

# 关中盆地地下热水环境同位素 分布及其水文地质意义

马致远<sup>1</sup>, 余娟<sup>1</sup>, 李清<sup>3</sup>, 王心刚<sup>4</sup>, 李峰<sup>2</sup>,  
穆跟胥<sup>2</sup>, 胡扬<sup>1</sup>, 贾旭兵<sup>1</sup>, 黎卫亮<sup>1</sup>

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 陕西省地质调查院, 陕西 西安 710016

3. 西安地质矿产研究所, 陕西 西安 710054; 4. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 通过对关中盆地地下热水<sup>2</sup>H、<sup>18</sup>O、<sup>13</sup>C、<sup>14</sup>C、<sup>34</sup>S分布特征的研究, 阐述了关中盆地腹部与其周边地区地下热水环境同位素异同现象及其水文地质意义, 论证了关中盆地地下热水的补给循环及其赋存环境特征。研究表明: 关中盆地地下热水中环境同位素( $\delta^{18}\text{O}$ )、( $\delta\text{D}$ )、( $\delta^{13}\text{C}$ )、( $\delta^{14}\text{C}$ )、( $\delta^{34}\text{S}$ )的分布除( $\delta\text{D}$ )外均呈现中部富集、周边贫化趋势, 指示关中盆地腹部咸阳及西安城区1500 m以下地下热水赋存环境相对封闭; 地下热水滞留时间较长, 以碳酸盐矿物溶解为主的水岩反应强烈, 热储层中碳酸盐溶解对地热水中的 $\text{HCO}_3^-$ 、( $\delta^{18}\text{O}$ )、( $\delta^{13}\text{C}$ )随深度增加趋势有明显贡献, ( $\delta\text{D}$ )在盆地中部的贫化指示地下热水补给时的温度偏低, 根据补给高程计算, 西安、咸阳城区地下热水分别为秦岭和北山末次冰期雪水补给。

**关键词:** 关中盆地; 环境同位素; 地下热水; 水文地质意义

**中图分类号:** P641.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2008)04-0396-06

## Environmental Isotope Distribution and Hydrologic Geologic Sense of Guanzhong Basin Geothermal Water

MA Zhi-yuan<sup>1</sup>, YU Juan<sup>1</sup>, LI Qing<sup>3</sup>, WANG Xin-gang<sup>4</sup>, LI Feng<sup>2</sup>,  
MU Gen-xu<sup>2</sup>, HU Yang<sup>1</sup>, JIA Xu-bing<sup>1</sup>, LI Wei-liang<sup>1</sup>

(1. School of Environmental Sciences and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Geology Investigation Institute of Shaanxi Province, Xi'an 710016, Shaanxi, China; 3. Geology Mineral Research Institute of Xi'an, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 4. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract** From the research on the isotopes of <sup>2</sup>H, <sup>18</sup>O, <sup>13</sup>C, <sup>14</sup>C, <sup>34</sup>S in geothermal water in the Guanzhong basin, the different phenomena and hydrologic geologic significances between Guanzhong basin and its ambient region are described, and supply-circulation and the host environment of the geothermal water in the basin is discussed. The results show that the environmental isotope like ( $\delta^{18}\text{O}$ ), ( $\delta\text{D}$ ), ( $\delta^{13}\text{C}$ ), ( $\delta^{14}\text{C}$ ), ( $\delta^{34}\text{S}$ ) in the geothermal water in Guanzhong basin are rich in its central area but lack in its periphery area in addition to ( $\delta\text{D}$ ), which indicate that the host environments of geothermal water of Xianyang and Xi'an are more closed at the depth deep than 1500 meters. The detained time of geothermal water is long and the water-rock reaction dominated by dissolution of carbonate minerals is strong. Dissolution of carbonate contributes most to  $\text{HCO}_3^-$ , ( $\delta^{18}\text{O}$ ) and ( $\delta^{13}\text{C}$ ) of geothermal water in geothermal reservoir. Depletion of ( $\delta\text{D}$ ) in the central area of the basin indicates the lower recharge temperature of geothermal water. According to recharge height, geothermal water of Xianyang

收稿日期: 2008-01-06

基金项目: 中国地质调查局项目(1221010535A98); 陕西省自然科学基金项目(2005D03)

作者简介: 马致远(1956-), 女, 天津人, 教授, 从事水文地质、环境同位素水文地质教学研究。E-mail: zhiyuanma56@163.com

©1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

and Xi'an maybe come from the snow water of Qinling and Beishan.

