

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).

青海省西宁地热田成因分析及资源评价

赵 振^{1,2} 于漂罗³ 陈惠娟^{1,2} 罗银飞^{1,2} 赵东阳^{1,2} 边 疆^{1,2}

(1. 青海省环境地质勘查局, 青海 西宁 810007; 2. 青海省环境地质重点实验室, 青海 西宁 810007;
3. 青海省地质调查局, 青海 西宁 810000)

摘要:笔者通过对西宁地热田已有钻探资料和区域地热地质资料, 结合近几年的勘查项目研究成果, 分析了西宁地热田的埋藏条件、补径排条件、地温场及水文地球化学的特征, 阐述了西宁地热田主要以大地热流为热源—低热导率岩层聚热—深循环逐渐加热受迫对流机制—构成控水控热, 具有以盆地传导型面状热储为主, 兼有断裂对流型带状热储特征。同时, 采用热储法对西宁地热田地热资源量进行了评价, 该地热田内热储中储存的热量 9.343×10^{14} kJ, 利用平均布井法计算出该地热田每年开采热量为 1.12×10^{12} kJ, 折合标准煤 3.78×10^4 t, 按地热田规模分级为中型低温地热田。初步摸清了西宁地热田分布规律以及资源量, 为西宁地热田地热资源合理开发利用提供了重要依据。

关键词: 西宁地热田; 成因分析; 资源评价

中图分类号: TK521+.33 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2015)03-0803-08

Genetic analysis and resource evaluation of the Xining geothermal field in Qinghai Province

ZHAO Zhen^{1,2}, YU Piao-luo³, CHEN Hui-juan^{1,2}, LUO Yin-fei^{1,2},
ZHAO Dong-yang^{1,2}, BIAN Jiang^{1,2}

(1. Environmental Geological Exploration Bureau of Qinghai Province, Xining 810007, Qinghai, China;

2. Key Laboratory of Environmental Geology of Qinghai Province Xining 810007, Qinghai, China; 3. Qinghai Geological Survey, Xining 810000, Qinghai, China)

Abstract: Based on available drilling data of the Xining geothermal field and regional geothermal and geological data in combination with research results of recent exploration projects, the authors analyzed burial conditions, recharge and runoff discharge conditions, geo-temperature field and geochemical characteristics of the Xining geothermal field, and pointed out that the Xining geothermal field mainly has terrestrial heat flow as the heat source, the strata with low thermal conductivity accumulate the heat, the deep circulation gradual heating forced convection mechanism causes the water control and heat control, dominated by basin conduction type planar thermal reservoir, with some characteristics of fracture convective banded thermal reservoir. The thermal reservoir method was adopted to conduct evaluation of the geothermal resource quantity of the Xining geothermal field. The

收稿日期: 2014-05-04; 改回日期: 2014-10-10

基金项目: 中国地质调查局项目“全国地热资源调查评价”(1212011220842)资助。

作者简介: 赵 振, 男, 1982年生, 工程师, 主要从事水文地质、环境地质、地热地质调查评价工作; E-mail: zhaozhen906@126.com。

heat quantity accumulated in the thermal reservoir of the geothermal field is 9.343×10^{14} kJ, and the annual exploited heat quantity of the geothermal field calculated by the average well deployment method is 1.12×10^{12} kJ, equivalent to 3.78×10^4 t standard coal. According to the scale classification, the Xining geothermal field should belong to the medium type low-temperature geothermal field. The distribution regularity and resource quantity of the Xining geothermal field have been ascertained, which provides an important basis for the rational development and utilization of geothermal resources in the Xining geothermal field.

Key words: Xining geothermal field; genetic analysis; resource evaluation

About the first author: ZHAO Zhen, male, born in 1982, engineer, mainly engages in survey and evaluation of hydrogeology, environmental geology, and geothermal geology; E-mail: zhaozhen906@126.com.

地热属于清洁的可再生能源^[1],青海省地热资源较为丰富^[2]。西宁地热田以往勘探程度相对较高,但缺乏资源评价,对开发利用地热资源具有较大影响。因此,笔者结合以往勘探资料以及近年取得成果,采用水化学、同位素分析法,进一步阐述西宁地热田热流体特征,并采用热储法和平均布井法对西宁地热田地热资源量进行整体评价,对西宁地热田地热资源的合理开发与科学保护具有重要意义。

1 地质概况

1.1 区域地质构造

西宁盆地区域构造位置处于祁吕贺兰山字型构造前弧西翼转折部位,构造形迹主要为北西向、北西西向褶皱、压性断裂,其次为南北向(近南北向)、北东向褶皱和张性断裂。在大地构造位置上,按传统的槽台观点,西宁盆地处于北祁连山槽褶皱带与南祁连山褶皱带之间的中祁连山隆起带的东部^[3-4];按板块构造理论,西宁盆地位于中祁连山弧隆起带内^[5]。西宁盆地包括老爷山凸起、西部斜坡、双树湾凹陷、大堡子—西宁凸起、总寨凹陷、小峡凸起等三级构造单元。西宁地热田位于西宁盆地大堡子—西宁凸起构造单元。

