

## 西宁盆地地热水特征及回灌结垢风险

赵 振, 秦光雄, 罗银飞, 晁嘉豪, 耿松鹤, 张 亮

### Characteristics of geothermal water in the Xining Basin and risk of reinjection scaling

ZHAO Zhen, QIN Guangxiong, LUO Yinfei, CHAO Jiahao, GENG Songhe, and ZHANG Liang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202103058>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 地下水环境中的硫代砷研究进展

Advances in thioarsenic in groundwater systems

严克涛, 郭清海 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 132-141

#### 松嫩盆地北部林甸地热田供暖尾水处理试验

An experimental study of heating tail water treatment of the Lindian geothermal fields in the Northern Songnen Basin

李永利, 于长生, 姜智超, 商洁, 张丽华 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 188-194

#### 沉积型和火山型地热流体的同位素水文地球化学对比研究

A comparative study of isotopic hydrogeochemistry of geothermal fluids of sedimentary basin type and volcanic type

马致远, 李嘉祺, 翟美静, 吴敏, 许勇 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 9-18

#### 四川巴塘地热田水文地球化学特征及成因

Hydrogeochemical characteristics and genesis of the geothermal fields in Batang of Sichuan

赵佳怡, 张薇, 张汉雄, 屈泽伟, 李曼, 岳高凡 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 81-89

#### 贵州洪家渡盆地泉水水化学和碳同位素特征及成因

Characteristics and controls of the hydrochemistry and carbon isotope of the spring water in the Hongjiadu Basin of Guizhou

任坤, 潘晓东, 焦友军, 黄宇, 曾洁, 彭聪, 梁嘉鹏 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 9-9

#### 基于滑坡分类的西宁市滑坡易发性评价

Landslide susceptibility assessment in Xining based on landslide classification

孙长明, 马润勇, 尚合欣, 谢文波, 李焱, 刘义, 王彪, 王思源 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 173-181



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202103058

## 西宁盆地地热水特征及回灌结垢风险

赵 振<sup>1,2</sup>, 秦光雄<sup>1,2</sup>, 罗银飞<sup>1,2</sup>, 晁嘉豪<sup>3,4</sup>, 耿松鹤<sup>3,4</sup>, 张 亮<sup>3,4</sup>

(1. 青海省环境地质勘查局, 青海 西宁 810001; 2. 青海省环境地质重点实验室, 青海 西宁 810001; 3. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 青岛 266580; 4. 非常规油气开发教育部重点实验室, 山东 青岛 266580)

**摘要:** 青海西宁盆地中低温地热资源丰富, 但热储地层以含黏土矿物的弱胶结砂岩为主, 地热水溶解性总固体较高, 回灌过程中存在显著的结垢风险。基于对西宁盆地地热成因及资源分布特征分析, 采用矿物溶解度法、饱和指数法等方法对典型地热水回灌结垢趋势及风险进行了综合判断。结果表明: 西宁盆地“凹中凸”构造有利于地热水在深部热储富集和增温, 同时将深部溶解的大量矿物质带到西宁地区中央凸起地带; 西宁地区地热储层埋深主要在 700~1600 m, 水温 30~70 °C, 主要为 SO<sub>4</sub>-Cl-Na 水化学类型, 溶解性总固体 1.85×10<sup>3</sup>~4.80×10<sup>4</sup> mg/L; 回灌过程中结垢以碳酸钙结垢为主, 当回灌水与地下热水性质相近时, 结垢风险主要发生在回灌井筒中, 地层结垢风险较小, 而当回灌水与地下热水性质差异较大时, 不配伍性将导致地层结垢风险大大提高, 其中药王泉与 DR2005 原 1:1 混合时结垢量最大可达 177.57 mg/L, 而其他地热水结垢量较小。根据以上特征, 提出以下综合解决方案: 物理防垢+管材防腐、系统增压防垢+管材防腐和地面预处理+管材防腐, 并辅之以阴极保护防腐、优化排量、酸洗井筒等措施, 可为今后保障地热水回灌能力措施的制定提供理论依据与技术支持。

**关键词:** 西宁盆地; 地热水; 回灌; 结垢风险; 防垢

中图分类号: P314

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)05-0193-12

## Characteristics of geothermal water in the Xining Basin and risk of reinjection scaling

ZHAO Zhen<sup>1,2</sup>, QIN Guangxiong<sup>1,2</sup>, LUO Yinfei<sup>1,2</sup>, CHAO Jiahao<sup>3,4</sup>, GENG Songhe<sup>3,4</sup>, ZHANG Liang<sup>3,4</sup>

(1. Qinghai Provincial Bureau of Environmental Geology, Xining, Qinghai 810001, China; 2. Qinghai Provincial Key Laboratory of Environmental Geology, Xining, Qinghai 810001, China; 3. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China; 4. Key Laboratory of Unconventional Oil and Gas Development, Ministry of Education, Qingdao, Shandong 266580, China)

**Abstract:** The Xining Basin in Qinghai Province is rich in geothermal resources of low to medium temperature, but the geothermal reservoir is dominated by weakly consolidated sandstone containing clay minerals, and the geothermal water has high salinity, which causes a significant risk of scaling during reinjection. In this paper, based on the analysis of the geothermal genesis and resource distribution characteristics in the Xining Basin, different methods, such as the mineral solubility method and saturation index method, are used to assess the scaling tendency and risk in typical geothermal water during reinjection. The results show that the “convex in concave” structure of the Xining Basin is beneficial for the enrichment and warming of thermal groundwater in the deep geothermal reservoir, and at the same time, a large number of dissolved minerals are brought to the central

收稿日期: 2021-03-16; 修订日期: 2021-05-21

基金项目: 青海省应用基础研究计划项目(2020-ZJ-758); 2018年度青海省清洁能源矿产专项资金勘查项目(20181317146sh 007)

第一作者: 赵振(1982-), 男, 高级工程师, 主要从事水文地质、环境地质、地热地质调查评价等工作。E-mail: zhaozhen906@126.com

通讯作者: 罗银飞(1976-), 男, 高级工程师, 主要从事水文地质、地热地质调查评价等工作。E-mail: 478967346@qq.com

bulge in the Xining Basin. The geothermal reservoir in the Xining Basin is mainly buried at a depth of 700–1 600 m with water temperature of 30–70 °C. The hydrochemical type is mainly of  $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}-\text{Na}$  type, and the salinity range from  $1.85\times 10^3$  to  $4.80\times 10^4$  mg/L. The main scaling product during reinjection is  $\text{CaCO}_3$ . When the characteristics of reinjection water and geothermal water are similar, the risk of scaling mainly occurs in the reinjection wellbore, and the risk of formation scaling is relatively small. When the characteristics of reinjection water and geothermal water are quite different, the incompatibility will greatly increase the risk of formation scaling. Among them, when the water from Yaowangquan is mixed with that from DR2005Y by 1 : 1, the maximum scaling amount can reach 177.57 mg/L, while the scaling amount from other geothermal water is smaller. Based on the above characteristics, three sets of comprehensive measures are proposed as the follows: physical anti-scaling + pipe anti-corrosion, system pressurization anti-scaling + pipe anti-corrosion and ground pretreatment + pipe anti-corrosion, supplemented by measures such as cathodic protection anticorrosion, optimized displacement, and pickling the wellbore. The results of this study can provide theoretical basis and technical support for the formulation of measures to ensure the reinjection capacity of geothermal water in the future.

