



山东省聊城东部地热田水质特征及开发利用研究*

马晓东, 彭庆吉, 李济, 单伟, 王英, 王奎峰

(山东省地质科学实验研究院, 山东 济南 250013)

摘要: 山东聊城东部地热田位于阳谷凸起的北部区内, 区内常被开发利用的奥陶纪马家沟组热储层的地热流体主要为地热水, 其矿化度和温度较高, 水量较大, 属氯化物·硫酸盐-钠·钙型和中性极硬型盐水; 其锶、氟的含量达到了命名矿水浓度; 偏硼酸的含量达到了有医疗价值浓度, 有时会达到矿水浓度; 偏硅酸的含量达到了矿水浓度; 对金属具有强腐蚀性, 对普通水泥具有结晶性侵蚀, 对各类水泥无分解性侵蚀, 并含有铁、锂、锰等多种对人体有益的微量元素。可以在地热供暖、洗浴、医疗保健、种植业、养殖业、工业等行业进行广泛地开发利用。

关键词: 地热田; 地热流体; 开发利用; 山东聊城

中图分类号: P641.5

文献标识码: A

山东省聊城东部地热田范围较大, 地热资源量丰富, 热储层埋深适当, 该文主要对区内的奥陶纪马家沟组热储层中的地热流体进行分析研究评价, 并对其开发利用提出建议。

1 地热地质特征

山东聊城东部地热田位于聊城市东部的阳谷凸起的北部区内(图 1), 呈 NNE 向分布, 西至聊考大断裂^[1], 东到茌平断裂, 南至谭庄断层, 北到齐广断层, 总面积约为 600 km²。区内新近系的基岩主要为石炭-二叠系, 局部为奥陶系, 由南至北埋深逐渐增厚。出露的地层为第四系, 与地热资源有关的隐伏地层主要为奥陶系、石炭-二叠系、古近系、新近系。

1.1 盖层

区内选用的地热热储盖层为第四系、新近纪明化镇组及石炭-二叠系。第四系主要由粘土质粉砂和粉砂质粘土组成; 新近纪明化镇组主要由粉砂岩、粘土岩互层构成; 石炭-二叠系主要由灰岩、页岩及泥岩组成。盖层的粘土或粘土岩的单层厚度较大, 一般为 2 ~ 50 m, 孔隙度较小, 热导率较低, 能够使热能和水量得以储集, 是良好的盖层。该区第四系、新近纪明化镇组及石炭-二叠系的地层总厚度为

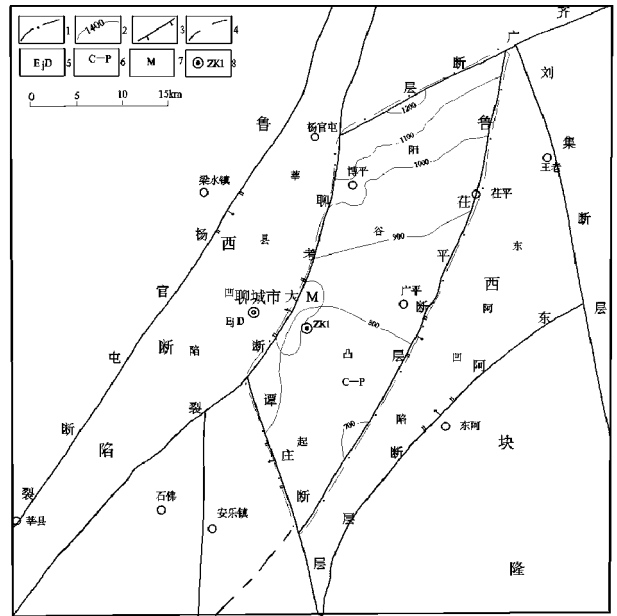


图 1 聊城市东部地热田前新近纪基岩地质图
1—地热田边界线; 2—新近系底界等深线(m); 3—断层; 4—推测断层; 5—古近纪东营组; 6—石炭-二叠系; 7—奥陶系; 8—钻井位置及编号

