

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.12.014

黑龙江省林甸地热田成因分析及资源评价

马永法^{1,2,3}, 周学军^{1,3*}, 詹涛^{1,3}, 刘玲^{1,3}, 王旭^{1,3}, 董俊领^{1,3}, 刘玉^{1,3}, 何兰¹, 刘艳^{1,3},
李昌^{1,3}, 史珍珍^{1,3}

MA Yongfa^{1,2,3}, ZHOU Xuejun^{1,3*}, ZHAN Tao^{1,3}, LIU Ling^{1,3}, WANG Xu^{1,3}, DONG Junling^{1,3},
LIU Yu^{1,3}, HE Lan¹, LIU Yan^{1,3}, LI Chang^{1,3}, SHI Zhenzhen^{1,3}

1. 黑龙江省生态地质调查研究院, 黑龙江 哈尔滨 150030;

2. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074;

3. 中国地质学会东北寒区地热能应用技术创新基地, 黑龙江 哈尔滨 150030

1. *Institute of Ecological Geology Survey and Research of Heilongjiang Province, Harbin 150030, Heilongjiang, China;*

2. *China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China;*

3. *Innovation Base of Cold Region Geothermal Energy Application Technology of Northeast China, Geological Society of China, Harbin 150030, Heilongjiang, China*

摘要:为深入分析林甸地热田的形成模式,准确评价地热流体资源量,采用地质调查、地球物理勘查、地热钻探、地球物理测井、水位监测等地质勘查方法,对地热田的成因机制与资源量进行了综合研究。结果表明,林甸地热田的热源主要为幔源热、基底花岗岩放射性元素衰变产热及深大断裂摩擦生热。地热田热储以各类砂岩为主,中生代白垩系泉头组三四段、青山口组 and 姚家组为热储主要发育层位。主要热储埋藏深度为 940~2062 m,热储层累计厚度为 150~240 m。林甸断裂、林甸东断裂、黑鱼泡凹陷西部边界断层 3 条深大断裂为深部热量向上部地层中传导的良好通道。同时,白垩系热储层之上沉积了嫩江组、四方台组、明水组巨厚泥性岩层,为良好的隔热盖层。经计算,林甸地热田的地热能储量为 6.95×10^{19} J,地热流体储存量为 9.78×10^{10} m³,地热流体可开采量为 9.84×10^7 m³/a,产能为 694.13 MW,属大型地热田。经水位监测,2017 年林甸镇地热资源开采量达到最大值,水位到最低点,超出了最大允许开采量,应进行回灌。通过对林甸地热田的成因分析、资源评价及动态监测,为今后地热田的勘查、开发利用规划、采矿权设置等提供了技术支撑。

关键词:地热地质模型;资源评价;林甸地热田;黑龙江

中图分类号:P314;P62 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2022)12-2244-12

Ma Y F, Zhou X J, Zhan T, Liu L, Wang X, Dong J L, Liu Y, He L, Liu Y, Li C, Shi Z Z. Genesis and resource assessment of Lindian geothermal field, Heilongjiang Province. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(12): 2244-2255

Abstract: In order to establish the genesis model of Lindian geothermal field and accurately evaluate the potential of the geothermal resources, geological exploration including geological survey, geophysical exploration, geothermal drilling, geophysical logging and water level monitoring were employed. The results show that the main heat sources in Lindian geothermal field are mantle-derived heat, radioactive decay heat produced by basement granite and friction heat generated by deep faults. The geothermal reservoir is mainly composed of sandstones. The third and fourth members of the Quantou Formation, the Qingshankou Formation and Yaojia Formation of the Cretaceous are the main reservoirs. The burial depth of the main geothermal reservoir are ca. 940 ~ 2062 m, and the accumulated thickness of the reservoir is ca. 150 ~ 240 m. Three deep faults, namely Lindian fault, Lindian East fault and Western Boundary Fault of Heiyubao Sag are good channels for conduction of the deep heat to the upper strata. Furthermore, the Nenjiang Formation, the Sifangtai

收稿日期:2021-09-29; **修订日期:**2022-11-02

资助项目:黑龙江省矿产资源补偿费项目《黑龙江省地热井集中区地热资源调查评价》(编号:黑国土资函[2015]684号)、黑龙江省财政项目《黑龙江省齐齐哈尔市南苑开发区地热资源预可行性勘查及地热能换热实验》(编号:SRKC-2019002)、黑龙江省九〇四环境工程勘察设计院有限公司科技创新基金项目《林甸地区 CO₂地质储存潜力与适宜性评价》(编号:CXJJ-001)

作者简介:马永法(1980-),男,博士,高级工程师,从事地热地质和二氧化碳地质封存研究。E-mail:80902601@qq.com

***通信作者:**周学军(1984-),男,高级工程师,从事地热地质研究。E-mail:13766893593@163.com

Formation and the Mingshui Formation overlaying the reservoir form a good thermal insulation caprock. According to calculation, the base resources of the Lindian geothermal field reaches 6.95×10^{19} J, whereas the volume of the geothermal fluid is 9.78×10^{10} m³, and the recoverable geothermal fluid is 9.84×10^7 m³/a, equaling to a capacity of 694.13 MW, which is equivalent to a large scale geothermal field. According to water level monitoring, withdrawal of the thermal water in Lindian town reached the maximum in 2017, and the water level dropped to the lowest point, which exceeded the maximum allowable withdrawal, thus reinjection is necessary. This research provides technical support for the exploration, exploitation and utilization planning and mining right setting of the Lindian geothermal field in the future.

