

## 张掖盆地地热资源赋存特征及成因分析

尹政, 柳永刚, 张旭儒, 李玉山, 冯嘉兴

### An analysis of the endowment characteristics and geneses of geothermal resources in the Zhangye Basin

YIN Zheng, LIU Yonggang, ZHANG Xuru, LI Yushan, and FENG Jiaying

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202202050>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 四川广安铜锣山背斜热储性质及地热成因模式

A study of the characteristics of geothermal reservoir and genesis of thermal groundwater in the Tongluoshan anticline near Guang'an in east Sichuan

李明辉, 袁建飞, 黄从俊, 刘慧中, 郭镜 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 36-46

#### 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

#### 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

#### 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

Tracer test and geothermal resource quantity evaluation based on dynamic data in the Xiaotangshan area of Beijing

杨亚军, 丁桂伶, 徐巍, 李海京, 鲁鹤, 王雨石, 张俊华, 王翊虹 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 196-200

#### 川藏铁路康定隧址区地热水成因及其工程影响分析

An analysis of the genesis and engineering influence of geothermal water in the Kangding tunnel site of the Sichuan-Tibet Railway

张云辉, 李晓, 徐正宣, 常兴旺, 黄, 多吉 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 46-53

#### 胶东典型花岗岩热储地下水水化学特征及热储研究

A study of the hydrochemical characteristics and geothermal water of typical granite geothermal reservoir in the Jiaodong area

王晓翠, 孙海龙, 袁星芳 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 186-194



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202202050

尹政, 柳永刚, 张旭儒, 等. 张掖盆地地热资源赋存特征及成因分析 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(1): 168-178.

YIN Zheng, LIU Yonggang, ZHANG Xuru, *et al.* An analysis of the endowment characteristics and geneses of geothermal resources in the Zhangye Basin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(1): 168-178.

## 张掖盆地地热资源赋存特征及成因分析

尹政<sup>1,2</sup>, 柳永刚<sup>3</sup>, 张旭儒<sup>1,2</sup>, 李玉山<sup>1,2</sup>, 冯嘉兴<sup>1,2</sup>

(1. 甘肃省地质矿产勘查开发局水文地质工程地质勘察院, 甘肃 张掖 734000; 2. 甘肃省地下水工程及地热资源重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 3. 甘肃省自然资源厅, 甘肃 兰州 730013)

**摘要:** 张掖盆地地处甘肃省河西走廊黑河流域中游地区, 地势南东高北西低。已有勘探资料显示, 张掖盆地赋存丰富的水热型地热资源。通过研究该区域地球物理勘探、钻探、地温测量及水文地球化学等成果资料, 分析了张掖盆地地热资源赋存特征, 探讨了其成因模式。张掖盆地地热田属沉积盆地型中低温地热田, 热储为呈层状分布的新近系白杨河组砂岩、砂砾岩, 选择钾镁地球化学温标计算热储温度为 47 ~ 82 °C, 盖层为新近系上新统疏勒河组泥岩及第四系松散地层; 地热水类型主要为碎屑岩类孔隙水, 根据氢氧同位素特征推断其主要补给来源为南部祁连山区大气降水; 祁连山北缘深大断裂和盆地内 NNW 向基底断裂是地热流体深循环良好的导水通道, 地下水接受补给后沿导水断裂带或岩层孔隙裂隙运移, 在深部热传导的增温作用下, 赋存于碎屑岩类孔隙之中形成了本区的地热资源。水质分析结果表明: 本区地热水属于溶滤型的陆相沉积水, 水化学类型为 Cl-SO<sub>4</sub>-Na 型, F<sup>-</sup>、SiO<sub>2</sub>、溶解性总固体、总硬度含量随水温的升高而增大; 区内地热水<sup>3</sup>H 值普遍小于 2.0 TU, 说明形成年代较早; <sup>14</sup>C 分析结果进一步证实, 区域地热水形成年龄超过 20 ka, 反映出地热流体补给路径长、径流缓慢的特点。研究成果可为张掖盆地地热资源勘查和开发利用提供重要参考。

**关键词:** 地热资源; 热储; 水文地球化学; 地热成因; 地下水年龄; 张掖盆地

中图分类号: P314

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)01-0168-11

## An analysis of the endowment characteristics and geneses of geothermal resources in the Zhangye Basin

YIN Zheng<sup>1,2</sup>, LIU Yonggang<sup>3</sup>, ZHANG Xuru<sup>1,2</sup>, LI Yushan<sup>1,2</sup>, FENG Jiaying<sup>1,2</sup>

(1. *Institute of Hydrogeological and Engineering Geology, Gansu Provincial Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Zhangye, Gansu 734000, China*; 2. *Gansu Key Laboratory of Groundwater Engineering and Geothermal Resources, Lanzhou, Gansu 730050, China*; 3. *Department of Natural Resources of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730013, China*)

**Abstract:** As a part of Hexi Corridor in Gansu Province, the Zhangye Basin is located in the middle reaches of the Heihe River Basin, with high topography in the southeast and low topography in the northwest. The existing exploration data show that the Zhangye basin is rich in hydrothermal geothermal resources. Based on the study of

收稿日期: 2022-02-28; 修订日期: 2022-05-07

投稿网址: [www.swdgedz.com](http://www.swdgedz.com)

基金项目: 第二次青藏科考“重大工程扰动灾害及风险”项目(2019QZKK0904); 甘肃省 2022 年省级基础地质调查项目(202241); 甘肃省地矿局 2021 年度创新资金项目(2021CX08)

第一作者: 尹政(1969-), 男, 本科, 正高级工程师, 主要从事地下水资源勘查、环境地质及地热资源评价等工作。

E-mail: [zyz8029@163.com](mailto:zyz8029@163.com)

通讯作者: 柳永刚(1970-), 男, 本科, 正高级工程师, 主要从事地质项目技术管理及矿床研究。E-mail: [527709711@qq.com](mailto:527709711@qq.com)

geophysical exploration, geothermal drilling, geo-temperature measurement and hydrogeochemistry, this paper analyzes the occurrence characteristics of geothermal resources and discusses the genetic mode in Zhangye Basin. The geothermal field in the Zhangye basin belongs to the sedimentary basin type of low-medium temperature. The geothermal reservoir is composed of sandstone and glutenite of Neogene Baiyanghe Formation with layered distribution. Temperature of the geothermal reservoir ranges from 47 to 82 °C calculated by using the potassium magnesium geochemical temperature standard. The caprock consists of mudstone of Neogene Shulehe Formation and Quaternary unconsolidated sediments. The geothermal water type is mainly clastic pore water. The characteristics of hydrogen and oxygen isotope indicate that the main recharge source is atmospheric precipitation in the southern Qilian Mountains. The deep faults in the northern margin of Qilian Mountains and NNW-trending basement faults in the basin are good conduits for deep circulation of the geothermal fluids. After receiving recharge, groundwater migrates along the water-conducting fault zones or rock pore fractures. Heating by the deep heat conduction, it occurs in the pores of clastic rocks and forms geothermal resources in this area. The results of hydrochemical analyses show that the geothermal water in this area belongs to continental sedimentary water containing dissolved water in rock salt formation, and the hydrochemical type is of  $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{—Na}$ . The contents of fluorine,  $\text{SiO}_2$ , total dissolved solids and total hardness increase with the increasing water temperature. The tritium value of hot water in the area is generally less than 2.0 TU, indicating that the formation age is relatively early. The results of carbon-14 analysis further confirm that the formation age of the regional geothermal water is more than 20,000 years, reflecting the characteristics of a long geothermal fluid supply path and slow runoff. The research results can provide important reference for exploration and utilization of geothermal resources in the Zhangye Basin.