**Keywords:** Xining Basin; geothermal water; reinjection; scaling risk; anti-scale

地下热水资源是一种清洁能源,在一定程度上是可再生资源,因此具有较高的开发利用价值<sup>[1]</sup>。我国地热资源丰富,地热资源种类较多,分布较为广泛<sup>[2]</sup>。相比于其他常规能源,地热水资源热量更高、节能减排和绿色低碳效应更加显著<sup>[3]</sup>。当持续开采或开采强度逐渐增大时,会出现补给能力小于开采强度,发生热储压力下降等不良地质环境问题,需要进行地热水回灌<sup>[4-9]</sup>。国内外案例表明,地热水开采及回灌过程中,常由于井筒温压变化等原因造成井口设备、井筒及地层中产生碳酸盐或硫酸盐沉淀、结垢<sup>[10]</sup>,井壁水垢脱落后如果落入井底,可能会对井筒形成堵塞;如果落在变径口上,可能会将井筒堵死,这些都会导致回灌的衰减和堵塞<sup>[11]</sup>。另外,回灌水与地下热水不配伍也是储层回灌堵塞的主要影响因素<sup>[12]</sup>。结垢问题已严重制约了地热开发效率<sup>[13]</sup>,而且还会对管材在地热水介质中的局部腐蚀行为产生显著影响<sup>[14]</sup>,严重时甚至导致停产停注<sup>[15]</sup>。

西宁盆地具有丰富的中低温地热资源。与东部天津、山东等地地热资源对比<sup>[16-17]</sup>,西宁盆地地热水含有大量硫酸根和碳酸根等腐蚀性离子、钙和镁等结垢离子以及氯化物、硫化物等环境污染成分,地热储层具有溶解性总固体高、水头高、渗透率低等特点,地热水回灌带来极大挑战,导致目前的开发方式还处于粗放状态,极大限制了西宁盆地中低温地热能的高效开发。

因此,针对西宁盆地的中低温地热资源开发,本文在广泛调研西宁盆地高溶解性总固体地热水的基

础上,分析了回灌过程中可能发生的井筒和储层结垢风险,提出了对应的除防垢建议,以期探索出适合于西宁盆地中低温地热资源的可持续高效开发利用方式。

## 1 西宁盆地地热水分布特征

### 1.1 西宁盆地地热成因

西宁盆地呈“凹中凸”构造,中央为西宁凸起,北为双树坳陷,南为总寨坳陷,两侧坳陷内广泛分布沉积断陷型中低温地下热水,由地壳内部获得热量,有较厚的保温隔热盖层,深循环加热后的地下热水常常沿构造通道富集,形成隐伏热异常。盆地坳陷区断裂构造发育为封闭或半封闭的对流体系,有利于地热异常的产生,而“凹中凸”构造的地热增温率则明显提高,同时其旁侧有利于地下热水富集<sup>[18]</sup>。基于此,西宁盆地形成了大地热流为热源、低热导率岩层聚热、深循环逐渐加热及对流机制控水控热的热储概念模型,如图 1、图 2 所示。

### 1.2 西宁地区地热水分布特征

研究区地热资源开发较早,地热储层位于西宁盆地中央凸起附近,埋深在 700~1 600 m,水温在 30~70 °C,分布不均匀且含水层情况复杂,其地下热水来源于大气降水补给,在沿大断裂深循环过程中从深部热储获得热量,又从流经的侏罗系—新近系等地层中溶滤出盐分。不同成因类型的地热流体其热储环境存在一定的差异,在漫长的地质历史时期,水岩反应程度决定热储流体水化学的主控因素<sup>[20]</sup>。研究区热储层岩性主要是含有大量石膏和钙芒硝透镜体的砂

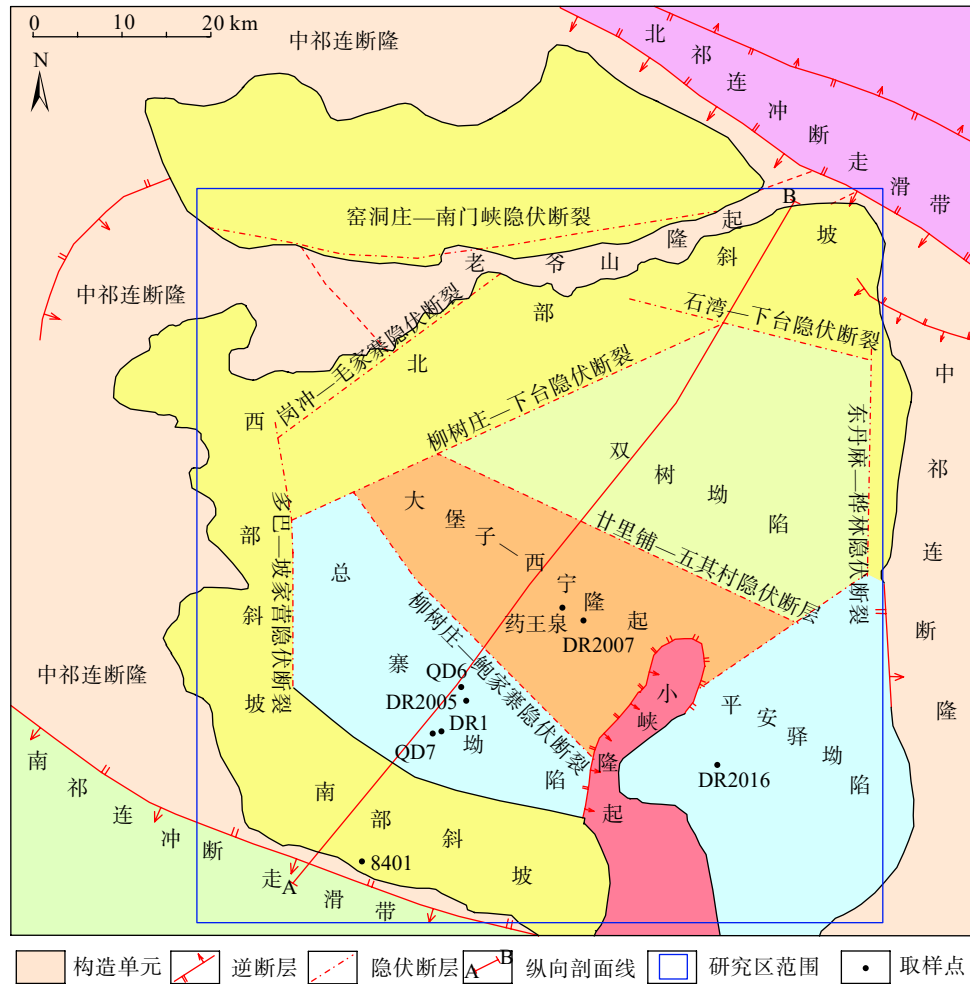


图 1 西宁盆地构造单元划分略图 (据文献 [19], 略有修改)

Fig. 1 Sketch map of tectonic units in the Xining Basin (modified from Ref. [19])

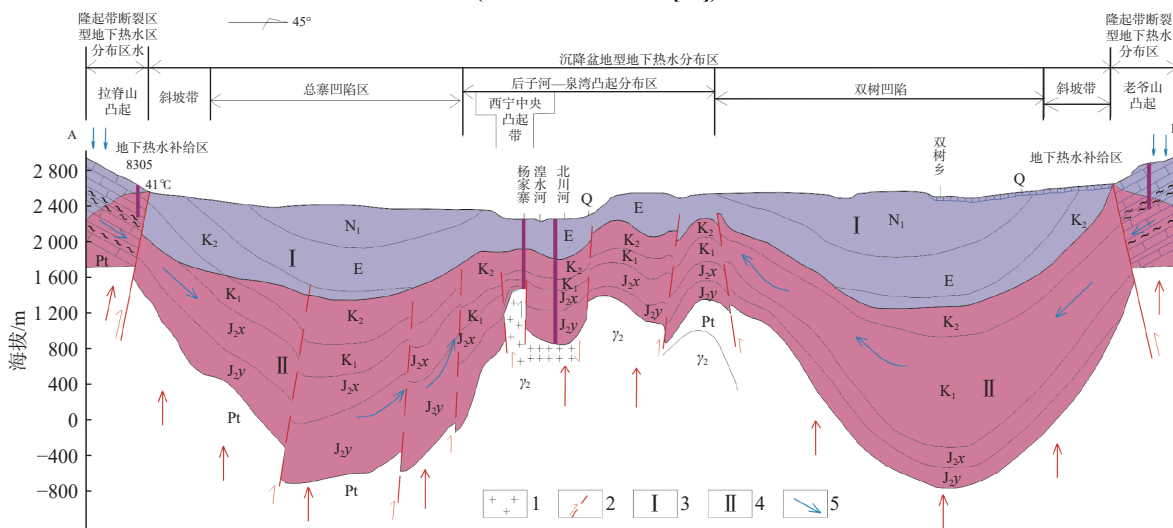


图 2 西宁盆地中生界热储构造概念模型纵向剖面 (据文献 [18], 略有修改)

