

## 胶东温泉地热水水化学及同位素特征研究

张涛

(山东省地质调查院, 山东 济南 250013)

**摘要:**对胶东半岛出露的 14 处温泉的水化学特征、同位素特征进行了分析,得出胶东半岛温泉水的来源主要为大气降水补给、海水补给,年龄以现代水为主。胶东半岛温泉水与围岩矿物未达到完全平衡,不适宜用 Na, K, Mg 地热温标,玉髓的地热温标显示胶东半岛温泉热储温度在 81.26~108.93℃ 之间。对下一步胶东半岛的温泉地热勘查、开发利用具有指导意义。

**关键词:**温泉;水化学;同位素;温标;胶东半岛

**中图分类号:**P641.3

**文献标识码:**A

## 0 引言

胶东半岛地区是山东省温泉出露最密集的地区,目前已发现的自然出露温泉有 14 处,占山东省全省温泉出露的 78%。温泉地热水已在洗浴、水疗、供暖、淡水养殖、旅游业等非电利用方面得到广泛的开发利用,取得了明显的经济效益和社会效益。

随着山东半岛经济的快速发展和人民物质生活水平的提高,温泉地热水开发利用的规模日益加大,盲目扩大温泉地热水的开采所产生的问题也随之而来。该文通过对该区温泉地热水的水化学及同位素特征的分析,研究了地热水的补给来源、更新速度、热储温度等,可为胶东温泉的合理开发利用提供依据。

## 1 地热地质条件及地热资源分布特征

## 1.1 地层与构造

胶东半岛位于太平洋板块与欧亚板块边缘西北内侧,是板内相对稳定隆起的古陆块。该区太古-元古宙沉积了一套巨厚的碎屑岩-碳酸岩建造,后经变质作用和混合岩化作用形成了胶东岩群地层,岩性主要为片麻岩、变粒岩、片岩和大理岩等,分布于半岛的东部和北部。中生代期间因受印支燕山运动影响,局部地段显示盆地性质,接受了大量碎屑岩沉积,分布于半岛南部。同期岩浆活动强烈,伴有大量

积酸性岩浆侵入体和大量中基性岩浆喷出。新生代该区存在明显升降差异运动,半岛局部地区有少量第三纪玄武岩喷发。第四系不发育,以残坡积为主,冲洪积次之,另有海积层零星分布于河口及沿岸低洼地带。

胶东地区三级构造单元可划分为胶北隆起、胶莱盆地和胶南-文登隆起。比较明显的构造形迹如:褶皱构造主要有乳山-威海复背斜、栖霞复背斜、胶莱向斜等;断裂构造有招远至栖霞间密集分布的 NNE 向断裂群,牟平-即墨间 5 条 NE 向大断裂带构成的断裂群。构造线的总体走向与欧亚板块和太平洋板块的边缘的应力效应一致,该区板内构造受板缘构造活动的控制。NE 和 NNE 向断裂大部分以压性和压扭性为主,NW 和 NNW 向断裂大都以张性或张扭性为主<sup>[1]</sup>(图 1)。

## 1.2 大地热流值分布特征

据陈墨香等人在龙口黄城测定的大地热流值为 61.13 mW/m<sup>2</sup><sup>[2]</sup>,与华北大地平均热流值(61.5±13.4 mW/m<sup>2</sup>)<sup>[3]</sup>、中国大陆整体大地热流值(63 mW/m<sup>2</sup>)<sup>[4]</sup>、全球大陆平均值(65 mW/m<sup>2</sup>)相比,非常接近。

李学伦据地下水中 SiO<sub>2</sub> 含量计算了山东半岛硅热流值<sup>[5]</sup>。山东半岛硅热流值介于 49.83~85.41mW/m<sup>2</sup> 之间,平均热流值为 62.45 mW/m<sup>2</sup>。