**Keywords:** geothermal resources; reservoir; hydrogeochemistry; geothermal genesis; groundwater age; Zhangye Basin

作为一种可再生清洁能源,地热资源具有分布广泛、稳定可靠、易于利用及经济等特点<sup>[1-3]</sup>,对绿色、可持续发展极具现实意义,受到世界各国和研究者普遍关注。我国是世界上地热资源储量较大的国家之一,尤其是中低温水热型地热资源丰富,沉积盆地型地热资源由于储集空间广、厚度大,其资源量约占水热型地热资源总量的 89%<sup>[4]</sup>,开发潜力巨大。合理利用地热资源对于优化能源结构,缓解能源危机<sup>[5-6]</sup>,助力中国实现 2030 年前“碳达峰”、2060 年前“碳中和”战略目标有望发挥重要作用。

我国已有地热资源研究成果丰硕,近年来高温地热研究主要集中在包括青藏<sup>[7-8]</sup>、川滇<sup>[9-10]</sup>、青海西宁<sup>[11]</sup>及新疆西部<sup>[12-13]</sup>等地区,中低温地热研究也在全国多个地区展开<sup>[14-17]</sup>。位于甘肃河西走廊中段的张掖盆地,自 2016 年以来,相继施工了 8 眼地热勘探井,井口出水温度达 45~78 °C,出水量 1 348~6 192 m<sup>3</sup>/d,勘探成果证实张掖盆地赋存丰富的水热型地热资源<sup>[18]</sup>。尽管地热资源勘查成果取得了较大突破,但尚未针对张掖盆地地热田的边界条件、热储特征及地下热水的形成、分布和运移规律等开展系统的研究。

河西走廊是中国西北地区重要的生态屏障,也是西北内陆的交通、能源、物流枢纽通道,以及丝绸之路经济带的重要路段,战略地位显著,在推动生态文明建设、推进西部大开发形成新格局中具有十分重要的作用。地热资源的勘探、开发和利用,对优化当地能源结构,促进绿色发展具有重要意义。本文通过资料收集、地球物理勘查、地热勘探、勘探井地温测量以及水文地球化学分析等手段,系统分析张掖盆地地热田地热地质特征,探讨其地热成因机制,以期对该地热田今后的地热资源勘查和开发利用提供科学依据。

## 1 区域地质背景

河西走廊地区位于青藏高原东北缘,是以前震旦纪及古生代褶皱为基底的中新生代断陷—坳陷盆地。从区域地质构造及演化过程看,河西走廊盆地发育在加里东褶皱基底之上,经晚侏罗世—早白垩世的拉张翘倾运动形成的箕状断陷,被新近纪挤压坳陷所覆盖,第四纪印度次大陆强烈推挤欧亚大陆,使祁连山强烈向河西走廊逆掩、逆冲,第四系叠加在坳陷构造层之上,最终形成了现今的盆地构造格局<sup>[19]</sup>。张掖

盆地属于河西走廊的次级沉积型盆地,受南北两侧祁连山北缘和龙首山南缘右行走滑逆冲断裂控制,盆地几何形态大致呈菱形,长轴呈 NWW 向展布<sup>[20]</sup>,属张扭性盆地,有利于地热流体的运移和赋存。

张掖盆地中生界下伏结晶基底褶皱形态变化较大,凹陷与隆起相间分布,次级构造较发育,严格控制着中生界地层的空间分布及形态特征,进而影响上覆新近系中新统主要热储的地热增温系统。根据盆地基底的起伏特征,可将盆地分为 3 个一级构造单元(图 1),即西部隆起带、东部斜坡带、中央凹陷带<sup>[20-21]</sup>。

西部隆起带位于祁连山前覆盖区,面积 1 250 km<sup>2</sup>,结晶基底埋深 2 500 m 左右,中生代地层薄,推测基岩主要由奥陶系、志留系组成,局部为石炭系、二叠系;东部斜坡带位于中央凹陷带以东,由永固凸起和大黄山隆起组成,面积 1 700 km<sup>2</sup>,结晶基底最大埋藏深度约 2 500 m,由南东向北西抬升,构成单斜构造;中央凹陷带位于西部隆起带与东部斜坡带之间,面积 2 100 km<sup>2</sup>,结晶基底埋藏深度 5 000 ~ 5 800 m,根据基底形态,又可分为 4 个二级构造单元:张掖凹陷、朝元寺凹陷、三工闸低凸起和李寨凸起。