Fig. 2 Longitudinal section of the conceptual model of Mesozoic thermal reservoir structure in the Xining Basin (modified from Ref. [18])

1—变质侵入体; 2—物探推断的断层; 3—盖层; 4—热储; 5—地下热水径流方向; N—新近系; E—古近系; K<sub>2</sub>—上白垩统; K<sub>1</sub>—下白垩统; J<sub>2x</sub>—中侏罗统享堂组; J<sub>2y</sub>—中侏罗统窑街组; Pt—元古宇; γ<sub>2</sub>—元古宙花岗岩

岩,所以西宁地区地热水溶解性总固体普遍较高,水化学类型多属于  $\text{SO}_4\text{-Cl-Na}$  型。前期钻获的主要地热井概况如表 1 所示。根据表 1 中的西宁地区地热水分布特征,基于其中典型 11 口地热井的井口水温和溶解性总固体,采用 Surfer 软件绘制西宁地区地热水

的井口水温和溶解性总固体分布等值线图,如图 3 所示。这些典型地热井分布在西宁河谷地区,总体上,井口水温从北向南逐渐升高,在  $11.00 \sim 62.00\text{ }^\circ\text{C}$ ,地热水溶解性总固体从西向东逐渐升高,在  $2.16 \times 10^4 \sim 6.48 \times 10^4\text{ mg/L}$ 。

表 1 西宁地区主要地热井基本情况

Table 1 Statistics of the major geothermal wells in the Xining area

孔号	位置	试段位置/m	热储厚度/m	含水层岩性及时代	水头高度/m	水头降深/m	涌水量/ ( $10^3\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ )	水温/ / $^\circ\text{C}$	溶解性总 固体/( $10^4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	水化学 类型
DR1	南川工业园 清水河南500m	745~1600	121.90	粗砂岩、中砂岩,K	-19.50	62.38 132.30	0.81 1.67	59.00 61.00	2.30	$\text{SO}_4\text{-Cl-Na}$
DR2005	城南杜家庄	850~1600	234.30	砂岩、砂砾岩,K、J	-15.70	107.38	1.33	61.00	3.42	$\text{SO}_4\text{-Cl-Na}$
8401	药水滩	-	-	碳酸盐岩地层,Jxx	+4.45	3.36	0.15	37.00	-	-
8701	西宁胜利宾馆	309~720	179.90	砂岩、砂砾岩,K、J	+55.84	54.84	3.03	39.50	3.49	$\text{SO}_4\text{-Cl-Na}$
8601	西宁供热公司	460~698	182.90	砂岩、砂砾岩,K、J	+59.98	58.41	2.24	42.20	3.98	$\text{SO}_4\text{-Cl-Na}$
911	西宁市杨家寨	270~580	251.60	中细砂岩、含砾中细 砂岩、砂砾岩,K、J	+63.00	62.00	合流0.86	32.00	3.38	$\text{SO}_4\text{-Cl-Na}$
8309	西宁彭家寨 地矿局基地	325~371	46.36	含砾砂岩,E	+22.92	43.33	0.58	27.00	2.16	$\text{SO}_4\text{-Cl-Na}$
CKB1	西宁市小桥 电厂北500m	429~468	38.00	砂岩,K	-	-	-	14.00	6.48	$\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$
DR2007	新宁花园	474~1030	340.40	砂岩、含砾粗砂岩, K、J	+50.00	自流	0.48	53.00	5.30	$\text{SO}_4\text{-Cl-Na}$
R2	海湖新区	697~1159	196.70	砂岩、砂砾岩, K、J	+61.00	自流	1.89	42.00	2.65	$\text{SO}_4\text{-Cl-Na}$
DR2010	互助县 威远镇	1039~1925	362.50	砂岩、砂砾岩, K、J	+27.00	自流	1.40	62.00	3.59	$\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$

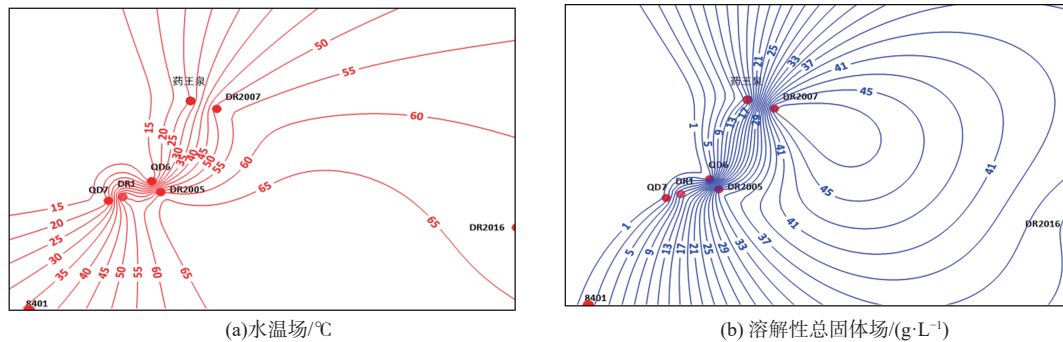


图 3 研究区地热水分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of geothermal water in the study area

### 2 典型地热水回灌结垢风险判断

对西宁地区 5 口典型地热井于 2018—2019 年进行水样采集(另有 DR2005、DR2016 地热原有水质分析资料),测定离子组成,采用矿物溶解度法、饱和指数法等<sup>[21-25]</sup>进行单一地热水和混合地热水结垢趋势预测,分析判断地热水回灌井筒内的结垢风险。

#### 2.1 地热水水化学特征

参考《地下水水质检验方法》(DZ/T 0064.1-80—1993),对 7 个地热水样进行离子组成监测,结果如表 2 所示,DR2005 和 DR2016 两口地热井的前期测定结果亦列在表中(DR2005 原及 DR2016 原)。地热水含有大量结垢阴阳离子,  $\text{Ca}^{2+}$  含量为  $24.04 \sim 549.55\text{ mg/L}$ ,

表2 西宁地区典型地热水水质分析结果

Table 2 Hydrochemical analyses of typical geothermal water samples in the Xining area

