



## 东濮凹陷西斜坡带优质砂岩热储特征研究

贺婷婷<sup>1</sup>, 谈 心<sup>2</sup>, 隋少强<sup>1</sup>, 章 惠<sup>1</sup>, 张海涛<sup>1</sup>

1. 中石化集团新星石油有限公司 新能源研究院, 北京 100083;
2. 中国石化国际石油勘探开发有限公司, 北京 100029

**摘 要:** 东濮凹陷西斜坡带新近系明化镇组砂岩热储地热井, 存在出砂严重和回灌困难的问题. 为了弄清东濮凹陷西斜坡带优质砂岩热储层地热地质特征, 综合考虑构造、储层和地温情况, 开展区域构造、地温场分布规律及热储精细解剖研究, 优化探井设计. 研究表明, 东濮凹陷西斜坡带新近系构造稳定, 馆陶组底板埋深 2 000~2 200 m, 优质砂体发育在馆陶组下部 1 800~2 200 m, 温度 65 °C 以上, 热储物性较好, 具备地热资源开发潜力. 东濮凹陷西斜坡带长垣地区优化部署的馆陶组砂岩热储地热井试水结果与预测一致, 进一步证实了东濮凹陷西部斜坡带的地热勘探开发潜力.

**关键词:** 地热资源; 砂岩热储; 馆陶组; 东濮凹陷; 渤海湾盆地

## THERMAL RESERVOIR CHARACTERISTICS OF HIGH-QUALITY SANDSTONE IN THE WEST SLOPE BELT OF DONGPU SAG

HE Ting-ting<sup>1</sup>, TAN Xin<sup>2</sup>, SUI Shao-qiang<sup>1</sup>, ZHANG Hui<sup>1</sup>, ZHANG Hai-tao<sup>1</sup>

1. New Energy Research Institute of Star Petroleum Co., Ltd., Sinopec, Beijing 100083, China;
2. International Petroleum Exploration and Production Corporation, Sinopec, Beijing 100029, China

**Abstract:** There are serious sand production and recharge difficulty in the sandstone reservoir geothermal wells of Neogene Minghuazhen Formation in the west slope belt of Dongpu Sag. To find out the geothermal geological characteristics of high-quality sandstone reservoir in the area, the paper studies the regional structure, distribution rule of geothermal field and detail of thermal reservoir, and optimizes the design of exploration wells combined with the structure, reservoir and geotemperature conditions. The results indicate that the Neogene structure in the west slope belt is stable with the floor depth of 2 000–2 200 m for Guantao Formation where the high-quality sandbodies are developed in its lower part (1 800–2 200 m) with the temperature above 65 °C, showing good thermal storage property and development potential for geothermal resources. The hydraulic testing results of sandstone reservoir geothermal wells of Guantao Formation in Changyuan area are consistent with the prediction, which further confirms the geothermal exploration and development potential in the area.

**Key words:** geothermal resources; sandstone geothermal reservoir; Guantao Formation; Dongpu Sag; Bohai Bay Basin

### 0 前言

东濮凹陷位于渤海湾盆地南缘临清拗陷的东南

部, 呈长条形北北东向展布, 形态南宽北窄, 凹陷内缺失侏罗系、白垩系, 古近纪地层直接覆盖在三叠系及更

收稿日期: 2021-05-20; 修回日期: 2021-10-15. 编辑: 黄欣.

基金项目: 中石化科技部项目“河南沿黄地区‘地热+’洁净能源开发技术研究”(JKL21003).

作者简介: 贺婷婷(1987-), 女, 博士, 高级工程师, 从事油气田开发地质、地热勘探与评价工作, 通信地址 北京市海淀区北四环中路 263 号, E-mail//hetingting010.xxsy@sinopec.com

老的地层之上.东濮凹陷内断层发育,整体呈现“两凹一隆一斜坡一断阶”构造格局,自西向东可进一步划分为西部斜坡带、西部次凹带、中央隆起带、东部次凹带及兰聊断裂带等5个次级构造单元<sup>[1]</sup>,西部斜坡带构造走向与东濮凹陷主要构造的延伸方向一致<sup>[2]</sup>.长垣市主城区构造上位于东濮凹陷西部斜坡带(图1),长垣断裂从城区东侧经过,研究表明长垣断裂西侧蕴藏着丰富的地热水资源.随着地源热泵技术的成熟,水热型地热能直接利用正快速普及<sup>[3]</sup>.目前豫东北地区的范县、南乐、清丰、濮阳、开封、兰考等地区的地热资源开发程度较高,开发效果显著.如兰考地区馆陶组砂岩热储底板埋深2 000 m左右,水温基本大于70℃,水量大于120 m<sup>3</sup>/h;范县奥陶系灰岩热储顶板埋深约1 500 m,水温约60℃,水量120 m<sup>3</sup>/h.而长垣地区地热资源的研究尚处于起步阶段,开发程度不高,前期已开发的新近系明化镇组砂岩热储地热井生产过程中存在出砂严重和回灌困难的问题,无法满足长垣地区供暖需求.因此需要综合进行区域构造特征分析、热储精细解剖及地温场分布规律研究,弄清长垣市优质砂岩热储地热地质特征,优化探井设计,为进一步证实东濮凹陷西部斜坡带的地热勘探开发潜力奠定基础,进而为豫东北地区地热供暖连片开发提供典型范例.

## 1 区域地质特征

### 1.1 构造

东濮凹陷位于渤海湾盆地南部,是新生代地壳水平拉张应力作用下逐渐裂解断陷而形成的双断式凹陷,以结晶变质岩系及其上地台构造层为基底.印支—燕山期,强烈的构造运动令地壳抬升,遭受剥蚀,凹陷主要特征是边断陷边沉积;喜马拉雅期,断陷盆地向凹陷盆地转化,形成了现今的构造格局<sup>①</sup>.东濮凹陷在演化过程中受到断层活动的控制,表现出明显的阶段性活动特征<sup>[4]</sup>.东濮凹陷内部发育3条主控大断裂,自西向东分别为长垣断裂、黄河断裂和兰聊断裂(图2,剖面线见图1).