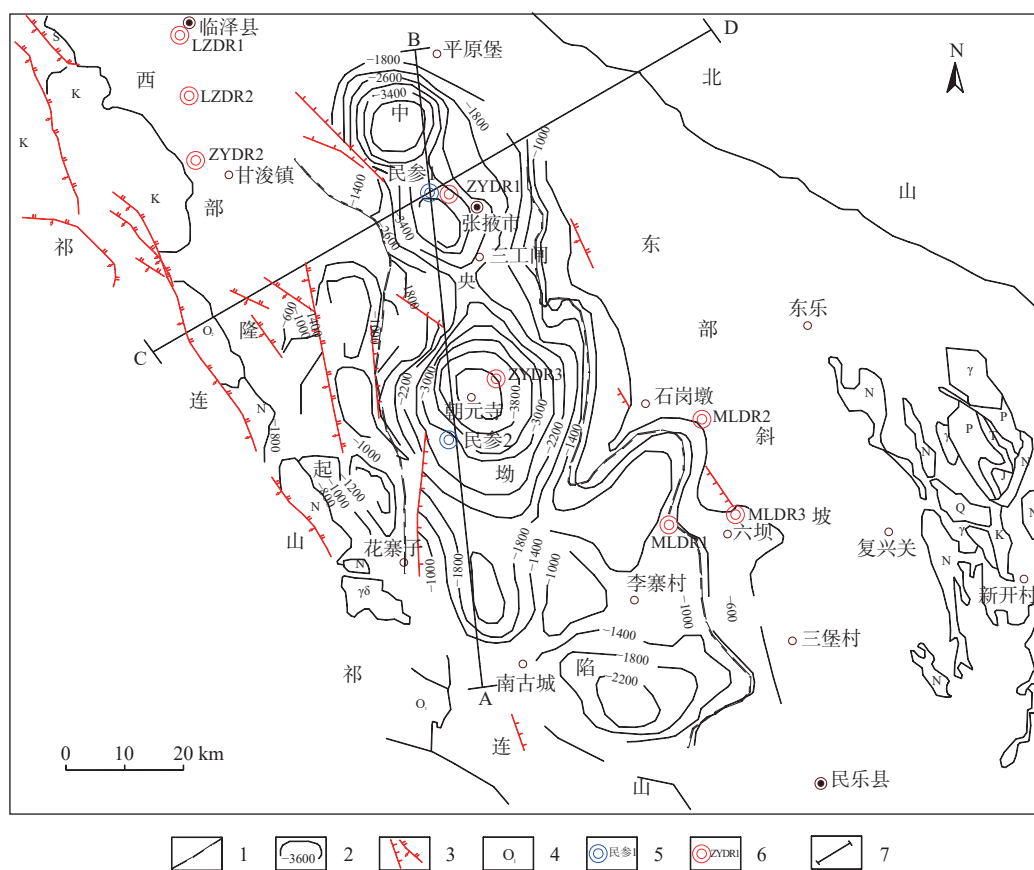


图 1 张掖盆地地震推断构造图 (改编自文献 [20])

Fig. 1 Seismic inferred structure in the Zhangye Basin ( modified from Ref. [20] )

1—构造分区线; 2—基底高程等值线; 3—断层; 4—地层时代; 5—石油参数井及编号; 6—地热勘探井及编号; 7—剖面线及编号

已有勘探资料证实,张掖盆地地层自上而下为第四系、新近系、白垩系及古生界地层。其中,新近系属内陆盆地红色碎屑岩建造,岩性为泥岩、砂质泥岩、砂砾岩和砾岩等,分为上新统疏勒河组(N<sub>2s</sub>)和中新统白杨河组(N<sub>1b</sub>),地层沉积连续,由盆地中心至边缘逐渐变薄,中心厚度达 800 ~ 1 000 m,至盆地边缘地带厚度为 500 ~ 600 m。盆地热储为中生界上覆的新近系白杨河组砂岩、砂砾岩(图 2)。

## 2 数据来源与研究方法

为分析和进一步查明张掖盆地地热资源赋存条件及分布特征,本次主要采用资料收集、地球物理勘查、勘探井地温测量、水文地球化学分析等方法。

本次研究充分收集了区域大量的相关资料(表 1),主要有:(1)石油部门在张掖盆地完成的参数井(民参 1、民参 2)勘探资料和石油地球物理勘查资料(包括地



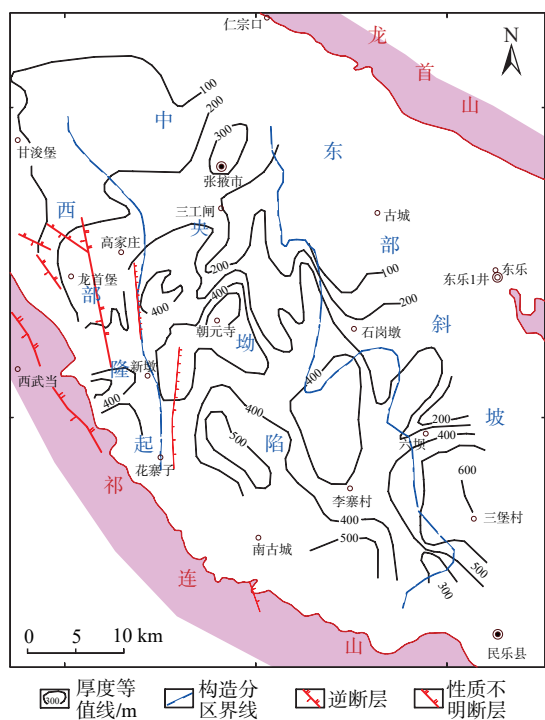


图 3 白杨河组间泉子段厚度等值线图  
(改编自文献 [20])

Fig. 3 Thickness contour map of the Quanzi section of the Baiyanghe Formation (modified from Ref. [20])

井白杨河组下部间泉子段埋深位置 1 630.0 ~ 1 804.5 m, 厚度达 174.5 m, 经测试分析, 其饱和状态孔隙率为 22.2%, 饱和含水率为 5.2%<sup>[7]</sup>(表 2)。

### 3.2 地温梯度

已有热响应试验显示, 张掖盆地恒温带深度约 30 m, 恒温带地温 7.6 °C。由于盆地结晶基底埋深较大, 受上覆孔隙裂隙岩层径流作用影响, 导致恒温带以下地温梯度偏低, 一般为 2.00 ~ 2.67 °C/100 m。热储层岩性相同, 受热储层埋藏深度、盖层厚度和基底形态、岩性及构造的影响, 地热井热储在垂向上的测温数据相差也较大。根据张掖盆地现有深井地温数据(表 2), 盆地西部隆起带临泽县城南部 LZDR1 井平均地温梯度 2.58 °C/100 m, 在钻遇到花岗岩后地温梯度未显异常; 盆地西南部隆起带甘浚 ZYDR2 地热井

平均为 2.04 °C/100 m; 中央拗陷中部滨河新区民参 1 井、ZYDR1 井一带平均地温梯度为 2.32 ~ 2.56 °C/100 m; 中央拗陷中部沙漠体育公园 ZYDR3 井地热井至南东民乐新天镇 MLDR1 井一带平均地温梯度为 2.43 ~ 2.67 °C/100 m, MLDR1 井在钻遇到花岗岩后地温梯度略有增长。

构造形态、基底起伏、岩浆活动、岩性、盖层厚度、褶皱、断层、深层地下水的运动等都是影响地温场的重要因素<sup>[22]</sup>。分析具有代表性的甘州区滨河新区 ZYDR1 孔地温测量资料, 地热增温率为 2.32 °C/100 m (图 4), 1 200 ~ 2 300 m 井段地热增温率较其他井段要低, 为 42.9 ~ 55.3 °C, 平均地温梯度为 1.35 °C/100 m, 推测该层段在传导热流场中叠加了地下水的对流作用, 这与测井解译的主要热储段(1 225 ~ 2 290 m)埋深基本一致<sup>[23]</sup>。

### 3.3 地热水地球化学特征

#### 3.3.1 地下热水常规组分

张掖盆地地下热水 pH 值 7.06 ~ 8.52, 平均 7.49。地下热水含有普通地下水的各种成分, 阳离子中 Na<sup>+</sup> 占优势, 阴离子中 Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 占优势。根据舒卡列夫分类方法, 考虑毫克当量百分数大于 25% 的离子, 张掖盆地地下热水阴离子分别为 Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, 阳离子仅为 Na<sup>+</sup>, 地热流体水化学类型基本一致, 为 Cl·SO<sub>4</sub>-Na 型。另外, 根据 Piper 水化学类型三线图(图 5)可知, 张掖盆地地热流体全部投点在较小区域内, 说明各地热井地热水的热储位置、溶滤特征、补径排条件具有一致性。