Key words: genesis model; resource assessment; Lindian geothermal field; Heilongjiang Province

在当今社会普遍关注全球气候变化和环境污染的形势下,中国大力推进“碳达峰、碳中和”。地热资源作为一种清洁可再生的绿色能源,相较传统能源,具有热流密度大、容易收集和输送、参数稳定、使用方便等优势^[1-2],开发利用前景广阔。黑龙江省林甸地热田位于松辽盆地北部,经过地质部门及石油部门数十年的勘探、研究,已证明其蕴含有丰富的中低温地热资源,被命名为“中国温泉之乡”。前人对地热田开展了大量工作,施尚明等^[3]研究了地热田的地温场特征,张树林等^[4]对林甸地区热储水的补给及其水动力条件开展了研究,石义强等^①对林甸县林甸镇地热资源进行了详查,刘妍^[5]对地热田的地热地质条件等进行了初步研究,隋学文等^②对林甸县地热资源进行了勘探,全红伟等^[6]初步分析了地热田砂岩孔隙热储回灌的可行性,董俊领^[7]评价了林甸县长青林场的地热资源潜力,孙梓耀等^③对林甸县巨浪牧场地热资源进行了预可行性勘查,常立新^[8]估算了地热田主要储层的静态资源量,周学军等^④对林甸县地热资源开展了调查工作,李永利等^[9]对地热田供暖尾水处理进行了试验, Yang 等^[10]与朱瑞杰等^[11]对地热田热水微生物多样性与群落结构开展了分析, Yang 等^[12]采用人工神经网络的方法对地热田的储层温度进行了预测,马永法等^[13]评估了地热田的二氧化碳地质封存潜力。以往在林甸地热田开展的工作,主要是对研究区内不同区块地热资源的生产性勘查,或是对回灌、尾水处理、热水微生物、地热储层等某个具体问题进行研究,而对整个地热田的地热资源形成模式、资源量评价等研究很少,且精度较低。因此,有必要对地热田成因机制、资源量进行系统的研究,以推动其开发利用。

针对以上问题,本次工作在前期勘查与搜集资料的基础上,从地热地质角度全面系统梳理了林甸地热田的地质构造、地层、控制断裂、侵入岩等区域地质概况,从“热、储、通、盖”4个要素全面分析了地

热异常形成的地质条件,深入研究了地热田的形成模式,评价了整个地热田的地热资源量,并对水位进行了监测,为今后在该区进一步开展地热资源勘查和研究提供了科学依据。

1 区域地质概况

1.1 地质构造

根据大地构造分级,林甸地热田处在兴安岭—内蒙地槽褶皱区小兴安岭—松嫩地块松嫩中断(坳)陷带北部倾没区与中央凹陷区的交汇处^[14],分属4个二级构造单元,北部为北部倾没区的乌裕尔凹陷、克山依龙背斜带,南部为中央凹陷区的齐家古龙凹陷、黑鱼泡凹陷(图1),构造面貌主要呈中间隆起、东西两侧凹陷的“两凹一隆”构造格局^[8]。

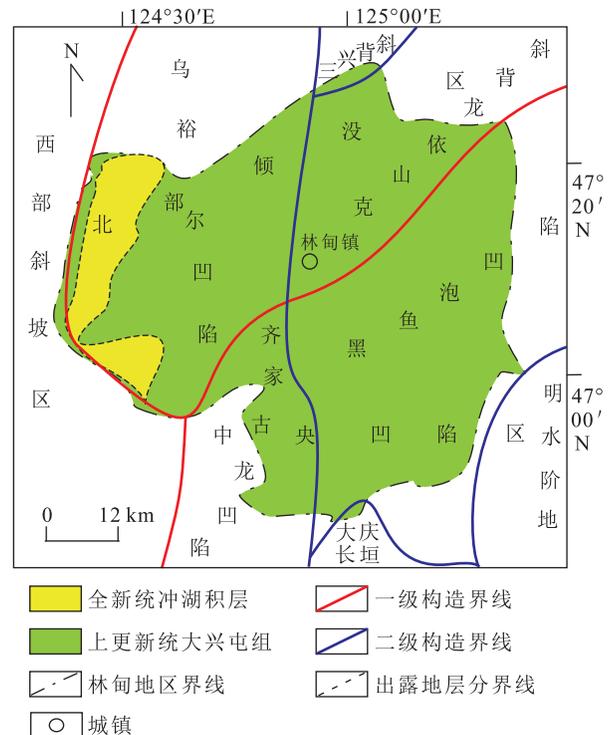


图 1 林甸地热田区域地质图

Fig. 1 Regional geological map of Lindian geothermal field

研究区的构造演化受新华夏系的控制^[15],且主要受2种动力因素的影响,一是深部地幔物质热动力变化的影响;二是太平洋板块活动的影响。其发育历史可分为4个阶段:热隆张裂阶段、伸展断陷阶段、热沉降拗陷阶段、构造反转阶段。整个演化过程,与深部热动力变化息息相关,从古至今一直是松辽热盆地的一部分^[3]。

1.2 地层

根据以往的地热及石油钻孔资料^⑤,研究区的地层层序自上而下分别为第四系大兴屯组、林甸组、泰康组,古近系依安组,白垩系明水组、四方台组、嫩江组、姚家组、青山口组、泉头组、登娄库组,

侏罗系,石炭系—二叠系基底(表1)。

1.3 控制断裂

研究区断裂较发育^②,主要发育3条较大的断裂,黑鱼泡凹陷西部边界断层、林甸断裂、林甸东断裂(图2)。

1.3.1 黑鱼泡凹陷西部边界断层(H13)

该断裂位于林甸地热田东南部黑鱼泡凹陷西部边缘,为其边界断层,从上地幔断至泉头组底面(T3),为壳断裂,断裂走向北东40°,断裂沿走向全长72 km,断裂面整体东倾,倾角在64°左右。

