

关中盆地深部地下热水残存 沉积水的同位素证据

何 丹, 马致远, 王疆霞, 郑 磊

(长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054)

摘 要:应用环境同位素水文地球化学方法, 结合区域沉积演化史, 对关中盆地固市凹陷、咸阳—礼泉断阶和西安凹陷深部地下热水成因类型进行了探讨, 并就残存沉积水存在的可能性, 寻找氢氧同位素关系、硫氧同位素关系、碳氧同位素关系、 $N(^{87}\text{Sr})/N(^{86}\text{Sr})$ 与古盐度的关系等环境同位素证据, $r\text{Na}/r\text{Cl}$ 值、 $\rho(\text{Cl}^-)/\rho(\text{Br}^-)$ 、 $r\text{Br}/r\text{I}$ 值与 $\rho(\text{Cl}^-)$ 的关系等水文地球化学证据以及沉积演化史证据。结果表明: 固市凹陷华阴地下热水的同位素、水文地球化学特征已基本符合沉积水的特征, 推测其为混有古入渗水的残存沉积水; 固市凹陷华阴之外的其他构造单元、咸阳—礼泉断阶和西安凹陷地下热水的同位素和水文地球化学特征部分接近沉积水的特征, 部分介于古入渗水和沉积水之间; 咸阳—礼泉断阶东部地下热水可能为古入渗水或残存沉积水与后期入渗水的混合; 西安凹陷及咸阳—礼泉断阶西部地下热水属于现代入渗水与古入渗水的混合水。

关键词: 地下热水; 环境同位素; 沉积水; 水文地球化学; 盐度; 沉积演化史; 关中盆地

中图分类号: P314.1; P641.3

文献标志码: A

Isotopic Evidence of Remaining Sedimentary Water in the Deep Geothermal Water of Guanzhong Basin

HE Dan, MA Zhi-yuan, WANG Jiang-xia, ZHENG Lei

(School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Combined with the regional sedimentary evolution history, the genetic types of deep geothermal water in Gushi depression, Xianyang-Liquan fault terrace and Xi'an depression of Guanzhong Basin were discussed by the environmental isotope and hydrogeochemistry methods; environmental isotope evidences including the relationships between hydrogen and oxygen isotopes, sulfide and oxygen isotopes, carbon and oxygen isotopes, and $N(^{87}\text{Sr})/N(^{86}\text{Sr})$ and paleosalinity, hydrogeochemistry evidences including the relationships of $r\text{Na}/r\text{Cl}$, $\rho(\text{Cl}^-)/\rho(\text{Br}^-)$, $r\text{Br}/r\text{I}$ to $\rho(\text{Cl}^-)$, and sedimentary evolution evidences were used to find the remaining sedimentary water in the deep geothermal water. The results show that the isotope and hydrogeochemistry characteristics of geothermal water from Huayin in Gushi depression are similar with that of sedimentary water, so that the geothermal water is remaining sedimentary water mixed with paleo-leaching water; the isotope and hydrogeochemistry characteristics of geothermal water in Xianyang-Liquan fault terrace, Xi'an depression and Gushi depression except Huayin are partly close to that of sedimentary water, and partly between paleo-leaching water

收稿日期: 2014-03-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41172211)

作者简介: 何 丹(1989-), 女, 四川仪陇人, 理学硕士研究生, E-mail: danhe0908@163.com。

通讯作者: 马致远(1956-), 女, 天津市人, 教授, E-mail: zhiyuanma56@163.com。

and sedimentary water; the geothermal water in the eastern Xianyang-Liquan fault terrace may be paleo-leaching water or the remaining sedimentary water mixed with later leaching water; the geothermal waters in Xi'an depression and the western Xianyang-Liquan fault terrace are the mixture of present- and paleo-leaching waters.

Key words: geothermal water; environmental isotope; sedimentary water; hydrogeochemistry; salinity; sedimentary evolution history; Guanzhong Basin

0 引言

沉积水是指与沉积物大体同时生成的、由古地表水演变而成的古地下水^[1],它们被埋藏于比较封闭的含水层中,几乎不参与现代水循环,属不易更新资源,是不能在没有人工回灌的条件下大量开采的水源。关中盆地深部地下热水的成因类型事关热水资源的可持续开发利用,一直为学术界关注的焦点^[2-7]。

目前,国内外学者对深部地下热水的成因及来源众说不一:Grasby 等认为加拿大及澳大利亚沉积盆地卤水属海相沉积水^[8];孙占学等认为江西地下水属大气降水深循环补给^[9];谭红兵推测柴达木盆地 1 500 m 深度流体可能是幔源和壳源的深部循环混合水^[10];王润三等对关中盆地具地压特征的地下热水的赋存环境进行了初步论证^[11]。柴达木盆地巴楚隆起热流体、松辽盆地地下热水、关中盆地深部热流体及加拿大 Beaufort Mackenzie 盆地地下热水等大型沉积盆地深部地下热水同位素研究成果显示,深部地下热水存在或混合(或残留)沉积成因流

体有同位素水文地球化学方面的重要证据^[8,12-13]。笔者应用同位素水文地球化学方法,结合关中盆地深部热储地层构造演化史,对研究区深部地下热水的成因类型及关中盆地赋存沉积水的可能性进行了探讨。

1 研究区概况

关中盆地是一个独立的新生代地堑型断陷盆地,处在中国重要的大地构造分界位置上,北接鄂尔多斯台地,南邻秦岭褶皱带,呈多期的隆升和沉降演化过程,与世界著名的地压型盆地沉积速率相近,同时也是国内重要的具有快速沉积特征的沉积盆地。

关中盆地属温带半干旱大陆性季风气候,年平均降水量为 550~750 mm。研究区(图 1)位于关中盆地腹地深部,主要涉及咸阳—礼泉断阶、西安凹陷、固市凹陷三大断块(图 2),断块差异性运动导致不同断块具有不同的沉积厚度、地貌类型以及沉积相特征等(图 3)。研究区主要开采热储层为第四系下更新统三门组(Q_1s)、新近系上新统张家坡组