\* 收稿日期:2011-04-23;修订日期:2011-09-20;编辑:曹丽丽

作者简介:张涛(1978—),男,山东高密人,工程师,主要从事地下水勘查、地热地质调查研究工作;E-mail:zhangtew@163.com。

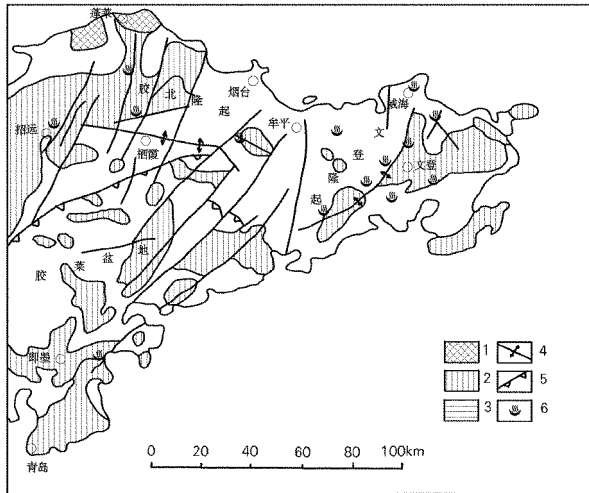


图 1 山东半岛构造单元及温泉分布图

(据栾光忠, 2002)

1—新生代喷出岩; 2—中生代喷出岩; 3—中生代侵入岩; 4—隆起带; 5—盆地边界; 6—温泉

其分布比较有规律, 具有明显的分区性。大致可以划分为 2 个较高和 1 个较低的地热异常区。在大地构造上, 两较高异常区分布对应胶北隆起和文登隆起, 较低地热异常区与胶莱盆地相对应。

### 1.3 地温场分布特征

胶东半岛地区地温梯度在温泉区外并不高, 通过多地深钻孔测温和矿山深部开采巷道的温度测量, 获得地温梯度的平均值在  $2.5\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{m}$  左右。

在温泉附近热储温度场明显受断裂构造控制, 平面等温线沿控热断裂走向呈带状或椭圆状; 平面等温线所反映出的高温部位往往就是两组断裂交会处, 即地热流体上涌通道, 由主通道向四周温度减小。

### 1.4 地热资源分布特征

胶东半岛地区是山东省天然温泉分布最密集的地区, 地表热显示明显, 共出露  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上温泉 14 处, 温度  $49\sim 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 以低温为主。其中, 属热水温泉 7 处, 温热水温泉 7 处。近年来, 围绕出露的温泉又施工了 60 多眼地热井, 主要集中在招远汤东泉、威海宝泉汤-温泉汤-洪水岚汤以及青岛即墨东温泉附近, 单井涌水量  $240\sim 1\,440\text{ m}^3/\text{d}$ 。

从温泉出露的地质构造部位看, 均出露于 2 组断裂交会处或不同岩体接触带。热储埋藏较浅, 盖层为第四系沉积层, 厚度一般小于  $50\text{ m}$ , 保温条件较差。第四系潜水含水系统与热储含水系统一般都有较强的水力联系, 热异常区盖层温度场、水化学场

一般受其下热储层形态的影响, 第四系含水系统温度场、水化学场与地热异常形态基本一致。

鲁东地热区热储岩性有花岗岩、闪长岩、辉绿岩、花岗片麻岩、云母片麻岩、砂岩、大理岩等, 均为裂隙介质热储。大气降水沿断裂、不同岩体接触带下渗至深部, 被围岩加热后沿通道上升至浅部形成温泉, 或储集在渗透性良好的岩层中形成热储。其空间形态不规则, 平面上多呈带状或椭圆状, 空间形态似不规则的蘑菇状。单个热储(或地热田)分布面积一般小于  $2\text{ km}^2$ 。

