

# 鲁西平原地热水的化学特征及开发利用

刘元斌, 孟令兴, 周亚醒

(山东省鲁南地质工程勘察院, 山东 兖州 272100)

**摘要:**鲁西平原地热水资源较丰富, 属中低温地热, 埋藏分布广, 温度适中, 开采潜力大。通过对鲁西平原地热水的水化学和冷水、海水的水化学进行对比分析, 研究地热水的形成及水化学特征, 根据地热水的水化学特征对地热水进行有针对性地开发利用。

**关键词:**地热; 水化学特征; 开发利用; 鲁西平原

中图分类号: P314.1

文献标识码: A

## 1 鲁西平原地热概况

鲁西平原位于山东省西部, 包括菏泽市全部及济宁市西部, 京杭运河以西属黄河冲积平原, 以东属汶泗河冲洪积扇。鲁西平原地热属沉积盆地地压梯度增温型地热<sup>[1]</sup>, 地热主要以热水的形式赋存于深部含水岩层中, 为热水型地热<sup>[2]</sup>。主要热储包括: 寒武+奥陶系层状裂隙-岩溶型热储和新近系砂岩类层状裂隙-孔隙型热储2种类型。寒武+奥陶系裂隙-岩溶型热储分布于鲁西平原之济宁凹陷南部, 金乡-鱼台凹陷、菏泽凸起及丰沛凸起内(分布区的深度以3000 m为底界); 新近系砂岩类层状裂隙-孔隙型热储主要分布于鲁西平原西部(巨野断裂以西地区)菏泽凸起及东明凹陷内, 尤其是菏泽凸起内具有双储双盖结构, 地热资源更为丰富(图1)。

利用开采强度计算法求得鲁西平原不同类型的地热资源量(表1)。目前区内地热开发尚处在初级阶段, 仅有零星的地热井分布, 且经营粗放, 用途单一, 利用率较低。了解地热水的水化学特征, 并根据地热水的水化学特性有针对性地对地热水进行有效合理开发利用, 提高地热利用率, 关系到地热能的开发利用前景及区域经济发展规划<sup>①</sup>。

## 2 鲁西平原地热水的化学特征

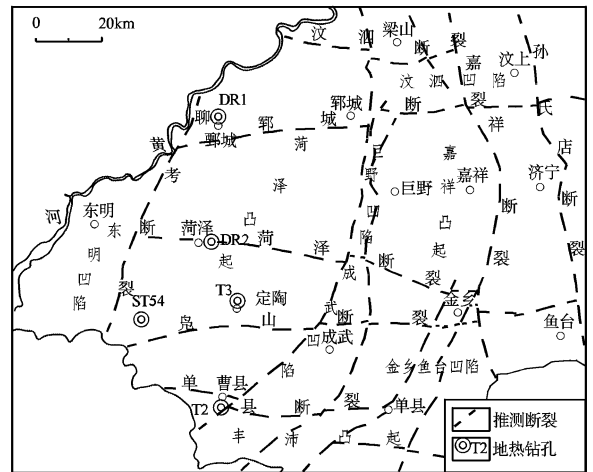


图1 鲁西平原构造纲要图

### 2.1 地热水水化学特征

从表2可以看出, 一般浅层地下水主要的阴、阳离子除重碳酸根离子、游离 $\text{CO}_2$ 大于地热水, 偏硅酸 $\text{H}_2\text{SiO}_3$ 基本相近外, 其他均远远小于地热水的含量。地热水的主要阴阳离子, 除 $\text{Na}^+$ ,  $\text{I}^-$ 含量新近系孔隙水大于寒武+奥陶系热水外, 其他组分含量均有浅层新近系热水较低, 寒武+奥陶系热水较高的特点, 特别是 $\text{SO}_4^{2-}$ 的含量。从水化学类型来看, 冷水的水化学类型比较单一, 热水的水化学类型比较复杂, 矿化度地热水远大于一般冷水<sup>[3]</sup>。