1.2 地层

根据区域地层资料^[6],西宁盆地出露地层主要有古元古界、中元古界长系、蓟县系、古生界的寒武系中、上统、奥陶系、志留系、泥盆系及中生界的三叠系中、上统、侏罗系中统、白垩系和丘陵地带的中生界古近系、新近系^[7]。西宁地热田R₂号钻孔揭露地层:古近系、白垩系以及第四系。

1.3 西宁地热田控制断裂

西宁地热田的分布主要受以下断裂(图1)控制:

1.3.1 解放村—青海宾馆断裂(F₁)

据物探资料推测,沿昆仑大道南侧有一条隐伏

断裂。推测走向为NNW向,倾向NE,控制着彭家寨—刘家寨次级凹陷。

1.3.2 湟水断裂带

湟水隐伏断裂带总体沿湟水呈近东西向向北略突的弓形,在彭家寨以西切入基岩区。该断裂主要由东西两段组成,并由多条次级断裂组成。受区域近南北向、北东向断裂的错动,分布不连续,形成地堑、地垒构造组合,表现为空间上的断块隆升与凹陷。

1.3.3 北川河东岸断裂(F₃)

该断裂走向由北北东向变为近南北向,是控制北川河河谷的一条主要断裂。该断裂北起康家沟,向南经双庙大沟,至九家湾附近延入西宁,长约24 km。

1.3.4 北川河西岸断裂(F₃)

该断裂在地貌上是盆地和河谷的界线。北起塔尔村,向南经黑沟沟口,至盐庄东侧,走向为近南北向,倾向东,倾角75°~85°,长约18 km,断裂性质属张性。

1.3.5 南川河断裂(F₆)

该断裂发育于南川河西岸,走向北北东向,长约20 km,是控制南川河发育的主要断裂。

1.4 侵入岩

岩浆活动仅限于盆地基底构造层及周边山区晚古生代构造层内,主要活动期为加里东期,活动形式有侵入和喷发2种,受构造的控制比较明显^[8]。并以侵入岩以石英闪长岩、花岗闪长岩类为主,据R₂号地热井1158.90 m揭露花岗岩。