**Key words:** Guanzhong basin; environmental isotope; geothermal water; hydrologic geologic significance

0 引言

环境同位素可以用于研究地下热水的补给、循环及其赋存环境, 地下热水  $\delta(D)$  值的变化主要取决于地下热水接受补给时的环境温度及其补给高程, 此外, 混合作用亦有一定影响;  $\delta(^{18}O)$  的变化除与  $\delta(D)$  相同的影响因素外, 还主要取决于地下水与围岩交换的程度;  $\delta(^{13}C)$  主要提供热水起源时溶解  $CO_2/HCO_3^-$  的相关信息;  $SO_4^{2-}$  中  $\delta(^{34}S)$  的分析, 可用于区分热水赋存环境的开放程度;  $^{14}C$  测年则提供了热水滞留时间的宝贵信息。故此, 环境同位素技术是一种不可替代的地球深部地热流体起源、成因及其运动循环的有效工具<sup>[1-3]</sup>。近年来, 随着关中地热的开发利用, 对盆地地下热水已有相当程度的研究<sup>[4-11]</sup>, 然而, 系统研究关中盆地地下热水各类环境同位素分布特征尚属首次。

1 研究区背景

关中盆地位于陕西省中部, 西起宝鸡, 东至潼关, 南依秦岭, 北抵北山, 位于东经  $107^{\circ}30' \sim 110^{\circ}30'$ 、北纬  $33^{\circ}39' \sim 35^{\circ}50'$  间, 总体似半个弯月横亘于陕西省中部(图 1)。受热源和构造影响, 盆地温泉和地温异常分为 3 个带: 盆地北部边缘断裂地下热水分布带; 盆地南部边缘断裂地下热水分布带; 咸阳—西安地下热水分布带。作为主干断层的

盆地南北缘断裂带, 控制着盆地现今的伸展扩展。盆地主控构造将盆地分为 6 个构造断块。关中盆地莫霍面呈北东向展布, 在西安凹陷和固市凹陷形成两个椭圆形局部隆起区, 在西安凹陷莫霍面埋深约 33 km, 固市凹陷莫霍面埋深约 30 km。盆地中部渭河断裂带由巨厚的新生界沉积物覆盖, 其热储温度与盆地周边相比较, 最高温度可达  $120^{\circ}C$ 。

2 氢氧同位素分布特征及其水文地质意义

根据实测同位素资料绘制的关中地区主要热储层新近系蓝田灞河组地下热水的  $\delta(D)$ 、 $\delta(^{18}O)$  分布等值线图见图 2、3。

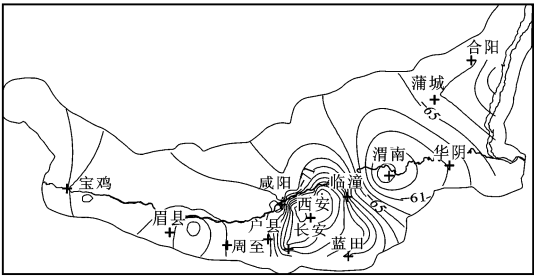


图 2 地下热水  $\delta(D)$  值分布等值线  
Fig. 2  $\delta(D)$  Contour Map of Geothermal Water

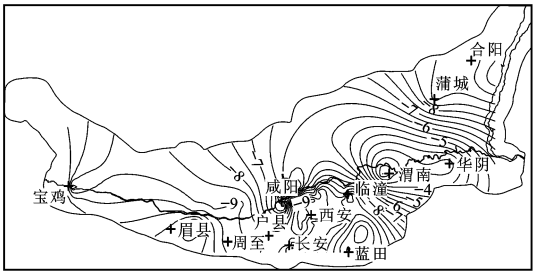


图 3 地下热水  $\delta(^{18}O)$  值分布等值线  
Fig. 3  $\delta(^{18}O)$  Contour Map of Geothermal Water