长垣断裂属兰聊深断裂带西侧的边界断裂,物探及钻孔资料揭示,该断层切割古生界至新近系,构成内黄隆起与东明断陷的边界,并对两构造单元的形成和发展具有控制作用<sup>[5]</sup>.长垣断裂从长垣城区东侧经过,

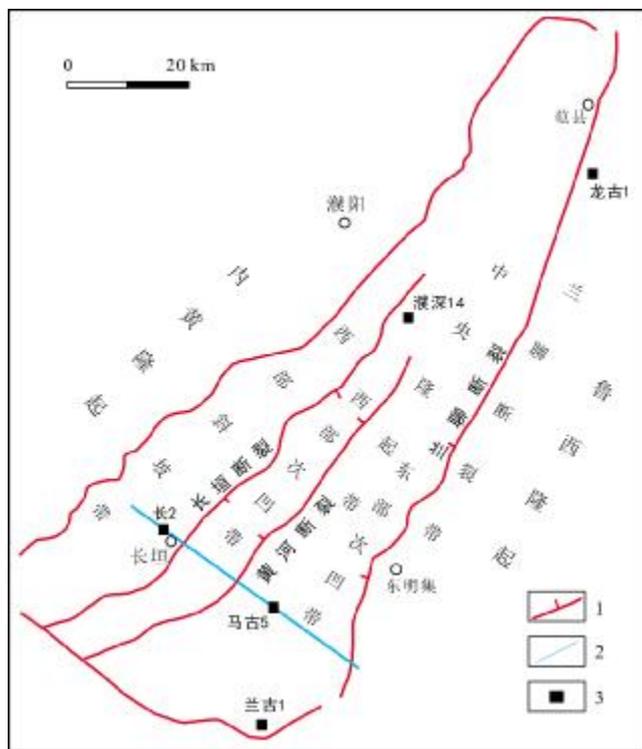


图1 东濮凹陷构造分区图

Fig. 1 Tectonic division map of Dongpu Sag

1—断裂(fault); 2—剖面线(section line); 3—井位(well location)

走向北北东,是西升东降的正断层,断至馆陶组底部,断层西部古近系地层较薄,有利于深部热源直接通过中生界地层传导<sup>[5]</sup>.长垣断裂形成于燕山期,喜马拉雅期有继承性活动.

黄河断裂位于凹陷中部,形成于中生代末或古近纪早期,为新近纪活动断裂.兰聊断裂是东濮凹陷的东部边界断裂,对东濮凹陷的构造演化和构造格局有着明显的控制作用<sup>[6]</sup>,形成于燕山期,是一个长期活动的断裂,尤其是喜马拉雅期活动更为强烈.

### 1.2 地层

新近纪东濮凹陷构造演化进入整体拗陷阶段,地层沉积较为完整,局部存在不整合接触.西部斜坡带新近系整个区域均有分布,发育比较好,自上而下分为明化镇组(Nm)和馆陶组(Ng).

明化镇组底板埋深800~1 600 m,地层厚度800~1 300 m,属于河流相—泛滥平原相砂泥岩沉积体系,下段以曲流河沉积为主,上段以泛滥平原沉积为主<sup>[7-8]</sup>,岩性主要为棕红色泥岩与浅棕色—灰白色砂岩、细砂岩堆积形成的互层,分布稳定,埋藏较浅,岩石中等—弱

①河南省地质调查院.河南省地热资源现状调查评价与区划. 2015.

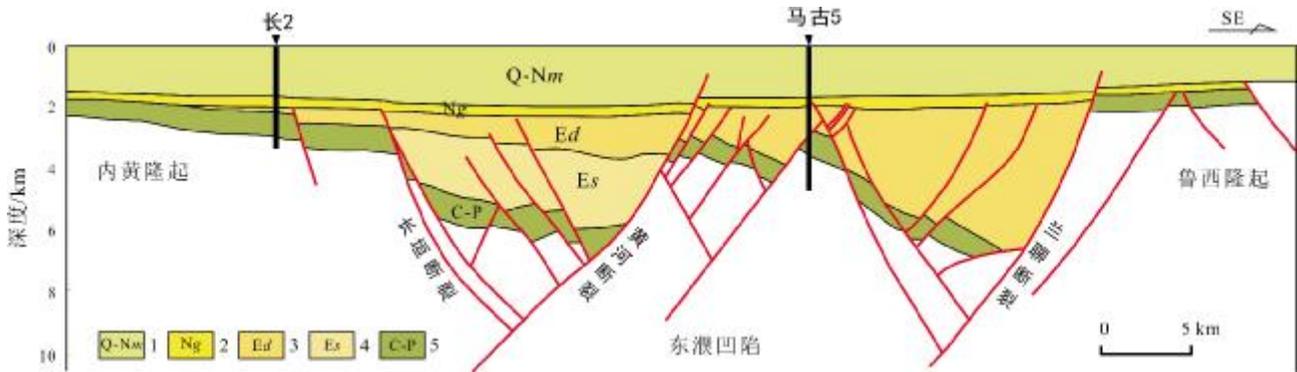


图2 东濮凹陷地质剖面

Fig. 2 Geological section across Dongpu Sag

1—第四系及新近系明化镇组(Quaternary and Neogene Minghuazhen fm.); 2—新近系馆陶组(Neogene Guantao fm.); 3—古近系东营组(Paleogene Dongying fm.); 4—古近系沙河街组(Paleogene Shahejie fm.); 5—石炭-二叠系(Carboniferous-Permian)

压实,泥岩含量较多。

馆陶组底板埋深 1 400~2 200 m, 地层厚度 200~700 m, 东深西浅, 南深北浅, 为一套河流相沉积。东南部埋藏较深(1 800~2 200 m), 岩石中等压实, 岩性为浅灰色砂砾岩夹棕、灰色薄层泥岩, 构成巨厚层状一块状砂砾岩地层, 砂砾岩连通性好<sup>[8]</sup>, 储层物性好, 馆陶组底部普遍发育一套底砾岩; 北部地区受区域构造影响, 埋藏较浅(1 400~1 800 m), 馆陶组沉积厚度较薄(200~400 m)。根据构造趋势及南部临近地区油气井资料中长 1、长 2、长 3、长 4 井地层发育情况, 推测长垣地区馆陶组底面埋深在 2 000~2 200 m, 馆陶组地层厚度 500~700 m。