寒武+奥陶系热水与海水主要阴、阳离子, 特征

\* 收稿日期: 2009-04-25; 修订日期: 2009-08-25; 编辑: 陶卫卫

作者简介: 刘元斌(1969—), 男, 山东金乡人, 工程师, 主要从事水工环地质工作; E-mail: xingxing400732@126.com。

①孟令兴等, 山东省地热资源调查(鲁西平原), 2008年。

系数对比来看(表3),特征系数  $r_{Na/rCl}$ ,  $r_{Na/rCa}$ ,  $Cl/Br$ ,  $SO_4 \times 10^2/Cl$ ,除  $r_{Na/rCa}$  低于海洋水,其他的都高于海洋水,反映了地下热水具有大陆溶滤水的特征。通过对微量元素的比较,除  $Br^-$  远小于海水的含量外, $Sr$ , $Li$ , $I^-$ , $F^-$  含量均大于海水,表明微量元素与海水有较大的差异性。对比表明,地下热水与原始同生沉积水成分之间差距颇大,说明地下热水

已历经很大程度的淡化,已从沉积成因水演变为渗入成因水。地下热水起源于沉积水,在地质历史发展过程中,因逐渐淋滤淡化而发生变质。 $Na^+$ , $K^+$ , $Cl^-$ , $Br^-$  等即是海水成因而后期淡化的结果,而  $Ca^{2+}$ , $Mg^{2+}$ , $SO_4^{2-}$ , $Sr^{2+}$ , $F^-$ , $I^-$  则在变质过程中因水热作用含量增加。

表1 新近系寒武+奥陶系热储资源量

热 储	允许可采水资源量(m <sup>3</sup> /a)	允许利用地热资源量		百年允许可采地热水资源量(m <sup>3</sup> )	允许利用地热资源量	
		允许利用地热资源量(J)	折合煤(t)		允许利用地热资源量(J)	折合煤(t)
新近系	$3.77 \times 10^8$	$2.97 \times 10^{14}$	10 134.7	$3.77 \times 10^{10}$	$2.97 \times 10^{16}$	$1.01 \times 10^6$
寒武-奥陶系	$1.79 \times 10^9$	$1.78 \times 10^{15}$	60 731.9	$1.79 \times 10^{11}$	$1.78 \times 10^{17}$	$6.07 \times 10^6$

表2 新近系奥陶系一般地下水与地热水水质对比(mg/L)

分析项目	浅层地下水	新近系地热水	奥陶系地下水	奥陶系地热水
pH	7.30	7.75	7.60	6.92~7.40
总硬度(以CaCO <sub>3</sub> 计)	429.39	408.31	243.55	1504~1848
矿化度	789.78	3957.52	576.36	3604~4111
游离CO <sub>2</sub>	7.43	2.16	8.95	7.16~21.78
钾(K <sup>+</sup> )	0.70	7.56~7.93	1.33	5.83~42.50
钠(Na <sup>+</sup> )	37.80	843.74~1158.00	48.67	446.80~542.86
钙(Ca <sup>2+</sup> )	103.43	107.60~126.65	43.24	413~525
重碳酸(HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	526.24	159.26~191.29	370.40	159~24148
硫酸(SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	20.00	1588.66~1767.50	29.94	1739~2224
氯化物(Cl <sup>-</sup> )	43.68	261.67~845.68	18.72	315.60~499.32
锶(Sr)		5.25~9.74		6.75~10.75
碘化物(I <sup>-</sup> )		0.35~0.70		0.083~0.180
氟化物(F <sup>-</sup> )	0.40	0.84~1.08	0.15	1.30~4.75
偏硅酸(H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> )	19.50	26.95~28.60	29.90	25.19~48.10
溶解性固体		3056.99	384.26	3538~4030
水质类型	HCO <sub>3</sub> -Ca·Mg	SO <sub>4</sub> -Cl-Na	HCO <sub>3</sub> -Mg·Ca·Na	SO <sub>4</sub> -Na·CaSO <sub>4</sub> -Cl-Ca·NaSO <sub>4</sub> -Ca·Na

表3 奥陶系地热水与海水化学成分对比(mg/L)