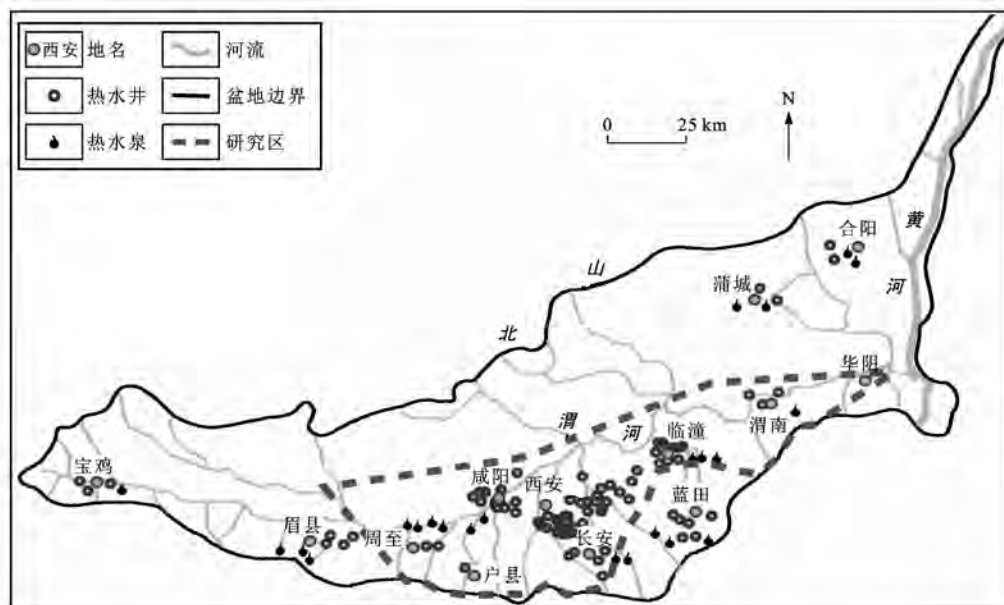


图 1 关中盆地地理位置

Fig. 1 Location of Guanzhong Basin



II-II'为剖面位置

图2 关中盆地板块构造

Fig. 2 Plate Tectonics of Guanzhong Basin

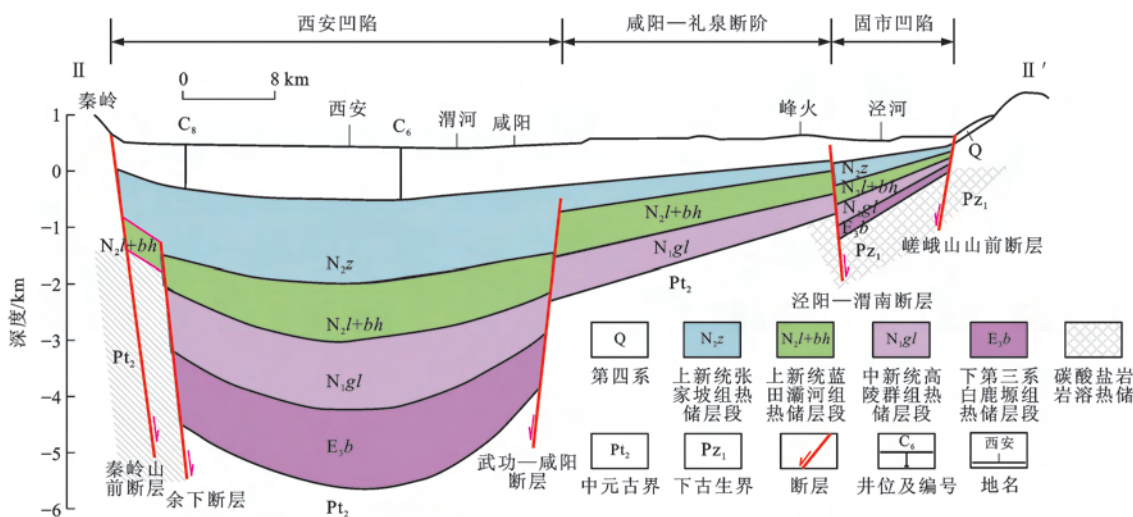


图3 关地盆地 II-II' 剖面

Fig. 3 II-II' Profile of Guanzhong Basin

(N_2z)以及新近系上新统蓝田灞河组(N_2l+bh)。第四系含水层厚约 800 m,主要富水段为砂、砾石孔隙含水层,富水性强;新近系含水层厚数千米,主要岩性为泥岩及中、细粒砂岩,砂岩胶结疏松,孔隙、裂隙发育,富水性中等。

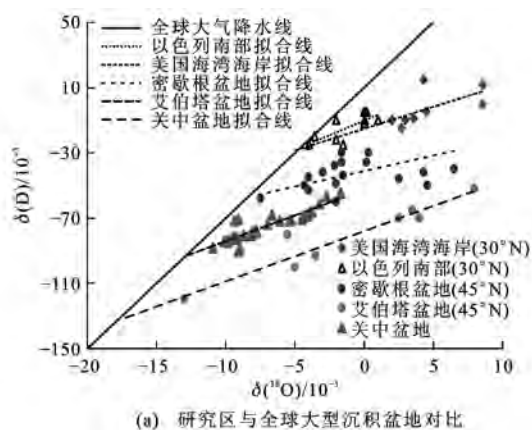
西安凹陷位于关中盆地中南部,基底为元古界变质岩层,上覆新生界河流相、河湖相碎屑岩层和松散沉积堆积物层。西安凹陷由于其基底地貌的不同和新构造运动的影响,被各期断裂切割成许多次级断凸和断凹。咸阳—礼泉断阶由其北部的乾县斜坡区和南部的凸起区组成,基底为下古生界寒武系、奥陶系碎屑岩层和碳酸盐岩地层,上覆第三系碎屑岩层和第四系松散堆积沉积物地

层。咸阳地热田处于咸阳—礼泉断阶南侧和渭河南、北两条断裂带之间,地热地质条件非常好。固市凹陷位于关中盆地东部中间地带,新生代以来处于北翘南俯的掀斜状态且新生界厚度较大,为地热资源提供了较好的储存条件。

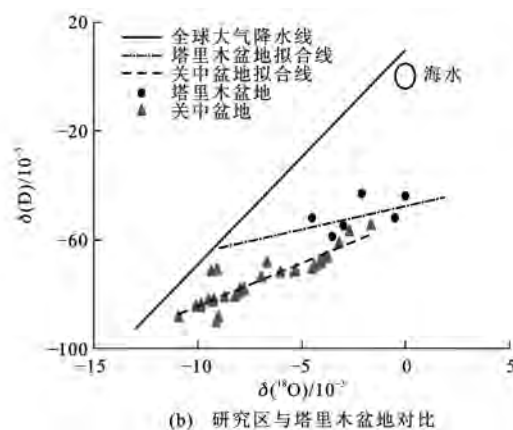
2 样品采集与测试

本次研究共采集同位素样品 45 个,其中西安凹陷有 16 个,咸阳—礼泉断阶有 19 个,固市凹陷有 6 个,秦岭采样点有 4 个,基本覆盖了整个研究区域。 $\delta(D)$ 与 $\delta(^{18}O)$ 值共 25 组样品, $\delta(^{34}S)$ 值有 21 组, $\delta(^{14}C)$ 值有 15 组, $\delta(^{13}C)$ 值有 16 组, $\delta(^{87}Sr)$ 值有 24 组;样品测试时间为 2008~2010 年。以上水样均由