1.3.2 林甸断裂(L1)

为北北东走向,断面倾角110°,从上地幔断至嫩

表1 林甸地热田地层简表

Table 1 Strata in Lindian geothermal field

地 层			累计厚度	岩性概述
系	组	段	/m	
第四系	大兴屯组		20~40	以粉质粘土和黄土状粉质粘土为主
	林甸组		40~110	主要为粉质粘土、粉细砂、含砾粗砂、砂砾石等
	泰康组		60~100	浅灰色粉质粘土、中细砂、粉砂、砂砾石、含植物化石及炭屑
古近系	依安组		10~145	灰色、深灰色、紫褐色泥岩与杂色砂砾岩不等厚互层
	明水组	二段	200~300	灰绿色泥岩与灰绿色粉砂岩、泥质粉砂岩互层
一段		100	深灰、灰黑色泥岩与灰色砂岩钙质砂岩、砂砾岩组成2个正旋回	
白垩系	四方台组		40~100	以紫红色泥岩为主,其次为灰、灰绿色粉砂岩、砂砾岩
		五段	50~100	紫红色泥岩及粉细砂岩
	嫩江组	四段	150~200	紫红色、灰绿色泥质粉砂岩、粉砂岩互层
		三段	150~200	紫红色、灰绿色泥质砂岩、粉砂岩互层
		二段	100~160	主要为黑色泥岩,底部为油页岩,顶部为浅灰色粉砂质泥岩及泥质粉砂岩
		一段	100~150	底部黑色泥岩夹油页岩,中下部为灰色粉砂岩、泥质粉砂岩、泥质粉砂岩夹泥岩,上部黑色泥岩,夹劣质油页岩
	姚家组	二三段	40~80	以砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩为主
		一段	20	下部为一组厚层状灰白色砂岩,底粗上细正旋回特征,顶部以红色泥岩与粉砂岩互层为主
	青山口组	二三段	180~350	以深灰色、灰黑色泥岩、厚层泥岩、灰色粉砂岩和泥质粉砂岩互层为主
		一段	50~80	灰黑色、深灰色泥岩与灰色粉砂岩,呈不等厚互层
泉头组	四段	30~100	灰绿色、紫红色泥岩与灰白色粉砂岩呈不等厚互层	
	三段	110~300	灰绿色、紫红色、杂灰绿色砂泥碎屑岩沉积	
登娄库组	二一段	112~320	以紫红色、暗紫色泥岩为主,夹薄层粉砂岩	
		>400	岩性为杂色砂砾岩、暗色砂质泥岩、块状砂岩和泥岩。泥岩含砂、钙质团块。受古地理条件控制明显,地层厚度变化较大,一般在200~700 m之间,与下伏侏罗系呈不整合接触	
侏罗系		>1000	为灰白色、灰色砂岩、砂砾岩、砾岩夹灰黑色、灰色泥板岩,泥岩含泥砾、钙砾浅变质岩	
石炭系—二叠系				

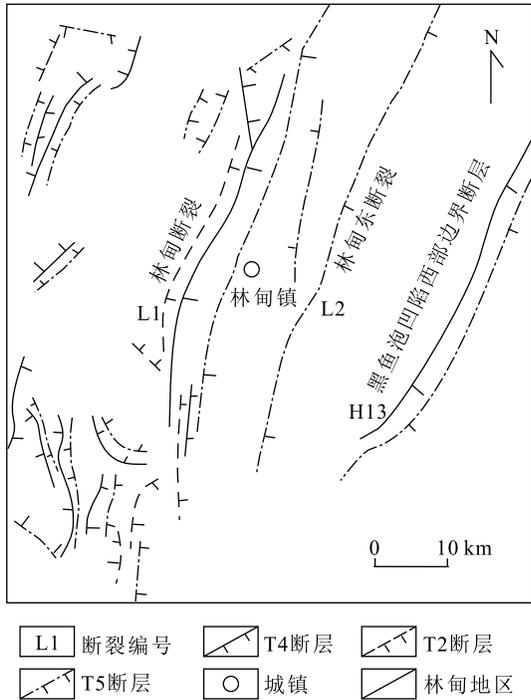


图 2 林甸地热田主要断裂展布迭合图^⑤

Fig. 2 Distribution of the main faults in Lindian geothermal field

三段底面,为壳断裂,在本区长约 40 km。该断裂带在侏罗系底面(T5层)表现为正断层,从北向南垂向断距和水平断距增大,最大垂向断距为 2955 m,水平断距为 3000 m。在登娄库组底面(T4层)最大断距为 50 m。在泉头组底面(T3层)表现为逆断层,最大断距为 110 m。在青山口组底面(T2层)也表现为逆断层,最大断距为 90 m。在嫩江组底面(T1层)和嫩三段底面(T06层)林甸断层都表现为逆断层,最大断距分别为 115 m 和 80 m。

林甸断裂(L1)两侧在泉头组底面(T3层)伴生 8 条走向近一致的断距较小的小断层。这些断层延伸长度在 5~10 km 之间,断距 30~50 m,最大 70 m。其倾向与主断层相同,均为东侧下降的正断层。

在泉头组顶面(T2层)深层主断层上形成 24 条小断层。这些小断层走向与倾向及所处部位和深层断裂大致一致,断层延伸长度一般为 5~8 km,最大 11 km,断距 30~50 m,最大达 190 m,均为正断层。

1.3.3 林甸东断裂(L2)