化学成分		海水	地下热水
主要离子	Na <sup>+</sup>	10660	446.80~542.86
	K <sup>+</sup>	384	5.83~42.50
	Ca <sup>2+</sup>	420	413~525
	Mg <sup>2+</sup>	1317	81.53~137.00
	Cl <sup>-</sup>	19324	315.60~499.32
微量元素	Sr	8.00	6.75~10.75
	Li	0.17	0.42~1.06
	Br	65.00	0.49~1.40
	I	0.06	0.08~0.18
	F	1.40	1.30~4.75
特征系数	$r_{Na/rCl}$	0.85	1.63~1.67
	$r_{Na/rCa}$	25.98	0.84~1.70
	$SO_4 \times 10^2/Cl$	10.20	368.75~665.60
	$Cl/Br$	297.29	356.66~491.90

## 2.2 放射性特征

综合区内5眼地热井地热水放射性元素含量(表4),5眼地热井中曹县庄寨地热井深度最大,温度最高。放射性元素含量总体上可以表明地热水随深度增加,温度增高,其放射性元素的含量亦增大的特点。

表4 地热水放射性元素含量(Bq/L)

测试项目	定陶	南华	鄄城	曹县庄寨	曹县政府
<sup>222</sup> Rn	0.5996	5.1±0.2	2.58	1.803	
<sup>226</sup> Ra	0.0483	0.30±0.01	0.05	0.5105	0.3069
U		0.05±0.001			
Th		<0.5			
总α	0.1776	0.83±0.08	0.26	0.23	0.095
总β	0.8481	0.56±0.03	1.13	1.2026	0.229

### 2.3 同位素特征

区内奥陶系地热水同位素测试分析项目有  $\delta D$ ,  $\delta O^{18}$ , T, 该区奥陶系地热水的同位素组成特征如下:

(1)  $\delta D$  与  $\delta O^{18}$ :  $\delta D$  为  $-57.0 \times 10^{-3} \sim -69.0 \times 10^{-3}$ ,  $\delta O^{18}$  为  $-9.2 \times 10^{-3} \sim -9.6 \times 10^{-3}$ , 经研究对比  $\delta D$  和  $\delta O^{18}$  的值在克雷格标准降水直线  $\delta D = 8\delta O^{18} + 10$  附近(图2), 说明地下热水由大气降水补给形成, 属大气成因。

(2) T(T. U): 根据南华地热水氡含量  $< 0.50$ , 反映地下热水循环时间在50年以上。

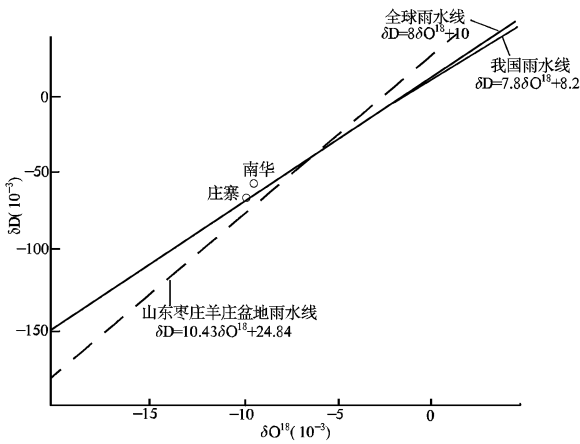


图2  $\delta D, \delta O^{18}$  值与标准雨水线对比图

### 3 地热水的腐蚀性评价

地热流体的腐蚀性是地热流体通过化学组分、温度、流速和压力等诸因素与所用材料相互作用的

复杂结果。其中, 地热流体的化学组分对金属的腐蚀有着重大的影响<sup>[4]</sup>。

#### 3.1 地热水对金属的腐蚀性评价

要确定地热水腐蚀性的评价方法, 首先要看  $Cl^-$  在地热水中所占的含量(表5)。

表5  $Cl^-$  的毫克当量百分含量

地热井	济宁	定陶	鄄城	曹县庄寨	菏泽南华
$Cl^-$ 含量 (%)	2.13	22.09	26.28	26.51	12.24

依据地热水中  $Cl^-$  的毫克当量百分数, 评价方法大致可分为2类:

(1) 拉申指数: 根据中国能源研究会地热专业委员会的理论研究成果, 当地热水中氯离子含量超过25%毫克当量百分数时, 采用拉申(Larson)腐蚀指数评价较为合理, 拉申指数表达式为:

$$LI = (Cl + SO_4^{2-}) / ALK$$

式中:  $LI$ —拉申指数;  $Cl$ —氯化物或卤化物浓度(mg/L);  $SO_4^{2-}$ —硫酸盐浓度(mg/L);  $ALK$ —总碱度(mg/L)。以上3项以等当量的  $CaCO_3$  (mg/L) 表示。

地下热水按拉申指数划分腐蚀程度:  $LI < 0.5$ , 无腐蚀性热水;  $0.5 < LI < 3.0$ , 轻微腐蚀性热水;  $3.0 < LI < 10$ , 中等腐蚀性热水;  $LI > 10$ , 强腐蚀性热水。

从表5中可以看出, 鄄城及曹县庄寨地热井的  $Cl^-$  的毫克当量百分含量超过25%, 适合拉申指数进行评价(表6)。

表6 地热水拉申指数计算评价

地热井	$Cl$ 含量(mg/L)		$SO_4^{2-}$ 含量(mg/L)		$ALK$ (mg/L)	$LI$	评价
	含量	等当量 $CaCO_3$	含量	等当量 $CaCO_3$	等当量 $CaCO_3$		
鄄城	325.0	455	2224.0	2312.96	136.0	20.35	强腐蚀性水
庄寨	499.32	703.27	1739.44	1811.92	130.80	19.23	强腐蚀性水

(2) 腐蚀系数: 由表5可知: 济宁、定陶、菏泽南华地热井中  $Cl^-$  的毫克当量百分含量均低于25%, 故不能采用拉申指数进行评价。依据《地热资源地质勘查规范》(GB/T11615-200), 可参照工业上用腐蚀系数  $K_k$  来衡量地热水的腐蚀性。具体评价方法如下:

若腐蚀系数  $K_k > 0$ , 称为腐蚀性水; 腐蚀系数  $K_k < 0$ , 并且  $K_k + 0.0503Ca^{2+} > 0$ , 称为半腐蚀性水; 腐蚀系数  $K_k < 0$ , 并且  $K_k + 0.0503Ca^{2+} < 0$ , 称为非腐

蚀性水;  $Ca^{2+}$ —离子含量(mg/L)。

腐蚀性系数的计算:

$$\text{对酸性水: } K_k = 1.008 (rH^+ + rAl^{3+} + rFe^{2+} + rMg^{2+} - rHCO_3^- - rCO_3^{2-}) \quad \text{①}$$

$$\text{对碱性水: } K_k = 1.008 (rMg^{2+} - rHCO_3^-) \quad \text{②}$$

式中  $r$  表示离子含量的每升毫克当量(毫摩尔)数。依据上述方法, 对  $Cl^-$  低于25%的地热水进行腐蚀性评价(表7)。

表7 地热水腐蚀系数计算评价(mg/L)

地热井	pH	适用公式	rH <sup>+</sup>	rAl <sup>3+</sup>	rFe <sup>2+</sup>	rMg <sup>2+</sup>	rHCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	rCO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	K <sub>k</sub>	评价
济宁	8.31	②	—	—	—	0.43	7.552	—	22.42	-7.20	非腐蚀性水
定陶	6.98	①	1.05 × 10 <sup>-10</sup>	0.004	0	10.09	3.96	0	462.00	6.20	腐蚀性水
菏泽南华	6.92	①	1.20 × 10 <sup>-10</sup>	0	0	7.96	2.79	0	445.90	5.20	腐蚀性水

综合表6,表7可知,工作区内地热水多为腐蚀性水,建议在选用建筑材料时考虑地热水对金属的腐蚀。另外,氧气溶解于水后会产生脱碳现象,使地热利用系统强度降低而损坏。因此,在利用地热水时,应尽量让包括开采井在内的整个供水系统保持密闭,以减少氧气的进入,必要时可采用化学防腐措施,如充氮等。