地热水类型	DR2005	DR2007	DR2016	药王泉	8401	DR2005原	DR2016原
$K^+/(mg \cdot L^{-1})$	65.81	48.74	80.69	18.22	4.63	124.00	87.40
$Na^+/(mg \cdot L^{-1})$	$1.18 \times 10^3$	$1.66 \times 10^4$	$1.51 \times 10^4$	$3.65 \times 10^3$	20.11	$1.11 \times 10^4$	$1.26 \times 10^4$
$Ca^{2+}/(mg \cdot L^{-1})$	24.04	425.55	549.55	41.36	317.40	270.10	418.00
$Mg^{2+}/(mg \cdot L^{-1})$	8.21	140.00	176.11	19.36	93.69	78.30	149.00
$Br^{2+}/(mg \cdot L^{-1})$	0.13	<0.02	0.25	<0.02	0	0.05	0
$Sr^{2+}/(mg \cdot L^{-1})$	0.37	13.83	48.15	2.97	0	6.10	25.70
$HCO_3^-/(mg \cdot L^{-1})$	$2.81 \times 10^3$	$0.70 \times 10^3$	$0.75 \times 10^3$	$2.82 \times 10^3$	$1.31 \times 10^3$	$1.41 \times 10^3$	$0.70 \times 10^3$
$CO_3^{2-}/(mg \cdot L^{-1})$	0	25.42	0	64.71	0	0	0
$Cl^-/(mg \cdot L^{-1})$	39.97	$9.36 \times 10^3$	$2.26 \times 10^4$	$1.2 \times 10^3$	7.52	$6.98 \times 10^3$	$1.94 \times 10^4$
$SO_4^{2-}/(mg \cdot L^{-1})$	146.66	$2.07 \times 10^4$	$1.22 \times 10^3$	$4.16 \times 10^3$	45.43	$1.42 \times 10^4$	$1.17 \times 10^3$
游离 $CO_2/(mg \cdot L^{-1})$	10.81	0	14.19	0	0	30.77	16.70
pH	7.40	8.41	7.20	8.34	6.68	7.56	8.08
溶解性总固体/( $mg \cdot L^{-1}$ )	$4.34 \times 10^3$	$4.80 \times 10^4$	$4.06 \times 10^4$	$1.20 \times 10^4$	$1.85 \times 10^3$	$3.42 \times 10^4$	$3.44 \times 10^4$
水化学类型判断	$HCO_3-Na$	$SO_4-Cl-Na$	$Cl-Na$	$SO_4-HCO_3-Na$	$HCO_3-Ca$	$SO_4-Cl-Na$	$Cl-Na$
备注	水样污染	-	-	-	-	前期测定	前期测定

$HCO_3^-$ 含量为  $0.69 \times 10^3 \sim 2.82 \times 10^3$  mg/L, 此外还含有少量钡镉离子; 除 8401 井地热水呈弱酸性, 其余水样均呈弱碱性, 部分地热水如 DR2005 和 DR2016 还含有微量的游离  $CO_2$ 。地热水溶解性总固体为  $1.85 \times 10^3 \sim 4.80 \times 10^4$  mg/L。采用舒卡列夫分类法判断各地热水水化学类型, 虽然水化学类型差异较大, 但主要以  $SO_4-Cl-Na$  型为主。由于 DR2005 井目前坍塌, 取得水样受浅层水污染, 水质较前期变化明显, 其余水样如 DR2007 和 DR2016 测定结果与前期一致。

## 2.2 单一地热水结垢风险判断

回灌过程中, 地热水流经回灌井筒进入地层, 井筒内为单一回灌水状态, 进入地层后为回灌水与地下水两两混合状态。因此, 首先针对单一地热水状态进行结垢趋势预测, 判断井筒结垢风险。

### 2.2.1 矿物溶解度法

采用矿物溶解度法判断各地热水水样结垢趋势。根据地热水离子组成, 将水中结垢阳离子与结垢阴离子进行配对(4种阳离子 $\times$ 2种阴离子), 计算得到4种碳酸盐垢和4种硫酸盐垢在水中的最大生成量, 并与这些盐垢在水中的溶解度进行对比, 判断可能存在的结垢风险, 结果见图4、图5(最大生成量小于0.01 mg/L的盐垢未在图中标出)。

对比碳酸盐垢与硫酸盐垢在水中的溶解度可知: ①以 10 mg/kg 水为界, 钡镉垢溶解度一般大于钙镁垢

溶解度; ②硫酸盐垢溶解度受温度影响较小, 一般随温度升高而稍微升高或不变, 碳酸盐垢溶解度则受温度影响较大, 其中碳酸钙垢溶解度随温度升高而出现逐渐下降的趋势, 对温度的影响较为敏感。因此, 地热水回灌、温度逐渐升高的过程可能对  $CaCO_3$  结垢影响较大。

对比各地热水碳酸盐垢最大生成量与其在水中的溶解度可得: ①各水样中  $CaCO_3$  最大生成量均大于或等于其溶解度曲线, 存在结垢风险; ②各水样中  $MgCO_3$  最大生成量, 均高于其溶解度曲线, 存在结垢风险, 但需要注意的是  $MgCO_3$  在水中不能稳定存在, 易水解成  $Mg(OH)_2$ ; ③各水样中  $BaCO_3$  最大生成量, 均低于其溶解度曲线, 结垢风险较小; ④ $SrCO_3$  最大生成量, DR2016、DR2016 原以及 DR2007 大于或等于其溶解度曲线, 存在结垢风险, 其余水样结垢风险较小。

在本次取样得到的相应数据基础上, 对比各地热水硫酸盐垢最大生成量与其在水中的溶解度可得: 各水样  $MgSO_4$ 、 $CaSO_4$  最大生成量均高于其溶解度, 存在结垢可能, 但水中硫酸根会与金属离子形成大量络合或离子对, 只有剩余的少量游离态金属离子和硫酸根离子才会形成结垢趋势, 因此不排除水样中  $CaSO_4$  和  $MgSO_4$  最大生成量低于溶解度的可能; 各水样中  $BrSO_4$ 、 $BaSO_4$  的最大生成量也均小于其溶解度, 结垢

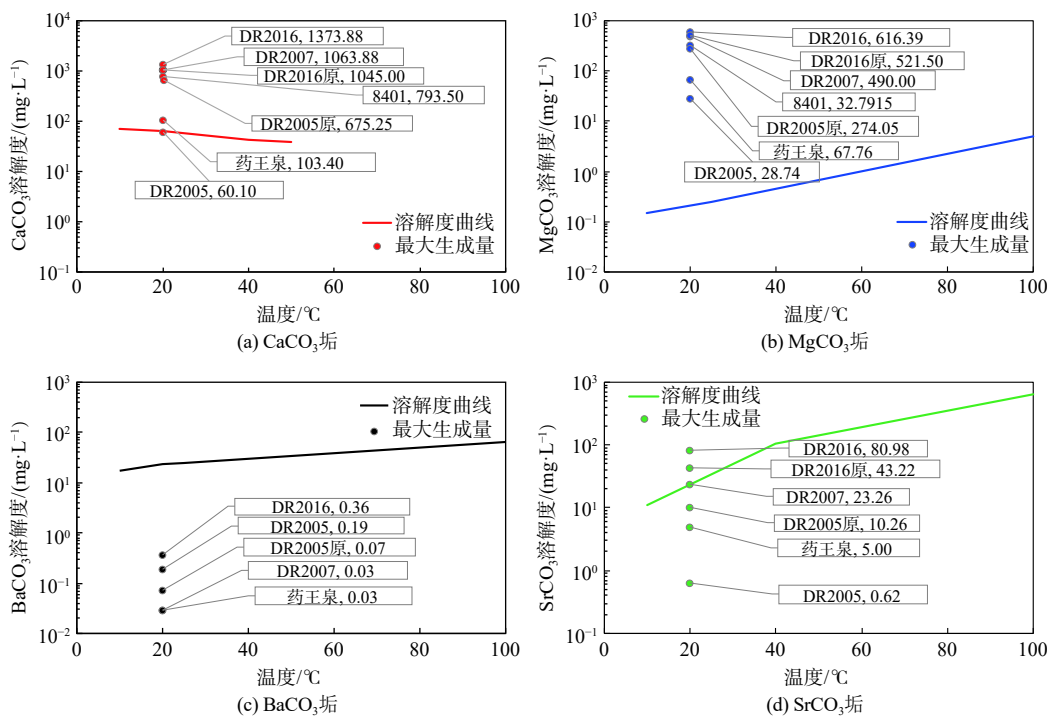


图 4 不同地热水碳酸盐垢最大生成量与溶解度曲线对比

Fig. 4 Comparison of the maximum formation and solubility curves of carbonate scale in different geothermal waters