图 2 中研究区主要热储层蓝田灞河组地下热水  $\delta(D)$  值从盆地周边向盆地中部呈下降趋势。如盆地南部眉县汤峪、西部宝鸡、东部华阴、北部渭河北岸碳酸盐岩热储流体的  $\delta(D)$  皆呈现高值。与此对应, 热储流体中  $\delta(D)$  值在西安凹陷中心部位最低, 并沿西安凹陷呈现半圈闭态势, 提示西安凹陷中部热储流体接受补给时的温度较低, 或在相同气候条件下的补给来源于高海拔处。值得注意的是



图 1 关中盆地地理位置  
Fig. 1 Location of Guanzhong Basin

盆地热储流体的  $\delta(D)$  值以固市凹陷中部渭南市为中心形成高值封闭区, 指示  $\delta(D)$  在固市凹陷发生明显氘漂移, 可能存在相对封闭环境下  $H_2S$  及  $CH_4$  气体与高温流体中氘的同位素交换作用。

与图 2 西安凹陷地下热水  $\delta(D)$  的低值相对应, 图 3 中热储流体的  $\delta^{18}O$  值在盆地中部西安凹陷及固市凹陷中部渭南市呈高值半封闭分布, 显示地下热水中的  $\delta^{18}O$  在盆地中部西安、固市凹陷处发生明显漂移, 形成  $\delta^{18}O$  两个高峰区, 与关中盆地地幔隆起区相吻合。

图 4 更清晰地反映了研究区地下热水  $\delta^{18}O$ 、 $\delta(D)$  的分布特征。西安、咸阳热水样点的  $\delta(D)$  值分别与盆地秦岭山前、渭北热水相似, 推测秦岭山前与西安城区热水、渭北热水与咸阳热水分别为同一系统, 存在共同的补给来源, 水化学资料图 5、6 支持了这一推断。根据同位素补给高程计算, 咸阳地下热水源自 700~1 023 m 高处, 对应于渭北北山; 西安热水源自 1 510~2 812 m, 对应于秦岭北麓。根据氢氧同位素与温度关系计算, 研究区地下热水接受补给时的温度比常温水低  $7^{\circ}C \sim 14^{\circ}C$ , 估计为末次冰期高山雪水补给。 $\delta^{18}O$  富集漂移现象在图 4 中尤为显著。

图 4 表明, 研究区内周边地区地下热水样点皆分布在关中大气降水线附近, 表明关中盆地的地下热水由大气降水补给。咸阳和西安地下热水氧同位素严重偏离大气降水线, 发生了明显的  $O^{18}$  漂移, 揭示咸阳和西安城区与现代循环水较少有联系, 热储环境较为封闭, 因此地下热水与围岩之间水岩反应强烈。

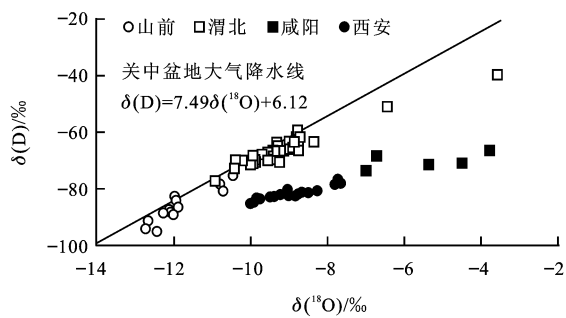


图 4 地下热水  $\delta^{18}O$  和  $\delta(D)$  的关系

Fig. 4 Relationship Between  $\delta^{18}O$  and  $\delta(D)$  of Geothermal Water

根据  $\delta^{18}O$  漂移程度与  $Cl^-$  含量, 可将盆地地下热水分类(图 7)。这里以  $Cl^-$  的对数为 y 轴, 以  $\delta^{18}O$  含量为 x 轴, A 点代表浅部较为活跃的现代