### 3.2 地热水对混凝土的腐蚀性评价

依据《岩土工程勘察规范》(GB50021-2001),评价地热井地热水对混凝土的腐蚀性。由表6,表7可以看出,除硫酸根对混凝土有强腐蚀性外,其他项目对混凝土无腐蚀性。因此,在工程建设中建议使用抗硫酸盐水泥。

### 3.3 硅酸盐垢

硅酸盐垢的结垢比较复杂,其垢通常含有40%~50%的二氧化硅,25%~30%的铁和铝的氧化物,以及10%~20%的氧化钠。硅酸盐垢的结垢通常采用无定形二氧化硅的相对饱和度R.S来评价,其表达式为:

$$R.S = \text{SiO}_2 / 2.466 \times 10^4 \times e^{-15.53/T}$$

式中:R.S为相对饱和度;SiO<sub>2</sub>为分子浓度(mg/L);T为绝对温度;当R.S < 1时,无SiO<sub>2</sub>垢生成;当R.S > 1时,可能有SiO<sub>2</sub>垢生成。

计算结果为工作区内热流体无硅酸盐垢生成(表8)。

表8 硅酸盐结垢评价

地热井	热储绝对温度	R.S	评价
济宁	308.15	<0.001	不结垢
定陶	331.15	0.0011	不结垢
鄆城	324.45	0.0016	不结垢
曹县庄寨	342.15	0.0015	不结垢
菏泽南华	326.45	<0.001	不结垢

## 4 鲁西平原地热水应用价值分析

(1)依据《医疗热矿泉水水质标准(GB13727-92)》规范进行评价。根据表2,区内部分地热井水氟的含量在2.56~3.50 mg/L之间,已经达到矿水命名浓度;锶的含量除济宁凹陷1.382 mg/L外,其他均在6.75~9.18 mg/L之间,已接近锶水;偏硅酸的含量,除济宁凹陷19.80 mg/L外,其他均在33.18~45.89 mg/L之间,达到矿水浓度;偏硼酸的含量在3.64~5.90 mg/L之间,达到医疗价值浓度、接近矿水浓度。其他有害元素含量低,均低于检出线。区内地热水为氟矿水,含有F<sup>-</sup>, H<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, HBO<sub>2</sub>, Li等多种对人体有益的矿物元素,具有较高的医疗价值<sup>[5]</sup>。

(2)区内地热水按《渔业水质标准》(GB5084-92)进行评价(表2)。区内地热水氟离子含量超过了渔业用水标准,一般不适宜渔业用水。若与低氟冷水混合使用,可供鱼类养育越冬、孵化及养殖罗非鱼等热带鱼种<sup>[6]</sup>。

(3)按照《农田灌溉水质标准》(GB5084-2005)的规定,按二类水进行评价(表2)。从表2中可以看出,热储区内地热水氯化物、氟化物、全盐量等成分也多数超标,而这些物质含量过高会对农作物生长产生一定负面影响,所以冷却后的水同样不适宜农业灌溉<sup>[7]</sup>。

## 5 地热水的开发利用

区内地热资源属于中低温地热,埋藏分布广,温度适中,开采潜力大,可以在以下方面开发利用。

(1)地热直接供暖。中国地热采暖已有十几年的历史。目前已成为地热利用中经济效益最好的国家之一。目前北京、天津等地利用低温地热水进行地板式采暖效果很好,水温一般控制在40℃左右。工作区内地热开发利用条件较好区和一般区,热水

温度一般在 32.9 ~ 69.1℃,完全能满足地板式供暖所需的温度。鄆城、菏泽、定陶的奥陶系热水具有一定的腐蚀性,可将地热水提出后送入换热器中,采用间接供暖方式供暖,经换热后的地热水可用于其他项目。

(2) 浴疗保健。区内地热水属于低温热矿水,富含氟、锶、偏硼酸、偏硅酸等多种矿物质,有较好的医疗、保健、养生作用。经常用热矿水进行洗浴,对高血压、冠心病、心脑血管、风湿病、皮肤病等有一定疗效。

