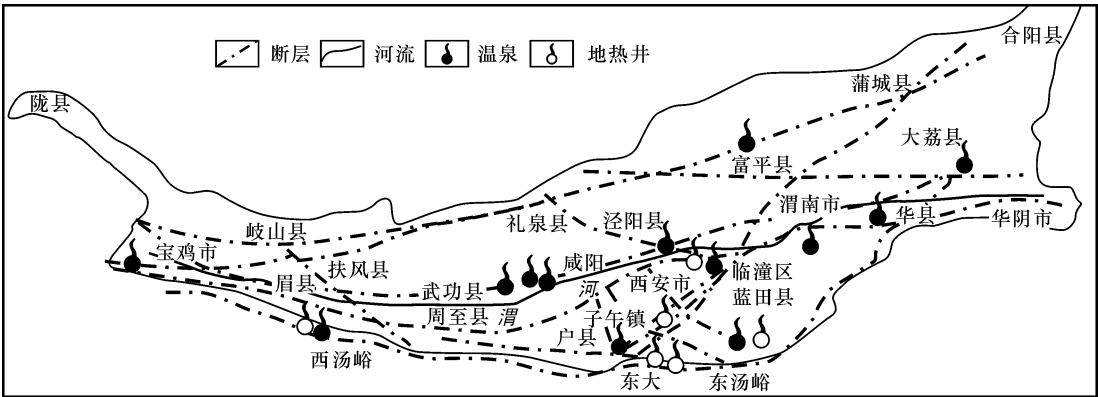


图 5 研究区主要热水井泉与断裂构造的关系图

Fig. 5 Sketch of the Relationship Between Main Thermal Groundwater and Main Geology Faults in the Studied Area
©1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

分布与深大断裂带的分布一致, 尤其是断裂交叉部位附近。深部地下热水沿断层向上运动, 而地表水沿断层向下运动。沿临潼断裂秦岭山前到渭河附近第四系及第三系的热水温度的变化从 $78\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 说明地表水和浅层地下水沿断层向下运动, 断层是各含水层发生水力联系的主要通道。秦岭-临潼断裂附近 $\delta(^{18}\text{O})$ 和 $\delta(\text{D})$ 等值线显示^[1], 从西南方向(秦岭)到东北方向(渭河), 关中盆地南部地下热水的 $\delta(^{18}\text{O})$ 和 $\delta(\text{D})$ 逐渐增加, 热水出露层位埋深逐步变浅, 热水温度逐渐下降, 这一特征在临潼断裂部位尤其明显, 说明第四系和第三系地下热水的来水方向为西南秦岭地区深部地层, 在沿断层向东北方向运动中发生混和。

3.2 元古界和各含水层的联系

研究区元古界地下热水赋存于秦岭北麓、骊山北麓变质岩及燕山期侵入岩裂隙中。在元古界与各含水层 $\delta(^{18}\text{O})$ 和 $\delta(\text{D})$ 关系中(图 6), 尽管元古界地层沿山前断裂横贯东西, 其热水 $\delta(^{18}\text{O})$ 和 $\delta(\text{D})$ 变化范围较大, 但元古界热水 δ 的平均值与第三系热水及第四系热水的 $\delta(^{18}\text{O})$ 和 $\delta(\text{D})$ 基本重合, 说明三者存在密切水力联系和共同的补给水源。

元古界热水的稳定同位素组成中, 眉县西汤峪热水的 $\delta(^{18}\text{O})$ 和 $\delta(\text{D})$ 沿降水线集中分布于平均值左下方, 指示热水来水方向, 即山前断裂的西部方向。蓝田东汤峪热水的 $\delta(^{18}\text{O})$ 和 $\delta(\text{D})$ 沿降水线集中分布于元古界热水稳定同位素平均值右上方, 与山前大断裂附近第四系热水 δ 值接近, 说明秦岭山前断裂及其盆地内部各基底断裂是地下热水的主径流带, 也是连通各个含水层水力联系的主要通道。地下水热水沿断裂开启部位向地表对流传导, 在岩层破碎和断裂交汇地段以温泉形式排泄地表, 如临潼华清池、东西汤峪温泉、长安东大等。临潼华清池附近有 6 条近南北向的张性断裂并与山前东西向大断裂交汇。同样, 蓝田东汤峪和眉县西汤峪均有数条北东向断裂或北西向断裂与东西向的秦岭山前大断裂交汇, 加之地层破碎、地形适宜, 成为地下热水富集区, 并以温泉形式出露地表。