位于林甸断裂东约 8 km,与林甸断裂倾向相同,断距变化趋势相反,林甸东断裂北大南小,错断

侏罗系底面以下地层,为壳断裂,垂向断距最大达 2955 m,水平断距最大达 6.8 km,最小垂向断距 750 m,最小水平断距 1.7 km。

1.4 侵入岩

主要为印支期和燕山期侵入岩,印支期花岗岩体在本区基底广泛分布,多呈巨大岩基出现。燕山期花岗岩体以岩基为主,呈条带状分布。

2 地热地质模型

2.1 热源

林甸地热田热源主要有 3 个,一是地球内能——幔源热,二是花岗岩放射性产生的热量,三是深大断裂摩擦生热。

2.1.1 幔源热

地幔热源是供给盆地热能的主要热源之一,通过热传导不断把热能输送到盆地内,所以莫霍面位置的升降起伏直接影响地幔的供热量^[6]。利用区域重力测量剖面,采用压缩质面法计算出林甸地热田的莫霍面深度,根据松辽盆地 1:20 万高精度航磁资料,采用能谱法计算出林甸地热田居里面埋藏深度,并综合成图(图 3)。从图 3 可以看出,林甸地热田处于松辽盆地莫霍面较浅的地区,莫霍面埋深多小于 32 km,最薄处为 30 km;居里面埋藏深度小于 22 km^[3]。研究区莫霍面与居里面埋深较浅,上地幔隆起,地壳较薄,热能外溢,形成了林甸地热田最稳定的热能来源。

2.1.2 花岗岩放射性热量

各类岩石具有不同的放射性元素含量,故其产

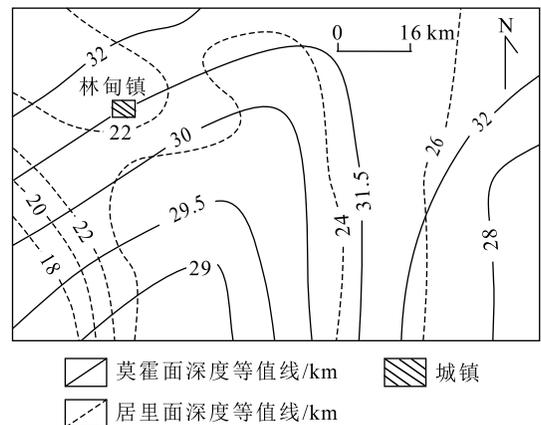


图 3 林甸地热田莫霍面和居里面埋深等值图^[3]

Fig. 3 Contour map of burial depth of Moho surface and Curie isothermal surface in Lindian geothermal field

热率亦不一样,其中以花岗岩产热率最高,达到 $8.3 \mu\text{cal}/(\text{g} \cdot \text{a})$,其热量是花岗岩中所含放射性元素U、Th、K衰变产生的。尤其是U具有 $3.47 \mu\text{cal}/(\text{g} \cdot \text{a})$ 的产热率^[17],产生的热量很大。林甸地热田基底侵入了大面积的印支期和燕山期花岗岩(图4),印支期花岗岩面积约 1350 km^2 ,燕山期花岗岩面积约 900 km^2 ,约占研究区总面积的一半以上,其放射性产热是另一主要热源。花岗岩产生的放射性热能具有年代很久的持续性,不仅在盆地形成初期影响研究区的地温场,而且在以后不同发展阶段也影响地温场,主导作用明显。

2.1.3 深大断裂摩擦生热

研究区断裂较发育,主要发育3条较大的断裂,并存在许多伴生的小断裂(图2)。这些断裂在活动过程中由于机械摩擦产生部分热量,同时,断裂又是深部地热向上部地层传热的良好通道^[5],故沿断

层走向的地温梯度、大地热流值亦较高。

2.2 热储

热储指埋藏于地下且地热流体相对富集,并具有足够孔隙率和渗透性的地质建造(地层、岩体或构造带),其中储存有一定的地热流体可供地热开发生产^[18]。根据勘探资料,研究区内主要热储层由上至下为中生代白垩系姚家组-青山口组、泉头组三四段,岩性以各类砂岩为主,在平面上均分布于整个林甸地区,其厚度、温度及物性条件见表2。

2.2.1 姚家组-青山口组热储

地层厚度为 $395 \sim 539 \text{ m}$,热储层厚 $122 \sim 244.8 \text{ m}$,热储层由姚二、姚三段,姚一段,青二、青三段,青一段组成。其中,青二、青三段砂体沉积较厚,单层厚度较大,是林甸地热田的主力热储层。

姚二、姚三段:热储层厚 $5.4 \sim 24.4 \text{ m}$,孔隙度值在 $18.1\% \sim 30.1\%$ 之间,渗透率值在 $40 \times 10^{-3} \sim 300 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间。热储层温度为 $48 \sim 58^\circ\text{C}$,南高北低。

姚一段:热储层厚度为 $8 \sim 31.4 \text{ m}$,孔隙度为 $15.8\% \sim 26.9\%$,渗透率在 $20 \times 10^{-3} \sim 150 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间。热储层温度为 $50 \sim 60^\circ\text{C}$,南高北低。

青二、青三段:热储层厚度 $116.8 \sim 197.2 \text{ m}$,孔隙度值 $16.4\% \sim 25.7\%$,渗透率值为 $20 \times 10^{-3} \sim 400 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。热储层温度 $51 \sim 64^\circ\text{C}$,北低南高,热水产量最大,是地热田的主力热储层。

青一段:砂岩厚度相差较大,沉积厚度不均一,在城区发育最好,砂岩总厚度一般大于 20 m ,单层最大厚度 8 m ;林甸西背斜发育最差,单层厚度大于 1 m 的仅发育两层,总厚 3.8 m ,单层最大厚度 2.2 m ,最薄 0.8 m 。孔隙度在 $15.5\% \sim 23.4\%$ 之间,渗透率平均值为 $32.7 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,热储层温度 $53 \sim 70^\circ\text{C}$ 。