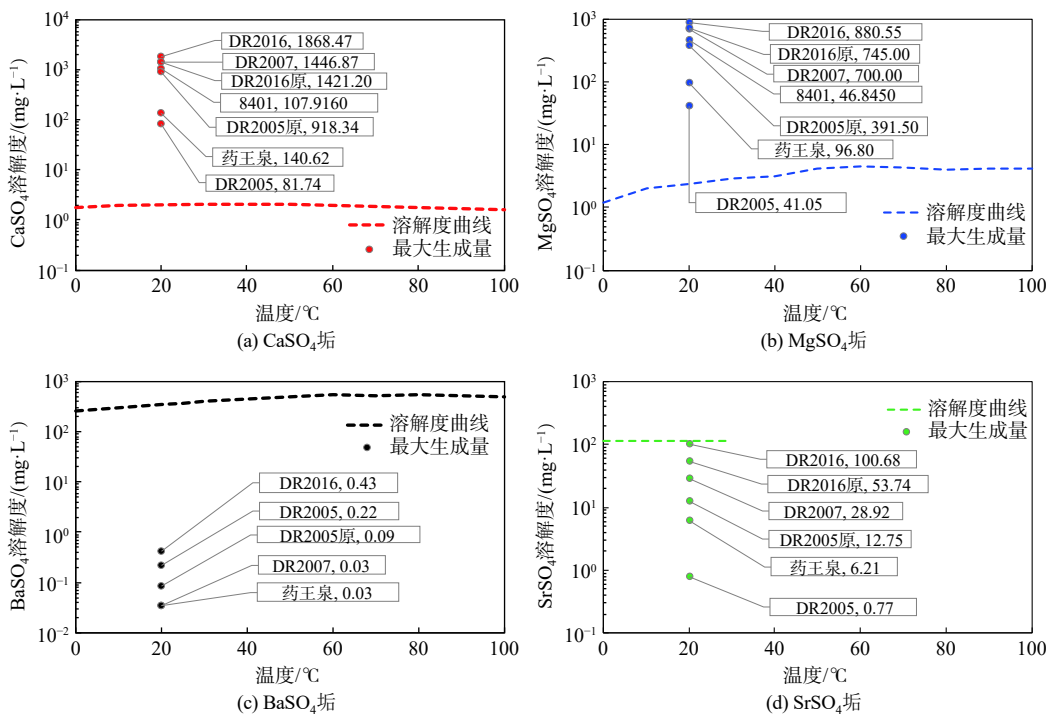


图 5 不同地热水硫酸盐垢最大生成量与溶解度曲线对比

Fig. 5 Comparison of the maximum formation and solubility curves of sulfate scale in different geothermal waters

风险小。

综上,认为  $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{MgCO}_3$ 、 $\text{CaSO}_4$  及  $\text{MgSO}_4$  的最大生成量均远高于对应温度下的溶解度,但  $\text{MgCO}_3$

易水解成  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ,而水中硫酸根又会与金属离子形成大量络合离子对从而极大降低硫酸盐结垢风险,因此井筒条件下各地热水中生成碳酸钙垢的可能性最大。

2.2.2 结垢趋势指数法

采用饱和指数法对地热水进行复合结垢趋势预测。对于井筒内注入水结垢预测, 具体方法参考贾红育等人建立的结垢趋势模型, 以盐垢溶解平衡理论为基础, 以不同热力学条件下的平衡常数为依据, 综合考虑温度、压力、水的离子强度、水中溶解 CO<sub>2</sub> 含量、pH 值和气相 CO<sub>2</sub> 的溶解作用等各种热力学影响因素对碳酸盐及硫酸盐混合结垢的影响, 通过依次计算注入水碳酸组分、pH、结垢饱和指数以及对应的结垢量, 针对单一地热水进行注入井筒内的复合结垢趋势和最大结垢量预测<sup>[24-28]</sup>。

各地热水样沿井筒向下升温过程中的结垢趋势及最大结垢量如图 6 所示。若某一类型垢的过饱和指数大于 0, 则说明存在该类型的结垢风险, 且过饱和指数越大, 结垢风险越大。碳酸钙垢的过饱和指数始终大于 0, 且随着温度升高呈线性增长, 说明碳酸钙垢已在水中达到过饱和状态, 存在结垢风险; 其他碳酸盐以及硫酸盐垢的过饱和指数也随着温度升高而变化, 但均小于 0, 导致结垢量始终为 0, 因此结垢风险较小。总体来看, 各水样的过饱和指数相近, 其中

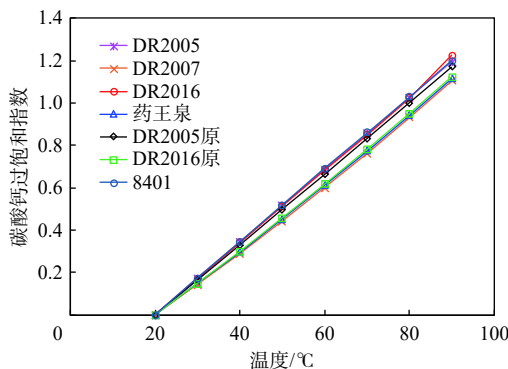
DR2005、DR2016、DR2005 原、8401 水样的结垢趋势稍高。此外, 对于同一水样, 过饱和指数越大, 结垢量越大, 90 °C 下各地热水的最大碳酸钙结垢量排序为: 8401 > DR2005 原 > DR2016 > DR2016 原、DR2007 > DR2005 > 药王泉, 其中 DR2005 及药王泉地热水结垢量为最小, 为 10 ~ 30 mg/L; 8401 地热水结垢量最大, 可达 380 mg/L, 其次为 DR2005 原及 DR2016 地热水, 结垢量最大可达 250 ~ 350 mg/L。地热水结垢量与过饱和指数和结垢离子含量都有较大关系。

2.3 混合地热水结垢风险判断

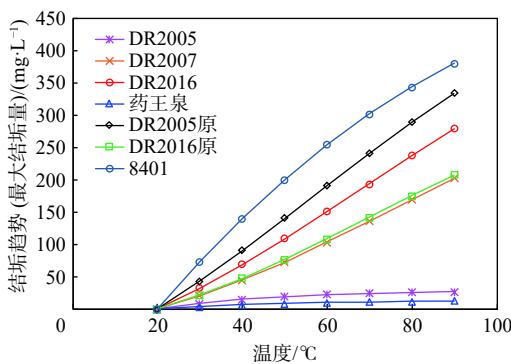
为评价回灌水与地下热水在近井储层内的混合结垢风险, 采用饱和指数法预测两两混合地热水的过饱和指数及最大结垢量<sup>[24-30]</sup>。地层内结垢预测的具体方法同样参考贾红育等人建立的结垢趋势模型, 依次通过地下热水原始成分恢复计算、不同混合比例下混合水碳酸组分及 pH 计算、混合水饱和指数以及对应的结垢量计算等步骤, 进行两种地热水在地层内的结垢预测。当得到的过饱和指数小于 0 时, 水中离子浓度达不到饱和浓度, 不会发生结垢。假设将地热水 DR2005 原、DR2007、DR2016、药王泉和 8401 分别回灌至 DR2005 原地热储层中, 先经过回灌井筒内回灌水的自我结垢过程(温度从 20 °C 升高至 60 °C), 再在 60 °C 下以不同比例与储层内的地下热水混合结垢, 预测结果如表 3、表 4 所示。