## 2 胶东温泉的水化学特征

### 2.1 矿化度及 pH 值特征

从 2008 年采集的水样分析资料来看, 胶东半岛地区各温泉矿化度差别很大, 矿化度最小的为牟平于家汤  $526.21\text{ mg/L}$ , 最大的为威海宝泉汤  $13\,416.57\text{ mg/L}$ , 矿化度小于  $1\text{ g/L}$  的有 6 处, 水质优良, 可作为矿泉水饮用; 大于  $5\text{ g/L}$  的有 3 处。泉水 pH 值  $7.0\sim 8.3$ , 平均  $7.82$ , 属中性至弱碱性水。

### 2.2 主要离子特征分析

为了更加直观地表达胶东半岛地区各温泉热水中主要离子组成, 绘制了各主要离子浓度的玫瑰花图(图 2)。由图 2 可以看出, 各温泉主要离子组成可以分为 3 种类型:

(1) 以氯、钠为主要离子组成, 包括招远汤东温泉、威海宝泉汤、温泉汤、文登汤村汤、大英汤、乳山小汤、即墨东温泉共 7 处。这几处温泉地下水类型按照舒卡列夫化学分类分别为 Na-Cl 型、Na-Ca-Cl 型、Na-Cl 型、Na-Ca-Cl 型、Na-Ca-Cl-SO<sub>4</sub> 型、Na-Ca-Cl 型、Na-Ca-Cl 型。该类型的水多是海相沉积及海相沉积有关的水, 也就是说这些温泉水可能是海水补给与大气降水溶滤混合补给的结果。为了验证上述说法, 将其与海水化学成分相比较, 发现其中部分离子比值较为接近(表 1), 说明这些温泉可能存在海水补给。

(2) 以硫酸根、钠为主要离子组成, 该区只有呼雷汤 1 处, 水化学类型为 Na-SO<sub>4</sub>-Cl 型。该类型的水多是大陆盐化作用形成的水或是温泉周边存在含硫矿物, 如石膏矿等。结合呼雷汤附近地形、地质情况分析, 且该温泉水矿化度为  $923.48\text{ mg/L}$ , 呼雷汤应该不是大陆盐化作用形成的水。