2.2.2 泉三、泉四段热储

泉头组沉积时期,主要受齐齐哈尔沉积环境控制,发育河流相、湖泛平原和浅湖相沉积。泉头组在林甸地热田广泛分布,顶板埋深 $1200 \sim 2100 \text{ m}$ 。泉三、四段地层总厚度 $240 \sim 310 \text{ m}$,热储层厚 $16 \sim 89.2 \text{ m}$,孔隙度为 $12.2\% \sim 20.2\%$,渗透率为 $10 \times 10^{-3} \sim 100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

泉四段:热储层厚 $7.6 \sim 55.6 \text{ m}$,孔隙度北高南低,北部为 $17\% \sim 20\%$,南部为 $15\% \sim 18\%$,渗透率西北高东南低,西北部为 $70 \times 10^{-3} \sim 100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,东南为 $20 \times 10^{-3} \sim 50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。热储层温度为 $55 \sim 72^\circ\text{C}$ 。

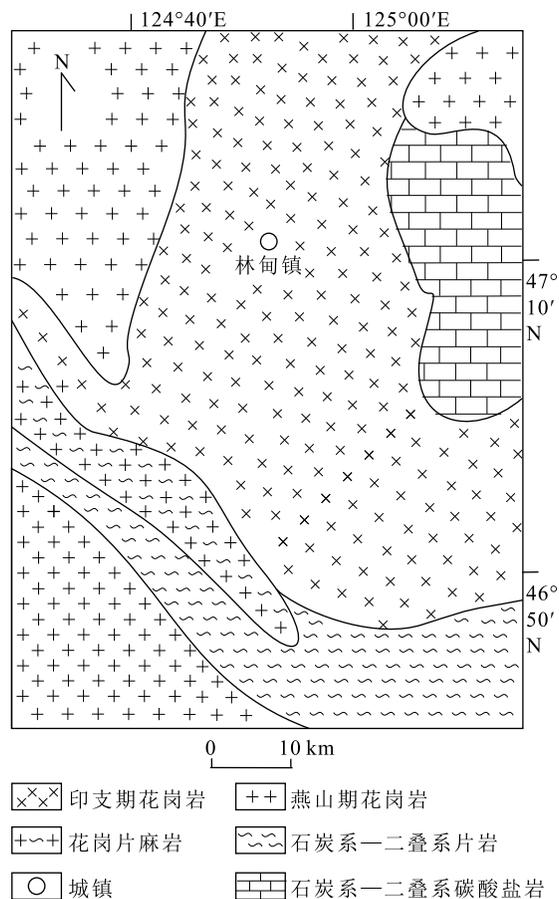


图4 林甸地热田基底岩浆岩和变质岩分布图^⑤

Fig. 4 Distribution of magmatic and metamorphic rocks in Lindian geothermal field

表 2 林甸地热田主要热储层厚度、温度、孔隙度与渗透率

Table 2 Thickness, temperature, porosity and permeability of main reservoirs in Lindian geothermal field

地 层		热储层厚度/m	热储层温度/°C	热储层孔隙度/%	热储层渗透率 / $10^{-3} \mu\text{m}^2$	富水性
组	段					
姚家组	二、三段	5.4~24.4	48~58	18.1~30.1	40~300	中等
	一段	8~31.4	50~60	15.8~26.9	20~150	中等
青山	二、三段	116.8~197.2	51~64	16.4~25.7	20~400	中等
口组	一段	0.8~20	53~70	15.5~23.4	均值 32.7	中等
泉头组	四段	7.6~55.6	55~72	15~20	20~100	中等
	三段	8.4~34.2	57~76	12.2~20.2	10~100	中等

泉三段:热储层厚 8.4~34.2 m,孔隙度为 12.2%~20.2%,北高南低,北部一般为 20%。渗透率为 $10 \times 10^{-3} \sim 100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,北高南低。热储层温度为 57~76°C。

2.3 导热通道

热储层下部白垩系泉头组一二段、登娄库组、侏罗系、石炭系一二叠系及花岗岩侵入成岩作用强,岩性致密,为较好的热传导层。构造断裂不仅是地热资源中水源和热储层的间接创造者,也为水源与热源的流通提供了有利通道^[19-21]。研究区分布着林甸断裂、林甸东断裂、黑鱼泡凹陷西部边界断层 3 条深大断裂和与其伴生的小断裂(图 2)。3 条深大断裂不仅延伸远、切割深,且都错断了白垩系姚家组、青山口组和泉头组三四段热储层,进入上地幔。这些断裂构造使围岩裂隙发育,导水性、导热性增强,为深部热量向上部地层传导提供了良好通道。

2.4 盖层

盖层是各类不透水或透水性差的岩石组合,多由各类泥质岩组成,是热储层温度保护的重要条件^[22],可以减少热量散失及隔绝地热流体与浅层地下水的水力联系。林甸地热田热储属封闭型热储。林甸地热田在上白垩统姚家组之上沉积了嫩江组、四方台组、明水组,岩性以泥质岩为主(表 1),夹薄层砂岩,厚度为 800~1300 m,隔热性良好,对地热流体封闭和蓄积起到了较好的作用,是良好的隔热盖层。

2.5 地温

地温梯度指不受大气影响的地层温度随深度增加的增长率,可以指示一个地区温度增长的方向^[23]。为了解林甸地热田热储层平面温度变化规律,利用钻井测井温度资料,模拟了 2000 m、1000 m