低密度聚乙烯瓶采集保存,除碳同位素样品外,其他样品不需经过特殊的预处理。所取氢氧同位素水样由中国地质科学院水文地质环境地质研究所 MAT-253 质谱仪测定;硫酸盐的 $\delta(^{34}\text{S})$ 值采用燃烧法制样,由中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室稳定同位素室 Delta-s 仪器测定;碳同位素样品经预处理后送由中国科学院地质与地球物理研究所新生代地质与环境重点实验室测试;锶样品送中国地质调查局宜昌地质矿产研究所采用热电离质谱仪 MAT-261 测定;水化学样品 24 组,全部送中南冶金地质研究所测试中心测试,所用主要仪器为 AA-100 原子吸收仪。其中: δ 值表示同位素测定值与标准值之间的千分偏差; $\delta(\cdot)$ 为某元素同位素测定值与标准值之间的千分偏差。



(a) 研究区与全球大型沉积盆地对比



(b) 研究区与塔里木盆地对比

$\delta(\text{D})$ 、 $\delta(^{18}\text{O})$ 值参照维也纳标准平均海洋水 (VSMOW); 图件引自文献[14]和[15]

图 4 国内外典型大型沉积盆地地下热水的氢氧同位素关系

Fig. 4 Relationships Between Hydrogen and Oxygen Isotopes of Geothermal Waters from Typical Sedimentary Basins at Home and Abroad

氡盈余(d)是水岩氧同位素交换程度的总体反映。水岩作用越强烈,氡盈余越小;氡盈余可表征 $\delta(^{18}\text{O})$ 值漂移程度,进而表征地下热水起源的意义。图 5 中 A~D 分别反映了不同溶滤或混合程度的地下水。A 区(固市凹陷)地下热水的混合程度相对最小,沉积水占大多数, $\delta(\text{D})$ 值较高, $\delta(^{18}\text{O})$ 值漂移程度显著, $\delta(^{18}\text{O})$ 值的富集主要是由于氧与岩石发生同位素交换,较高的 $\delta(\text{D})$ 值应是地下热水中大量 H_2S 和 CH_4 气体与围岩中的氡进行大幅度交换所致,指示环境封闭还原,与外界联系较差,基本为滞留状态的赋存环境及非入渗成因类型;B 区(咸阳—礼泉断阶东部)地下热水的溶滤或混合程度次于固市凹陷, $\delta(\text{D})$ 、 $\delta(^{18}\text{O})$ 值也均次于固市凹陷,指示深部地下热水水岩反应稍弱,热储环境较封闭;C 区

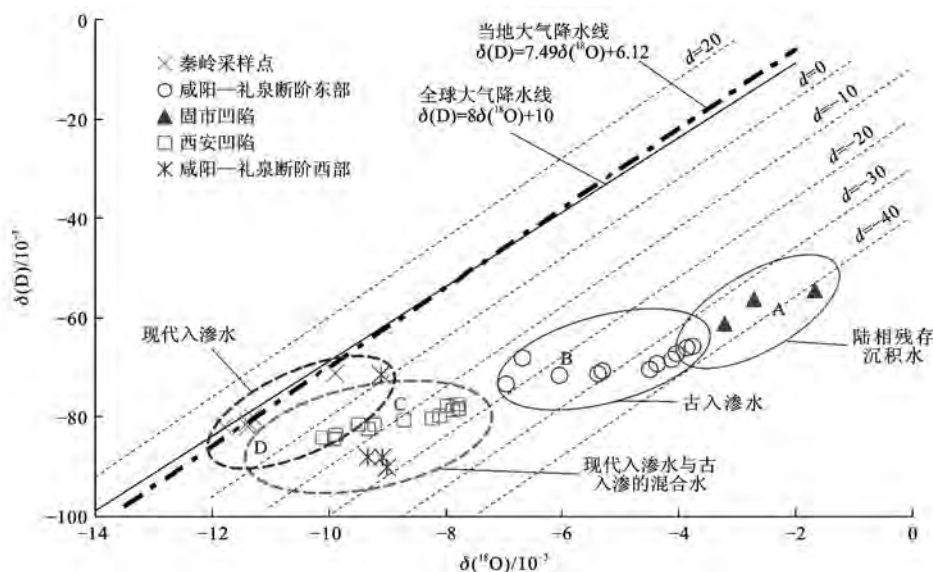
3 环境同位素证据

3.1 氢氧同位素特征

沉积水的氢氧同位素成分是沿着一条斜率为正,介于大气降水线与氧漂移线之间的直线分布^[12-13],沉积水的 δ 值富集并出现漂移,比海水的 δ 值小。图 4 是关中盆地与全球大型沉积盆地、塔里木盆地的氢氧同位素特征趋势对比图。从图 4 可以看出:关中盆地地下热水同位素趋势斜率与密歇根等盆地型沉积水和塔里木盆地沉积水的斜率极为近似;但研究区的 $\delta(\text{D})$ 值稍偏小, $\delta(\text{D})$ 值低且 $\delta(^{18}\text{O})$ 值漂移显著,表明关中盆地在接受补给时温度较低,贮存环境较封闭,水岩反应强,符合古入渗水或沉积成因的地下热水特征。因此,推测关中盆地有沉积水残存的可能。

(西安凹陷及咸阳—礼泉断阶西部)地下热水的 $\delta(^{18}\text{O})$ 值出现漂移,但 $\delta(\text{D})$ 值低,指示其属于现代降水与古入渗水混合的半开放、现代循环水型,沉积水基本被后期古入渗水完全改造;D 区(秦岭采样点)处于大气降水线附近,说明地下热水为大气降水补给,属现代入渗水。

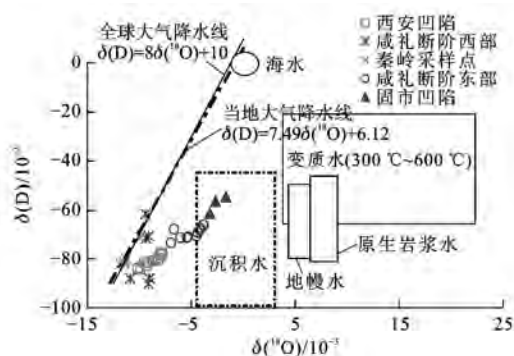
为了进一步确认关中盆地深部地下热水的成因来源,绘制了研究区深部地热流体稳定氢氧同位素 δ 值与不同成因流体 δ 值的对比图(图 6)。根据近年来国内外典型海相、陆相沉积盆地(图 4)的 δ 值,将关中盆地沉积水的 δ 值变化范围归纳为: $\delta(\text{D})$ 值为 $(-100 \sim -45) \times 10^{-3}$, $\delta(^{18}\text{O})$ 值为 $(-4.5 \sim 3) \times 10^{-3}$ ^[15-17]。应当指出的是,沉积水的 δ 值范围有待进一步修正。