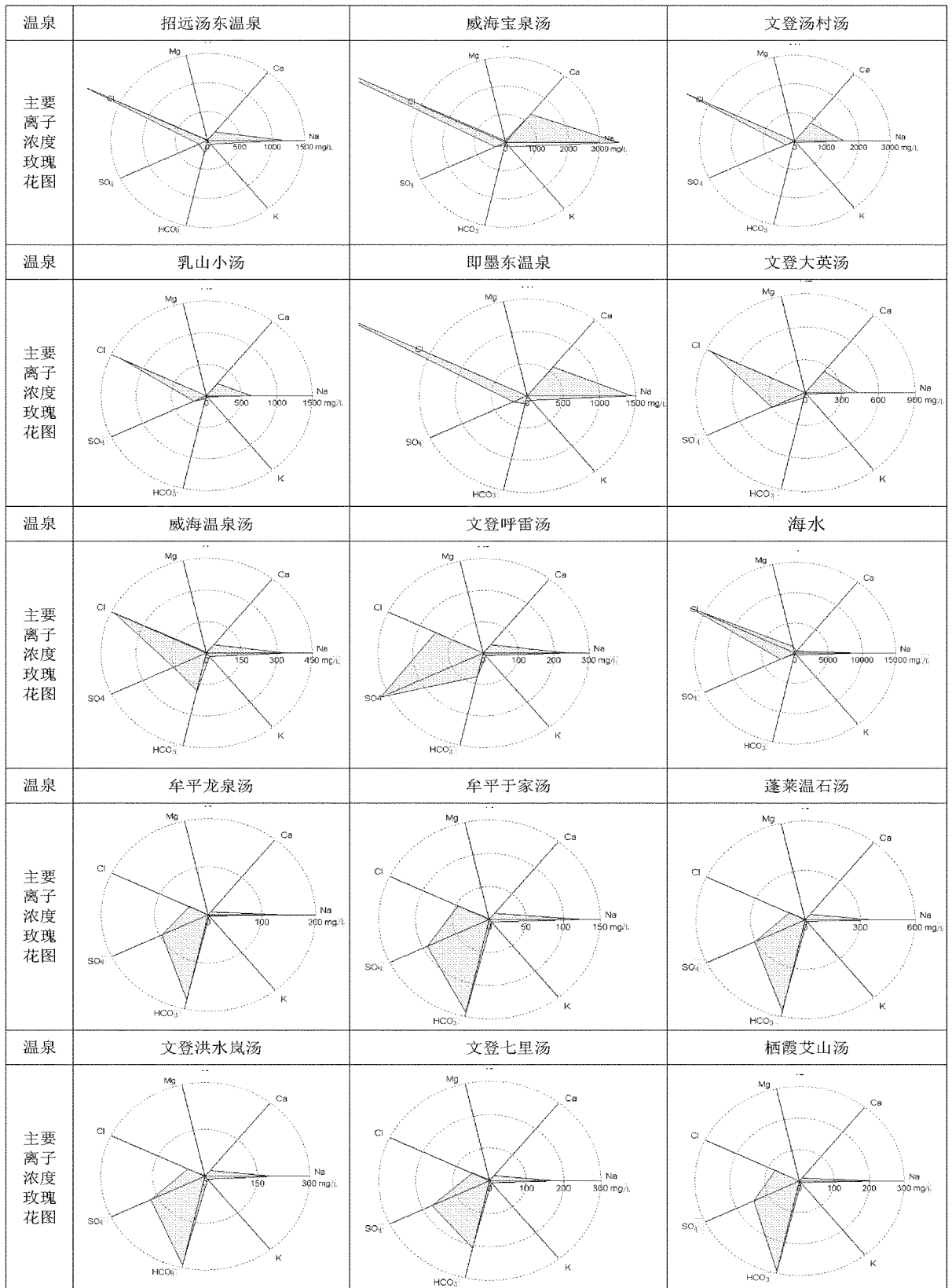


图 2 胶东半岛各温泉水主要成分玫瑰花图

表 1 胶东半岛部分温泉水成因系数

名称	成因系数		
	Cl/Br	Ca/Sr	$\gamma_{Na}/\gamma_{Cl}$
海水	297	53	0.85
宝泉汤	294.24	21.32	0.72
招远温泉	311.23	7.21	0.88
温泉汤	360.41	24.35	1.21
汤村北汤	297.46	21.95	0.63
大英汤	281.23	15.47	0.76
小汤	287.05	11.03	0.76
即墨温泉	313.66	24.73	0.74

(3)以重碳酸根、钠为主要离子组成,包括牟平龙泉汤、蓬莱温石汤、文登洪水岚汤、七里汤、牟平于家汤、栖霞艾山汤。前 4 处温泉水化学类型为  $Na-HCO_3-SO_4$  型,后 2 处温泉水化学类型为  $Na-HCO_3-SO_4-Cl$  型。考虑到钙的溶解度随温度的升高而降低,这些温泉的水化学类型应该以  $Ca-HCO_3$  型为主,即温泉水的来源应是大气降水溶滤补给。

### 2.3 微量组分特征分析

除主要离子组成与普通地下水差别较大外,胶东温泉微量组分也明显高于普通地下水,如  $SiO_2$ , Sr, F, Li 等,主要是该区热储围岩以花岗岩类为主,矿物成分中富含这些微量元素,在较高的温度下,溶滤作用增强,致使温泉水中微量组分增高。另外热水中还含有较强的 Rn, Ra 等放射性元素,这既是水深循环的特征,也是构造活动的标志。由于温泉热水中含有一定量的特殊化学组分和放射性元素,使其具有一定的医疗和保健作用。