900 ~ 1 300 m。

1.2 热储层

该区常被选择开采利用的热储层主要为奥陶纪马家沟组的地层^[2]。该热储层顶板埋深 900 ~ 1300m,

* 收稿日期: 2010-11-25; 修订日期: 2011-01-08; 编辑: 陶卫卫

作者简介: 马晓东(1972—), 男, 山东苍山人, 高级工程师, 主要从事岩矿鉴定与地质矿产勘查工作; E-mail: smxd2007@QQ.com。

底板埋深1 700~2 100 m,厚度800~1 000 m,其裂隙岩溶率为8%~16%,岩性以厚层状白云岩及灰岩为主,其上部的岩溶裂隙率较高^[3],储水丰富。水温60~80℃,单井出水量1 200~3 000 m³/d(降深20 m/h)。

2 地热流体特征

2.1 化学成分

该区奥陶纪马家沟组热储层的地热流体主要为地下热水,从表1中可以看出地热水中主要阳离子为Na⁺和Ca²⁺,其含量分别为834.7~862.56 mg/L和701.1~717.96 mg/L,阴离子主要为Cl⁻和SO₄²⁻,其含量分别为1 646.67~1 657.4 mg/L和1 605.70~1 680.2 mg/L,属氯化物·硫酸盐-钠·钙(Cl·SO₄-Na·Ca)型水。其矿化度平均为5 272.04 mg/L,总碱度平均为137.87 mg/L;pH值平均为6.88;总硬度平均(以CaCO₃计)为2 380.64 mg/L,属中性极硬咸水^[4-6]。

表1 聊城东部地热田地热水有关成分含量

成分		分析结果(mg/L)		平均值	
		1	2	mg/L	mmol/L
阴离子	Cl ⁻	1657.4	1646.67	1652.04	46.599
	SO ₄ ²⁻	1680.2	1605.70	1642.95	34.21
	HCO ₃ ⁻	160.4	175.79	168.10	2.756
	F ⁻	3.9	3.28	3.59	0.192
阳离子	Na ⁺	834.7	862.56	848.63	36.915
	Ca ²⁺	701.1	717.96	709.53	35.404
	K ⁺	57.68	69.48	63.58	1.629
	Mg ²⁺	154.0	141.70	147.85	12.17
H ₂ SiO ₃		41.57	33.78	37.68	
游离CO ₂		41.38	19.29	30.34	
总碱度		131.56	144.18	137.87	
矿化度		5292.7	5251.38	5272.04	
总硬度		2384.8	2376.47	2380.64	
pH值		6.8	6.95	6.88	

注:1.地质矿产部水文地质专业实验测试中心;2.地质矿产部山东省中心实验室。

2.2 允许开采量

根据区内地热井ZK₁,抽水试验成果(表2),经计算区内开发利用奥陶纪马家沟组热储层的地热井允许开采量为46.94 m³/h(降深20 m),井口水温62℃。故区内地热水具有温度高,允许开采量大的优势。

表2 聊城东部地热田抽水试验结果

降深	1	2	3	
静水位埋深(m)	13.00 (高出地面)	13.00 (高出地面)	13.00 (高出地面)	
动水位埋深(m)	0	38	41.58	
水位降深(m)	12.5	51.00	54.58	
出水量	m ³ /h	32.52	119.69	127.87
	m ³ /d	780.48	2872.63	3068.88
单位出水量(m ³ /h·m)	2.50	2.35	2.34	
井口出水温度(℃)	62	62	62	
抽水试验延续时间	48	48	72	
稳定时间(h)	39	36	44	
水量跳动误差(%)	0	0.5	0	
水位跳动误差(%)	0	0.1	0.02	
试验日期(2003年)	1.20~1.22	1.22~1.23	1.23~1.25	

3 地热流体评价

3.1 医疗热矿水评价

依据《地热资源地质勘查规范》(GB11615-89)附录C《医疗热矿水水质评价标准》。经化验测试,该区地热水锶和氟的含量已超过命名矿水浓度;偏硼酸的含量已超过有医疗价值浓度,有时会超过矿水浓度;偏硅酸的含量超过了矿水浓度(表3)。

表3 聊城东部地热田地热水矿水特征

元素名称	含量(mg/L)	有医疗价值浓度	矿水浓度	命名矿水浓度
锶	15.14~16.60	10	10	10
氟	3.28~3.9	1.0	2	2
偏硅酸	33.78~41.57	25	25	50
偏硼酸	4.40~8.0	1.2	5	50

另外区内地热水含有铁、锰、锂等有益微量元素和放射性元素(²²⁶Ra 170.5~335 mBq/L,²²²Rn 816~4 700 mBq/L,总α 845~734.6 mBq/L,总β 2 270~2 448.7 mBq/L),具有较高的医疗保健价值。