分析热储层中矿物成分钠盐可能较丰富, 其溶解度随温度升高而增大; Cl<sup>-</sup> 主要来源地下水流经含氯矿物岩层(NaCl、MgCl<sub>2</sub>、CaCl<sub>2</sub> 等)而聚集的, Cl<sup>-</sup> 不容易被吸附而大量赋存于地下水中, 张掖盆地的地下热水也显示出了这一特征; SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 是地下水流经含石膏矿物的岩石时溶滤硫酸盐形成的<sup>[24]</sup>。在地下水中很多组分彼此存在着一定的共生关系, 两种组分在数量上的比例关系, 称为比例系数, 利用比例系数可以判断地

表 2 张掖盆地地热勘探孔孔隙型热储统计表

Table 2 Statistics of geothermal reservoirs of pore type tapped by geothermal exploration holes in the Zhangye Basin

孔号	位置	井深/m	水头埋深/m	孔隙型热储岩性	热储底界埋深/m	孔隙型热储总厚度/m	热储底界测温/°C
LZDR1	临泽县城南部	1 500.59	62.00	砂岩、砂砾岩	1 004.40	134.55	40.00
ZYDR1	甘州区滨河新区	2 601.22	16.35	砂岩、砂砾岩	1 804.50	174.50	49.70
ZYDR2	甘州区甘浚镇	2 053.08	212.00	砂岩、砂砾岩	1 509.10	165.40	41.50
ZYDR3	沙漠体育公园	2 174.00	147.00	砂岩、砂砾岩	2 020.00	175.48	58.64
MLDR1	民乐县新天镇	2 269.18	69.51	砂岩、砂砾岩	2 188.00	193.05	64.60

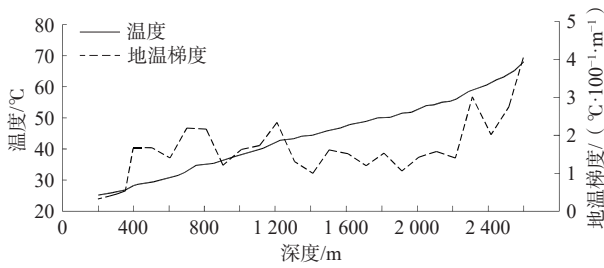


图 4 滨河新区 ZYDR1 井测温曲线

Fig. 4 Temperature measurements of ZYDR1 well in the Binhe new area

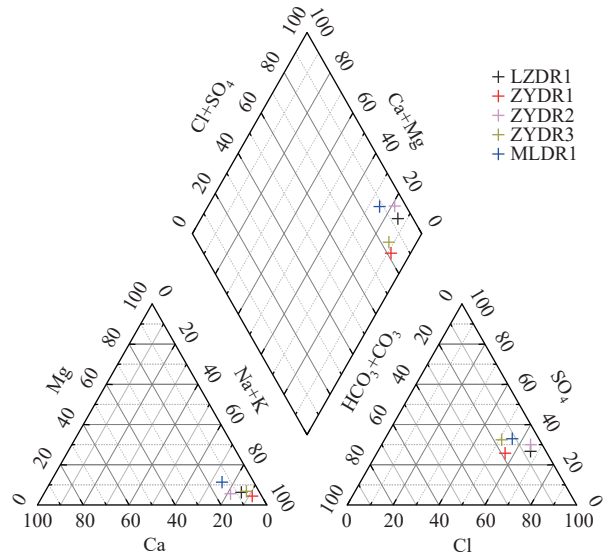


图 5 Piper 地热水水化学类型三线图

Fig. 5 Piper trilinear diagram showing the hydrochemical types of geothermal waters

下水的成因、进行水化学分类及水化学找矿等。通常,  $\rho(\text{Cl})/\rho(\text{Br})$  ( $\rho$  为质量浓度) 大于 300 属于溶滤岩盐形成的溶滤水; 小于 300 时说明水中 Br 富集, 属古埋藏型海水; 等于 300 属于大洋水<sup>[25]</sup>。标准海水的  $\gamma\text{Na}/\gamma\text{Cl}$  (离子毫克当量浓度比) 平均值为 0.85, 海相沉积水的  $\gamma\text{Na}/\gamma\text{Cl}$  一般小于 0.85, 含岩盐地层溶滤水的  $\gamma\text{Na}/\gamma\text{Cl}$  接近于 1.0<sup>[26]</sup>。张掖盆地地热流体的  $\rho(\text{Cl})/\rho(\text{Br})$  最小

为 605, 远大于 300;  $\gamma\text{Na}/\gamma\text{Cl}$  介于 0.79 ~ 1.09, 平均为 0.92, 可认为研究区地热水主要为溶滤型陆相沉积水。

### 3.3.2 地下热水特征组分

按照理疗热矿水水质标准进行评价, 热水的偏硅酸、偏硼酸、氟离子含量较高, 为热矿水的主要特征组分, 可以达到理疗热矿水的矿水浓度或命名浓度。5 眼勘探井地热水中, 偏硅酸质量浓度为 28.36 ~ 59.80 mg/L, 偏硼酸为 3.15 ~ 24.10 mg/L, 氟离子为 1.43 ~ 3.60 mg/L。F<sup>-</sup>、SiO<sub>2</sub> 质量浓度与水温大致呈正相关关系(表 3), 这主要是由于温度对溶滤作用的影响, 即热矿水中氟化物、硅酸盐的溶解度随温度的升高而增大。地热水水化学特征也反映出了其循环深度较深, 围岩体中硅酸盐、硼酸盐矿物较丰富, 水文地球化学环境也有利于偏硅酸、偏硼酸、氟离子运移<sup>[27]</sup>。

### 3.3.3 地下热水同位素特征

#### (1) 氢氧同位素特征

张掖盆地地下热水  $\delta\text{D}$  与  $\delta^{18}\text{O}$  值变化范围不大(表 4),  $\delta\text{D}$  为 -74‰ ~ -77‰,  $\delta^{18}\text{O}$  为 -9.5‰ ~ -10.5‰。黄锦忠等<sup>[28]</sup> 在张掖盆地开展了较多的大气降水的氢氧同位素研究, 建立了张掖地区的大气降水曲线, 利用 IAEA 的稳定同位素数据线性回归求得张掖地区的大气降水线方程为:  $\delta\text{D}=6.76\delta^{18}\text{O}-4.50$ , 该曲线  $R^2=0.94$ , 可信度高, 可将地下热水的  $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$  值绘制在该大气降水线曲线图上, 从图上可看出(图 6), 地热水样点大多落在降水线附近, 这表明本区地下热水补给来源主要为大气降水<sup>[29-30]</sup>。