通过这些微量组分特征,可以计算地热水的年龄。 $^{222}Rn$  是  $^{226}Ra$  直接衰变的产物,利用 Ra-Rn 法估算热水年龄是根据前苏联学者 Cherdyntsev 于 1969 年提出的公式:

$$T = -1/\lambda [\ln(1 - N_{Rn}/N_{Ra})]$$

式中:  $T$ —热水年龄(a),  $\lambda$ — $^{226}Ra$  的衰减常数( $4.26 \times 10^{-4}$ , 1/a),  $N_{Ra}$ —水中  $^{226}Ra$  含量(Bg/L),  $N_{Rn}$ —水中  $^{222}Rn$  含量(Bg/L)。

根据表 2 中有关数据,利用上式计算得威海宝泉汤热水的年龄为 11.2 a; 牟平于家汤热水年龄为 18 a; 牟平龙泉汤热水年龄为 19 a。由于威海宝泉汤热水中 Rn 含量特高,是胶东 Rn 含量最高的温泉,计算结果可能有一定偏差,但总体计算结果与分析结果相差不大,具有一定的参考意义。

根据放射性同位素测定结果结合胶东的地热类型及其水文地质条件、特征综合分析,胶东温泉热水的主要部分是现代水补给为主,形成时间应在 5~10 a 左右,少部分热水的年龄约 30~40 a。

表 2 胶东半岛温泉热水 Ra, Rn 分析结果

温泉	Ra(mBq/L)	Rn(Bq/L)	取样时间	计算温泉水年龄(a)
宝泉汤	93	297	2008 年	0.74
	747	150.9	1992 年	11.65
龙泉汤	66	52	2008 年	2.98
	50	6	1994 年	19.64
即墨温泉	180	234	2008 年	1.81
于家汤	7.9	1.0	2001 年	18.62

## 3 地下热水的同位素地球化学特征

### 3.1 氡同位素特征

收集了胶东温泉及地表水氡的部分测试数据(表 3)。其氡值变化范围在 1.5~19.41,其中宝泉汤、于家汤、招远温泉热水氡含量比较低,形成时间较早,应是 1953 年之前水与近代水的混合,地下水年龄大于 40 a。1994 年龙泉汤热水氡含量比较高,应是现代水与少量 20 世纪 60—70 年代补给的混合。根据 2007 年的测试数据分析,氡值一般在 5~15 TU,胶东温泉主要应以现代水补给为主。

表 3 胶东半岛温泉热水  $^3H$  分析结果

温泉	$^3H(TU)$	取样时间	温泉	$^3H(TU)$	取样时间
宝泉汤	1.5~4.3	1992 年	温石汤	10.76	2007 年
于家汤	3.38	2007 年	招远温泉	2.52	2007 年
龙泉汤	19.41	1994 年	即墨温泉	7.71	2007 年
	6.63	2007 年	威海海水	7.6	1992 年
艾山汤	5.2	2007 年	地下水	10.4	1992 年

### 3.2 氢氧同位素特征

2008 年对胶东温泉热水进行了氢氧同位素的取样测试,另外收集了 1992 年、2006 年、2007 年前人的测试资料,14 处温泉共计数据 60 组,其中大气降水数据 1 组、海水数据 2 组、地表水数据 14 组、地下水数据 15 组、温泉热水数据 28 组。鉴于大气降水数据量较少,参考了柳鉴容等人的研究数据<sup>[6]</sup>。将各类水样在  $\delta^2H - \delta^{18}O$  关系图上投点(图 3),由图 3 可以看出,所有的数据点都落在在中国东部地区大气降水线附近,包括温泉热水,说明该区热水主要来源于大气降水。