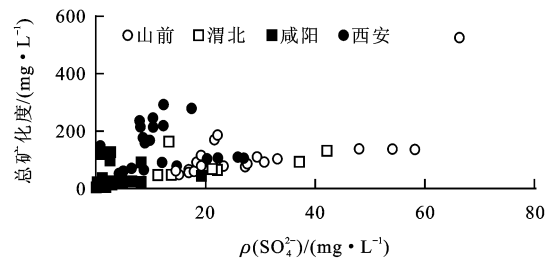


图 5 地下热水  $SO_4^{2-}$  与 TDI 的关系

Fig. 5 Relationship Between  $SO_4^{2-}$  and TDI of Geothermal Water

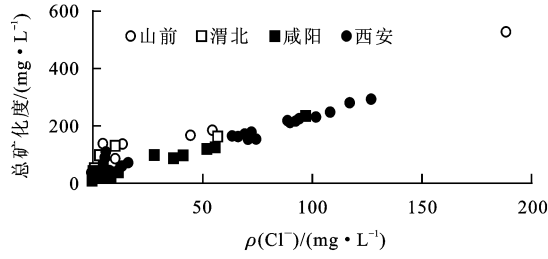


图 6 地下热水  $Cl^-$  与 TDI 关系

Fig. 6 Relationship Between  $Cl^-$  and TDI of Geothermal Water

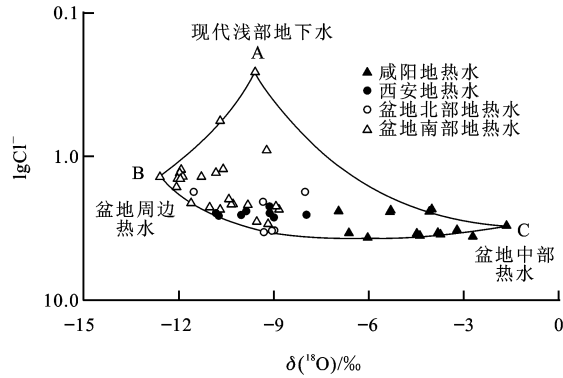


图 7 地下热水混合三角图

Fig. 7 Ternary Mixing Diagram of Geothermal Water

水, B 点表示盆地周边地区的循环型热水, C 点表示盆地腹部西安、咸阳的地压地热流体(封存型热水), AB 线表征循环型热水类型, 从 A→B, 现代水所占比例减小, 温度增高; BC 线表征高温高压的封闭型热水类型, 从 B→C, 水岩作用加强, 与现代水连通程度减弱, 封闭程度增大。而处于混合三者内部的水点, 是 A、B、C 3 点作用的结果, 表征两种类型热水的混合。由图 5 可知, 盆地中部咸阳、西安相对封闭,  $Cl^-$  含量较高,  $^{18}O$  与热水中溶解的含氧组分交换几率较大,  $^{18}O$  漂移显著。

影响关中盆地地下热水氧同位素漂移的主要因素有埋藏深度、温度、滞留时间、地质条件。

由图 8~11 可见, 热水井埋深越深, 温度越高, 热水年龄越长, 地质条件越封闭,  $\delta^{18}\text{O}$  愈富集。故而, 热储埋深、温度、封存状况和滞留时间是  $\delta^{18}\text{O}$  在盆地中部富集的主要原因。

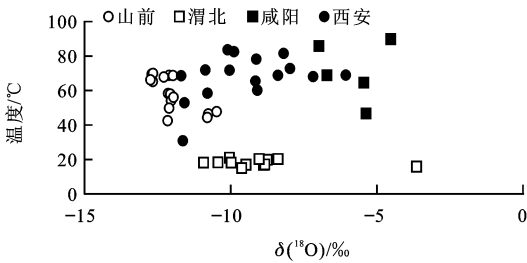


图 8 地下热水  $\delta^{18}\text{O}$  值与温度的关系  
Fig. 8 Relationship Between  $\delta^{18}\text{O}$  and T of Geothermal Water