## 2 砂岩热储特征

东濮凹陷新近纪进入区域性沉降阶段, 发育一套以冲积-河流相为主的碎屑岩沉积体系, 岩性为黏土岩、砂质黏土岩、砂岩、砂砾岩。其层位和厚度受古地形影响, 产状近于水平。区内地热类型主要为沉积盆地埋藏型, 发育层状砂岩类孔隙型热储。

### 2.1 明化镇组砂岩热储

据长垣市已开发地热井资料, 地热井深 1 300 m 左右, 涌水量 60 m<sup>3</sup>/h 左右, 出井水温 50 ℃左右, 主要热储层为新近系明化镇组砂岩热储。取水段 1 300 m 以浅, 砂体发育程度低, 成岩性差, 导致地热井出砂严重, 回灌井回灌效果差, 水量小、温度低。

长垣地区 2013 年地热供暖项目, 共完钻 3 口地热井: CYXC1、CYXC2、CYXC3 井, 井深均为 1 300 m, 整体发育曲流河沉积, 上部岩性为细、粉砂岩与泥岩互

层, 下部为中、细砂岩与泥岩互层(图 3)。取水层为新近系明化镇组, 主要地热开采层位在 900~1 200 m 之间。2013 年正式进行供暖季供暖, 采取一采二灌方式运行, 生产井为 CYXC2 井, 回灌井为 CYXC1 井和 CYXC3 井。运行初期 CYXC2 井采水量最高为 80 m<sup>3</sup>/h, 出水温度为 48 ℃。出砂量 0.05 m<sup>3</sup>/h, 较为严重, 造成 CYXC1、CYXC3 井回灌量逐年降低。2013 年供暖季回灌量为 35 m<sup>3</sup>/h, 回灌压力为 0.95 MPa。2014 年采暖季其回灌量为 10 m<sup>3</sup>/h, 回灌压力为 0.9 MPa, CYXC2 井由于长期出砂, 出水量逐渐降低。究其原因主要是对区域砂岩热储地质特征认识不清, 开采的明化镇组热储埋藏较浅, 地层成岩性差, 砂层中有大量细微黏土颗粒及细粉砂。抽水井出砂严重, 导致井底沉沙, 影响抽水; 回灌井内回灌层被细粉砂掩埋, 影响回灌。

### 2.2 馆陶组砂岩热储

基于测录井等资料, 结合区域沉积特征, 开展馆陶组砂岩热储精细解剖。馆陶组为河流相沉积, 埋藏较深, 岩石中等压实, 储层成岩性较好。馆陶组上部为细砂岩与泥岩间互沉积, 发育曲流河道砂体、边滩沉积; 馆陶组下部为砂砾岩夹泥岩沉积, 发育辫状河道砂坝沉积, 测井曲线表现为厚层箱状特征, 砂岩厚度大, 岩石颗粒粒径较大, 赋水性好。

根据与邻井地层对比结果(图 4), 长垣地区馆陶组地层厚度 600 m 左右, 砂地比 60%, 优质砂体发育在馆陶组下段, 深度 1 750~2 200 m, 其中又以馆陶组底部最优, 砂地比高达 95%。测井二次解释长 2 井馆陶组底部(1 809~1 999.4 m)大套砂体孔隙度 27.4%~28.5%, 平均渗透率 442 mD, 长 3 井馆陶底部(1 836.5~