2 地热地质条件

2.1 区域地质构造热背景

西宁盆地是印支末期构造运动形成的断陷盆地。新生代以来受其喜马拉雅造山运动的影响,西宁盆地新构造运动活动强烈,表现在盆地周边及盆

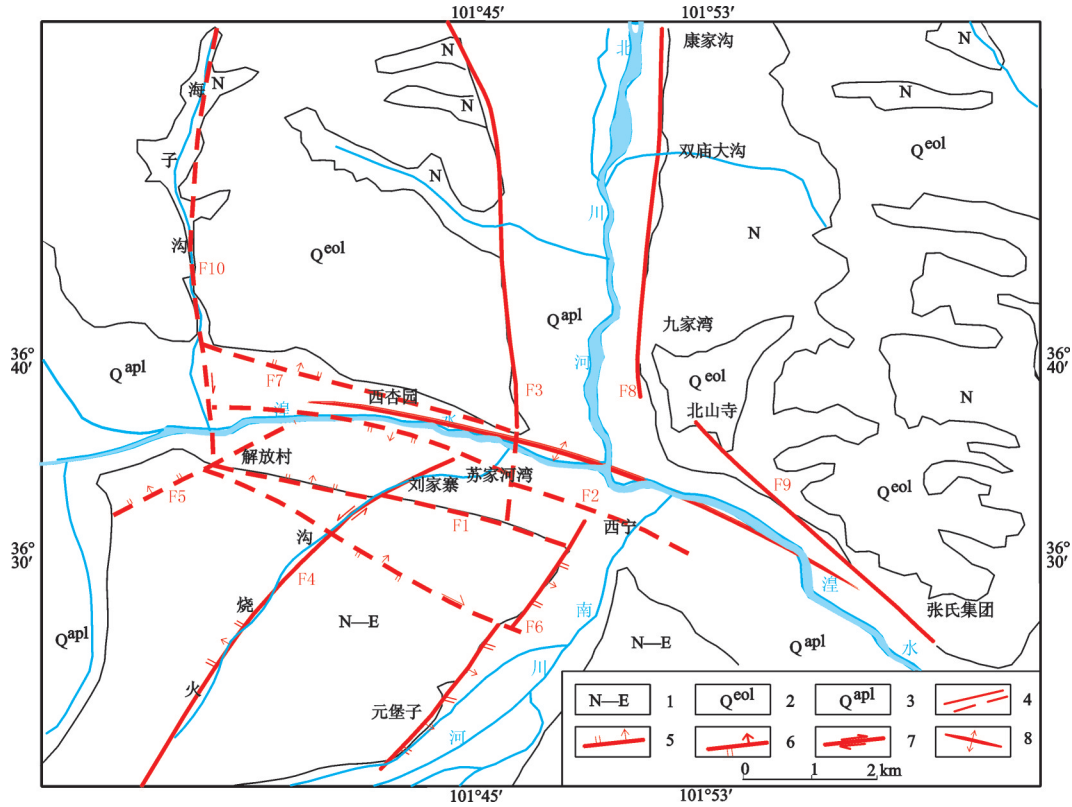


图1 西宁地热田主要断裂分布图

1—新近—古近系泥岩、砂岩;2—第四系黄土;3—第四系砂砾石;4—实测断裂、推测断裂;5—正断层;6—逆断层;7—平移断层;8—西宁中央凸起
 Fig.1 Distribution of main fractures in the Xining geothermal field
 1—Neogene–Paleogene mudstone, sandstone; 2—Quaternary loess; 3—Quaternary sandy gravel; 4—Measured fracture, inferred fracture; 5—Normal fault; 6—Reverse fault; 7—Strike-slip fault; 8—Xining central bulge

地内老断裂的复活,如已发现拉北断裂和蔡家堡断裂东端老地层已逆冲在新近系之上,深部的水热活动进一步加剧,造就了西宁盆地具备地热资源形成的区域地质构造背景,使之成为中低温地热资源的远景区。盆地内沉积500 m厚的新近系、古近系泥岩、粉砂岩及砂岩和第四系黄土层,起着隔热保温作用,造成盆地现今仍保留着较高的地热背景。

2.2 地温场分布特征

地壳浅部地温场的影响因素包括:基岩的起伏、构造形态、岩浆活动、地下水活动等^[9-10]。西宁地热田基底起伏和构造形态对地热田地温场分布起着主导作用。

已有地热异常显示的深孔中,在水平分布上显示出由地热田边缘至中部水温由低变高的分布规律,如地热田边缘钻孔水温在9.5~23.5℃,而位于地热区中部的R2、DR2005、DR2007、8601、8701号钻孔中水温高达39.5~61.0℃。

从钻孔不同深度实际测温资料来看,钻孔中的水温基本上随孔深的增加而增高,显示出水温与孔深的正相关关系(图2)。西宁地热田地热梯度值在3.89℃/100 m~5.74℃/100 m。

2.3 热流体化学特征

2.3.1 热流体化学特征

西宁地热田地下热水为碎屑岩类裂隙孔隙承压水,具有良好的感观,无肉眼可见物,略带硫化氢气味。西宁地热田白垩系热储层段地下热水样品进行水质检测。结果(表1)表明:西宁地热田热流体地下热水中阳离子以Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺为主,占阳离子总量的99.95%,且Na⁺>Ca²⁺>Mg²⁺>K⁺;阴离子SO₄²⁻、Cl⁻、HCO₃⁻为主,占阴离子总量的99.96%,且SO₄²⁻>Cl⁻>HCO₃⁻。pH值为7.15~7.82,属于弱碱性。热流体化学类型SO₄·Cl-Na型水。热流体地下热水矿化度较高,一般为20~52 g/L。氟离子含量一般超过命名矿水的浓度指标,可命名为

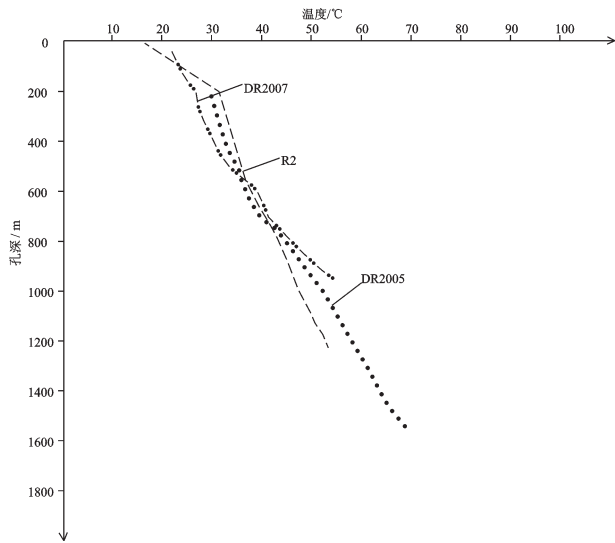


图2 西宁地热区深度与温度变化曲线图

Fig.2 Depth and temperature variation curves of the Xining geothermal field

氟水,由于其含特殊的微量元素对皮肤病、关节炎等疾病有特殊的医疗效果,具有一定的医疗保健价值。同时,还含有其他较多的微量元素,这些成分使西宁地热田地下热水具有良好的医疗价值,为复合型矿泉水,属康复医疗型地热资源。

2.3.2 Piper 三线图

Piper 三线图是一种对水样进行分类的图示方法,在三线图中分别表示出任一水样的阴、阳离子的相对含量,在菱形图中综合表示水样的离子相对含量,并且可看出水样的一般化学特征(图3)。