3.2 生活饮用水评价

该区地热水物理感观性状良好,口感略有咸味。根据《饮用天然矿泉水水质标准》(GB8537-1995),该区地热水色度符合感官要求,碘化物含量不超标,浑浊度与锶含量超标(表4)。

表4 饮用天然矿泉水水质标准及评价

项目要求或指标	分析结果	评价
色度,度≤15,并不得呈现其他异色	<5	不超标
碘化物,mg/L<0.50	<0.05~0.09	不超标
浑浊度,NTU≤5	<2~6.0	超标
锶,mg/L<5.0	15.14~16.60	超标

根据《生活饮用水卫生规范》(卫法监发[2001]161号),该区地热水在浑浊度、硫酸盐、氯化物、氟化物、溶解性固体均超标(表5)。

表 5 生活饮用水水质标准及评价

项目	标准	分析结果	评价
色度(度) <15,并不得呈现其他异色		<5	不超标
浑浊度(度)不超过3(特殊情况不超过5)		<2~6.0	超标
铁(mg/L)	0.3	0.046~0.3	不超标
锰(mg/L)	0.1	<0.01~0.037	不超标
硫酸盐(mg/L)	250	1605.7~1680.2	超标
氯化物(mg/L)	250	1646.67~1657.4	超标
氟化物(mg/L)	1.0	3.28~3.9	超标
溶解性固体(mg/L)	1000	5251.38~5292.7	超标

综上,该区地热水不能作为天然饮用矿泉水及生活饮用水源。

3.3 农业灌溉用水与渔业用水评价

依据《农田灌溉水质标准》(GB5084-92),该区地热水水温、矿化度和氯化物等均超标,因此不宜直接作为农业灌溉用水。根据《渔业用水水质标准》(GB11607-89),区内地热水中铜及氟化物含量超标(表7),故不能直接用作渔业用水。

3.4 地热水的腐蚀性评价及解决方案

3.4.1 金属的腐蚀性

依据有关地热流体腐蚀性的研究,当地热流体中的氯离子的含量超过 25% 时,应选择用拉申腐蚀指数进行分析评价。拉申腐蚀指数计算公式为:

$$LI = (Cl + SO_4) / ALK$$

式中:LI—拉申腐蚀指数;Cl—氯化物或卤化物浓度(mg/L);SO₄—硫酸盐浓度(mg/L);ALK—总碱度(mg/L);Cl⁻和 SO₄²⁻以 CaCO₃(mg/L)表示(表6)。

表 6 聊城东部地热田拉申腐蚀指数分析评价

评价标准		LI ≥ 10		具有强腐蚀性		
Cl ⁻ (mg/L)	CaCO ₃ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	CaCO ₃ (mg/L)	ALK	LI	评价
1652.04	2332.00	1642.95	1711.76	137.87	29.33	强腐蚀性

该区地热水的拉申腐蚀指数 LI 为 29.33 (>10),对金属具有强腐蚀性。特别是对低合金钢及碳钢等材料的设备和管件的腐蚀性强烈。解决办法是采用金属粉末喷涂、镀锌管、环氧煤沥青涂层等新技术、新方法、新材料。

3.4.2 混凝土的侵蚀性

地热流体对混凝土的侵蚀主要有分解性侵蚀和

结晶性侵蚀 2 类。

(1)分解性侵蚀:主要与地热水的化学成分和水泥类型有关。其总指标为 pH_s,即分解性侵蚀指数,以下式计算:

$$pH_s = [\gamma HCO_3^- / (0.15\gamma HCO_3^- - 0.025)] - K_1$$

式中:γHCO₃⁻—水中 HCO₃⁻ 的含量(毫摩尔/升);K₁—按“水对混凝土的侵蚀性鉴定标准”查取的数值。当 pH < pH_s 时,地热水对混凝土具有分解性侵蚀。当 pH ≥ pH_s 时,地热水对混凝土无分解性侵蚀;pH 为地热水的氢离子浓度实际测定值。

分解性侵蚀作用又分为碳酸性侵蚀与酸性侵蚀 2 种。酸性侵蚀的侵蚀指标为 pH 值。碳酸性侵蚀的侵蚀指标为游离 CO₂。当水中游离 CO₂ 含量(mg/L)大于公式:a[Ca²⁺] + b + K₂ 的数值时,则有碳酸性侵蚀。式中:[Ca²⁺]—水中 Ca 离子的含量(mg/L);a,b—依据 γHCO₃⁻ 和 Cl⁻ + SO₄²⁻ 的总量查水文地质手册,得 a = 0.05 ~ 0.07, b = 18;K₂—按“水对混凝土的侵蚀性鉴定标准”查取的数值。