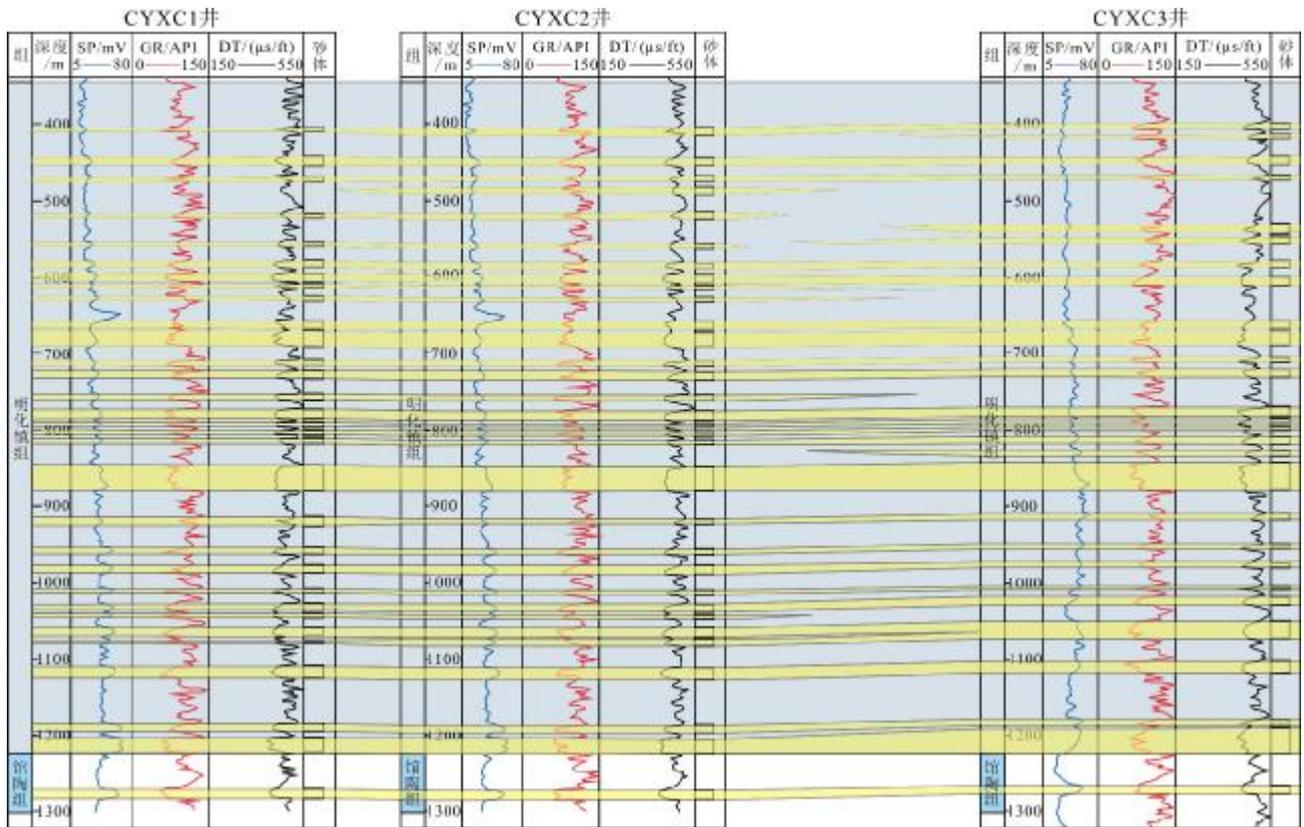


图 3 长垣地区明化镇组连井对比剖面

Fig. 3 Correlation of geothermal well profiles of Minghuazhen Formation in Changyuan area

2 027 m)大套砂岩储层孔隙度 26.5%~27.5%,平均渗透率 379.3 mD,说明长垣区域馆陶组砂体厚度大,储层物性好。

### 3 地温分布特征

在沉积盆地内,基岩面的起伏形成基底隆起和凹陷格局,对区域地温场和地表热流的分布起着控制作用。基底隆起区的大地热流值大于凹陷区的大地热流值<sup>[9]</sup>,构造发育部位热流值也相对较高,而地温梯度的分布与大地热流分布形态类似。测井温度资料是研究地温梯度分布的主要依据<sup>[10-11]</sup>。研究表明东濮凹陷地温随埋藏深度增加而增大,具线性变化特征。东濮凹陷地温梯度大致分布在 2.6~4.63 °C/hm 之间,平均 3.24 °C/hm。地温梯度分布与东濮凹陷构造走向一致,总体分布特征是中央隆起带高,地温梯度 3.3~3.7 °C/hm,西部斜坡、西部次凹、东部次凹和兰聊断裂带相对较低,分布在 2.8~3.2 °C/hm 之间,并且凹陷南部地温梯度高于北部<sup>[12]</sup>。

结合地温测温等资料,开展长垣地区地温场分析。

区域恒温层平均深度约 25 m,温度 16 °C。根据区内钻孔水温(测温)和恒温带地温资料计算地温梯度,计算公式如下:

$$\Delta T = \frac{T_n - T_0}{H_n - H_0} \times 100$$

式中:  $\Delta T$  为地温梯度 (°C/hm),  $T_n$  为井口水温 (°C),  $T_0$  为恒温带温度 (°C),  $H_n$  为取水段平均深度 (m),  $H_0$  为恒温带深度 (m)。

CYXC1 井试水井口温度 50 °C,取水段井深 929~1 265 m,推算长垣地区区域地温梯度 3 °C/hm 左右,与区域地温认识一致。据此推测长垣地区馆陶组底部优势取水段 1 800 m 以深温度 65 °C 以上,热储温度高。