Piper 三线图表明西宁地热田地下热水阳离子均以 Na^+ 占绝对优势,阴离子以 SO_4^{2-} 和 Cl^- 含量最高,为盐水或卤水,属 $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4\text{-Na}$ 型水。西宁地热田水化学成分的形成主要是古雨水补给地下水时,与围岩产生水-岩作用,溶解大量的石膏和其他盐类,形成高矿化。

2.3.3 地下热水水化学动态

西宁地热田热流体化学成份动态变化资料有 8701 孔,1987年、2002年和 2012年分别取 3 次水质全分析样及其他微量元素分析样,反映出该井开采 25 年后,热流体水化学成分动态变化规律,将该对比资料列入表 2。开采 25 年后,热流体矿化度由 1987 年的 34.88 g/L 降到 2002 年的 27.66 g/L,降低了 20.7%,而 2012 年矿化度为 27.70 g/L,从 2002 年到 2012 年 10 年间矿化度变化趋于恒定。而这一显现确切表明了随地下热水的开采激发,径流条件由差变好,并得到了有效补给,使得地下热水矿化度降低,水质变好。但从 2002 年到 2012 年 10 年时间,该井水质化验结果反映,地下热水化学组分已经趋于一种新的平衡点。这说明随着地下热水的开采激发,该井的径流条件由差变好,并得到了有效的补给,使得地下热水的矿化度由高降低,水质由差变好;同时也间接说明该地区地下热水水化学动态的变化是由于地下热水的开采改变了原先稳定的水-岩平衡^[11]。储层中的地下热水由于压力降低、流速加大,使得地下热水中的某些成分与围岩之间的平衡方向和交换数量发生了变化,对未开采的水-岩

表 1 热流体水质分析结果表

Table 1 Water quality analytical results of thermal fluids

井/泉编号	主要阳离子/(mg/L)				主要阴离子/(mg/L)				pH	矿化度/g/L	水化学类型
	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	CO_3^{2-}			
杜家庄 (DR2005)	124.00	11100.00	270.10	78.30	6983.00	14200.00	1414.00	0	7.56	34.20	$\text{SO}_4\text{-Cl-Na}$
新宁花园 (DR2007)	34.00	17250.00	573.14	103.28	8915.68	25792.11	598.00	0	7.82	52.97	$\text{SO}_4\text{-Cl-Na}$
胜利公园 (8701)	50.00	8300.00	271.40	171.00	5232.00	14109.60	1576.00	0	7.35	27.66	$\text{SO}_4\text{-Cl-Na}$
海湖新区 (R1)	29.00	6330.00	380.76	36.45	3261.40	9413.88	1354.64	0	7.47	20.135	$\text{SO}_4\text{-Cl-Na}$
体育中心 (R2)	18.00	9359.00	476.95	72.90	5955.60	12007.50	1181.35	0	7.37	28.49	$\text{SO}_4\text{-Cl-Na}$
杨家寨 (8601)	62.40	128600.00	531.30	165.80	7778.10	17937.90	520.40	0	7.40	39.88	$\text{Cl-SO}_4\text{-Na}$
西杏园温泉 (Q1)	73.00	10600.00	293.08	71.92	6860.00	12900.00	13400.00	0	7.56	32.2	$\text{SO}_4\text{-Cl-Na}$

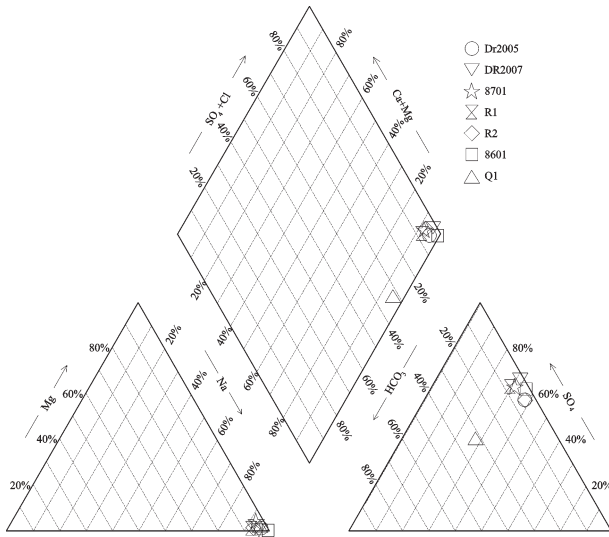


图3 热流体Piper三线图解

Fig.3 Piper three-line diagram of thermal fluids

平衡系统作出调整^[12]。

2.4 同位素特征

利用环境同位素技术研究地热资源的生成和运移机理,是目前地热领域中逐渐发展起来的新方法,是深层次评价地热资源的又一创新领域^[13-14]。通过测定、分析地热流体中同位素的现在值,推知其作用的过程和时间,从而揭示地下流体的年龄、成因、来源等。