埋深的地温变化情况。在 2000 m 埋深情况下,林甸地区地温为 90~96°C,地温高值区在林甸县城一带,地层温度为 94~96°C(图 5)。在 1000 m 埋深区,林甸地区地温为 41~43°C,地温分布状况没有大的改变,林甸县城地区仍处于地温高值区(图 6)。

纵向上,林甸地热田 0~2000 m 的地温梯度为 45~48°C/km,远高于全球平均地热增温率 25°C/km。分析其原因,区域地温梯度主要受基底花岗岩体分布控制^[24]。

2.6 地热流体形成模式

松辽盆地是中国莫霍面和居里面埋藏最浅的

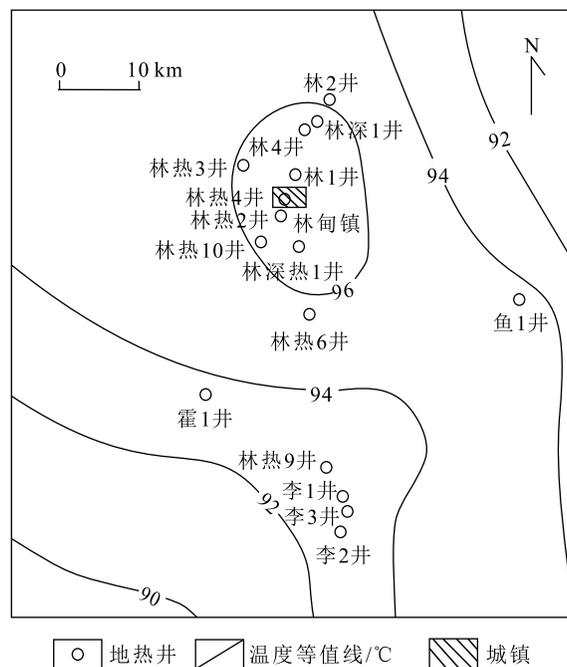


图 5 林甸地热田 2000 m 地温等值线图

Fig. 5 Contour map of 2000 m geotemperature in Lindian geothermal field

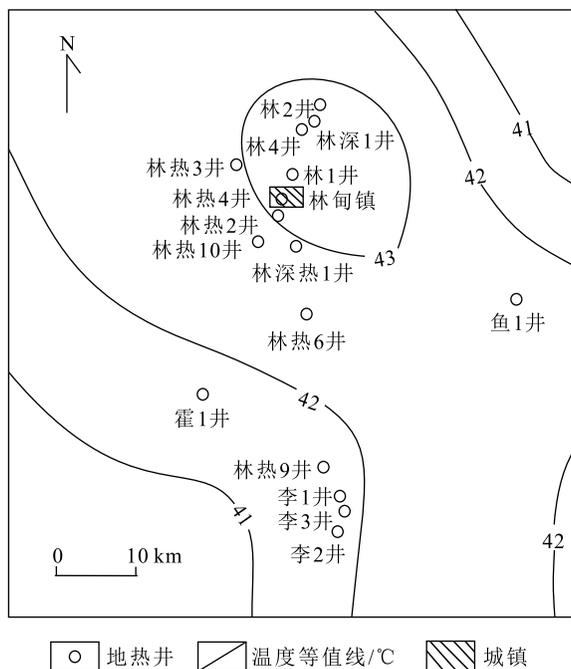


图6 林甸地热田 1000 m 地温等值线图

Fig. 6 Contour map of 1000 m geo-temperature in Lindian geothermal field

盆地之一,林甸地热田位于松辽盆地北部莫霍面和居里面埋藏较浅处,由于地壳较薄,热能外溢,加上基底大面积花岗岩放射性元素衰变产热及深大断裂摩擦生热,成为林甸地热田热能的主要来源。林甸地热田热储严格受沉积砂层控制,属“层控型”沉积岩孔隙型热储,以各类砂岩为主,中生代白垩系泉头组三四段、青山口组和姚家组在林甸地热田范围内广泛分布,为热储的主要发育层位。热储埋藏深度为 940~2062 m,热储层累计厚度为 150~240 m。林甸地热田热储层接受松嫩盆地东北部边缘地带古近系、新近系和第四系地下水或大气降水补给^②。热储层下部的白垩系泉头组一二段、登娄库组、侏罗系、石炭系一二叠系及花岗岩侵入体为较好的热传导层。林甸断裂、林甸东断裂、黑鱼泡凹陷西部边界断层 3 条深大断裂为深部热量向上部地层中传导的良好通道。同时,林甸地热田在白垩系热储层之上沉积了嫩江组、四方台组、明水组巨厚泥性岩层,为良好的隔热盖层。

从“热、储、通、盖”4 个要素分析,林甸地热田是由下部的热传导层、中部的热储层和上部的热储盖层构成的相对简单的地热系统(图 7),属于沉积盆

地型(传导型)地热田,这类地热田的特点是热储分布面积广,地层岩性、厚度变化不大,分布稳定,构造条件较简单。

3 地热资源量计算

根据《地热资源地质勘查规范》(GB/T 11615—2010)^[25]要求,地热资源评价包括地热能储量与地热流体可开采储量评价。林甸地热田为沉积盆地型地热资源类型,热储厚度大,分布面积广,为热储层分布无限边界条件。地热能储量计算评价主要采用热储法,地热流体可开采储量计算评价主要采用解析法。依据地质构造分区情况,将林甸地热田划分为乌裕尔凹陷计算区(I区)、克山-依龙背斜计算区(II区)、黑鱼泡凹陷计算区(III区)、齐家-古龙凹陷计算区(IV区)(图 1),其面积分别为 1215 km³、597 km³、1404 km³、345 km³。