表 3 回灌井筒内碳酸钙垢过饱和指数及结垢趋势

注入水	DR2005原	DR2007	DR2016	药王泉	8401
过饱和指数	1.19	1.85	0.86	1.80	1.21
结垢趋势/(mg·L <sup>-1</sup> )	191.78	103.93	151.21	10.29	254.40



(a) 碳酸钙结垢过饱和指数



(b) 碳酸钙结垢趋势(最大结垢量)

图 6 井筒内地热水回灌升温过程中碳酸钙过饱和指数及结垢趋势

Fig. 6 CaCO<sub>3</sub> saturation index and scaling trend in geothermal water reinjection and heating process in wellbore

由表可知, 回灌 DR2005 原、DR2007 和 8401 地热水时, 结垢风险主要发生在井筒, 与地下热水混合后无结垢风险; 回灌 DR2016 地热水时, 不仅井筒中存在结垢风险, 地层中也存在一定结垢趋势, 随着回灌水-地下热水混合比例增大, 结垢趋势先增大后减小, 最大结垢量为 7.36 mg/L, 此时注入水所占比例为 30%; 药王泉地热水回灌时, 井筒结垢风险较小, 仅为 10.29 mg/L, 其结垢风险主要发生在地层中, 这是由于药王泉含有大量碳酸氢根离子, 而 DR2005 原含有大量钙离子, 两者不配伍而结垢, 最大结垢量可达 177.57 mg/L。根据计算得到的各地热井回灌时最大结垢量, 绘制不同地热井在井筒内以及地层内的结垢趋势空间分布, 如图 7 所示。在图中可看出, 在地热储层温度为 60 °C 所对应的深度处, 由北向南井筒内



表 4 地层内碳酸钙垢过饱和指数及结垢趋势

Table 4 CaCO<sub>3</sub> saturation index and scaling trend in formation

	注入水在地层中的比例/%	注入水类别				
		DR2005原	DR2007	DR2016	药王泉	8401
过饱和指数	0	0	0	0	0	0
	10	-0.01	-0.02	0.008	0.11	-0.03
	20	-0.02	-0.04	0.013	0.22	-0.06
	30	-0.03	-0.06	0.015	0.33	-0.09
	40	-0.03	-0.08	0.014	0.43	-0.11
	50	-0.04	-0.10	0.012	0.54	-0.13
	60	-0.04	-0.11	0.008	0.64	-0.14
	70	-0.04	-0.11	0.002	0.74	-0.14
	80	-0.03	-0.11	-0.002	0.84	-0.13
	90	-0.02	-0.08	-0.004	0.89	-0.07
100	0	0	0	0	0	
结垢趋势/(mg·L <sup>-1</sup> )	0	0	0	0	0	0
	10	0	0	4.21	60.16	0
	20	0	0	6.59	110.05	0
	30	0	0	7.36	147.50	0
	40	0	0	6.80	170.49	0
	50	0	0	5.26	177.57	0
	60	0	0	3.13	168.38	0
	70	0	0	0.92	143.90	0
	80	0	0	0	106.17	0
	90	0	0	0	57.65	0
100	0	0	0	0	0	

结垢趋势逐渐增强,地层内结垢趋势逐渐减弱。

综上,认为当回灌水与地下热水性质相近时,回灌地层结垢风险较小,结垢风险主要发生在回灌井筒中;当回灌水与地下热水结垢阴阳离子含量差异较大时,不配伍性将导致地层结垢风险大大提高。

### 3 地热水回灌防垢措施及建议

通过评估得到,西宁地区地热水回灌过程中,回灌井筒及地热储层中均存在结垢风险,结垢颗粒在管壁上的附着、在滤网及近井地层中的沉积,都会导致

地热水的回灌能力逐渐下降,因此需要采取有效的综合措施来预防井筒及近井地层结垢。

#### 3.1 常用防垢除垢措施

石油行业油水井普遍存在结垢风险,除防垢技术和措施丰富<sup>[31-32]</sup>,其中防垢方法包括物理防垢、化学防垢及工艺防垢,除垢方法分为化学除垢、物理除垢及机械除垢,对地热开发过程中的除防垢技术选择具有良好的借鉴作用。对于地热井,目前常用的防垢措施有预处理法、增压法、化学法、磁法阻垢及采用防垢涂层等,常用的除垢方法有机械除垢(专用钻头定期清垢,空心机械通井器连续除垢)、水力破碎法及化学清洗法(HCl和HF等溶液加缓蚀剂溶解水垢)<sup>[15,33]</sup>。其中,预处理方法即在地热水进入系统之前进行预结晶沉淀和膜过滤等处理,减缓地热利用系统的污垢生成,但可能存在生成的结垢颗粒在地面管线或设备中堵塞的情况,需要定期除垢;增压法即采用电潜泵增压,使CO<sub>2</sub>酸性气体保留在液相中,使碳酸钙处于不饱和状态,从而达到防垢密度,但溶在水中过多的CO<sub>2</sub>酸性气体会造成管线腐蚀的问题;化学法即向回灌地热水中投入酸性溶液,降低地热水pH值,存在腐蚀问题、不经济,或投入防垢剂,但须无毒,符合国家排放标准,因此存在一定的技术成本;磁法阻垢即在磁场作用下在水中形成晶核,减少在管壁上的附着,但前期成本较高;阻垢涂层法即结合防腐涂层实现阻垢,但同样面临着磨损和定期更换的问题。

目前已知的这些地热阻垢方法各有利弊,至今还没有一个既经济方便又持续高效的方法。考虑到西宁地区各地热井结垢趋势不同,应均衡各防垢措施利弊,合理采取多种防垢措施。对于结垢风险较高的井,可采用预处理-增压法-阻垢涂层联合防垢,从地面设备到井筒进行全方位的防垢,结垢风险较低的井可采用预处理等防垢方法。

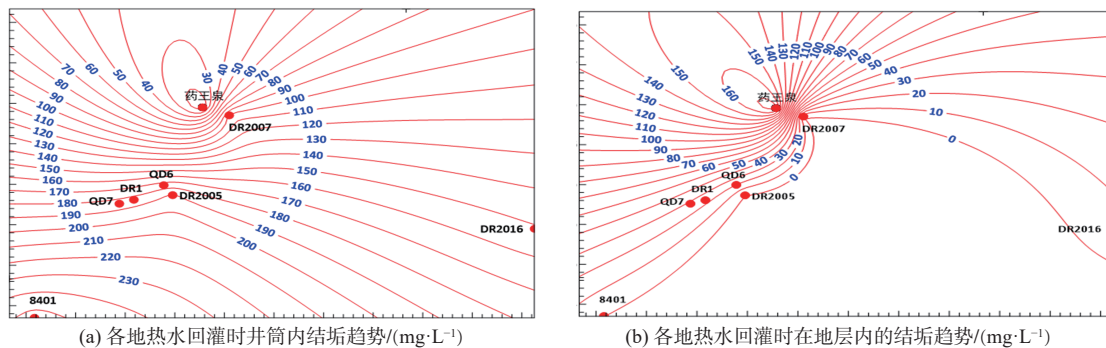


图 7 不同地热水回灌时结垢趋势分布

Fig. 7 Distribution of scaling tendency during different geothermal water reinjections

### 3.2 综合预防措施建议

西宁地区地热水回灌不仅面临结垢风险,还面临腐蚀及地层堵塞风险,因此设计综合防治措施,有利于确保回灌井筒及地层的长期回灌能力,提高地热水开发利用的经济性。通过筛选对比现有地热水回灌防腐防垢防堵措施及技术,可考虑的措施有回灌地热水预处理、寻找与回灌水配伍的回灌储层、井筒采用防腐防垢管材、井筒及近井地层定期酸洗、调节回灌水 pH 值、添加 CO<sub>2</sub>、酸化压裂等<sup>[15, 31]</sup>,如表 5 所示。综合对比各措施的原理、预防范围及效果等,给出回灌井初步防护建议:主要考虑优选管材的方法来达到