#### (2) 放射性同位素(<sup>3</sup>H、<sup>14</sup>C)特征

放射性同位素<sup>3</sup>H, 半衰期为 12.43 a, 在过去的 50 a 里被广泛应用于解决地下水年龄等相关问题, 由于其半衰期短, 一般适用于确定数年至 50 a 的地下水年龄。<sup>14</sup>C 半衰期为 (5 730±40) a, 常被用来测定介于  $2 \times 10^3 \sim 6 \times 10^4$  a 的古地下水年龄。自 1953 年核爆试验后, 大量<sup>3</sup>H 进入大气层, 并随降水进入到地下系统中, 可以根据<sup>3</sup>H 含量的大小判断水的新老。<sup>3</sup>H 含量很低的水

表 3 张掖盆地地下热水水化学分析结果

Table 3 Hydrochemical analyses of geothermal waters in the Zhangye Basin

孔号	温度 /°C	TDS / (mg·L <sup>-1</sup> )	总硬度 / (mg·L <sup>-1</sup> )	pH	$\rho$ / (mg·L <sup>-1</sup> )																	
					K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>+</sup>	Mg <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	F <sup>-</sup>	偏硅酸	偏硼酸	锶	锂	硒	铁	溴	游离 CO <sub>2</sub>
LZDR1	45	3 432	374.8	7.6	8.0	1 044	84.2	39.9	0	217.1	1 293	701.6	6.2	1.4	28.36	12.0	5.84	0.23	0.001	0.06	1.16	6.98
ZYDR1	56	4 497	286.7	8.5	13.7	1 409	56.2	35.6	23.8	743.0	1 331	828.0	3.7	2.1	35.4	20.2	3.77	0.62	<0.002	0.02	2.20	8.40
ZYDR2	46	3 513	509.4	7.6	12.1	1 017	142.9	37.0	0	167.5	1 285	804.6	3.5	1.9	31.1	16.0	5.41	0.87	<0.001	0.33	0.77	7.63
ZYDR3	76	5 427	487.9	7.1	46.0	1 586	88.5	64.8	0	773.1	1 449	1 242.0	29.2	3.5	64.2	26.3	5.59	1.48	<0.002	0.58	1.40	51.80
MLDR1	77	5 810	1 131.0	7.7	61.7	1 522	250.0	123.0	0	596.0	1 754	1 408.0	37.2	3.6	59.8	3.2	10.80	1.04	0.027	<0.02	<0.01	106.00

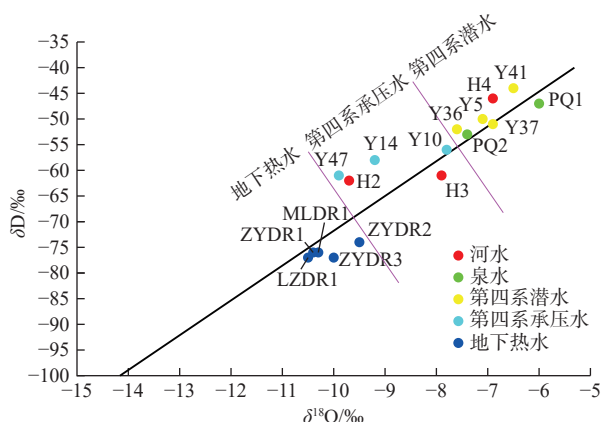


图 6 张掖城区及外围部分水样  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  与 H-Craigh 降水直线关系图

Fig. 6 Plot of  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  in water samples in the city of Zhangye and nearby area

表 4 张掖盆地水样氢、氧同位素分析结果

Table 4 Results of hydrogen and oxygen isotope analyses of geothermal water in the Zhangye Basin

编号	位置	地下水类型	$\delta^{18}O/‰$	$\delta D/‰$	$^3H/TU$
H2	鹰落峡	河水	-9.7	-62	58
H3	新河大桥	河水	-7.9	-61	51
H4	乌江大桥	河水	-6.9	-46	49
PQ1	山丹河	泉水	-6.0	-47	55
PQ2	乌江四社	泉水	-7.4	-53	51
Y36	张掖龙渠	潜水	-7.6	-52	55
Y37	张掖甘浚	潜水	-6.9	-51	65
Y5	张掖新墩	潜水	-7.1	-50	57
Y41	张掖大满	潜水	-6.5	-44	47
Y10	张掖城区	承压水	-7.8	-56	39
Y11	张掖城区	承压水	-9.2	-63	21
Y14	张掖城区	承压水	-9.2	-58	16
Y47	张掖乌江	承压水	-9.9	-61	20
LZDR1	临泽沙河	地下热水	-10.5	-77	1.5±0.7
ZYDR1	张掖滨河新区	地下热水	-10.4	-76	<1.0
ZYDR2	张掖甘浚	地下热水	-9.5	-74	<0.5
ZYDR3	张掖党寨	地下热水	-10.0	-77	1.3±0.5
MLDR1	民乐新天镇	地下热水	-10.3	-76	<0.5

(如 <2 TU), 可以肯定是 1953 年以前形成的地下水“老水”,  $^3H$  含量高的地下水, 则必定包含有 1953 年后入渗补给的“新水”<sup>[31]</sup>。研究区水样的  $^3H$  值见表 4, 可以看出地下热水的  $^3H$  值普遍小于 2 TU, 说明地热水为 1953 年以前形成的地下水。另外, 据 MLDR1 井、MLDR3 井、ZYDR3 井地下热水  $^{14}C$  分析结果, 现代碳百分数分别为 (6.06±0.67)%、(0.78±0.45)%、(2.89±0.95)%, 分析其表观年龄分别为 (23.17±0.92) ka、(40.08±4.67) ka、(29.31±2.72) ka, 这进一步证实了研究区地热水属于古地下水, 形成年龄超过 20 ka。

## 4 讨论与分析

### 4.1 热储构造及热源分析

已有资料表明, 张掖盆地地热田属呈层状分布的盆地型中低温地热田, 热储以新近系中新统白杨河组间泉子段的砂岩、砂砾岩为主, 属碎屑岩类孔隙型热储, 其底界面埋深一般为 1 004.40 ~ 2 188.00 m。热储层上部为大厚度的泥岩构成盖层, 起到了非常好的保温作用, 热源来自深部地壳或上地幔的热传导, 地下热水温度随热储埋藏深度而升高, 即地下深部的热能通过上覆岩层向上传导, 对围岩地层进行加热。LZDR1 井、ZYDR2 井、MLDR1 井虽钻遇了加里东期花岗岩, 但其时代较早, 岩浆余热已消失殆尽, 测温曲线也显示花岗岩对现今地温场基本无影响, 不构成附加热源。故地下热水的形成是在正常的大地热流背景下, 地下水在深循环过程中吸取围岩热量并与围岩发生水-岩相互作用, 同位素组成、水化学成分发生改变, 形成较高温度的热水。