3.1 地热能储量

3.1.1 计算模型

热储层中储存热能总量包括热储中固体和流体含热能总量,采用热储法计算模型计算。

$$Q = Q_r + Q_w \quad (1)$$

其中, $Q_r = A d \rho_r C_r (1 - \varphi) (t_r - t_0)$, $Q_w = Q_L \rho_w C_w (t_r - t_0)$, $Q_L = Q_1 + Q_2$, $Q_1 = A \varphi d$, $Q_2 = A S H$

式中: Q —热储中储存的热量, J; Q_r —岩石中的储存的热量, J; Q_w —水中储存的热量, J; Q_L —热储中储存的水量, m³; Q_1 —截止到计算时刻,热储孔隙

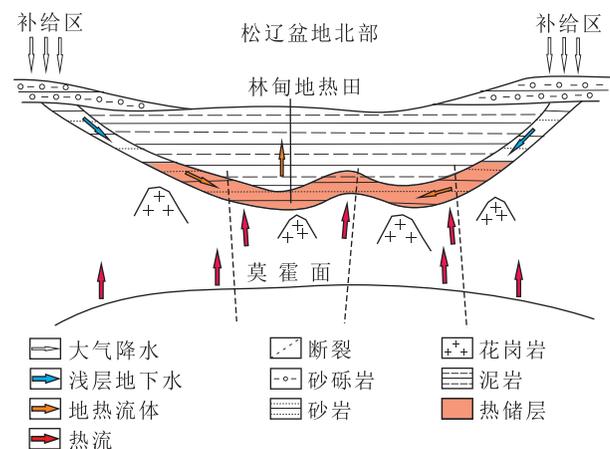


图7 林甸地热田成因模式

Fig. 7 Genesis model of Lindian geothermal field

中热水的静储量, m^3 ; Q_2 —地热流体的弹性储存量, m^3 ; A —计算区面积, m^2 ; d —热储厚度, m ; φ —热储岩石的孔隙度, 无量纲; t_r —热储温度, $^{\circ}C$; t_0 —当地年平均气温, $^{\circ}C$; ρ_r 、 ρ_w —分别为岩石和水的密度, kg/m^3 ; C_r 、 C_w —热储岩石和水的平均比热容, $J/(kg \cdot ^{\circ}C)$; S —弹性释水系数, 无量纲; H —自热储层顶板算起的压力水头高度, m 。

3.1.2 参数选择

(1) 分别计算有代表性的乌裕尔凹陷区 (I 区) 的林热 40 井、林热 43 井、巨浪 1 井、林热 53 井, 克山-依龙背斜区 (II 区) 的林热 10 井、林灌 1 井、林热 39 井, 黑鱼泡凹陷区 (III 区) 的花园镇林热 9 井及长青林场的林热 11 井、林热 14 井、林热 15 井、林

热 16 井、林热 17 井、林热 18 井、林热 24 井、林热 25 井、林热 26 井、林热 27 井、林热 28 井, 齐家-古龙凹陷区 (IV 区) 的林热 41 井的 d 、 φ 、 t_r 、 S 、 H 平均值作为该区的计算模型参数 (表 3)。

(2) 年平均气温 (t_0)

林甸县的年平均气温为 $2.5^{\circ}C$ 。

(3) 岩石的密度 (ρ_r)、比热 (C_r)

依据《地热资源地质勘查规范》(GB/T11615—2010)^[25] 附录, C 取砂岩经验值, 岩石密度为 $2600 kg/m^3$, 比热为 $878 J/(kg \cdot ^{\circ}C)$ 。

(4) 水的比热 (C_w)、密度 (ρ_w)

水的比热为 $4.2 \times 10^3 J/(kg \cdot ^{\circ}C)$ 或 $1 kcal/(kg \cdot ^{\circ}C)$ 。水的密度随温度增加稍有降低, 依据

表 3 林甸地热田储量各计算区 d 、 φ 、 t_r 、 S 、 H 的平均值

Table 3 The average of d , φ , t_r , S and H of the reservoirs evaluated in Lindian geothermal field

序号	计算区	井号	d/m	$\varphi/\%$	$t_r/^{\circ}C$	S	H/m
I	乌裕尔凹陷	林热 40 井	305	18.6	43.8		
		林热 43 井	139.2	19.8	46.5		
		巨浪 1 井	135.2	16.3	55		
		林热 53 井	193	18.1	48.3		
	平均值		193.1	18.2	48.4	3.016×10^{-3}	971
II	克山-依龙背斜	林热 10 井	192.9	21.3	63.2		
		林灌 1 井	206.1	23.1	64.3		
		林热 39 井	254	18.3	58.5		
	平均值		226.8	20.9	62	1.308×10^{-4}	1082.56
III	黑鱼泡凹陷	林热 11 井	213.5	17.25			
		林热 14 井	192.9	16.00			
		林热 15 井	194.3	22.03			
		林热 16 井	256.3	16.52			
		林热 17 井	248.8	15.46			
		林热 18 井	250.4	19.03			
		林热 24 井	222.9	16.4			
		林热 25 井	307.4	18.05			
		林热 26 井	251.2	17.61			
		林热 27 井	214.7	14.81			
	林热 28 井	225.3	15.05				
		长青林场平均值	238.18	17.11	61.95		
		花园镇林热 9 井	122	23.49	63.51		
		平均值	180.1	20.3	62.73	6.25×10^{-5}	1059.71
IV	齐家-古龙凹陷	林热 41 井	261.8	17.5	63.4	5.20×10^{-3}	1252.2