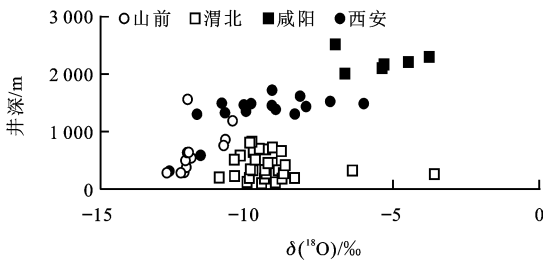


图 9 地下热水  $\delta^{18}\text{O}$  值与井深关系  
Fig. 9 Relationship Between  $\delta^{18}\text{O}$  and Depth of Geothermal Water

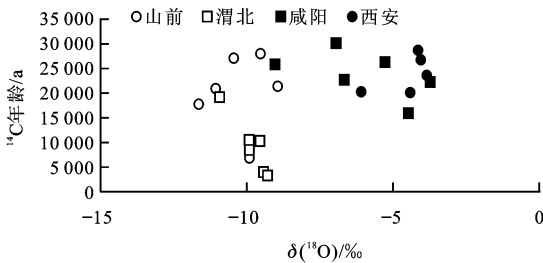


图 10 地下热水  $\delta^{18}\text{O}$  值与  $^{14}\text{C}$  年龄的关系  
Fig. 10 Relationship with  $\delta^{18}\text{O}$  and  $^{14}\text{C}$  Age of Geothermal Water

### 3 $^{14}\text{C}$ 年龄的分布特征及其水文地质意义

关中地区地下热水  $^{14}\text{C}$  年龄在秦岭山前及西部出现最小值, 揭示盆地南部为来水方向; 关中盆地中部  $^{14}\text{C}$  年龄多为  $2.4 \times 10^4$  a 年以上, 流速缓慢, 最大流速  $2.5 \text{ m/a}$ , 为地下水径流滞流区, 接受南、西两个方向的汇流补给(图 12)。

关中盆地中部热水  $^{14}\text{C}$  年龄普遍偏大的主要因素是埋深较深, 由图 11 可知, 咸阳—西安一带的地

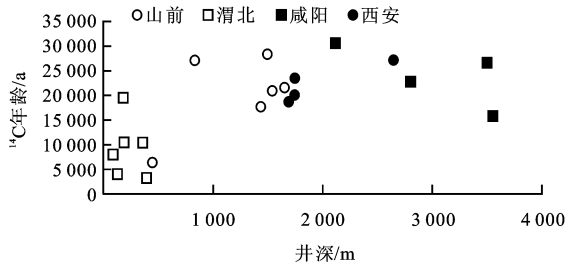


图 11 地下热水井深与  $^{14}\text{C}$  年龄关系  
Fig. 11 Relationship Between Depth and  $^{14}\text{C}$  Age of Geothermal Water

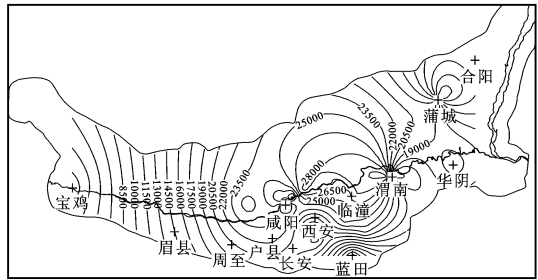


图 12 地下热水  $^{14}\text{C}$  年龄分布等值线  
Fig. 12  $^{14}\text{C}$  Age Contour Map of Geothermal Water

下水埋深较盆地周边地区深, 多为  $400 \sim 1600 \text{ m}$ , 埋深与其  $^{14}\text{C}$  年龄成正比。地下热水在西安、咸阳一带年龄偏大, 推测在此区域进行了深部循环, 地下水滞留时间长, 是水岩的强烈反应区, 滞留区内水岩反应改变了热水的同位素组成, 地热储层中碳酸盐的溶解对地热水中的  $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\delta^{13}\text{C}$  增加有明显的贡献。