$\delta(D)$ 、 $\delta(^{18}O)$ 值参照维也纳标准平均海洋水(VSMOW)

图5 地下热水氢氧同位素关系

Fig. 5 Relationships Between Hydrogen and Oxygen Isotopes of Geothermal Waters



$\delta(D)$ 、 $\delta(^{18}O)$ 值参照维也纳标准平均海洋水(VSMOW)

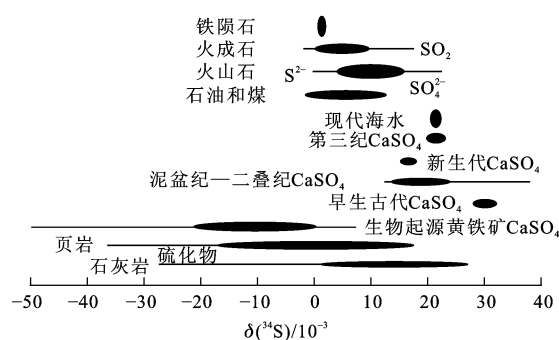
图6 不同成因类型地下热水氢氧同位素关系

Fig. 6 Relationships Between Hydrogen and Oxygen Isotopes of Geothermal Waters with Different Genetics

图6显示咸阳—礼泉断阶东部部分采样点、固市凹陷所有采样点的 δ 值都落在了沉积水范围内,即基本不存在内生水及现代降水起源,推测固市凹陷及咸阳—礼泉断阶东部部分采样点地下热水与现代入渗水基本无联系,应为古入渗水且有可能存在残存沉积水。

3.2 硫氧同位素特征

地下热水中的硫酸盐来源可反演地下热水的起源。咸阳—礼泉断阶东部、固市凹陷及西安凹陷 $\delta(^{34}S)$ 平均值分别为 13.59×10^{-3} 、 13.84×10^{-3} 和 11.99×10^{-3} ;研究结果与图7对照发现,研究区地下热水中硫酸盐最可能为海相沉积岩,即泥盆纪—二叠纪 $CaSO_4$ 。根据沉积和构造演化史,关中盆地



图件引自文献[18];黑色椭圆的相对大小指示不同物质及环境中硫化物及 $\delta(^{34}S)$ 值的变化范围

图7 不同物质及环境中硫同位素组成的变化

Fig. 7 Changes of Sulfide Isotope Composition for Different Materials and Environments

在地质历史时期多次被湖水浸没;随着湖水消失,在后期沉积作用下,残存湖水被埋藏于热储层中。同时,研究区地处西北内陆,海水入侵发生在奥陶纪,而且渭河断裂以南绝大部分海侵地层被剥蚀,而二叠纪地层在西安凹陷、咸阳—礼泉断阶东部、固市凹陷基本无表露。因此,可基本排除海相蒸发岩成为研究区地下热水中 SO_4^{2-} 来源的可能性。

根据研究区热水采样点的 δ 值分布范围,对比陆地、海水、大气3种硫酸盐的 $\delta(^{34}S)$ 值与 $\delta(^{18}O)$ 值的关系(图8),可排除海水硫酸盐及大气硫酸盐成为地下热水中 SO_4^{2-} 主要来源的可能性。西安凹陷及咸阳—礼泉断阶西部大部分采样点接近陆地蒸发岩,推测西安凹陷及咸阳—礼泉断阶西部基底构造活动频繁,断层开启性良好,深部地下热水在经历了热储封

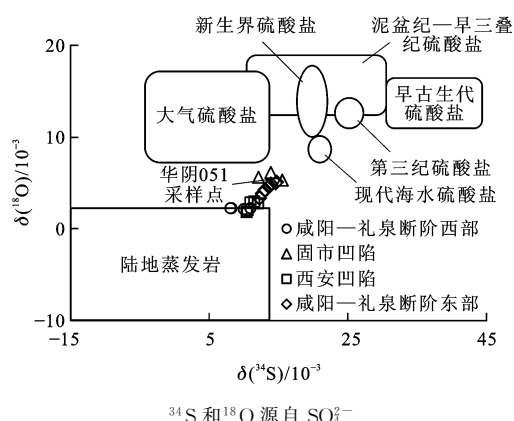


图8 陆地、海水及大气硫酸盐的硫氧同位素关系

Fig. 8 Relationship Between Sulfide and Oxygen Isotopes from Continental, Seawater and Atmosphere Sulfates

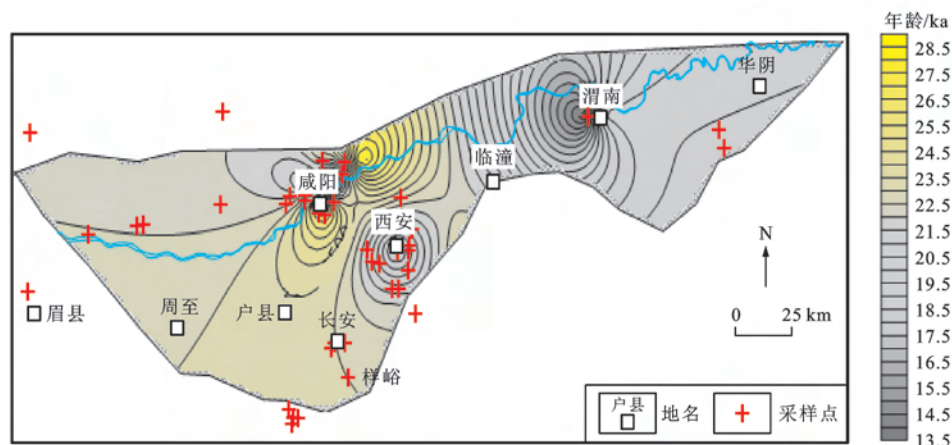
闭环环境下硫酸盐还原作用后受构造运动的影响, H_2S 气体二次氧化形成次生陆地蒸发岩, 即西安凹陷及咸阳—礼泉断阶西部深部地下热水可能经历了由沉积封闭状态向入渗开放状态的过渡; 咸阳—礼泉断阶东

部和固市凹陷热水硫酸盐中 $\delta(^{34}S)$ 值及 $\delta(^{18}O)$ 值偏高, 且赋存环境相对封闭, 硫酸盐还原作用较强, 以水岩作用下溶滤作用为主; 固市凹陷热水采样点具有高 $\delta(^{18}O)$ 值、 $\delta(^{34}S)$ 值, 是硫酸盐还原作用以及硫酸盐与地下热水同位素交换作用的结果, 同位素交换作用贡献较大。结合水化学特征推测固市凹陷可能具有古入渗成因, 赋存少量残存陆相沉积热水。