元古界地下水主要阴阳离子成分变化不大, 为硫酸钠型水, 与第四系和第三系地下水接近, 部分与第三系水重合。说明元古界地下热水在沿活动断层上行中, 虽然越流补给了第三系、第四系地下水, 但是与浅部冷水混合较少, 更接近净热水(图 2)。

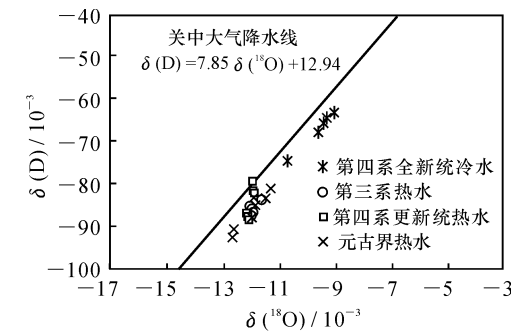


图 6 元古界与各含水层 $\delta(^{18}\text{O}) - \delta(\text{D})$ 关系
Fig. 6 Cross plot of $\delta(^{18}\text{O})$ and $\delta(\text{D})$ for Groundwater Between Archeozoic Era and Other Aquifers of Southern Guanzhong Basin

3.3 太古界和各含水层

研究区太古界含水层分布于临潼骊山附近。在元古界与各含水层 $\delta(^{18}\text{O}) - \delta(\text{D})$ 关系中(图 7), 太古界热水的 δ 值与第三系热水、地表水及秦岭地下冷水、第四系地下冷水接近, 反映太古界热水在沿断裂上行中与大量地表水与地下冷水混合, 有部分渭北奥陶系地下水参与了与太古界热水的混合。图 2 中太古界热水和元古界、第三系、第四系含水层水化学组成接近。

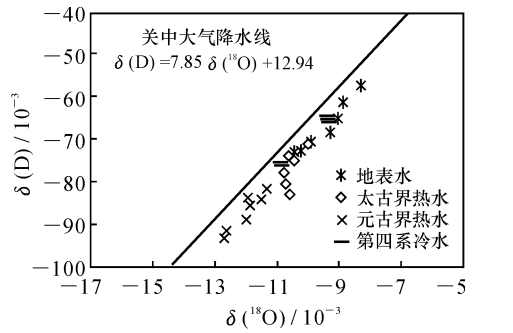


图 7 太古界与各含水层关系 δ 直方图
Fig. 7 Cross plot of $\delta(^{18}\text{O})$ and $\delta(\text{D})$ for Groundwater Between Proterozoic Era and Other Aquifers of Southern Guanzhong Basin

3.4 各含水层之间的混合关系

图 4、图 6、图 7 显示了各个含水层之间的联系程度。第三系热水的 δ 值分布范围最广, 几乎与所有热储层之间存在联系, 是研究区各热水含水层水力联系较畅通的含水层。第三系热储层的热水井均分布于秦岭-临潼大断裂及秦岭-临潼大断裂与北西向断裂的交汇地带, 再次证实, 在影响热储层导水能力和富集程度的诸多因素中, 构造条件是制约性因素。在上覆热盖层条件下, 凡构造交汇或开启性断裂部位都可形成一定规模的带状热储并

沿热流运动方向补给其他热储层。带状的热储对地下热水的形成起着通道作用如秦岭山前东、西汤峪出露的元古界、沿秦岭-临潼大断裂出露的太古界和第三系热储层;而层状热储的主要功能为储热如第四纪和第三系含水层。如前所述,第三系含水层既是带状热储,又是层状热储,兼具热水廊道及储热空间双重作用,是研究区重要的热储层。