### 4 $^{13}\text{C}$ 分布特征及其水文地质意义

关中盆地周边到关中盆地中部的地下热水中  $\delta^{13}\text{C}$  值逐渐增大(图 13)。

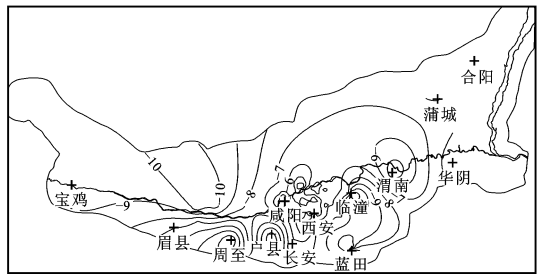


图 13 地下热水  $^{13}\text{C}$  值分布等值线  
Fig. 13  $^{13}\text{C}$  Contour Map of Geothermal Water

$^{13}\text{C}$  是跟踪地下水中碳酸盐演化的示踪剂, 地下热水  $^{13}\text{C}$  的变化取决于不同的碳来源及地下热水系统开放程度。如果溶解发生在完全开放的系统

条件下,  $\delta^{13}\text{C}$ )将基本由土壤的  $\text{CO}_2$  控制; 反之, 溶解发生在完全封闭的条件下,  $\delta^{13}\text{C}$ )则主要来自碳酸盐矿物源 DIC 的溶解, 因此  $\delta^{13}\text{C}$ )可提供地下热水的补给条件。图 13 为关中盆地地下热水中  $^{13}\text{C}$  的分布情况, 图中显示从盆地周边至盆地中部, 地下热水  $\delta^{13}\text{C}$ )值逐渐增大, 其变化值为  $-2.541\text{‰} \sim -11.976\text{‰}$ , 在西安凹陷处达到最大值。地下热水  $\delta^{13}\text{C}$ )值这一演化趋势, 可解释为  $\delta^{13}\text{C}$ )随井深增加, 封闭性加剧, 水岩反应强烈, 碳源以热液碳酸盐矿物溶解稀释为主, 盆地中部  $\delta^{13}\text{C}$ )值达  $-4.497\text{‰}$ , 接近海相碳酸盐  $\delta^{13}\text{C}$ )值与  $\text{O}^{18}$  呈现良好的相关关系(图 14~17), 揭示盆地中部地下热水中  $^{13}\text{C}$  的碳源以围岩封闭环境中热液碳酸盐矿物溶解为主。

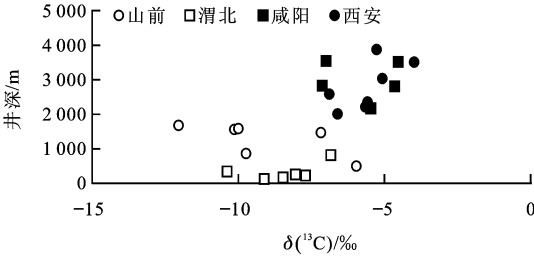


图 14 地下热水  $\delta^{13}\text{C}$ )值与井深的关系  
Fig. 14 Relationship Between  $\delta^{13}\text{C}$ ) and Depth of Geothermal Water

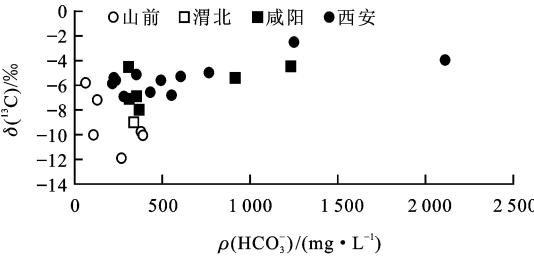


图 15 地下热水  $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 与  $\delta^{13}\text{C}$ )值关系  
Fig. 15 Relationship Between  $\rho(\text{HCO}_3^-)$  and  $\delta^{13}\text{C}$ ) of Geothermal Water

5  $^{34}\text{S}$  分布特征及其水文地质意义

根据  $^{34}\text{S}$  资料绘制关中地区地下热水  $\delta^{34}\text{S}$ )分布等值线图(图 18)。

图 18 显示关中地区地下热水  $\delta^{34}\text{S}$ )分布, 与其他环境同位素特征一样,  $\delta^{34}\text{S}$ )值仍然呈现出中部相对富集、周边盆地贫化的特征。这是由于盆地中部热水取样深度较大, 条件较为封闭。硫酸盐还原作用加强导致了  $\text{SO}_4^{2-}$  中的  $\delta^{34}\text{S}$ )富集。  $\text{SO}_4^{2-}$