本次主要利用西宁地热田历次地热地质调查

勘查项目获得的氢氧同位素样分析成果(表3),对各类水体的同位素资料进行分析,判断地下热水的主要补给来源。

所有样品的稳定同位素成分表示在图4。从图4看出样品基本沿全球大气降水线分布。说明西宁地热田地下热水主要是由西宁盆地南部、北部山区大气降水入渗补给形成,地下热水径流方向与河流流向基本一致。深层地热水落在全球降水线下方,表明地下热水来源南北山区大气降水补给区入渗补给地下水,经深部循环加热、较强的蒸发作用,而后径流受阻^[15],沿深大断裂带出露地表。

2.5 区域热储概念模型

西宁盆地北为双树坳陷,南为总寨坳陷,坳陷内广泛分布有沉积断陷型中低温地下热水,地下水深循环过程中在正常地热增温率下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流通并富集,形成隐伏热异常。盆地坳陷区断裂构造相对发育,为封闭或半封闭的对流体系,有利于地热异常的产生,“凹中凸”构造的地热增温率则明显提高,其旁侧又有利于地下热水富集。基于此,建立的西宁盆地的热储概念模型是:大地热流为热源—低热导率岩层聚热—深循环逐渐加热受迫对流机制—构成控水控热^[16](图5)。西宁盆地具有以盆地传导型面状热储为主,兼有断裂对流型带状热储特征。西宁地热田位

表2 8701孔水化学成分动态变化对比(离子含量单位:mg/L)

Table 2 Dynamic change comparison of chemical components in No. 8701 drill hole (unit of ion content: mg/L)

取样时间 年-月-日	1987-9-21	2002-7-22	2012-10-9	取样时间 年-月-日	1987-9-21	2002-7-22	2012-10-9
水温/℃	39.5	39.5	36.0	Mg ²⁺	171.0	112.0	116.9
矿化度/(g/L)	34.88	27.66	27.70	Fe ³⁺	0.50	0.18	0.776
PH值	7.10	7.35	7.70	Fe ²⁺	1.20	0.063	<0.010
K ⁺	64.5	50.0	37.08	Cu ²⁺	0.000	0.000	1.700
Na ⁺	10920.0	8300	9352	NH ₄ ⁺	1.700	1.98	0.058
Ca ²⁺	391.7	271.4	242.6	Mn ²⁺		0.78	<0.001
Zn ²⁺	0.002	64.1	0.002	Pb ²⁺	0.000	0.000	0.000
Cl ⁻	7840.2	5232.0	5865	SO ₄ ²⁻	14109.6	10791	11321
HCO ₃ ⁻	1358.5	1576	1427	CO ₃ ²⁻	0.0	0.0	0.00
F ⁻	0.4000	4.20	6.60	I ⁻		0.17	0.19
Br ⁻		1.51	4.40	NO ₂ ⁻	0.000	0.004	0.002
NO ₃ ⁻	1.8000	0.89	1.48	HPO ₄ ⁻	0.000	1.08	0.05
耗氧量	3.78	1.09	5.26	CO ₂	39.71	45.07	39.01
SiO ₂	21.10	18.94	23.66	HBO ₂ ⁻		15.88	14.89

表3 西宁地热田各类水体同位素测试结果统计
 Table 3 Statistics of isotopic analytical results of various water bodies in the Xining geothermal field

样品编号	地点	取样点高程/m	$\delta^{18}O$	δD	计算补给区海拔高程/m
1	R ₂ 号海湖体育中心	2280	-10.16	-74.00	2930
2	8701井胜利宾馆	2260	-10.50	-73.00	2980
3	DR2007井新宁花苑	2250	-10.20	-71.00	2910
4	DR2005井杜家庄	2460	-10.40	-74.00	3160
5	8305井	2975	-10.11	-67.36	3610
6	药水滩泉	2971	-9.80	-61.00	3550

于西宁盆地大堡子—西宁构造单元,也具有该地热类型的特征^[17]。

3 地热资源量计算

热储资源量的评价受自然条件、社会需要、成本和经济条件的制约,特别是成本和经济条件决定了计算热储的深度。同时,评价一个热田的热储资源,通常应包括流体的总量、温度、化学成分以及流体的赋存和开采技术条件等方面的综合评价^[18]。因