### 4 馆陶组探井部署

综合考虑区域构造、热储和地温场特征,长垣城区地热资源优越。结合市场需求情况,在长垣前期地热项目西侧部署一口生产井 (CYTC1) 和一口回灌井 (CYTG2)。

生产井 CYTC1 井完钻井深 2 176 m,完钻层位为

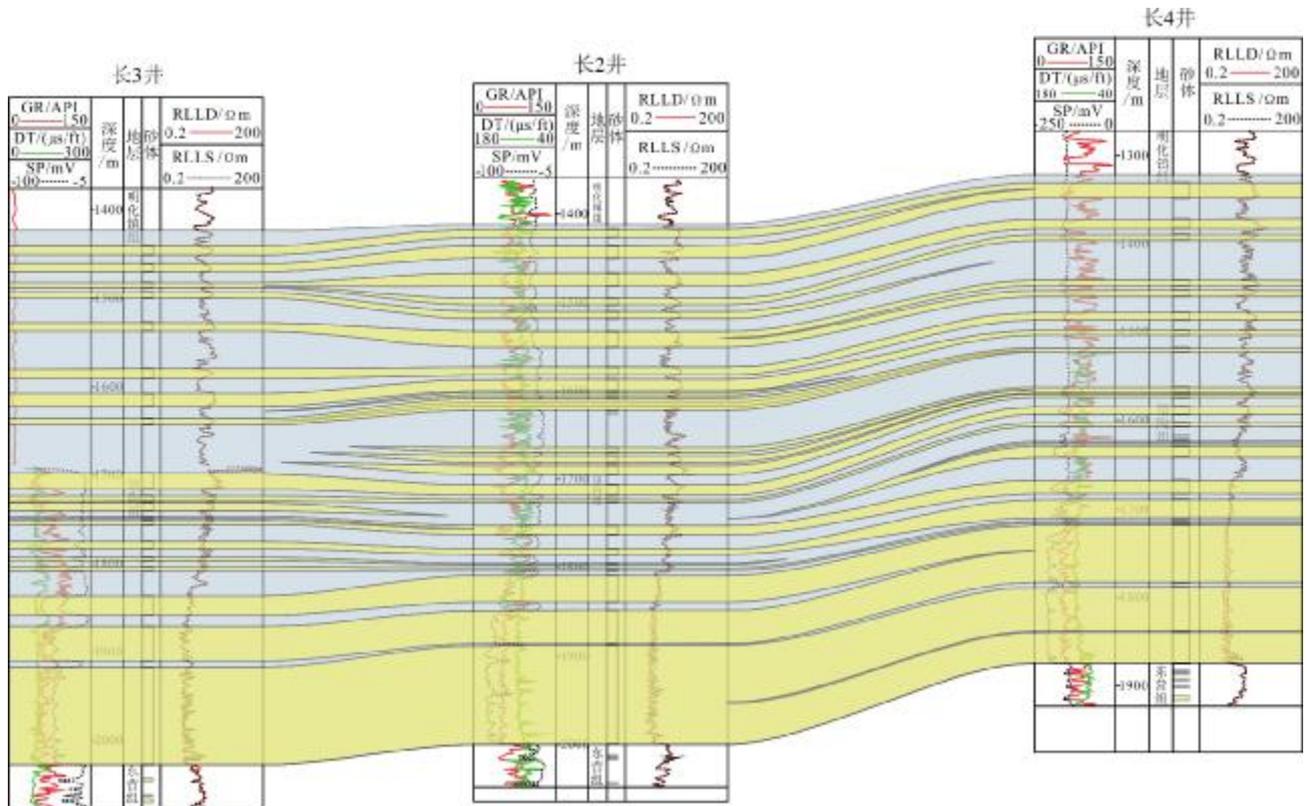


图4 长垣地区馆陶组砂体连井对比剖面

Fig. 4 Correlation of sand body wells of Guantao Formation in Changyuan area

古近系东营组,馆陶组顶深 1 480 m,底深 2 125 m.

录井结果显示明化镇组上部为黄色黏土岩和棕黄色细砂岩不等厚互层,下部以棕黄色泥岩和浅棕色细砂岩呈不等厚互层为主,自然电位曲线泥岩段较平直,砂岩段呈箱状、钟型低幅负异常,整体表现为曲流河沉积特征.馆陶组上部岩性为浅棕色细砂岩与棕红色泥岩呈不等厚互层,测井曲线呈中高幅箱形、钟型,为曲流河“泥包砂”的正旋回沉积,砂体厚度相对较小、连通性相对较差;馆陶组下部岩性为灰白色砂岩夹灰色泥岩,底部见灰白色砂砾岩,发育辫状河“砂包泥”的正旋回沉积,砂体厚度大、连通性好,测井曲线表现为厚层箱型高幅负异常(图5).测井解释结果显示馆陶组下部热储发育,砂体厚度较大,馆陶组热储总厚度 387 m,平均孔隙度 22.6%.根据录井剖面、测井曲线、热储厚度及物性资料,结合市场需求,使用基于地层系数的储层分类评价方法优化取水段综合确定 CYTC1 井取水段 1 766~2 125 m,试水结果显示水温 73 ℃,水量 122 m<sup>3</sup>/h,极大地节约了成本,取得了良好的应用效果.

根据该井产出剖面测井原始资料的计算机处理结

果,参考地质、钻井、完井测井及生产情况等资料进行综合解释分析,在深井抽水泵抽水生产条件下,确定了两套主力产水层和两套次产水层(图5),位于馆陶组中下部,尤其馆陶组底部产水量大.其中,1 765.5~1 790.9 m 井段流量曲线有较明显地抬升,分析认为该层段产水,通过流量曲线计算此段产水 285.81 m<sup>3</sup>/d,占总产水量的 13.83%,为次产水层;1 917.8~1 942.9 m 井段流量曲线幅度明显抬升,分析认为该层段产水,通过流量曲线计算此段产水 170.49 m<sup>3</sup>/d,占总产水量的 8.25%,为次产水层;2 062.0~2 094.9 m 井段流量曲线有大幅度明显抬升,分析认为该层段产水,通过流量曲线计算此段产水 468.99 m<sup>3</sup>/d,占总产水量的 22.69%,为主产水层;2 097.0~2 125.0 m 井段流量曲线有较明显地抬升,分析认为该井段产水,通过流量等曲线计算此段产水 389.57 m<sup>3</sup>/d,占总产水量的 18.89%,为主产水层.

在相邻地区部署实施的回灌井 CYTG2 井,完钻井深 2 252 m,试水水温 76 ℃,水量 126 m<sup>3</sup>/h,进一步证实了东濮凹陷西斜坡带的地热勘探开发潜力.2020年