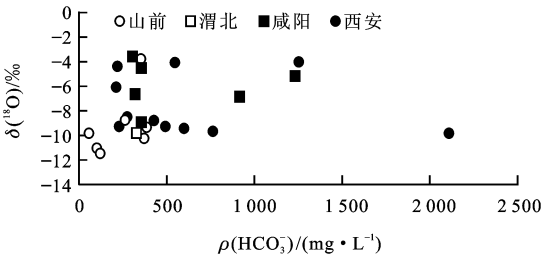


图 16 地下热水  $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 值与  $\delta^{18}\text{O}$ )的关系  
Fig. 16 Relationship Between  $\rho(\text{HCO}_3^-)$  and  $\delta^{18}\text{O}$ ) of Geothermal Water

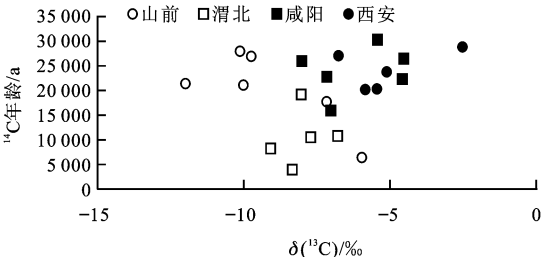


图 17 地下热水  $\delta^{13}\text{C}$ )值与  $^{14}\text{C}$  年龄值关系  
Fig. 17 Relationship Between  $\delta^{13}\text{C}$ ) and  $^{14}\text{C}$  Age of Geothermal Water

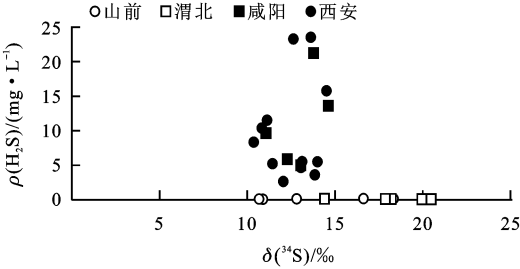


图 18 地下热水  $\delta^{34}\text{S}$ )值与  $\text{H}_2\text{S}$  的关系  
Fig. 18 Relationship Between  $\delta^{34}\text{S}$ ) and  $\text{H}_2\text{S}$  of Geothermal Water

中  $\delta^{34}\text{S}$ )富集的趋势与  $\delta^{18}\text{O}$ )富集的趋势一致(图 19)。图 20  $\delta^{34}\text{S}$ )样点中, 绝大部分含  $\text{H}_2\text{S}$  气体、 $\text{CH}_4$  及 I、Br 成分, 揭示地下热水中  $\delta^{34}\text{S}$ )的来源可能为富含有机质沉积物的封闭环境下硫酸盐的还原作用所致。

6 结语

综上所述, 关中盆地地下热水中环境同位素  $\delta^{18}\text{O}$ )、 $\delta\text{D}$ )、 $\delta^{13}\text{C}$ )、 $\delta^{14}\text{C}$ )、 $\delta^{34}\text{S}$ )的分布除  $\delta\text{D}$ )外均呈现中部富集、周边贫化趋势, 指示地表 1 500 m 以下关中盆地中部西安凹陷地区地下热水赋存环境相对封闭; 地下热水滞留时间较长(13 985 ~ 27 966 a), 以碳酸盐矿物溶解为主的水岩反应强

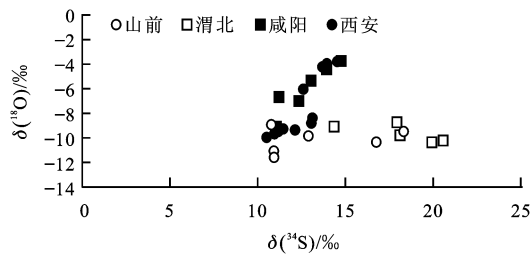


图 19 地下热水  $\delta(^{34}\text{S})$  值与  $\delta(^{18}\text{O})$  值关系  
Fig. 19 Relationship Between  $\delta(^{34}\text{S})$  and  $\delta(^{18}\text{O})$  of Geothermal Water