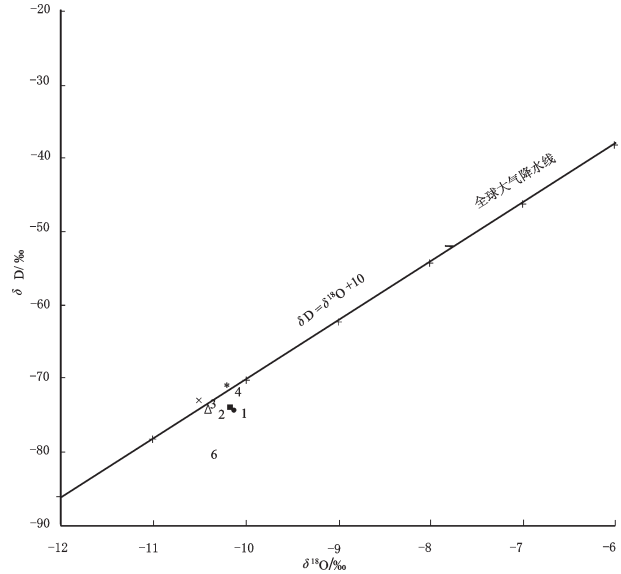


图4 西宁地热田不同水体 $\delta D-\delta^{18}O$ 关系(数字为表3中数据点)
 Fig. 4 $\delta D-\delta^{18}O$ relationship of different water bodies in the Xining geothermal field

此,西宁地热田地热资源评价仅评价白垩系热储层资源量。西宁地热田边界西边为解放村,东边到西

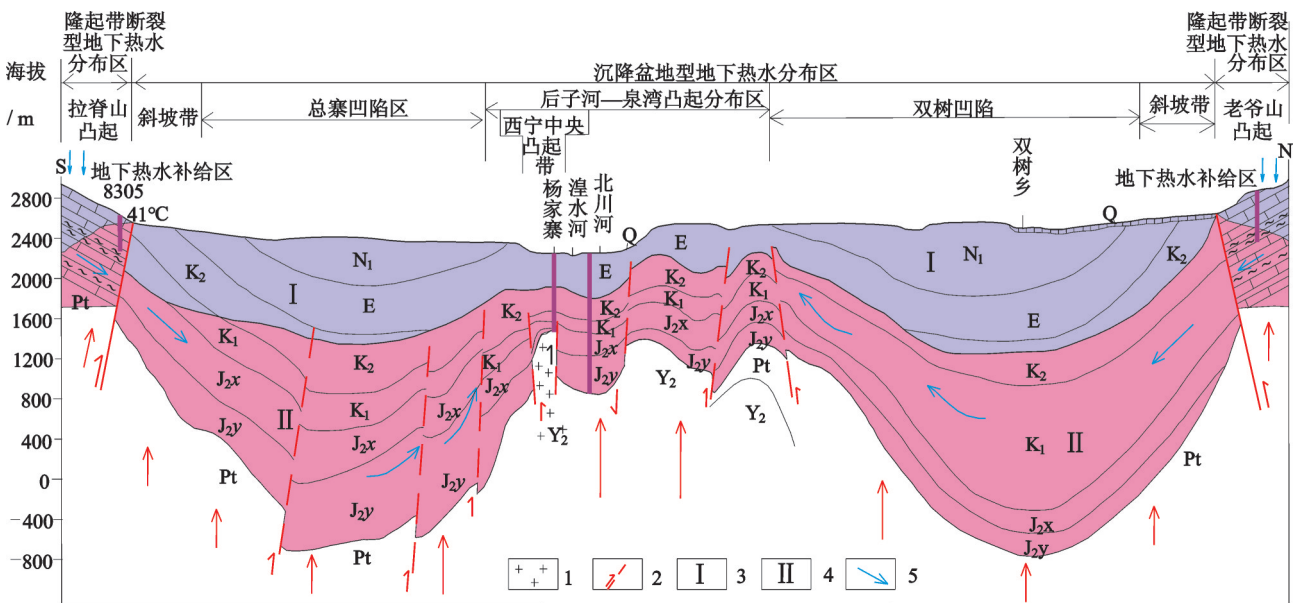


图5 西宁盆地中生界热储构造概念模型图^[11]
 1—变质侵入体;2—物探推断的断层;3—盖层;4—热储;5—地下热水径流方向;N—新近系;E—古近系;K₂—上白垩统;K₁—下白垩统;J_{2x}—中侏罗统享堂组;J_{2y}—中侏罗统窑街组;Pt—元古宇

Fig. 5 Conceptual model of Mesozoic—Cenozoic thermal reservoir structure in Xining basin^[11]
 1—Metamorphosed intrusion; 2—Geophysically inferred fault; 3—Cover; 4— Heat reservoir; 5— Flow direction of underground hot water; N—Neogene; E—Paleogene; K₂—Cretaceous; K₁— Lower Cretaceous; J_{2x}—Middle Jurassic Xiangtang Formation; J_{2y}—Middle Jurassic Yaojie Formation; Pt — Proterozoic

门口,南北两侧距西宁凸起地热边界较远,可视为无边界评价区,确定为以河谷南北两侧黄土丘陵为界。评价区面积为23.5 km²。

3.1 西宁地热田热量计算

热储中的热量利用《GB/T11615-2010》规范要求的热储法计算,西宁地热田内热储中储存的热量 9.343×10^{14} kJ。可回收热资源量约为 0.934×10^{14} kJ。