综合分析认为, 张掖盆地总体上是在以热传导为主的大地热流作用机制下形成的中低温地热资源, 但在主要热储层中叠加了地下水的对流作用。

### 4.2 热储温度及循环深度分析

根据张掖盆地地热形成的地质条件和地热水化学特征, 结合热温标适用条件<sup>[32]</sup>, 选择钾镁地球化学温标对地热异常区热储温度进行估算。计算公式如下:

$$T = \frac{4410}{13.95 - \lg(C_1^+/C_2)} - 273.15 \quad (1)$$

式中:  $T$ ——热储温度/°C;

$C_1^+$ ——热水中  $K^+$  的质量浓度/( $mg \cdot L^{-1}$ );

$C_2$ ——热水中  $Mg^{2+}$  的质量浓度/( $mg \cdot L^{-1}$ )。

$K^+$ 、 $Mg^{2+}$  的质量浓度见表 5。经计算, 张掖盆地已有地热井热储温度为 47.82 ~ 81.49 °C, 结合井口实际出水温度, 可以判断张掖盆地地热田地下热水的深部热储为中低温热储, 推测深部热储温度在 47 ~ 82 °C 之间(表 5)。

根据区内地热井测温资料, 张掖盆地地热异常区地热增温梯度为 2.04 ~ 2.67 °C/100 m, 恒温带深度约 30 m, 恒温带地温 7.6 °C。通过式(2)可确定地下热水的循环深度<sup>[33]</sup>:

$$Z = \frac{T - T_0}{G} + Z_0 \quad (2)$$

式中:  $Z$ ——地热水循环深度/m;

$T$ ——热储温度/°C;



表 5 张掖盆地地下水热储温度估算

Table 5 Estimated temperature of geothermal reservoirs in the Zhangye Basin

孔号	LZDR1	ZYDR1	ZYDR2	ZYDR3	MLDR1
$\rho(K^+)/(mg \cdot L^{-1})$	8.05	13.73	12.06	46.04	61.70
$\rho(Mg^{2+})/(mg \cdot L^{-1})$	39.92	35.58	37.04	64.80	123.00
实测井口温度/°C	45.00	56.00	46.00	78.00	77.00
估算热储温度/°C	47.82	60.29	57.04	81.49	80.80

$T_0$ ——恒温带温度/°C;

$G$ ——地热增温梯度/(°C·100<sup>-1</sup>·m<sup>-1</sup>);

$Z_0$ ——恒温带平均深度/m。

经计算张掖盆地地热田地下热水的循环深度为 1 588.91 ~ 2 813.27 m, 与已有勘探孔热储底界面比较深 500 ~ 800 m(表 6), 说明热储层下部一定深度裂隙带内尚有地下热水的循环。

表 6 张掖盆地地热勘探孔推测热水循环深度

Table 6 Estimated circulation depth of geothermal water in geothermal exploration holes in the Zhangye Basin

孔号	孔深/m	测温深度/m	测温/°C	地温梯度/(°C·100 <sup>-1</sup> ·m <sup>-1</sup> )	热储底界埋深/m	推测热水循环深度/m
LZDR1	1 500.59	1 500.00	45.60	2.58	1 004.40	1 588.91
ZYDR1	2 601.22	2 600.00	67.14	2.32	1 804.50	2 301.12
ZYDR2	2 053.08	2 000.00	47.70	2.04	1 509.10	2 453.53
ZYDR3	2 174.00	2 120.00	63.40	2.67	2 020.00	2 797.42
MLDR1	2 269.18	2 200.00	64.60	2.63	2 188.00	2 813.27

### 4.3 地热流体补给来源及通道

根据对地热井地热流体氢、氧稳定同位素分析结果, 张掖盆地地下水补给来源主要为大气降水。张掖盆地南部祁连山区降水量充沛, 高海拔地带年降水量可达 800 mm 左右, 区域构造运动强烈, 深大断裂及次级断裂数量较多, 加上山区水文网发育, 河流切割作用强烈, 对地下水的形成、分布、赋存和运移产生着深刻的影响。张掖盆地属于祁连地槽褶皱系北缘的中新生代凹陷盆地, 祁连山区较盆地热储层位置高 3 000 ~ 4 000 m, 具有较好的补给高程优势, 而北山区高程低, 与盆地热储层高差小, 且降水量仅几十毫米, 推测地下水补给来源主要为南部祁连山区降水。

祁连山北缘深大断裂和盆地内 NNW 向基底断裂是地热流体深循环的良好导水通道。祁连山区大气降水和冰雪融水沿破碎岩体、水文网的入渗后形

成基岩裂隙水, 通过北缘深大断裂破碎带补给到盆地深部, 在深部热传导的作用下地下水逐渐增温, 并储存在孔隙发育、渗透性较好的热储层中, 在水头压力差的作用下由 SE 向 NW 径流, 水力坡度为 2.20% 左右(图 7)。研究区地下水属于万年尺度的古地下水, 反映出地热流体补给来源远, 径流速度缓慢这一特点。

## 5 结论

(1) 张掖盆地地热田属呈层状分布的沉积盆地型中低温地热田, 热储为新近系中新统白杨河组碎屑岩类孔隙型热储, 热源来自深部地壳或上地幔的热传导; 地热系统中地热水系在地下水深循环过程中, 在正常的大地热流值背景下被围岩逐渐加热所致; 初步分析, 地下水温度大致随热储埋藏深度的加深而升高。

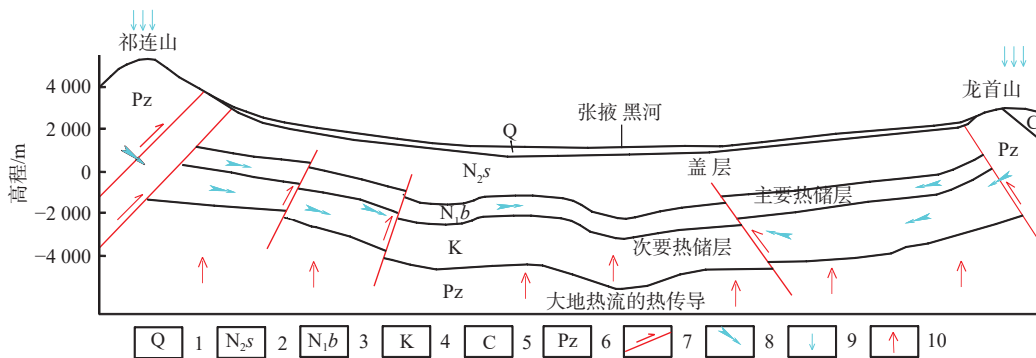


图 7 张掖盆地地热田概念模型示意图

Fig. 7 Schematic diagram of conceptual model of the geothermal field in the Zhangye Basin