3.3 碳氧同位素特征

3.3.1 ^{14}C 测年特征

^{14}C 测年可将古地质环境下地下热水的滞留时间量化, 为地下热水的起源成因提供年代证据。图9为研究区 ^{14}C 年龄等值线分布图。 ^{14}C 测年结果表明, 关中盆地地下热水 ^{14}C 年龄均处在 12~32 ka, 关中盆地地下热水应接受了全新世前古降水的补给。固市凹陷地下热水 ^{14}C 年龄高值为 30 ka, 咸阳—礼泉断阶则超过 20 ka。鉴于 ^{14}C 测年的局限性, 估计地下热水实际年龄更大。

图9 ^{14}C 年龄等值线分布Fig. 9 Contour of ^{14}C Ages

3.3.2 $\delta(^{13}C)$ 与 $\delta(^{18}O)$ 的关系

地下热水无机碳中的 $\delta(^{13}C)$ 值可指示热储系统中古碳酸盐系统的开放度。图10对比了海相和次生大陆碳酸盐的 $\delta(^{13}C)$ 、 $\delta(^{18}O)$ 值。从图10可以看出, 关中盆地深部地下热水的 $\delta(^{13}C)$ 、 $\delta(^{18}O)$ 值与热液方解石的范围大致重合, 表明研究区地下热水无机碳的主要来源为次生热液碳酸盐溶解。这一溶解应为地质历史时期在构造因素影响下热储减压脱气的结果; 溶解过程后于构造变动时期, 形成时代与热液方解石形成的时代相近, 也就是说, 水与岩石的关系为同期形成或稍后形成, 指示研究区地下热水可能是在地质历史时期中形成的。

3.4 $N(^{87}Sr)/N(^{86}Sr)$ 值与古盐度特征

由于海水和陆源水体的 $N(^{87}Sr)/N(^{86}Sr)$ 值和

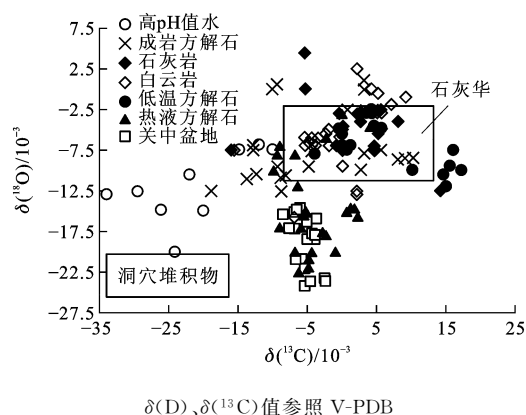


图10 海相和次生大陆碳酸盐的碳氧同位素关系

Fig. 10 Relationship Between Carbon and Oxygen Isotopes from Marine and Secondary Continental Carbonates

Sr 含量(质量分数, 下同)都存在着较大差异, 利用

$N(^{87}\text{Sr})/N(^{86}\text{Sr})$ 值和盐度的关系图可以精确地鉴别出地下热水是海水或陆源水来源,以及是否存在与海水的混合^[19]。海水中的Sr含量(约 8×10^{-6})远高于河流中的Sr含量(低于 1×10^{-6})^[20]。其中: $N(\cdot)/N(\cdot)$ 表示同一元素的同位素比值, $N(\cdot)$ 为元素的原子丰度。

假设一海水与陆表水混合的水体,根据混合原理,水体的 $N(^{87}\text{Sr})/N(^{86}\text{Sr})$ 值(P)表达式为

$$P = (P_s C_s A + P_r C_r B) / (C_s A + C_r B) \quad (1)$$

式中: P_s 为(古)海水端员的 $N(^{87}\text{Sr})/N(^{86}\text{Sr})$ 值; P_r 为(古)陆表水端员的 $N(^{87}\text{Sr})/N(^{86}\text{Sr})$ 值; C_s 为(古)海水端员的Sr含量; C_r 为(古)陆表水端员的Sr含量; A 为(古)海水端员占混合水体的比例; B 为(古)陆表水端员占混合水体的比例, $B=1-A$ 。

假设海水盐度为 35×10^{-3} ,陆表水盐度为0,则混合水体的Sr含量(C)和盐度(S)表达式为

$$C = C_s A + C_r B \quad (2)$$

$$S = 35 \times 10^{-3} A \quad (3)$$

联合式(1)~(3),可得混合水体的盐度公式

$$S = \left| 35 \times 10^{-3} C_s C_r (P_r - P_s) / [P(C_s - C_r)^2 + (C_s P_s - C_r P_r)(C_s - C_r)] - 35 \times 10^{-3} C_r / (C_s - C_r) \right| \quad (4)$$

式(4)是以 S 、 P 为变量的双曲线方程,说明 $N(^{87}\text{Sr})/N(^{86}\text{Sr})$ 值与盐度是一一对应关系。根据式(1)、(3)直接投点得到一双曲线,双曲线使用现代海水端员 $N(^{87}\text{Sr})/N(^{86}\text{Sr})$ 值(0.709 198)、Sr含量(8×10^{-6})、世界陆表水端员的 $N(^{87}\text{Sr})/N(^{86}\text{Sr})$ 极限值(0.738 44)、Sr含量极小值(0.01×10^{-6})和Sr含量极大值(0.949×10^{-6})。

将关中盆地深部地下热水的 $N(^{87}\text{Sr})/N(^{86}\text{Sr})$ 值和由式(4)计算得到的盐度进行投点,得到图11。从图11可以看出,所有地下热水的盐度均在4.9左

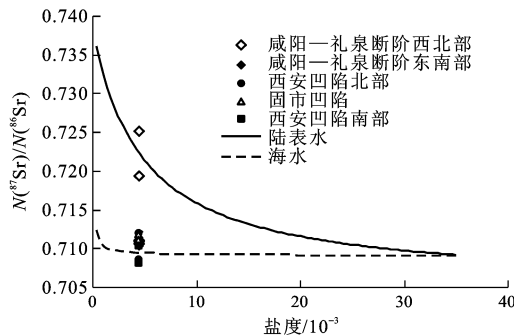


图11 地下热水 $N(^{87}\text{Sr})/N(^{86}\text{Sr})$ 与盐度的关系

Fig. 11 Relationship Between $N(^{87}\text{Sr})/N(^{86}\text{Sr})$ and Salinity of Geothermal Water