(2)结晶性侵蚀:侵蚀指标为 SO₄²⁻,并且与 Cl⁻ 有关(仅对非抗硫酸盐型的水泥而言)。

经计算,区内地热水对各类水泥无分解性侵蚀;对普通水泥有结晶性侵蚀,但对抗硫酸盐水泥无结晶性侵蚀。解决办法是使用适当的混凝土添加剂或抗硫酸盐型的水泥。

3.4.3 结垢

结垢也是在地热水开发利用中普遍存在的问题,解决好这个问题是正确建立适宜的运行系统,经济合理地利用地热资源的前提。

(1)碳酸钙垢:当地热水中 Cl⁻ 大于 25%,适用拉申腐蚀性指数进行分析判断,区内地热水的拉申腐蚀性指数 LI = 29.33 > 0.5 (拉申腐蚀指数),故不易生成碳酸钙垢。

(2)硫酸钙垢:依据地热水硫酸钙的生成趋势进行定性估算,选用 R.S 相对饱和度,其计算公式为:

$$R.S = 10^{(\log ppm Ca^{2+} + \log ppm SO_4^{2-} - \log K)}$$

其中:K 是与温度和水中总固形物含量有关的常数。温度 T = 62℃,矿化度为 5 272.04 mg/L,总固形物 [TDS] = 矿化度 - [HCO₃⁻]/2 = 5 163.485 mg/L(在相关书上查出 log K = 5.88 值)。当 R.S < 1 时,无硫酸钙垢生成;当 R.S > 1 时,可生成硫酸钙垢。地热水 [Ca²⁺] = 709.53 mg/L, [SO₄²⁻] = 1 642.95 mg/L;

经计算,地热水 $R.S$ 为 1.54 大于 1 (相对饱和度 $R.S$), 区内地热水会有硫酸钙垢的生成。

(3) 硅酸盐垢: 采用相对饱和度 $R.S$ 进行判断, 计算公式为:

$$R.S = \text{SiO}_2 (\text{mg/L}) / (2.466 \times 10^4 \times e^{-1553/T})$$

其中: T 为地热水的绝对温度; 当 $R.S < 1$ 时, 无硅酸盐垢生成; 当 $R.S > 1$ 时, 可生成硅酸盐垢。该区地热水 $[\text{SiO}_2] = 28.988 \text{ mg/L}$, $T = (52 + 273.15) \text{ K} = 325.15 \text{ K}$; 经计算, 地热水 $R.S$ 为 $0.12 < 1$, 不能生成硅酸盐垢。

故区内地热水对于防垢有利, 可减少由于除垢和防垢带来的成本增加, 由于会有硫酸钙垢的生成, 开发利用时应选好除垢和防垢的方法措施, 如采用酸洗法或采用玻璃管、耐酸碱热性塑管等抗垢性的管材。

3.5 地热水的排放

该区地热水中的 H_2S 和 CO_2 的含量很小, 依据《污水综合排放标准》(GB8978-1996), 其有害成分(表7)及放射性物质成分(总 α 为 $0.7346 \sim 0.845 \text{ Bq/L}$ 、总 β 为 $2.27 \sim 2.4487 \text{ Bq/L}$) 的含量均小于“最高允许排放浓度”, 故弃水的排放不会对环境产生不良的影响。

表7 聊城东部地热田地热水有害成分排放评价

污染物		最高允许排放浓度 (mg/L)	地热水分析含量 (mg/L)	评价
第一类污染物	总镉	0.1	$< 0.001 \sim < 0.005$	不超标
	总铬	1.5	$< 0.004 \sim < 0.01$	不超标
	总砷	0.5	< 0.01	不超标
	总镍	1.0	$< 0.005 \sim < 0.03$	不超标
	总铅	1.0	$0.003 \sim < 0.01$	不超标
	总汞	0.05	< 0.0001	不超标
第二类污染物一级标准	pH	6~9	6.8~6.95	不超标
	色度	50	< 5	不超标
	化学需氧量 COD	100	1.22~2.35	不超标
	挥发性酚	0.5	< 0.0015	不超标
	氟化物	10	3.28~3.9	不超标
	氰化物	0.5	< 0.001	不超标
	磷酸盐 (以 P 计)	0.5	$< 0.02 \sim < 0.04$	不超标
	铜	0.5	$< 0.02 \sim < 0.05$	不超标
	锌	2.0	$< 0.01 \sim < 0.05$	不超标
	锰	2.0	$< 0.01 < 0.037$	不超标