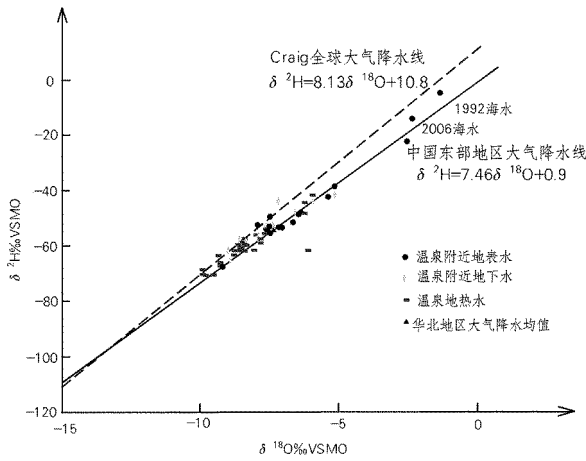


图 3 胶东半岛温泉热水  $\delta^2\text{H} - \delta^{18}\text{O}$  关系图

另外,图 3 所示数据点分布还为认识地热田类型提供了证据。一般来说,高温地热田的热水都会表现出显著的氧漂移,这在世界许多地区都有实例<sup>[7]</sup>。胶东半岛温泉热水并没有表现出显著的氧同位素单向富集(氧漂移),证明了该区地热田属于中低温类型。

### 4 热储温度的估算

在地热资源调查与开发利用项目中,热储层的温度是划分地热系统的成因类型和评价地热资源潜力不可或缺的重要参数,但在通常情况下难以直接测量。利用地热流体水化学数据的地热温标计算方法为此提供了经济有效的手段<sup>[8]</sup>。

用地热温标可以来估算热储层温度,其前提是地热流体与周围矿物达到化学平衡。Na - K - Mg 三角图是由 Giggenbach 于 1988 年提出的,图中分为完全平衡、部分平衡和未成熟水(处于岩石溶解淋滤过程中的水)3 个区域<sup>[9]</sup>。将胶东半岛温泉水投到该图上可以发现(图 4),该次研究的 14 处温泉水全部位于部分平衡和未成熟水区域,说明 Na, K, Mg 地热温标不适用于这些温泉。

王莹等人的研究发现<sup>[10]</sup>,在低温热储的估算中,玉髓与水反应大多数情况下要比石英与水反应更接近平衡。因此,该次工作选用无蒸汽损失的玉髓作为地化温标,对胶东半岛温泉热储温度分别进行计算。计算结果显示(表 4):胶东半岛温泉热储温度在 81.26~108.93 °C 之间,相差 27.67 °C。热储温度最低的是文登汤村汤,最高的是蓬莱的温石汤和文登洪水岚汤,大部分温泉的热储温度都在