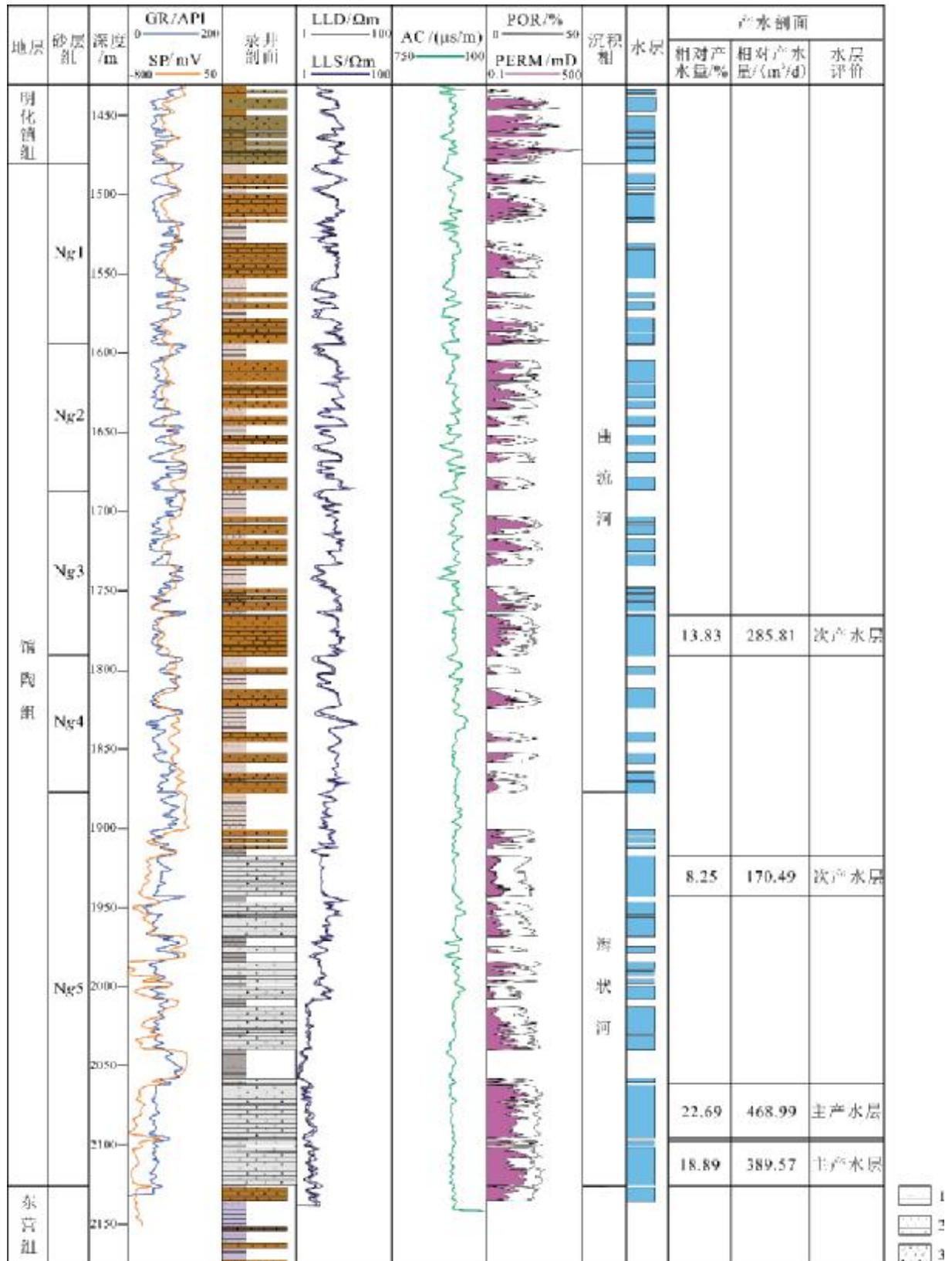


图 5 CYTC1 井测井曲线与产能测试对比

Fig. 5 Logging curve interpretation and productivity test of CYTC1 well

1—泥岩(mudstone); 2—细砂岩(fine sandstone); 3—砂砾岩(glutenite)

CYTC1、CYTG2井正式进行供暖季供暖,目前保持采灌平衡的状态,CYTC1井采水量为80 m<sup>3</sup>/h,出水温度为75.4℃,基本不出砂;CYTG2井回灌量为80 m<sup>3</sup>/h,回灌无压力,运行状况良好。

## 5 地热资源量评价

采用“热储体积法”对长垣地区馆陶组砂岩热储进行地热资源量精细评价,热储体积法是目前用于计算层状热储地热田地热资源量使用最为广泛的一种方法<sup>[13]</sup>,主要用于计算热储中储存的热量,即热储及流体范围内的静态储量的估算,能估计地热田地热资源潜力<sup>[14-15]</sup>。本次计算不考虑水运移产生的热量运输,不考虑流体的侧向补给、越流补给<sup>[16-17]</sup>。在进行地热资源评价时,对于大型沉积盆地的新生代砂岩,当孔隙度大于20%时,热储回收率定为0.25<sup>[18]</sup>。地热资源量计算时涉及到的参数包括热储面积、热储有效厚度、热储平均温度、岩石孔隙度、岩石和水的比热容等。计算公式如下:

$$Q_R = AH[\rho_c C_c(1-\phi) + \rho_w C_w \phi](T - T_0) \quad (2)$$

式中:  $Q_R$  为地热资源量(J);  $A$  为热储面积(m<sup>2</sup>);  $H$  为热储有效厚度(m);  $\phi$  为岩石孔隙度(%);  $T$  为热储温度(℃);  $T_0$  为恒温层温度(℃);  $\rho_c$ 、 $\rho_w$  分别为岩石和水的密度(kg/m<sup>3</sup>);  $C_c$ 、 $C_w$  分别为岩石和水的比热容,单位 J/(kg·℃)。

热储面积按照长垣市2019年预计供暖面积200×10<sup>4</sup> m<sup>2</sup>计算;热储有效厚度根据已有地热井取水段统计,取水段热储平均有效厚度236 m;热储温度根据该地区地热井试水温度取73℃;根据测井解释数据计算馆陶组平均孔隙度22%;恒温层温度参照年平均气温取15℃;砂岩的密度取2 600 kg/m<sup>3</sup>,砂岩比热容取2 285.4 J/(kg·℃);水的密度取1 000 kg/m<sup>3</sup>,水的比热容取4 200 J/(kg·℃)。

长垣市馆陶组优势热储地热资源量计算结果如表1所示。长垣市区域地热资源总量为1.52×10<sup>17</sup> J,折合标准煤约5.2×10<sup>6</sup> t。可采地热资源量为3.8×10<sup>16</sup> J,折

合标准煤约1.3×10<sup>6</sup> t。根据1 m<sup>2</sup>每年供暖所需的热量相当于0.0283 t标准煤计算,长垣市馆陶组优势热储段地热资源量满足的供暖面积可达460×10<sup>4</sup> m<sup>2</sup>,地热资源优越,开发潜力巨大。

## 6 开发利用建议

地热资源是可再生资源,但过量开采使热储层水位持续下降,地热井产水能力减弱,地热水长期排放也造成资源的严重浪费<sup>[19]</sup>,因此砂岩地热水回灌非常重要,有效的回灌对延长热储开发利用年限、减少供热尾水外排对环境污染以及预防地面沉降具有非常重要的意义。地热回灌已发展成一项较为成熟的实用技术,在世界范围内进行了大量的回灌探索和研究。岩溶裂隙型热储层回灌井,特别是位于深大断裂带附近的回灌井,可回灌性一般大于80%,但新近系孔隙型砂岩热储层回灌效果不甚理想<sup>[20]</sup>。