3.2 地热流体储存量计算

经计算西宁地热田热流体储存量为 10.3×10^8 m³。

3.3 地热流体可采量计算

西宁地热田可采水量:采用平均布井法计算,如果单井涌水量确定为2639.3 m³/d,区内布井6眼,西宁地热田每年可开采水量为 576.7×10^4 m³,每年开采热量为 1.12×10^{12} kJ,折合标准煤 3.78×10^4 t。按保证开采100年折算热能为35.2 MW,按地热田规模分级为中型低温地热田。

4 结 语

(1)西宁地热田蕴藏着丰富的中低温地热资源,具有以盆地传导型面状热储为主,兼有断裂对流型带状热储特征。

(2)西宁地热田地下水为碎屑岩类裂隙孔隙承压水;地下水阳离子均以Na⁺占绝对优势,阴离子以SO₄²⁻和Cl⁻含量最高,为盐水或卤水,属Cl⁻·SO₄-Na型水。热流体矿化度较高,一般为20~52 g/L。

(3)西宁地热田不同来源地下水的氢、氧同位素组成表明,地下水主要是由周边山区大气降水入渗补给形成。

(4)西宁地热田热流体富含特殊的微量元素对医疗皮肤病,关节炎等疾病有特殊的医疗效果,具有一定的医疗保健价值。为复合型矿泉水,属康复医疗型地热资源。

(5)西宁地热田内热储中储存的热量 9.34×10^{14} kJ,每年可开采水量为 576.7×10^4 m³,每年开采热量为 1.12×10^{12} kJ,折合标准煤 3.78×10^4 t。按保证开采100年,折算热能为35.2 MW,按地热田规模分级为中型低温地热田。

(6)地热资源开发利用将对深部热储温度场和地表生态环境等产生复杂影响,因此采用地热回灌技术是十分必要的^[19-20]。

(7)以监测为基础,以资源和环境保护为根本,

实行梯级开发、综合利用,最大限度开发利用地热资源^[21]。

参考文献(References):

- [1] 蔺文静, 刘志明, 王婉丽, 等. 中国地热资源及其潜力评估[J]. 中国地质, 2013, 40(1): 312-320.
Lin Wenjing, Liu Zhiming, Wang Wanli, et al. The assessment of geothermal resources potential of China[J]. Geology in China, 2013, 40 (1): 312-320 (in Chinese with English abstract).
- [2] 赵振, 罗银飞, 孟梦, 等. 青海省地热资源概况及勘查开发利用部署初步研究[J]. 青海环境, 2013, 23(3): 130-135.
Zhao Zhen, Luo Yinfei, Meng Meng, et al. Preliminary study of geothermal resources and its exploration development and utilization in Qinghai [J]. Journal of Qinghai Environment, 2013, 23 (3): 130-135(in Chinese with English abstract).
- [3] 黄汲清, 陈炳蔚. 中国及邻区特提斯海的演化[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
Huang Jiqing, Chen Bingyu. Tethys Evolution in China and Adjacent Regions[M]. Beijing: Science Press, 1987 (in Chinese with English abstract).
- [4] 刘训, 游国庆. 中国的板块构造区划[J]. 中国地质, 2015, 42(1): 1-17.
Liu Xun, You Guoqing. Tectonic regional subdivision of China in the light of plate theory[J]. Geology in China, 2015, 42(1): 1-17 (in Chinese with English abstract).
- [5] 高延林. 板块构造单元划分方法探讨——以青藏高原为例[J]. 青海地质, 1993, 2(1): 10-23.
Gao Yanlin. A method study on plate tectonic unit division —— a case study of Tibetan Plateau [J]. Qinghai Geology, 1993, 2(1): 10-23 (in Chinese with English abstract).
- [6] 张森琦, 许伟林, 严维德, 等. 西宁盆地地热系统[M]. 北京: 地质出版社, 2012.
Zhang Senqi, Xu Weilin, Yan Weide, et al. Geothermal System in Xining Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012 (in Chinese with English abstract).
- [7] 青海省地质矿产局. 青海省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1991:10-36
Qinghai Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional Geology of Qinghai Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991:10-36(in Chinese with English abstract).
- [8] 赵振, 罗银飞, 陈惠娟, 等. 青海省西宁市海湖新区体育中心地下水资源调查评价报告[R]. 青海省环境地质勘查局. 2013.
Zhao Zhen, Luo Yinfei, Chen Huijuan, et al. A Survey in Qinghai province Xining City Hai Lake District Sports Center of Underground Water Resources Assessment Report[R]. Qinghai Province Environmental Geological Exploration Bureau, 2013 (in Chinese with English abstract).
- [9] 王卫星, 李攻科, 李宏, 等. 河北汤泉地热流体水文地球化学特征