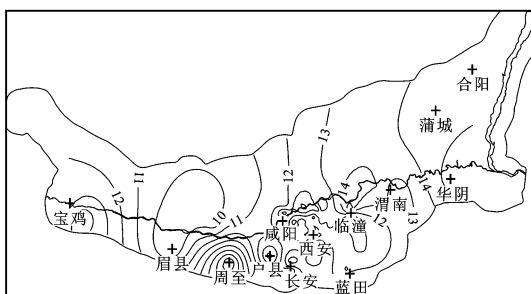


图 20 地下热水  $\delta(^{34}\text{S})$  值分布等值线  
Fig. 20  $\delta(^{34}\text{S})$  Contour Map of Geothermal Water

烈。 $\delta\text{D}$ ) 在盆地中部的贫化指示地下热水接受补给时的温度较常温水偏低。据计算, 热水接受补给时温度比常温水低  $7\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 14\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

关中盆地地下热水主要由大气降水补给, 氧同位素由秦岭山前向盆地内部逐渐富集, 随井深滞留时间成正相关, 据此判断, 盆地中部西安咸阳地热补给区分别来源于秦岭及北山。 $^{13}\text{C}$ 、 $^{14}\text{C}$  表现为氧同位素相同的变化趋势, 盆地中部  $^{14}\text{C}$  年龄为  $15\ 000\sim 30\ 000\ \text{a}$ , 表明该区域地热水的地下循环时间很长, 属于水的滞流区, 最大流速为  $2.5\ \text{m/s}$ , 是水岩强烈反应地带。滞流及北山区内水岩反应

改变了热水同位素的组成, 地热储层中碳酸盐溶解对地热水中的  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\delta(^{18}\text{O})$ 、 $\delta(^{13}\text{C})$  有明显贡献。水岩反应与地质条件封闭程度密切相关,  $^{34}\text{S}$  用来区分地热水赋存的封闭程度。

参考文献:

[ 1 ] 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.

[ 2 ] 钱 会, 马致远. 水文地球化学[ M ]. 北京: 地质出版社, 2005.

[ 3 ] Clark I D, Fritz P. Environmental Isotopes in Hydrogeology[ M ]. New York: Lewis Publishers, 1997.

[ 4 ] 马致远, 范基娇, 苏 艳, 等. 中南部地下水热水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): 41-47.

[ 5 ] 马致远, 钱 会, 苏 艳, 等. 关中盆地南部含水层之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(3): 69-75.

[ 6 ] 苏 艳, 马致远. 西安、咸阳地下水水汽过量参数研究[ J ]. 煤田地质与勘探, 2007, 35(3): 39-41.

[ 7 ] 马致远, 范基娇, 牛光亮. 关中地区地下热水的分类[ J ]. 煤田地质与勘探, 2005, 33(5): 54-57.

[ 8 ] 秦大军, 庞忠和, 翁修荣, 等. 西安地区地热水和渭北岩溶水同位素特征及相互关系[ J ]. 岩石学报, 2005, 21(5): 1489-1500.

[ 9 ] 陶书华. 西安附近地下热水的形成[ J ]. 水文地质工程地质, 1995, 45(5): 6-11.

[ 10 ] Qin D J, Pang Z H, Turner J V, et al. Isotopes of Geothermal Water in Xi'an Area and Implications on Its Relation to Karstic Groundwater in North Mountains[ J ]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(5): 1489-1500.

[ 11 ] Ma Z Y, Liu F, Su Y, et al. Isotope Constraints on Rock-Water Reaction of Geothermal Water in Guanzhong Basin, Shaanxi, China[ C ]. // Thomas D B. Proceeding of International Water-Rock Reaction 2007. London: Taylor and Francis Group, 2007: 763-766.

## 本利迁址公告

本刊编辑部已于 2008 年 10 月迁至新地址办公, 详细通讯地址如下: 西安市南二环路中段长安大学杂志社《地球科学与环境学报》编辑部  
邮政编码: 710064 电话: 029-82334941 E-mail: dkyhxb@chd.edu.cn  
《地球科学与环境学报》编辑部