右浮动,处于陆表水端员附近,因此,推断地下热水不是海相成因,而属陆源陆相水。

4 水文地球化学证据

目前,国内外学术界对沉积水的研究甚少,有限的研究集中于海相沉积水的水文地球化学识别方法,鲜有陆相沉积水研究的相关报道。关中盆地沉积相组合为河湖相。为探明研究区深部地下热水的成因类型以及残存沉积水的可能性,采用海相沉积水的水文地球化学特征对比及海、陆相沉积水对比的方法对研究区陆相沉积水进行研究。

沉积水的水文地球化学性质主要包括: Ca^{2+} 相对含量增大, Na^+ 相对含量减少, $r\text{Na}/r\text{Cl}$ 值小于0.85, $\rho(\text{Cl}^-)/\rho(\text{Br}^-) \geq 293$, H_2S 、 CH_4 气体出现,矿化度高,pH值增高。

4.1 $r\text{Na}/r\text{Cl}$ 值与 $\rho(\text{Cl}^-)$ 的关系

$r\text{Na}/r\text{Cl}$ 值是表征地下水的成因系数。若沉积水的 Na^+ 在地质历史过程中与地层中的交换性 Ca^{2+} 产生阳离子交换吸附,则 $r\text{Na}/r\text{Cl}$ 值小于0.85,而当有入渗水混入后, $r\text{Na}/r\text{Cl}$ 值则趋向大于0.85。一般来说,沉积水封闭越好,变质程度越高, $r\text{Na}/r\text{Cl}$ 值越小^[17]。 $r\text{Na}/r\text{Cl}$ 值与 $\rho(\text{Cl}^-)$ 的关系(图12)显示固市凹陷华阴051采样点 $r\text{Na}/r\text{Cl}$ 值(0.7)和华阴农场南界采样点 $r\text{Na}/r\text{Cl}$ 值(0.58)低于海水 $r\text{Na}/r\text{Cl}$ 值(0.85),高于海水 $r\text{Ca}/r\text{Cl}$ 值(0.004),与四川威远气田震旦系沉积水的 $r\text{Ca}/r\text{Cl}$ 值^[21]范围一致,表明其热储环境封闭,变质程度高,具有典型的沉积水特征。咸阳—礼泉断阶所有采样点大致落于海水的临界线上, $r\text{Na}/r\text{Cl}$ 值稍大于0.85,推测其可能为古入渗水稀释的结果,显示后期古入渗水逐渐替代沉积水的混合过程。西安凹陷所有采样点及固市凹陷部分采样点的 $r\text{Na}/r\text{Cl}$ 值高于海水, $\rho(\text{Cl}^-)$ 值较低,不排除存在早先形成的沉积水经过后期淋滤的可能性。

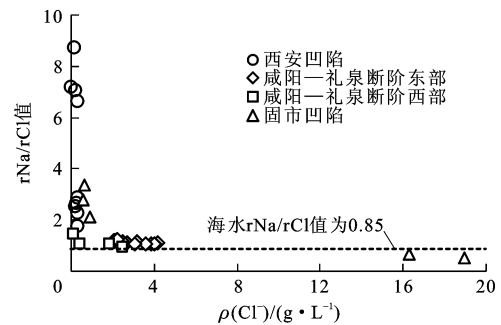


图12 地下热水 $\rho(\text{Cl}^-)$ 与 $r\text{Na}/r\text{Cl}$ 值的关系

Fig. 12 Relationship Between $\rho(\text{Cl}^-)$ and $r\text{Na}/r\text{Cl}$ Value of Geothermal Water

其中: $\rho(\cdot)$ 为离子质量浓度。

4.2 $\rho(\text{Cl}^-)/\rho(\text{Br}^-)$ 、 $r\text{Br}/r\text{I}$ 值与 $\rho(\text{Cl}^-)$ 的关系

$\rho(\text{Cl}^-)/\rho(\text{Br}^-)$ 值和 $r\text{Br}/r\text{I}$ 值是判别沉积成因地下水的参数。海水的 $\rho(\text{Cl}^-)/\rho(\text{Br}^-)$ 值为 293, $\rho(\text{Cl}^-)/\rho(\text{Br}^-)$ 值大于 293 的为陆相沉积水^[17]。沉积水在沉积过程中存在富含溴和碘的生物遗骸,且在封闭的环境下地下热水中碘的富集速率大于溴^[13],因此,大量溴和碘富集使 $\rho(\text{Cl}^-)/\rho(\text{Br}^-)$ 、 $r\text{Br}/r\text{I}$ 值降低。

$\rho(\text{Cl}^-)$ 值与 $\rho(\text{Cl}^-)/\rho(\text{Br}^-)$ 值的关系(图 13)显示,固市凹陷华阴地下热水 $\rho(\text{Cl}^-)/\rho(\text{Br}^-)$ 值明显高于海水(293),且 $\rho(\text{Cl}^-)$ 值最高,可能是热储中盐岩的大量溶解使 Cl^- 的富集速率大于 Br^- ,这与陆相沉积水的 $\rho(\text{Cl}^-)/\rho(\text{Br}^-)$ 值大于 293^[17] 的特征相吻合,说明华阴地下热水为沉积成因的陆相沉积水。而咸阳—礼泉断阶地下热水 $\rho(\text{Cl}^-)/\rho(\text{Br}^-)$ 值低于但接近海水(293),可能是由于咸阳—礼泉断阶地下热水的补给来源为北部奥陶系灰岩水。西安凹陷由于与咸阳—礼泉断阶地质构造差异大,且 $\rho(\text{Cl}^-)$ 值较低, $\rho(\text{Cl}^-)/\rho(\text{Br}^-)$ 值相对较低,因此,推测其地下热水可能存在经后期淋滤的残存沉积水。

关中盆地内所有采样点的 $r\text{Br}/r\text{I}$ 值(0.19~5.9)都远小于海水的 $r\text{Br}/r\text{I}$ 值,甚至低于四川威远气田沉积水的 $r\text{Br}/r\text{I}$ 值(18~44)^[21],其中固市凹陷华阴地下热水变质程度较高,其余地质单元地下热水亦存在一定程度的变质。

4.3 钙镁系数

深部地下热水封存愈久,钙镁系数愈高,且一般

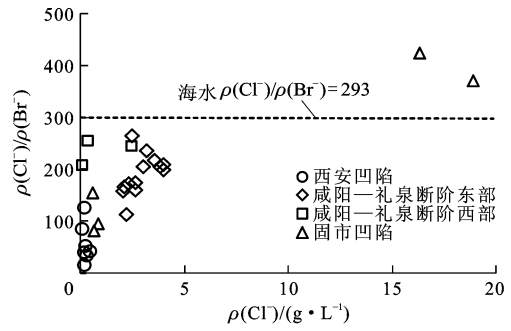


图 13 地下热水 $\rho(\text{Cl}^-)$ 与 $\rho(\text{Cl}^-)/\rho(\text{Br}^-)$ 的关系

Fig. 13 Relationship Between $\rho(\text{Cl}^-)$ and $\rho(\text{Cl}^-)/\rho(\text{Br}^-)$ of Geothermal Water