1—第四系; 2—新近系上新统疏勒河组; 3—新近系中新统白杨河组; 4—白垩系; 5—石炭系; 6—古生界; 7—断裂及移动方向; 8—深部地下水运动方向; 9—降水; 10—大地热流传导

(2)张掖盆地地热流体水化学类型为  $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{—Na}$  型,  $\text{F}^-$ 、 $\text{SiO}_2$  质量浓度与水温大致呈正相关关系,反映出富含  $\text{F}^-$ 、 $\text{SiO}_2$  的地下热水由地壳深部沿断裂构造向上运移到浅部,并对外横向扩散、渗透的过程;根据地热流体的  $\rho(\text{Cl})/\rho(\text{Br})$ 、 $\gamma_{\text{Na}}/\gamma_{\text{Cl}}$ (离子毫克当量浓度比)判断,该地热水主要为溶滤型的陆相沉积水。

(3)同位素研究表明,张掖盆地地下热水为大气降水补给,属大气成因,区内地下热水  $^3\text{H}$  值较低,均小于 2 TU,说明形成时间较早; $^{14}\text{C}$  分析结果证实地热水形成年龄超过 20 ka,其补给高程和准确的补给年龄尚需开展进一步的研究。

(4)根据张掖盆地地热形成的地质条件和地热水水化学特征,选择钾镁地球化学温标对热异常区热储温度进行估算,推测深部热储温度大致在  $47\sim 82\text{ }^\circ\text{C}$ ,为中低温热储,同时热储层下部一定深度裂隙带内存在地热水的循环。

#### 参考文献 (References) :

- [ 1 ] 汪集旸. 地热学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2015. [ WANG Jiyang. Geothermics and its applications [M]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese) ]
- [ 2 ] 周总瑛, 刘世良, 刘金侠. 中国地热资源特点与发展对策[J]. 自然资源学报, 2015, 30(7): 1210 - 1221. [ ZHOU Zongying, LIU Shiliang, LIU Jinxia. Study on the characteristics and development strategies of geothermal resources in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(7): 1210 - 1221. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 3 ] 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) ]
- [ 4 ] 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) ]
- [ 5 ] 王贵玲, 刘彦广, 朱喜, 等. 中国地热资源现状及发展趋势[J]. 地学前缘, 2020, 27(1): 1 - 9. [ WANG Guiling, LIU Yanguang, ZHU Xi, et al. The status and development trend of geothermal resources in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2020, 27(1): 1 - 9. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 6 ] 王寿川, 刘亚强, 张楷, 等. 我国地热的开发现状和前景探讨[J]. 制冷技术, 2015, 35(2): 68 - 72. [ WANG Shouchuan, LIU Yaqiang, ZHANG Kai, et al. Discussion on status and prospects of geothermal resource development in China[J]. *Chinese Journal of Refrigeration Technology*, 2015, 35(2): 68 - 72. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 7 ] 胡志华, 高洪雷, 万汉平, 等. 西藏羊八井地热田水热蚀变的时空演化特征[J]. 地质论评, 2022, 68(1): 359 - 374. [ HU Zhihua, GAO Honglei, WAN Hanping, et al. Temporal and spatial evolution of hydrothermal alteration in the Yangbajing geothermal field, Xizang(Tibet)[J]. *Geological Review*, 2022, 68(1): 359 - 374. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 8 ] 龙登红, 周小龙, 杨坤光, 等. 青藏高原东北缘深部地质构造与地热资源分布关系研究[J]. 中国地质, 2021, 48(3): 721 - 731. [ LONG Denghong, ZHOU Xiaolong, YANG Kunguang, et al. Research on relationship between the deep structure and geothermal resource distribution in the Northeastern Tibetan Plateau[J]. *Geology in China*, 2021, 48(3): 721 - 731. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 9 ] 卞跃跃, 赵丹. 四川康定地热田地下热水成因研究[J]. 地球学报, 2018, 39(4): 491 - 497. [ BIAN Yueyue, ZHAO Dan. Genesis of Geothermal Waters in the Kangding geothermal field, Sichuan Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2018, 39(4): 491 - 497. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 10 ] 张七道, 刘振南, 尹林虎, 等. 深变质岩区地热流体化学特征及成因——以滇西陇川盆地温泉为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(6): 1838 - 1852. [ ZHANG Qidao, LIU Zhennan, YIN Linhu, et al. Chemical characteristics and genesis of geothermal fluid in deep metamorphic rock area: A case of hot springs in Longchuan Basin, Western Yunnan[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2021, 51(6): 1838 - 1852. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 11 ] 赵振, 秦光雄, 罗银飞, 等. 西宁盆地地热水特征及回灌结垢风险[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(5): 193 - 204. [ ZHAO Zhen, QIN Guangxiong, LUO Yinfei, et al. Characteristics of geothermal water in the Xining Basin and risk of reinjection scaling[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(5): 193 - 204. (in Chinese with English abstract) ]