井筒防腐目的,如采用玻璃钢、不锈钢管材等;对于井筒及地层结垢,可以考虑采取对地热水预处理、高压防 CO<sub>2</sub> 脱气等方法,提高回灌水组成稳定性以及与地下热水的配伍性。

在此基础上,提出 3 套综合防治方案(表 6)。第 1 套方案工艺流程简单,对系统温压变化要求不高,系统封闭无 O<sub>2</sub>,并建议尝试采用目前最新的物理防垢技术,如采用合金短节形成微磁场使水分子极性化从而降低结垢趋势;或采用 HTI 电偶层技术释放大量的负电子中和金属离子,从而达到防垢的目的,是目前防垢技术的一个发展方向。

表 5 地热回灌井筒防腐防垢防堵措施汇总及对比

Table 5 Summary and comparison of anti-corrosion, anti-scaling and anti-blocking measures in geothermal reinjection wellbore

序号	措施	原理	防腐	防垢	防堵	备注
1	地热水预处理(常压/低压)	对尾水进行预结垢、杀菌、曝晒释放酸性气体、除氧、除颗粒等	√	√	√	设计工艺流程及计算参数指标
2	回灌储层优选	回灌水-地下水配伍性良好,同层注采			√	进行配伍性分析,提出储层选择标准
3	系统增压法调pH、加CO <sub>2</sub>	防止地热水脱气、或恢复地热水溶解气状态,使地热水结垢欠饱和		√		进行全流程开采-利用-注入温压场计算及结垢趋势分析,确定有效工艺参数
4	适速注入	保持井筒高压低温,减小结垢和腐蚀趋势,避免泥砂运移	√	√	√	根据地层泥砂运移及井筒结垢和腐蚀趋势优化排量
5	物理防垢新技术	合金短节、HTI电偶层,形成微磁场使水分子极性化降低结垢趋势,或释放大量的负电子中和金属离子	√	√		基于电化学、胶体理论,已发展至第三代(磁场式-静电场式-电子场)
6	管材选择	不锈钢、非金属、防腐防垢内衬	√	√		玻璃钢管材+不锈钢筛网
7	阴极保护	锌作为牺牲阳极	√			可大大降低局部腐蚀
8	近井-井筒定期酸洗	溶解井筒及近井地层结垢物,提高近井渗透率		√	√	对井筒管材有一定要求,投入大
9	近井酸化压裂	提高近井吸水能力			√	对井筒管材有一定要求,投入大,对固结程度较差的地层压裂效果不敢保证

表 6 地热水回灌井综合防腐防垢防堵建议

Table 6 Suggestions for comprehensive anti-corrosion, anti-scaling and anti-blocking in geothermal water reinjection wells

方案	地面-井筒	地层	备注/特点
方案1	物理防垢+管材防腐	同层注采/配伍性储层	预防工艺简单,对系统温压变化要求不高,系统封闭无O <sub>2</sub>
方案2	系统增压防垢+管材防腐	同层注采/配伍性储层	需保持系统高压,防止脱气生垢,能耗增加,系统封闭无O <sub>2</sub>
方案3	地面预处理+管材防腐	同层注采/配伍性储层	占用面积大、工艺流程复杂,需脱氧
辅助措施	阴极保护防腐、优化排量降低井筒结垢和腐蚀趋势、酸洗井筒除垢	酸化压裂提高近井吸水能力、优化排量防止泥砂颗粒运移	经济性及技术可行性有待论证

## 4 结论

(1)西宁地区地热水在深部循环过程中从侏罗系-新近系等地层中溶滤出盐分,导致地热水含有大量结垢离子、溶解性总固体高。Ca<sup>2+</sup>含量为 24.04 ~ 549.55

mg/L, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>含量为 0.69×10<sup>3</sup> ~ 2.82×10<sup>3</sup> mg/L,此外还含有少量钡镉离子, pH 多呈弱碱性,地热水溶解性总固体在 1.85×10<sup>3</sup> ~ 4.80×10<sup>4</sup> mg/L,主要为 SO<sub>4</sub>-Cl-Na 水化学类型。

(2)通过矿物溶解度法和饱和指数法预测得到,回灌过程中主要发生碳酸钙垢风险,但各地热水差异明显,回灌井筒中结垢量排序为:8401 > DR2005 原 > DR2016 > DR2016 原、DR2007 > DR2005 > 药王泉,8401 最大结垢量可达 380 mg/L;地层中,药王泉与 DR2005 原的配伍性最差,1:1 混合时结垢量最大可达 177.57 mg/L,当回灌水与地下热水性质相近时,地层结垢风险一般较小。

(3)建议采取物理防垢+管材防腐+同层注采、系统增压防垢+管材防腐+同层注采、地面预处理+管材防腐+同层注采等地热水回灌井防腐防垢防堵方法,可有效避免回灌过程中的腐蚀结垢问题。

### 参考文献 (References) :

- [ 1 ] 拓明明,周训,郭娟,等.重庆温泉及地下热水的分布及成因[J].水文地质工程地质,2018,45(1):165-172. [TA Mingming, ZHOU Xun, GUO Juan, et al. Occurrence and formation of the hot springs and thermal groundwater in Chongqing[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(1): 165 - 172. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 2 ] 王洁青,周训,李晓露,等.云南兰坪盆地羊吃蜜温泉水化学特征与成因分析[J].现代地质,2017,31(4):822-831. [WANG Jieqing, ZHOU Xun, LI Xiaolu, et al. Hydrochemistry and formation of the Yangchimi hot spring in the Lanping Basin of Yunnan[J]. Geoscience, 2017, 31(4): 822 - 831. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 3 ] 薛宇泽,陶鹏飞,韩元红.渭河盆地中深层地热资源开发存在问题及改进措施[J].资源环境与工程,2020,34(3):428-431. [XUE Yuze, TAO Pengfei, HAN Yuanhong. The problem and improvement measures of middle and deep geothermal resources development in Weihe Basin[J]. Resources Environment & Engineering, 2020, 34(3): 428 - 431. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 4 ] 马正孔.砂岩地热尾水回灌技术的研究[J].华北国土资源,2018(4):72-73. [MA Zhengkong. The research on reinjection technology of geothermal tail water into sandstone[J]. Huabei Land and Resources, 2018(4): 72 - 73. (in Chinese) ]
- [ 5 ] 梅博,郭亮,王鹏,等.地热井尾水回灌技术及其应用进展[J].中国资源综合利用,2018,36(1):168-170. [MEI Bo, GUO Liang, WANG Peng, et al. The technology and application of water recharge in the tail water of geothermal well[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2018, 36(1): 168 - 170. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 6 ] ZHANG L, CHAO J H, GENG S H, et al. Particle migration and blockage in geothermal reservoirs during water reinjection: Laboratory experiment and reaction kinetic model[J]. Energy, 2020, 206: 118234.
- [ 7 ] 杨亚军,丁桂伶,徐巍,等.基于示踪试验及动态数据的北京小汤山地区地热资源量评价[J].水文地质工程地质,2020,47(5):196-200. [YANG Yajun, DING Guiling, XU Wei, et al. Tracer test and geothermal resource quantity evaluation based on dynamic data in the Xiaotangshan area of Beijing[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(5): 196 - 200. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 8 ] 张薇,王贵玲,刘峰,等.中国沉积盆地型地热资源特征[J].中国地质,2019,46(2):255-268. [ZHANG Wei, WANG Guiling, LIU Feng, et al. Characteristics of geothermal resources in sedimentary basins[J]. Geology in China, 2019, 46(2): 255 - 268. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 9 ] 洪增林,张银龙,周阳.关中盆地南部山前中深层地热资源赋存特征及应用[J].中国地质,2019,46(5):1224-1235. [HONG Zenglin, ZHANG Yinlong, ZHOU Yang. Research on the modes of occurrence and application of geothermal resources in the middle and deep layers of the piedmont area in southern Guanzhong Basin[J]. Geology in China, 2019, 46(5): 1224 - 1235. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 10 ] 孟宪级,白丽萍,齐金生.地热水结垢趋势的判断[J].工业水处理,1997,17(5):6-7. [MENG Xianji, BAI Liping, QI Jinsheng. The judgment of scaling tendency in geothermal water in China[J]. Industrial Water Treatment, 1997, 17(5): 6 - 7. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 11 ] 曹倩,方朝合,李云,等.国内外地热回灌发展现状及启示[J].石油钻采工艺,2021,43(2):203-211. [CAO Qian, FANG Chaohe, LI Yun, et al. Development status of geothermal reinjection at home and abroad and its enlightenment[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2021, 43(2): 203 - 211. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 12 ] 戴群,王聪,罗杨,等.砂岩地热储层回灌堵塞机理研究及治理对策[J].精细石油化工进展,2017,18(6):