该区地热水的井口温度可达 62°C , 经系统循环

利用后, 弃水的温度约为 15°C , 当被直接排放进入地下管道与其他污水混合后, 温度也会下降, 故其余热不会对环境产生污染, 最理想的方案是作为回灌水利用。

4 结语

依据该区奥陶纪马家沟组热储层地热水的水质特征, 可以被广泛应用于地热水的洗浴、供暖、医疗保健、养殖业、种植业、工业等行业^[7-9], 是当地一项重要的矿产资源。该区地热井具有水温较高、出水量大等特点, 可直接对住宅楼及大的公共场所进行地板辐射供暖。地热水中又富含一些有益的化学元素或矿物质, 且温度较高, 可直接用于洗浴与医疗保健等方面。从地热水的水温、水量、化学成分等指标综合考虑, 区内地热水在工业上的用途十分广泛, 可应用于烘干、纺织、制革、印染、造纸等行业。地热水虽不能在渔业上直接应用。但可用于制作全自动的热孵化箱来孵化鸡、鸭、孔雀、鹌鹑等, 也可对其处理后再进行甲鱼、鳗鱼、罗非鱼、鲤鱼、福寿螺、对虾、沼虾、牛蛙、珍珠等水产类养殖。地热水虽不宜直接作为农业灌溉用水, 但可利用区内地热水加温土壤的办法进行温室栽培、科学育种实验等农林业的种植项目。

参考文献:

- [1] 马晓东, 周长祥, 王强, 等. 聊城东部地热田地质特征研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2008, (4): 16-20.
- [2] 马晓东, 陆茉莉, 周长祥, 等. 山东聊城西部地热田地热地质特征[J]. 山东国土资源, 2007, 23(6-7): 24-28.
- [3] 沈照理. 水文地质学[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 723-803.
- [4] 栾光忠. 胶东温泉地热水及温度与其他要素的相关性分析[J]. 青岛海洋大学学报, 1993(增刊): 14-19.
- [5] 栾光忠, 刘激. 胶东半岛温泉的地热属性与可持续发展对策[J]. 长安学报, 2003, 25(3): 71-75.
- [6] 马振民, 何江涛, 张锡明. 菏泽凸起地下水热水的水文地球化学特征及成因分析[J]. 山东地质, 2000, 16(2): 24-30.
- [7] 佟伟. 西藏地热[M]. 北京: 科学出版社, 1981: 168-171.
- [8] 佟伟, 章铭陶. 腾冲地热[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 260-262.
- [9] 申建梅, 陈宗宇, 张古杉. 地热开发利用过程中的环境效应与环境保护[J]. 地球学报, 1998, 19(4): 402.

Study on Characteristics of Water Quality of Geothermal Field and Its Development and Utilization in Eastern Liaocheng City of Shandong Province

MA Xiaodong, PENG Qingji, LI Ji, SHAN Wei, WANG Ying, WANG Kuifeng
(Shandong Institute and Laboratory of Geological Sciences, Shandong Jinan 250013, China)

Abstract: Geothermal field in eastern Liaocheng city of Shandong province located in the northern region of Yanggu uplift. Geothermal fluid in Ordovician Majiagou hot geothermal reservoir is mainly composed of geothermal water. Its salinity and temperature are high with larger amount of water. It belongs to chloride sulphate – sodium and calcium salt and medium extremely hard type water. Its concentration of strontium and fluoride reached a named mineral water; the content of borate reached a concentration of medical value, sometimes can reach the concentration of mineral water; silicic acid content reached a concentration of mineral water, which has strong corrosion to metals, has a crystalline erosion to general cement, non – degradable erosion to all kinds of cements, and contains many trace elements which are beneficial to humans, such as iron, lithium and manganese. It can be used in geothermal heating, bathing, medical care, farming, aquaculture, industry and other industries.

Key words: Geothermal field; geothermal fluid; development and utilization; Liaocheng city in Shandong province