长垣市2020年进行供暖的两口地热井,目前保持采灌平衡的状态,后续开发利用可参考地热供暖开发时间较长、技术比较成熟、具有可对比性的兰考地区。兰考地区沉积环境和储层物性与长垣市类似,目前已开发20多口地热井,均取馆陶组热水,地热资源良好,水温70℃左右,水量基本大于120 m<sup>3</sup>/h。开采初期开发效果良好,保持采灌平衡,随着时间的推移,后期大部分井回灌压力升高,回灌困难,制约兰考地区地热资源高效益开发。针对兰考地区回灌井回灌困难,回灌压力持续升高(最高达到1.5 MPa)现状,通过分析该地区地层特性、热储层回灌能力、完井工艺、地面尾水处理工艺、地热水质状况及采取的防堵解堵措施等影响回灌的主要因素,梳理总结了兰考地区回灌困难存在的主要问题,包括管理问题、尾水水质处理以及防堵解堵措施。针对存在的主要问题,提出了加强管理、改进水质处理设备流程、完善回扬解堵工艺、开展防腐防垢研究及改进新投井成井工艺等方面的对策和建议,最终达到提高回灌量,降低回灌压力的目标。长垣市地热供暖在后期运行过程中可能同样出现回灌压力升

表1 长垣市地热资源量评价参数取值与计算结果

Table 1 Evaluation parameters and calculation results of geothermal resources in Changyuan City

热储层位	面积/km <sup>2</sup>	热储有效厚度/m	孔隙度/%	热储温度/℃	地热资源量/J	标准煤/t	地热水资源量/J	标准煤/t
Ng	2×10 <sup>6</sup>	236	22	73	1.52×10 <sup>17</sup>	5.2×10 <sup>6</sup>	2.53×10 <sup>16</sup>	8.64×10 <sup>5</sup>

高的问题,建议参考兰考地区解决回灌困难的对策和措施,针对制约回灌的因素,对于老钻井按照“以防为主,以治为辅”的原则,应从基础工作抓起,采取防止堵塞的手段;对于新钻井,从设计开始,至生产运行,详细记录全生命周期井史、采灌基础数据,为后期修井、回灌制定解决方案提供依据。

## 7 结论

1)长垣主城区构造上位于东濮凹陷西部斜坡带,长垣断裂的西侧,新近系地层发育齐全、分布稳定。长垣地区馆陶组底面埋深在2 000~2 200 m,储层成岩性较好,馆陶组地层厚度500~700 m。

2)明化镇组整体发育曲流河沉积,储层成岩性较差,导致地热井出砂严重。油气井显示馆陶组砂体厚度大,发育辫状河沉积,储层物性好。综合地层测温和已钻地热井实测资料,推测馆陶组底部优势取水段温度65℃以上,热储物性好,具地热资源开发潜力。

3)综合考虑区域构造、热储和地温场特征,优化探井设计。长垣地区新钻馆陶组砂岩热储地热井发育两套主力产水层,累计平均有效厚度61 m,地温73~76℃,水量大于120 m<sup>3</sup>/h,彰显了长垣地区优越的地热资源条件,弄清了东濮凹陷西斜坡带优质砂岩热储分布于馆陶组下部。

4)长垣市馆陶组优势取水段精细评价结果表明,地热资源总量 $1.52 \times 10^{17}$  J,折合标准煤约 $5.2 \times 10^6$  t,年可采地热资源量可满足 $460 \times 10^4$  m<sup>2</sup>的供暖面积,开发潜力巨大。考虑后期运行过程中可能出现的回灌压力升高问题,从地质、地面、管理等多方面综合研究,采取针对性的措施进行预防和完善,确保地热井长寿命高效开发。

## 参考文献(References):

- [1]刘丽,任战利.东濮凹陷热演化史研究[J].石油勘探与开发,2007,34(4):419-423,444.  
Liu L, Ren Z L. Thermal evolution of Dongpu sag[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(4): 419-423, 444.
- [2]任孟坤,张明功,高广亮.东濮凹陷西部斜坡带构造样式与油气聚集[J].断块油气田,2010,17(3):300-303.  
Ren M K, Zhang M G, Gao G L. Structural styles and hydrocarbon accumulation in west slope belt of Dongpu depression[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2010, 17(3): 300-303.
- [3]王贵玲,陆川.碳中和目标驱动下地热资源开采利用技术进展[J].地质与资源,2022,31(3):412-425,341.  
Wang G L, Lu C. Progress of geothermal resources exploitation and utilization technology driven by carbon neutralization target[J]. Geology and resources, 2022, 31(3): 412-425, 341.
- [4]胥菊珍,王世坤,黄俊峰,等.东濮凹陷构造样式及其演化规律[J].新疆石油地质,2004,25(5):492-494.  
Xu J Z, Wang S K, Huang J F, et al. Structural style and evolution in Dongpu sag[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2004, 25(5): 492-494.
- [5]张方亮.长垣县地热地质特征初步研究[J].地下水,2008,30(3):27-29.  
Zhang F L. Preliminary study on geothermal geological characteristics of Changyuan Country[J]. Ground Water, 2008, 30(3): 27-29. (in Chinese)
- [6]张克鑫,漆家福,赵衍彬,等.新生代东濮凹陷构造特征及其演化[J].新疆石油地质,2007,28(6):714-717.  
Zhang K X, Qi J F, Zhao Y B, et al. Structure and evolution of Cenozoic in Dongpu sag[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28(6): 714-717.
- [7]张云鹏,张蓬勃,杨庆文,等.东濮凹陷浅层气成藏规律分析[J].断块油气田,1998,5(5):13-17.  
Zhang Y P, Zhang P B, Yang Q W, et al. An analysis on rule of reservoir generation of shallow gas in Dongpu depression[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 1998, 5(5): 13-17.
- [8]石砥石,王永诗,王亚琳,等.临清拗陷东濮凹陷新近系油气网毯式成藏条件和特征初探[J].地质科学,2007,42(3):417-429.  
Shi D S, Wang Y S, Wang Y L, et al. An approach to the Neogene meshwork-carpet oil and gas pool-forming system in the Dongpu sag, Linqing depression[J]. Chinese Journal of Geology, 2007, 42(3): 417-429.
- [9]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 W, Wang G L, Liu F, et al. Characteristics of geothermal resources in sedimentary basins[J]. Geology in China, 2019, 46(2): 255-268.
- [10]任战利.中国北方沉积盆地构造热演化史研究[M].北京:石油工业出版社,1999:5-7.  
Ren Z L. Study on the tectonic thermal evolution history of sedimentary basins in Northern China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999: 5-7. (in Chinese)
- [11]肖卫勇,王良书,李华,等.渤海盆地地温场研究[J].中国海上油气(地质),2001,15(2):105-110.  
Xiao W Y, Wang L S, Li H, et al. Geotemperature field in Bohai Sea[J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 2001, 15(2): 105-110.
- [12]刘丽,任战利,崔营滨,等.东濮凹陷现今地温场分布特征[J].地质科学,2007,42(4):787-794.  
Liu L, Ren Z L, Cui Y B, et al. Distribution of present-day geothermal