- 10 - 13. [ DAI Qun, WANG Cong, LUO Yang, et al. Research on sandstone geothermal reservoir reinjection plugging mechanism and measures against it[J]. *Advances in Fine Petrochemicals*, 2017, 18(6): 10 - 13. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [13] 刘明言. 地热流体的腐蚀与结垢控制现状[J]. *新能源进展*, 2015, 3(1): 38 - 46. [ LIU Mingyan. A review on controls of corrosion and scaling in geothermal fluids[J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2015, 3(1): 38 - 46. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [14] 豆肖辉, 张大磊, 荆赫, 等. 不锈钢在低温地热水环境中的腐蚀与结垢行为[J]. *腐蚀与防护*, 2020, 41(7): 61 - 66. [ DOU Xiaohui, ZHANG Dalei, JING He, et al. Corrosion and scaling behavior of stainless steel in low-temperature geothermal water environment[J]. *Corrosion & Protection*, 2020, 41(7): 61 - 66. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [15] 马致远, 侯晨, 席临平, 等. 超深层孔隙型热储地热水回灌堵塞机理[J]. *水文地质工程地质*, 2013, 40(5): 133 - 139. [ MA Zhiyuan, HOU Chen, XI Linping, et al. Reinjection clogging mechanism of used geothermal water in a super-deep-porous reservoir[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2013, 40(5): 133 - 139. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [16] 王连成. 天津市新近系馆陶组地热水回灌研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014. [ WANG Liancheng. A study of geothermal reinjection in the Guantao reservoir in Tianjin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2014. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [17] 赵季初. 鲁北砂岩热储地热水回灌试验研究[J]. *山东国土资源*, 2013, 29(9): 23 - 30. [ ZHAO Jichu. Lubei geothermal tail water reinjection experiments in sandstone reservoir[J]. *Shandong Land and Resources*, 2013, 29(9): 23 - 30. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [18] 赵振, 于漂罗, 陈惠娟, 等. 青海省西宁地热田成因分析及资源评价[J]. *中国地质*, 2015, 42(3): 803 - 810. [ ZHAO Zhen, YU Piaoluo, CHEN Huijuan, et al. Genetic analysis and resource evaluation of the Xining geothermal field in Qinghai Province[J]. *Geology in China*, 2015, 42(3): 803 - 810. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [19] 尚小刚. 青海省威远镇地热田热储特征及其开发利用潜力评价[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013. [ SHANG Xiaogang. Development use and potential evaluation of the thermal reservoir characteristics and geothermal resources of geothermal field in Weiyuan town, Qinghai Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [20] 马致远, 李嘉祺, 翟美静, 等. 沉积型和火山型地热流体的同位素水文地球化学对比研究[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(6): 9 - 18. [ MA Zhiyuan, LI Jiaqi, ZHAI Meijing, et al. A comparative study of isotopic hydrogeochemistry of geothermal fluids of sedimentary basin type and volcanic type[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(6): 9 - 18. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [21] 蔡义汉. 地热直接利用[M]. 天津: 天津大学出版社, 2004. [ CAI Yihan. Geothermal direct-use[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2004. ( in Chinese ) ]
- [22] 李义曼, 庞忠和. 地热系统碳酸钙垢形成原因及量化评价[J]. *新能源进展*, 2018, 6(4): 274 - 281. [ LI Yiman, PANG Zhonghe. Carbonate calcium scale formation and quantitative assessment in geothermal system[J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2018, 6(4): 274 - 281. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [23] 任加国, 武倩倩. 水文地球化学基础[M]. 北京: 地质出版社, 2014. [ REN Jianguo, WU Qianqian. Hydrogeochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014. ( in Chinese ) ]
- [24] 柴蕊. 天津市周良庄地热田地下水的水化学及钙华研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2006. [ CHAI Rui. A study of hydrochemistry and tufa in thermal groundwater in the Zhouliangzhuang geothermal field, Tianjin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2006. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [25] 刘光启. 化工物性算图手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002. [ LIU Guangqi. The manual of calculation about chemical physical properties[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002. ( in Chinese ) ]
- [26] 李雪娇. 硫酸钡结垢影响因素及化学阻垢实验研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2015. [ LI Xuejiao. Experimental research on influencing factors of barium sulfate scaling and chemical scale inhibition[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [27] ODDO J E, TOMSON M B. Why scale forms and how to predict[J]. *SPE Production & Facilities*, 1997, 9(1): 47 - 54.

- [28] ODDO J E, TOMSON M B. Simplified calculation of  $\text{CaCO}_3$  saturation at high temperatures and pressures in brine solutions[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1982, 34(7): 1583 – 1590.
- [29] 王磊, 唐红伟, 高雨. 油气田地面集输系统结垢预测模型研究 [J]. *管道技术与设备*, 2012(3): 12 – 13. [ WANG Lei, TANG Hongwei, GAO Yu. Study of gathering system scaling prediction[J]. *Pipeline Technique and Equipment*, 2012(3): 12 – 13. (in Chinese with English abstract) ]
- [30] 贾红育, 曲志浩. 注水开发油田油层结垢趋势研究 [J]. *石油勘探与开发*, 2001, 28(1): 89 – 91. [ JIA Hongyu, QU Zhihao. A study on formation scaling tendency for waterflooding oilfields[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2001, 28(1): 89 – 91. (in Chinese with English abstract) ]
- [31] 陈易, 徐燕来, 王闰, 等. 油田注水硫酸盐垢结垢趋势预测研究 [J]. *内江科技*, 2012, 33(5): 23. [ CHEN Yi, XU Yanlai, WANG Run, et al. Research on prediction of sulfate scaling trend in oilfield water injection[J]. *Neijiang Science & Technology*, 2012, 33(5): 23. (in Chinese) ]
- [32] 韩淑彬. G104区块注水井井筒结垢机理及防垢技术研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2016. [ HAN Shubin. Research on scaling mechanism and anti-scaling technology of water injection well in G104 block[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016. (in Chinese with English abstract) ]
- [33] 刘明言, 朱家玲. 地热能利用中的防腐防垢研究进展 [J]. *化工进展*, 2011, 30(5): 1120 – 1123. [ LIU Mingyan, ZHU Jialing. Progress of corrosion and fouling prevention in utilization of geothermal energy[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2011, 30(5): 1120 – 1123. (in Chinese with English abstract) ]

编辑: 汪美华