- 及其成因[J]. 中国地质, 2013, 40(6): 1935-1941.
- Wang Weixing, Li Gongke, Li Hong, et al. Hydrogeochemical characteristics and origin of the geothermal fluid in Tangquan area, Hebei Province [J]. *Geology in China*, 2013, 40 (6): 1935- 1941 (in Chinese with English abstract).
- [10] 李攻科, 王卫星, 李宏, 等. 河北汤泉地热田地温场分布及其控制因素研究[J]. 中国地质, 2014, 41(6): 2099-2109.
- Li Gongke, Wang Weixing, Li Hong, et al. Temperature distribution and controlling factors of the Tangquan geothermal field in Hebei Province [J]. *Geology in China*, 2014, 41 (6): 2099-2109(in Chinese with English abstract).
- [11] 王海波, 薛晓青, 邵景力, 等. 内蒙古临河市地热田水化学研究[J]. 内蒙古农业大学学报, 2013, 34(1): 102-104.
- Wang Haibo, Xue Xiaoqing, Shao Jingli, et al. Study of geochemical field chemistry of Inner Mongolia Linhe region[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University*, 2013, 34 (1): 102-104(in Chinese with English abstract).
- [12] 张森琦, 李惠娣, 许国成, 等. 青海西宁城南新区杜家庄地热田地下水的地球化学特征[J]. 现代地质, 2007, 21(1): 165-166.
- Zhang Senqi, Li Huidi, Xu Guocheng, et al. Geochemical characteristics of groundwater in the Dujiashuang geothermal field in the south of Xining, Qinghai[J]. *Geoscience*, 2007, 21 (1): 165-166 (in Chinese with English abstract).
- [13] 朱家玲, 王坤, 王东升. 环境同位素在研究地热资源形成过程中的应用[J]. 太阳能学报, 2008, 29(3): 265.
- Zhu Jialing, Wang Kun, Wang Dongsheng. Environmental isotope application on evaluation origin and causing of geothermal resources of[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2008, 29 (3): 265 (in Chinese with English abstract).
- [14] 郭晓东, 赵海卿. 珲春盆地地下水水化学特征分析[J]. 中国地质, 2014, 41(3): 1010-1016.
- Guo Xiaodong, Zhao Haiqing. Hydrochemical characteristics and correlation analysis of groundwater in Hunchun Basin [J]. *Geology in China*, 2014, 41 (3): 1010- 1016(in Chinese with English abstract).
- [15] 廖媛, 马腾, 陈柳竹, 等. 青海贵德盆地高砷低温地热水水化学特征[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(4): 123-127.
- Liao Yuan, Ma Teng, Chen Liuzhu, et al. Hydrochemistry of high-arsenic thermal groundwater of low- temperature in the Guide basin in Qinghai, China [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2013, 40(4): 123 -127(in Chinese with English abstract).
- [16] 张森琦, 李长辉, 许伟林, 等. 西宁盆地热储构造概念模型的建立[J]. 地质通报, 2008, 27(1): 126-136.
- Zhang Senqi, Li Changhui, Xu Weilin, et al. Construction of the conceptual model of thermal reservoir structure of the Xining basin, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(1): 126-136 (in Chinese with English abstract).
- [17] 王斌, 何世豪, 李百祥. 从地球物理场信息分析西宁盆地地热地质条件[J]. 西北地震学报, 2011, 33(2): 150-153.
- Wang Bin, He Shihao, Li Baixiang. Analysis on Geothermal Geological Condition of Xining Basin on the Basis of Characteristic of Geophysical Field[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2011, 33 (2): 150- 153(in Chinese with English abstract).
- [18] 李凯, 余岩, 金尚荣, 等. 本溪县汤池沟热田热储特征及资源量评价[J]. 辽宁地质, 2000, 17(4): 305-307.
- Li Kai, She Yan, Jin Shangrong, et al. Heat reservoir characteristics and resources evaluation of Tangchigou hot- water field in Benxi county [J]. *Liaoning Geology*, 2000, 17(4): 305-307 (in Chinese with English abstract).
- [19] 赵璐, 邹立, 罗湘赣, 等. 贵阳市乌当区地热田成因及水质特征分析[J]. 中国地质, 2011, 38(3): 724-730.
- Zhao Lu, Wu Li, Luo Xianggan, et al. An analysis of the genesis and water quality characteristics of the geothermal field in Wudang District, Guiyang [J] *Geology in China*, 2011, 38 (3): 724-730(in Chinese with English abstract).
- [20] 曾梅香, 田光辉, 赵越波, 等. 采灌条件下中低温热储温度场动态特征初探[J]. 中国地质, 2010, 37(1): 191-197.
- Zeng Meixiang, Tian Guanghui, Zhao Yuebo, et al. A tentative discussion on dynamic characteristics of the low- medium temperature geothermal reservoir field under the condition of exploitation-reinjection [J]. *Geology in China*, 2010, 37 (1): 191-197(in Chinese with English abstract).
- [21] 王奎峰. 山东省聊城市东部地热田地热资源特征[J]. 中国地质, 2009, 36(1): 194-202.
- Wang Kuifeng. Geothermal resources in the eastern Liaocheng geothermal field of Shandong Province [J]. *Geology in China*, 2009, 36 (1): 194-202 (in Chinese with English abstract).