(3) 娱乐、旅游。依托温泉浴疗,可以开发游泳馆、康乐中心、会议中心、疗养中心、温泉饭店、高级宾馆等一系列娱乐旅游项目。鄆城利用鄆城1号地热水井,开发温泉度假村项目,已取得了较好的经济效益<sup>[8]</sup>。

(4) 地热水产养殖。利用地热发展水产品养殖,以充分合理利用地热资源,打破气候、地域制约,增加水产品种养殖种类,以期建成一个有特色、有规模、有水平和有效益的地热水产品养殖基地。

(5) 地热工业利用。清洗羊毛、烘干衣物、造纸和牛奶杀菌等。在路面下铺设管道,在冬季利用地热化雪。地热水也可以用来从矿物中提取金和银,甚至是制冷和生产冰。

(6) 地热尾水加热泵技术。近几年热泵技术作为低温地热开发利用中的一种高新技术,在国外尤其在美国和欧洲的应用日益普遍,它的出现为低温地热资源的利用提供了新的方法,拓宽了人们利用地热资源的范围。例如天津市大部分的地热资源利用仅局限于供暖,地热水排放温度在 30℃ 以上,该温度的地热水无法用常规的方法加以利用,造成热

量的浪费,同时对环境造成热污染,而利用热泵技术则可以从再提取部分能量加以利用,这不仅减少了资源的浪费和地热水排放污染,同时也缓解了对地热资源的需求,从而延长了地热资源的使用时间。

## 6 结论

区内地热资源较为丰富,地热主要以地热水的形式赋存于寒武 + 奥陶系、新近系热储中。地热水主要来源于大气降水。水化学类型:新近系地热水为  $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl} - \text{Na}$ ,奥陶系地热水为  $\text{SO}_4 - \text{Na} \cdot \text{CaSO}_4\text{Cl} - \text{Ca} \cdot \text{NaSO}_4 - \text{Ca} \cdot \text{Na}$ 。矿化度在 3 604.5 ~ 4 111 mg/L 之间,pH 值在 6.92 ~ 7.75 之间。含有  $\text{F}^-$ ,  $\text{H}_2\text{SiO}_3$ ,  $\text{HBO}_2$ ,  $\text{Li}$  等多种对人体有益的矿物元素,具有较高的医疗价值,基本适宜渔业养殖,用途较广泛。地热水不适用于农业灌溉,硫酸根对混凝土有强腐蚀性,开发时需注意。

## 参考文献:

- [1] (英) H. C. H. 阿姆斯特德. 地热能[M]. 北京: 科学出版社, 1978.
- [2] (美) L. M. Edwards, 等. 地热能源手册[M]. 北京: 地质出版社, 1987.
- [3] 王福花, 侯欣英, 孙鹏, 等. 山东菏泽地区地热田地质特征, 山东国土资源, 2008, 24(4): 40-43.
- [4] GB50021-2001. 岩土工程勘察规范[S].
- [5] GB13727-92. 医疗热矿泉水水质标准[S].
- [6] GB5084-92. 渔业水质标准[S].
- [7] GB/T11615-200. 地热资源地质勘查规范[S].
- [8] 张杰, 程鑫. 烟台市地热资源勘查开发利用现状与远景规划[J]. 山东国土资源, 2009, 25(8): 14-17.

## Chemical Characteristics and Utilization of Geothermal Water in Luxi Plain

LIU Yuanbin, MENG Lingxing, ZHOU Yaxing

(Lunan Geo - engineering Exploration Institute, Shandong Yanzhou 272100, China)

**Abstract:** Geothermal resource in Luxi plain is very rich. It belongs to medium and low temperature type. It buried and distributed widely, the temperature is moderate and mining potentiality is large. Through constrast and analysis on hydrochemical characteristics of geothermal water, cold water and sea water, the forming of geothermal water and its hydrochemical characteristics are studied. According to hydrochemical characteristics of geothermal water, geothermal water is developed and used properly.

**Key words:** Geothermal; hydrochemical characteristics; exploitation and utilization; Luxi plain