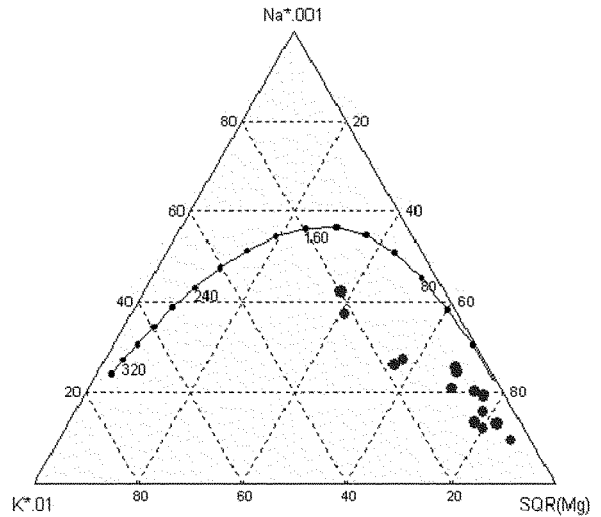


图 4 胶东温泉热水的 Na - K - Mg 三角图

100 °C 左右,一般高于出露温度 10~50 °C。

需要指出的是,计算结果未考虑冷水(大气降水、地表水、海水)混合的影响,计算结果可能偏低,即墨东温泉计算温度低于孔口温度也说明了这一问题。

表 4 胶东半岛温泉热储温度计算结果

温泉	热储温度 (°C)	孔口温度 (°C)	温度差 (°C)
招远汤东温泉	104.08	87.7	16.38
栖霞艾山汤	97.15	49.7	47.45
蓬莱温石汤	108.93	61.8	47.13
牟平于家汤	98.94	65.4	33.54
牟平龙泉汤	85.55	62	23.55
威海宝泉汤	107.34	69	38.34
威海温泉汤	105.72	52	53.72
文登洪水岚汤	108.93	72	36.93
文登七里汤	107.34	66	41.34
文登呼雷汤	98.94	66	32.94
文登汤村汤	81.26	55	26.26
文登大英汤	87.60	69	18.6
乳山小汤	87.60	65	22.6
即墨东温泉	89.60	90	-0.4

### 5 结语

胶东半岛地区是山东省天然温泉分布最密集的地区,温泉水温 49~90 °C,均出露于 2 组断裂交会处或不同岩体接触带。温泉热水来源以大气降水溶滤补给为主,部分温泉接受海水补给。热水年龄多小于 40 a,小部分温泉年龄大于 40 a。胶东半岛温泉属于中低温地热田类型,热储温度在 81.26~108.93 °C 之间。

## 参考文献:

- [1] 栾光忠,刘红军,刘冬雁,等. 山东半岛温泉的地热属性及其特征[J]. 地球学报,2002,(1):79-84.
- [2] 陈墨香,黄歌山,汪缉安,等. 渤海地温场特点的初步研究[J]. 地质科学,1984,(4):392-401.
- [3] 陈墨香,邓孝. 华北平原新生界盖层地温梯度图及其简要说明[J]. 地质科学,1990,(3):269-277.
- [4] 汪洋,汪集旸,熊亮萍,等. 中国大陆主要地质构造单元岩石圈地热特征[J]. 地球学报,2001,(1):17.
- [5] 李学伦,刘保华,孙效功,等. 山东半岛硅热流值与区域地质条件的关系[J]. 青岛海洋大学学报,1997,(1):75-83.
- [6] 柳鉴容,宋献方,袁国富,等. 中国东部季风区大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  的特征及水汽来源[J]. 科学通报,2009,54(22):3521-3531.
- [7] 庞忠和,樊志成,汪集旸. 漳州盆地地热系统的氢氧稳定同位素研究[J]. 岩石学报,1990,(4):75-82.
- [8] 汪集旸,熊亮萍,庞忠和. 中低温对流型地热系统[M]. 北京:科学出版社,1993:67-82.
- [9] 郑西来,刘鸿俊. 地热温标中的水—岩平衡状态研究[J]. 西安地质学院学报,1996,18(1):74-79.
- [10] 王莹,周训,于溪,等. 应用地热温标估算地下水热储温度[J]. 现代地质,2007,21(4):605-612.

## Study on Hydrochemistry and Isotopic Characteristics of Geothermal Water in Jiaodong Area

ZHANG Tao

(Shandong Geological Surveying Institute, Shandong Jinan 250013, China)

**Abstract:** Hydrochemical characteristics and isotope characteristics of exposed 14 spa water in Jiaodong Peninsula are analyzed in this paper. It is regarded that the source of hot spring water in Jiaodong Peninsula is mainly precipitation recharge and water supply. The forming age mainly belongs to modern water. Spring water in Jiaodong Peninsula and minerals of country rocks can not meet the full balance. It is not suitable for using Na, K and Mg geothermal temperature scale. As showed by geothermometers of chalcedony, the reservoir temperature of geothermal hot springs in Jiaodong Peninsula is 81.26~108.93 °C. It will provide references for further exploration, development and utilization of geothermal springs in Jiaodong peninsula.

**Key words:** Hot Springs; hydrochemistry; isotope; temperature scale; Jiaodong peninsula