- [12] 史杰, 乃尉华, 李明, 等. 新疆曲曼高温地热田水文地球化学特征研究[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(3): 165 - 172. [ SHI Jie, NAI Weihua, LI Ming, et al. Study on the hydrogeo-chemical characteristics of the Quman high temperature geothermal field in Xinjiang[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(3): 165 - 172. (in Chinese with English abstract) ]
- [13] 史杰, 汪美华, 马小军, 等. 新疆塔什库尔干县曲曼地热田地下水同位素研究[J]. 地球学报, 2022, 43(5): 645 - 653. [ SHI Jie, WANG Meihua, MA Xiaojun, et al. Isotope and hydrogeochemical characteristics of the Quman high temperature geothermal field in Taxkorgan, Xinjiang[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2022, 43(5): 645 - 653. (in Chinese with English abstract) ]
- [14] 汪洋, 张旭虎, 蒲丛林, 等. 河北廊坊南部地区地热水化学特征及成因机制[J]. 地质通报, 2022, 41(9): 1698 - 1706. [ WANG Yang, ZHANG Xuhu, PU Conglin, et al. The hydrochemical characteristics of geothermal water and its formation in the south Langfang, Hebei Province[J]. Geological Bulletin of China, 2022, 41(9): 1698 - 1706. (in Chinese with English abstract) ]
- [15] 刘润川, 任战利, 叶汉青, 等. 地热能资源潜力评价——以鄂尔多斯盆地部分地级市和重点层位为例[J]. 地质通报, 2021, 40(4): 565 - 576. [ LIU Runchuan, REN Zhanli, YE Hanqing, et al. Potential evaluation of geothermal resources: Exemplifying some municipalities and key strata in Ordos Basin as a study case[J]. Geological Bulletin of China, 2021, 40(4): 565 - 576. (in Chinese with English abstract) ]
- [16] 汪新伟, 王婷灏, 李海泉, 等. 太原盆地岩溶地热系统的形成演化及其地热资源潜力[J]. 中国地质, 2022, 49(3): 716 - 731. [ WANG Xinwei, WANG Tinghao, LI Haiquan, et al. Evolution of karst geothermal system and its geothermal resource potential in Taiyuan Basin[J]. Geology in China, 2022, 49(3): 716 - 731. (in Chinese with English abstract) ]
- [17] 刘峰, 王贵玲, 张薇, 等. 江西宁都县北部大地热流特征及地热资源成因机制[J]. 地质通报, 2020, 39(12): 1883 - 1890. [ LIU Feng, WANG Guiling, ZHANG Wei, et al. Terrestrial heat flow and geothermal genesis mechanism of geothermal resources in northern Ningdu County, Jiangxi Province[J]. Geological Bulletin of China, 2020, 39(12): 1883 - 1890. (in Chinese with English abstract) ]
- [18] 尹政, 田辽西, 张旭儒, 等. 张掖城区及外围地热资源普查报告[R]. 兰州: 甘肃省地矿局水文地质工程地质勘察院, 2018. [ YIN Zheng, TIAN Liaoqi, ZHANG Xuru, et al. Geothermal resources survey in Zhangye city and its periphery [R]. Lanzhou: Institute of Hydrogeological and Engineering Geology, Gansu Provincial Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, 2018. (in Chinese) ]
- [19] 刘宝睿, 杨克绳, 刘东艳. 论河西走廊陆盆的演化和最终形成期[J]. 地质论评, 2009, 55(1): 25 - 31. [ LIU Baorui, YANG Kesheng, LIU Dongyan. A discussion on evolution and final forming time of the Hexi Corridor continental basin[J]. Geological Review, 2009, 55(1): 25 - 31. (in Chinese with English abstract) ]
- [20] 玉门油田石油地质志编写组. 中国石油地质志-卷十三-玉门油田[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989: 236 - 261. [ Compilation group of petroleum geology in Yumen Oilfield. Yumen Oilfield, petroleum geology of China (Vol. 13) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989: 236 - 261. (in Chinese) ]
- [21] 魏红军, 李百祥. 张掖—民乐盆地地质构造特征与张掖市地热资源开发可行性分析[J]. 甘肃地质, 2007, 16(4): 73 - 76. [ WEI Hongjun, LI Baixiang. Characteristics of geological structures in Zhangye—Minle Basin and feasibility study of geothermal resources in Zhangye City[J]. Gansu Geology, 2007, 16(4): 73 - 76. (in Chinese with English abstract) ]
- [22] 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: 117 - 132. [ WANG Jiyang, XIONG Liangping, PANG Zhonghe. Low-medium temperature geo-thermal system of convective type[M]. Beijing: Science Press, 1993: 117 - 132. (in Chinese) ]
- [23] 尹政, 柳永刚, 张旭儒, 等. 张掖—民乐盆地中生界地层结构及对地热的控制作用[J]. 甘肃地质, 2021, 30(3): 49 - 56. [ YIN Zheng, LIU Yonggang, ZHANG Xuru, et al. Mesozoic cenozoic stratigraphic structure and its control on geothermal energy in Zhangye—Minle Basin[J]. Gansu Geology, 2021, 30(3): 49 - 56. (in Chinese with English abstract) ]
- [24] 王卫星, 孙玉东, 杨永江, 等. 天津市东丽湖地热对井的地质与水文地球化学特征[J]. 物探与化探, 2010, 34(1): 44 - 48. [ WANG Weixing, SUN Yudong, YANG Yongjiang, et al. Geological and hydrogeochemical characteristics geothermal paired wells in Dongli Lake area Tianjin[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2010, 34(1): 44 - 48. (in Chinese with English abstract) ]
- [25] PAYNE B R. Water balance of Lake Chala and its relation

- to groundwater from tritium and stable isotope data[J]. *Journal of Hydrology*, 1970, 11(1): 47 – 58.
- [26] 冯欣, 张亚哲. 深州地区地下水离子比例系数分析研究[J]. *中国农村水利水电*, 2014(4): 18 – 20. [ FENG Xin, ZHANG Yazhe. An analysis of the ions ratio coefficients of groundwater in Shenzhou area[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2014(4): 18 – 20. (in Chinese with English abstract) ]
- [27] 尹政, 张旭儒, 王春磊, 等. 张掖—民乐盆地地热田热矿水化学特征及理疗作用研究[J]. *甘肃地质*, 2022, 31(1): 72 – 78. [ YIN Zheng, ZHANG Xuru, WANG Chunlei, et al. Chemical characteristics and physiotherapy effects of thermal mineral water in Zhangye Basin[J]. *Gansu Geology*, 2022, 31(1): 72 – 78. (in Chinese with English abstract) ]
- [28] 黄锦忠, 谭红兵, 王若安, 等. 我国西北地区多年降水的氢氧同位素分布特征研究[J]. *水文*, 2015, 35(1): 33 – 39. [ HUANG Jinzhong, TAN Hongbing, WANG Ruohan, et al. Hydrogen and oxygen isotopic analysis of perennial meteoric water in northwest China[J]. *Journal of China Hydrology*, 2015, 35(1): 33 – 39. (in Chinese with English abstract) ]
- [29] CHEN Jiansheng, ZHAO Xia, FAN Zhechao, et al. Isotope method for confined groundwater recharge of the lower reaches of the Heihe River, Inner Mongolia, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(4): 668 – 673.
- [30] MONTOROI J P, GRÜNBERGER O, NASRI S. Groundwater geochemistry of a small reservoir catchment in Central Tunisia[J]. *Applied Geochemistry*, 2002, 17(8): 1047 – 1060.
- [31] 张人权. 国外水文地质研究中应用同位素方法的现状[J]. *水文地质工程地质*, 1981, 8(6): 55 – 57. [ ZHANG Renquan. Application of isotope method in hydrogeological research abroad[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 1981, 8(6): 55 – 57. (in Chinese) ]
- [32] 王莹, 周训, 于媛, 等. 应用地热温标估算地下热储温度[J]. *现代地质*, 2007, 21(4): 605 – 612. [ WANG Ying, ZHOU Xun, YU Yuan, et al. Application of geothermometers to calculation of temperature of geothermal reservoirs[J]. *Geoscience*, 2007, 21(4): 605 – 612. (in Chinese with English abstract) ]
- [33] 汪集暘, 熊亮萍, 庞忠和. 利用地热资料确定地下热水循环深度[J]. *科学通报*, 1990, 35(5): 378 – 380. [ WANG Jiyang, XIONG Liangping, PANG Zhonghe, et al. Using geothermal data to determine the circulation depth of underground hot water[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1990, 35(5): 378 – 380. (in Chinese with English abstract) ]

编辑: 汪美华  
实习编辑: 刘真真