大于 3^[21]。关中盆地大部分地下热水钙镁系数远大于海水(0.19),且高于四川威远气田沉积水钙镁系数(2.1~6.5);华阴 051 采样点地下热水钙镁系数高达 12.26,说明该地下热水在漫长的地质历史时期内发生了较为强烈的正向变质作用。

4.4 溶解性总固体

海-陆相体系的沉积物具有不同的原始化学成分,但普遍认为陆相沉积水的溶解性总固体(TDS)低于海相沉积水。固市凹陷地下热水的溶解性总固体介于 $4.4\sim33.54\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,咸阳—礼泉断阶东部地下热水溶解性总固体介于 $1.3\sim8.27\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,部分正好处于陆相沉积水的范围内($3\sim14\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)^[22]。固市凹陷华阴地下热水长期的水岩反应致使其溶解性总固体高达 $33.54\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, $\delta(^{18}\text{O})$ 值漂移程度远大于国内除四川盆地卤水外的所有流体,接近海水的溶解性总固体($35\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$),表明华阴地下热水封存条件更佳,可能残存沉积水(表 1)。

表 1 沉积水及各构造单元特征

Tab. 1 Characteristics of Different Tectonic Units and Sedimentary Water

特征参数	沉积水	西安凹陷	咸阳—礼泉断阶	固市凹陷
氡盈余	$\delta(^{18}\text{O})$ 值显著漂移	$(-16\sim-2)\times10^{-3}$	$(-35\sim-20)\times10^{-3}$	$(-40\sim-30)\times10^{-3}$
$\delta(^{18}\text{O})$	$(-4.3\sim3)\times10^{-3}$	$(-11.8\sim-7.9)\times10^{-3}$	$(-10.9\sim-2.3)\times10^{-3}$	$(-3.21\sim-0.7)\times10^{-3}$
δ 值斜率	大于 $\delta(^{18}\text{O})$ 值漂移线斜率, 小于大气降水线斜率			
^{14}C 年龄	超过 10 ka	12.27~24.025 ka	26.29 ka	29.983 ka
$r\text{Na}/r\text{Cl}$ 值	小于 0.85	大于 0.85	约 0.85	小于 0.85
$\rho(\text{Cl}^-)/\rho(\text{Br}^-)$ 值	大于 293	22.54~185.81	254.46	424.66
$r\text{Br}/r\text{I}$ 值	小于 1 300	1.1~2.4	5.9	3.35
矿化度	高	$0.3\sim5.20\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$	$1.30\sim8.27\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$	$3.42\sim33.56\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$
溶解性总固体	海水为 $35\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$; 陆相沉积水为 $3\sim14\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$	$0.35\sim4.16\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$	$4.4\sim8.6\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$	$4.4\sim33.54\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$
CH_4 与 H_2S 含量之和	出现 CH_4 、 H_2S	大于 10.582%	大于 10.582%	大于 10.582%
pH 值	大于 7	7.2~8.3	7.4~8.9	7.1~8.7

5 沉积演化史证据

关中盆地是奠基在不同构造基底之上的叠合式、大陆裂谷型沉积盆地,亦为第三系快速沉积盆地。在晚白垩世—古新世,关中盆地长期处于隆起和剥蚀状态;自始新世,盆地沉陷并积水成湖;上新世时期,渭河断裂带的裂陷作用加剧;至第四系时期,渭河断陷带下陷速度超过了沉积速度,形成了广阔的“三门湖”;晚更新世,渭河断陷带仍继续沉降,以广泛发育的河流相为特征。自中更新世以来,由于断陷带经历了多次沉降与堆积的轮回,形成了多级河流冲积阶地。从古近纪始新世至第四纪全新世,渭河断陷带的演化过程具有断陷及充填同时进行的演化特征。

关中盆地古沉积环境为内陆河湖相沉积相,盆地的快速沉降堆积可以将早期存在于地层中的地下水封存在疏松地层孔隙中,并将深部孔隙介质中赋存的地下热水挤压到含水层中,呈滞留状态,直到渭河形成才使浅部流体得以排泄,而1500 m以下地下水则因很难参与水循环而滞留原地。由于不断与周围岩石发生水岩交换及蒸发浓缩,地下水发生 $\delta(^{18}\text{O})$ 值漂移并形成较高矿化度的水。深大断裂或其他开启性构造的形成使附近流体有更多机会接受入渗水及地表水的混合作用,使原本咸化的流体逐渐淡化,或转化为(古)入渗水,但部分仍保留原始沉积水的特征,即残存沉积水。

6 结 语

(1)固市凹陷华阴051采样点地下热水的 $\delta(\text{D})$ 、 $\delta(^{18}\text{O})$ 值均落在沉积水的 δ 值范围内,其氢氧同位素趋势与国内外典型沉积盆地沉积水的趋势相近,且溶解性总固体已接近海水,属高矿化度盐水, $r\text{Na}/r\text{Cl}$ 值小于0.85, $\rho(\text{Cl}^-)/\rho(\text{Br}^-)$ 值大于海水(293),钙镁系数高达12.26,呈现滞留型水动力条件,符合沉积水的水化学特征。

(2)固市凹陷华阴之外的其他构造单元、咸阳—礼泉断阶东部的地下热水推测为古入渗水或残存沉积水与后期入渗水的混合;西安凹陷及咸阳—礼泉断阶西部的地下热水属于现代入渗水与古入渗水的混合水。

(3)多种环境同位素及水化学研究结果证实,关中盆地深部地下热水可能是地质历史时期的古入渗水或部分经后期古入渗水改造的残存陆相沉积水。

(4)未来有必要开展 ^{36}Cl 及 $N(^4\text{He})/N(^3\text{He})$

等同位素研究来进一步证实本文的研究结果。

参考文献:

References:

- [1] 张人权,梁杏,靳孟贵,等.水文地质学基础[M]. 6版.北京:地质出版社,2011.
ZHANG Ren-quan, LIANG Xing, JIN Meng-gui, et al. The Basis of Hydrogeology[M]. 6th ed. Beijing: Geological Publishing House, 2011.
- [2] 卞惠瑛,王双明,杨泽元,等.固市凹陷地下热水水力条件分析[J].煤田地质与勘探,2014,42(3):50-54,60.
BIAN Hui-ying, WANG Shuang-ming, YANG Ze-yuan, et al. Hydrodynamic Conditions of Geothermal Water in Gushi Depression of Guanzhong Basin[J]. Coal Geology and Exploration, 2014, 42(3): 50-54, 60.
- [3] 马致远,侯晨,席临平,等.超深层孔隙型热储地热水尾水回灌堵塞机理[J].水文地质工程地质,2013,40(5):133-139.
MA Zhi-yuan, HOU Chen, XI Lin-ping, et al. Reinjection Clogging Mechanism of Used Geothermal Water in a Super-deep-porous Reservoir[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2013, 40(5): 133-139.
- [4] 胡扬,马致远,余娟,等.关中盆地地下热水接受补给时温度及热储层温度的估算[J].地球科学与环境学报,2009,31(2):173-176.
HU Yang, MA Zhi-yuan, YU Juan, et al. Estimation of the Making-up Temperature of Geothermal Water and the Thermal Reservoir Temperature in the Guanzhong Basin[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2009, 31(2): 173-176.
- [5] 马致远,余娟,李清,等.关中盆地地下热水环境同位素分布及其水文地质意义[J].地球科学与环境学报,2008,30(4):396-401.
MA Zhi-yuan, YU Juan, LI Qing, et al. Environmental Isotope Distribution and Hydrologic Geologic Sense of Guanzhong Basin Geothermal Water[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2008, 30(4): 396-401.
- [6] 马致远,钱会,黄建勋,等.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[J].地球科学与环境学报,2006,28(2):69-74.
MA Zhi-yuan, QIAN Hui, HUANG Jian-xun, et al. Isotope and Geochemistry Constraints on Hydraulic Relationship of Groundwater Among Different Aquifers in Southern Area of Guanzhong Basin, Shaanxi Province[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2006, 28(2): 69-74.
- [7] 马致远,范基娇,苏艳,等.关中南部地下热水氢氧

- 同位素组成的水文地质意义[J]. 地球科学与环境学报, 2006, 28(1): 41-46.
- MA Zhi-yuan, FAN Ji-jiao, SU Yan, et al. Hydrogeology Significance on Hydrogen and Oxygen Isotopes Composition in Underground Thermal Water of Guanzhong Area, Shaanxi Province[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2006, 28(1): 41-46.
- [8] GRASBY S E, CHEN Z. Formation Waters of the Beaufort Mackenzie Basin: Deep Biodegradation Associated with Rapid Sedimentation and Burial [C] // WANG Y X, BULLEN T D. Proceedings of the 12th International Symposium on Water-rock Interaction. London: CRC Press, 2007: 501-504.
- [9] 孙占学, 李学礼, 史维浚. 江西中低温地热水的同位素水文地球化学[J]. 华东地质学院学报, 1992, 15(3): 243-248.
- SUN Zhan-xue, LI Xue-li, SHI Wei-jun. Isotopic Hydrogeochemistry of Mid-low Temperature Geothermal Water in Jiangxi Province[J]. Journal of East China Geological Institute, 1992, 15(3): 243-248.
- [10] 谭红兵. 深源流体控制盐卤资源超常富集成矿[M] // 冯长根. 青藏高原冰川融水深循环及其地质环境效应. 北京: 中国科学技术出版社, 2009: 113-118.
- TAN Hong-bing. Bittern Resource Controlled by Deep Source Fluid Is Extremely Enriched in Ore[M] // FENG Chang-gen. Glaciers Melt Water Deep Circulation in Qinghai-Tibet Plateau and Its Geological Environmental Effect. Beijing: China Science and Technology Press, 2009: 113-118.
- [11] 王润三, 薛华锋, 王凤林, 等. 西安—咸阳地热田异常地层压力初步研究[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 1999, 29(4): 333-337.
- WANG Run-san, XUE Hua-feng, WANG Feng-lin, et al. A Preliminary Study on Abnormal Formation Pressures in Xi'an-Xianyang Geothermal Field[J]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 1999, 29(4): 333-337.
- [12] 马致远, 钱会. 环境同位素地下水文学[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2004.
- MA Zhi-yuan, QIAN Hui. Environmental Isotope Geo-hydrology[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2004.
- [13] 钱会, 马致远, 李培月. 水文地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2012.
- QIAN Hui, MA Zhi-yuan, LI Pei-yue. Hydrogeochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012.
- [14] MA Z Y, YU J, SU Y, et al. $\delta^{18}\text{O}$ Shifts of Geothermal Waters in the Central of Weihe Basin, NW China[J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 59(5): 995-1008.
- [15] CLARK I D, FRITZ P. Environmental Isotopes in Hydrogeology[M]. London: CRC Press, 1997.
- [16] 石中平, 刘丹. 环境同位素在秦岭特长隧道地区地下水研究中的应用[J]. 现代隧道技术, 2001, 38(3): 16-21.
- SHI Zhong-ping, LIU Dan. Application of Environmental Isotope to the Research of Groundwater in Qinling Tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2001, 38(3): 16-21.
- [17] 沈照理, 朱宛华, 钟佐桑. 水文地球化学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- SHEN Zhao-li, ZHU Wan-hua, ZHONG Zuo-shen. The Basis of Hydrogeochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993.
- [18] 黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 等. 汾阳地区不同类型地下水 SO_4^{2-} 、 $\delta^{34}\text{S}$ 的特征及影响因素[J]. 第四纪研究, 2014, 34(2): 364-371.
- HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, et al. The Characteristics and Influencing Factors of SO_4^{2-} and Sulfate Isotope ($\delta^{34}\text{S}$) in Different Types of Groundwater in Fenyang, Shanxi Province[J]. Quaternary Sciences, 2014, 34(2): 364-371.
- [19] 刘秀明, 王世杰, 孙承兴, 等. (古)盐度研究的一种重要工具——锶同位素[J]. 矿物学报, 2000, 20(1): 91-96.
- LIU Xiu-ming, WANG Shi-jie, SUN Cheng-xing, et al. Strontium as an Essential Indicator of Paleosalinity[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2000, 20(1): 91-96.
- [20] PALMER M R, EDMOND J M. The Strontium Isotope Budget of the Modern Ocean[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1989, 92(1): 11-26.
- [21] 汪蕴璞, 王焕夫, 曲焕林. 论四川盆地威远气田震旦系深层水成因[J]. 中国地质科学院水文地质工程地质研究所所刊, 1990(6): 99-125.
- WANG Yun-pu, WANG Huan-fu, QU Huan-lin. A Discussion on Genesis of Sinian Deep Groundwater of Weiyuan Gas Field in Sichuan Basin [J]. Bulletin of Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, 1990(6): 99-125.
- [22] HU W W, MA Z Y, LI T, et al. Isotope Characteristics of Geothermal Water in Gushi Depression, Shaanxi Province, NW China[C] // IEEE. 2011 International Symposium on Water Resource and Environmental Protection. Xi'an: IEEE, 2011: 1979-1982.