- field in the Dongpu sag[J]. Chinese Journal of Geology, 2007, 42(4): 787-794.
- [13] 宾德智, 陈红. 地热资源评价方法与资源/储量分类[C]//全国油区城镇地热开发利用经验交流会论文集. 北京: 中国石油学会, 2003.
- Bin D Z, Chen H. Geothermal resource evaluation method and resources/reserves classification [C]// Symposium of Geothermal Development and Utilization in Oil Towns. Beijing: Chinese Petroleum Society, 2003. (in Chinese)
- [14] 李冬怀, 袁旭光, 韩军. 地热资源量评价计算方法评述[J]. 地球科学前沿, 2018, 8(3): 546-554.
- Li D H, Yuan X G, Han J. Summarization on calculation and assessment for geothermal resources[J]. Advances in Geosciences, 2018, 8(3): 546-554.
- [15] 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): 312-321.
- Lin W J, Liu Z M, Wang W L, et al. The assessment of geothermal resources potential of China[J]. Geology in China, 2013, 40(1): 312-321.
- [16] 谢娜, 喻生波, 丁宏伟, 等. 甘肃省地热资源赋存特征及潜力评价[J]. 中国地质, 2020, 47(6): 1804-1812.
- Xie N, Yu S B, Ding H W, et al. Occurrence features of geothermal resources and geothermal potential assessment in Gansu Province[J]. Geology in China, 2020, 47(6): 1804-1812.
- [17] 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 Z L, Zhang Y L, Zhou Y. 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.
- [18] 中华人民共和国地质矿产部. DZ 40—1985 地热资源评价方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1986.
- Ministry of Geology and Mineral Resources of the People's Republic of China. DZ 40—1985 Geothermal resource evaluation method[S]. Beijing: Standards Press of China, 1986. (in Chinese)
- [19] 赵鹏飞. 基于 Origin 的渗透系数衰减方程在地热水回灌中的应用[J]. 地质与资源, 2021, 30(1): 71-74.
- Zhao P F. Application of origin-based permeability coefficient attenuation equation in geothermal water recharge[J]. Geology and Resources, 2021, 30(1): 71-74.
- [20] 赵苏民, 孙宝成, 林黎, 等. 沉积盆地型地热田勘查开发与利用[M]. 北京: 地质出版社, 2013: 215-218.
- Zhao S M, Sun B C, Lin L, et al. Exploration, development and utilization of sedimentary basin geothermal field [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013: 215-218. (in Chinese)

(上接第 683 页/Continued from Page 683)

- [13] 国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. GB 8537—2018 食品安全国家标准——饮用天然矿泉水[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- National Health Commission of the People's Republic of China, State Market Supervision and Administration. GB 8537—2018 National food safety standard: Natural mineral water for drinking [S]. Beijing: Standards Press of China, 2019. (in Chinese)
- [14] 苏春田, 黄晨晖, 邹胜章, 等. 新田县地下水锶富集环境及来源分析[J]. 中国岩溶, 2017, 36(5): 678-683.
- Su C T, Huang C H, Zou S Z, et al. Enrichment environment and sources of strontium of groundwater in Xintian county, Hunan Province[J]. Carsologica Sinica, 2017, 36(5): 678-683.
- [15] 王大纯, 张人权, 史毅虹, 等. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1995: 35-47.
- Wang D C, Zhang R Q, Shi Y H, et al. General hydrogeology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995: 35-47. (in Chinese)
- [16] 李文鹏, 郝爱兵. 中国西北内陆干旱盆地地下水形成演化模式及其意义[J]. 水文地质工程地质, 1999(4): 28-32.
- Li W P, Hao A B. The formation and evolution model of groundwater and its significance in inland arid basin, Northwest China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1999(4): 28-32.
- [17] 南京大学地质系. 地球化学(修订版)[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 25-30.
- Department of geology, Nanjing University. Geochemistry (revised edition)[M]. Beijing: Science Press, 1979: 25-30. (in Chinese)
- [18] 曹艳玲, 吴波, 范振华, 等. 山东省定陶地区富锶土壤地质成因研究[J]. 山东国土资源, 2021, 37(1): 28-36.
- Cao Y L, Wu B, Fan Z H, et al. Study on geological origin of strontium rich soil in Dingtao area in Shandong Province [J]. Shandong Land and Resources, 2021, 37(1): 28-36.
- [19] 孙嘉祥, 李霓, 张雯倩. 大同第四纪玄武岩成因: 主微量元素及 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素研究[J]. 岩石学报, 2020, 36(11): 3331-3345.
- Sun J X, Li N, Zhang W Q. Petrogenesis and characteristics of the mantle source for the Quaternary Datong basalt: Research on the major, trace elements and Sr-Nd-Pb-Hf isotopes[J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(11): 3331-3345.
- [20] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. GB 15618—2018 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- Ministry of Ecological Environment, State Administration of Market Supervision. GB 15618—2018 Soil environmental quality Risk control standard for soil contamination of agricultural land [S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.