大多数地下热水比地下冷水的氯离子偏高,而 $\delta^{18}\text{O}$ 则相反,古热水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 很低。所以,氯离子和 $\delta^{18}\text{O}$ 的含量变化是各个热储层热水和冷水混合的标志。图 8 显示了各个含水层 $\delta^{18}\text{O}$ 与 Cl^- 离子的关系。

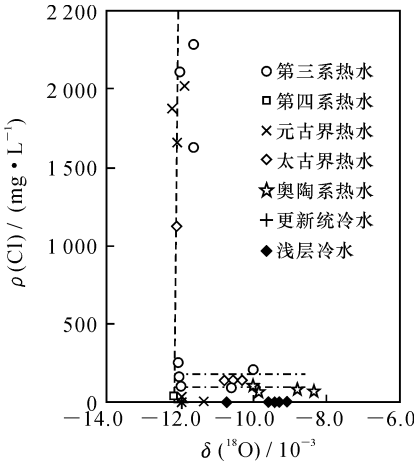


图 8 研究区各个含水层 $\delta^{18}\text{O}$ - Cl^- 离子的关系

Fig. 8 Relationship Between $\delta^{18}\text{O}$ and Cl^- in Different Aquifers in Studied Area

(1)所有地下热水均为混合水,混合水的基本成分由第四纪上部浅层冷水、第四纪下部深层冷水(更新统冷水)和(净)热水组成。元古界、太古界和第三系含水层出露的热水井泉样点更接近净热水。

(2)地下热水的点群分布在一条直线上,所以,净热水视为单股热水。多股冷水参与了混合。这与图 3、图 4、图 6 的结论一致。

(3)热水混合线和冷水混合线相交,交点靠近深层冷水一侧,说明冷水的组成以深层冷水为主。热水和冷水的混合不是发生在地壳的浅部,而是地壳深部。

(4)各个含水层水样的 Cl^- 和 $\delta^{18}\text{O}$ 并不存在负相关关系,提示所混合的冷水亦为古水,与净热水形成时代相差不大。

4 结论与建议

(1)研究区各含水层之间存在水力联系,其中第三系热水与地表水及其他含水层之间联系广泛,是研究区重要的集水通道和热储层。

(2)盆地边缘断裂是沟通各个含水层之间水力联系的主要通道。含水层之间的连通程度取决于活动性断层开启程度。

(3)研究区约半数以上的第三系含水层和第四系含水层发生了水力联系。断层是沟通第三系含水层与地表水及第四系含水层间水力的主要通道。

(4)关中南部的所有地下热水均为混合水。净热水视为单股热水。多股冷水参与了混合。冷水的组成以深层冷水为主,因此热水和冷水的混合不是发生在地壳的浅部。混合的冷水亦为古水,与净热水形成时代相近。

(5)供水井抽水时应考虑采水过程会导致地下浅层较年轻的水和深层的老水的混合,深部热水和浅部冷水的混合。抽水井应尽可能远离活动断层。

(6)地下热水开采中应避免上层冷水及地表水的混入。应防止过量抽取地下水,以保证地下水可持续开采。

[参 考 文 献]

[1] 马致远. 关中南部的地下热水氢氧同位素组成的水文地质意义[J]. 地球科学环境学报, 2006, 28(1): 60 - 65.

[2] 陶书华. 西安附近地下热水的形成[J]. 水文地质与工程地质, 1996, 40(3): 6 - 11.

[3] 马致远. 环境同位素地下水文学[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2004.

[4] 马致远. 关中地区地下热水的分类[J]. 煤田地质与勘探, 2005, 33(5): 54 - 58.

[5] Hiscock K M, Dennis P E. Hydrochemical and Stable Isotope Evidence for the Extent and Nature of Effective Chalk Aquifer of North Norfolk, UK[J]. Journal of Hydrology, 1996, 80: 79 - 107.