《地热资源地质勘查规范》(GB/T11615—2010)^[25] 水的密度随温度变化统计表,推算出水的密度在乌裕尔凹陷计算区(I区)为989.4 kg/m³,在克山依龙背斜计算区(II区)为982.5 kg/m³,在黑鱼泡凹陷计算区(III区)为981.7 kg/m³,在齐家古龙凹陷计算区(IV区)为981.3 kg/m³。

3.1.3 地热能储量

将参数代入计算模型公式(1),计算林甸地热田热储层中储存的热能总量为6.95×10¹⁹ J(表4)。

表4 林甸地热田地热能储量计算结果

Table 4 The calculation results of thermal energy reserves in Lindian geothermal field

序号	计算区	热储中热能总量/J	
I	乌裕尔凹陷	2.89×10 ¹⁹	6.95×10 ¹⁹
II	克山-依龙背斜	2.16×10 ¹⁹	
III	黑鱼泡凹陷	4.05×10 ¹⁸	
IV	齐家-古龙凹陷	1.49×10 ¹⁹	

3.1.4 地热流体储存量

采用水文地质学计算法对地热流体储存量(Q_t)进行计算,其值为9.78×10¹⁰ m³,包括体积储存量(Q₁)为9.19×10¹⁰ m³,弹性储存量(Q₂)为5.90×10⁹ m³,计算结果见表5。积储存量(Q₁)和弹性储存量(Q₂),计算结果见表5。

3.2 地热流体可开采量

3.2.1 计算公式

地热流体可开采储量计算,采用解析模型均匀布井法进行计算评价。

公式为:

$$s_i = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{4\pi T} W\left(\frac{r_i^2}{4at}\right) \quad (2)$$

式中:s_i—各井对i号井的干扰降深,m;r_i—i号

井至各井的距离,m;t—抽水延续时间,d;T—导水系数,m²/d;a—导压系数,m²/d;Q_i—i号井的设计出水量,m³/d;W $\left(\frac{r_i^2}{4at}\right)$ —井函数。

3.2.2 计算参数确定

(1) 开采时间及最大限制降深

根据规范要求计算,开采时间为100 a。目前热水泵最大扬水高度350 m,最大限制降深为热水泵最大扬水高度(350 m)减去静止水位埋深。各计算区最大限制降深值分别为340 m、230 m、315 m和370 m(表6)。

(2) 单井出水量

根据抽水试验及生产井实际产水量,并考虑长期抽水水位下降引起水量衰减等因素确定。其中,乌裕尔凹陷计算区(I区)单井出水量为900 m³/d,克山-依龙背斜计算区(II区)单井出水量为600 m³/d,黑鱼泡凹陷计算区(III区)单井出水量为500 m³/d,齐家-古龙凹陷计算区(IV区)单井出水量为800 m³/d。

(3) 井数、井距

根据以往林甸县长期观测数据,井间距2000 m和井间距3000 m,长期抽水均有干扰影响,井间距2000 m的井干扰影响程度明显大于井间距为3000 m的井。综合考虑,各计算区井距均选取3000 m。工作区可布开采井数量为:n=A/(2R)²。各计算区可布开采井数量分别为135个、66个、156个和38个(表7)。

(4) 导水系数、导压系数

根据降压试验资料,利用泰斯公式、雅各布公式计算,确定各计算区的导水系数分别为24 m²/d、47 m²/d、17.6 m²/d与16.26 m²/d,导压系数分别为7.96×10³ m²/d、3.59×10⁵ m²/d、2.82×10⁵ m²/d与3.13×10³ m²(表8)。

表5 林甸地热田地热流体储存量计算结果

Table 5 The calculation results of thermal fluid storage in Lindian geothermal field

序号	计算区	体积储存量		弹性储存量		总储存量
		/m ³		/m ³		
I	乌裕尔凹陷	4.27×10 ¹⁰	9.19×10 ¹⁰	3.56×10 ⁹	5.90×10 ⁹	9.78×10 ¹⁰
II	克山-依龙背斜	2.83×10 ¹⁰		8.45×10 ⁷		
III	黑鱼泡凹陷	5.13×10 ⁹		9.30×10 ⁶		
IV	齐家-古龙凹陷	1.58×10 ¹⁰		2.25×10 ⁹		

表 6 林甸地热田储量各计算区最大限制降深

Table 6 The maximum limit drop of reserves in each calculation area of Lindian geothermal field

序号	计算区	静止水位埋深 /m	最大限制降深 /m
I	乌裕尔凹陷	10	340
II	克山-依龙背斜	120	230
III	黑鱼泡凹陷	35	315
IV	齐家-古龙凹陷	-20	370

注:水位由井口算起,负值为自流

3.2.3 可开采量

将上述确定的有关参数值带入计算公式(2),经过叠加计算出各个构造单元开采 100 a 时的最大降深值分别为 303.20 m、211.08 m、283.43 m 和 187.03 m,均未超过最大降深(表 9),说明该布井方案合理,地热水可开采储量计算值可靠。

将各计算区单井出水量相叠加,计算出整个地热田地热流体可开采量为 $9.84 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$ (表 10)。

3.2.4 地热田规模评价

依据《地热资源地质勘查规范》(GB/T 11615—2010)^[25],计算地热田产能公式为:

$$W_t = 4.1868 Q(t - t_0) \quad (3)$$

式中: W_t —热功率, kW; Q —地热流体可开采量, L/s; t —地热流体温度, °C; t_0 —当地年平均气温, °C; 4.1868—单位换算系数。计算参数见表 11。

将表 11 的参数代入公式(3),计算出林甸地热田产能为 694.13 MW(表 12)。根据《地热资源地质勘查规范》(GB/T 11615—2010)^[25]可判断,林甸地热田属大型地热田。

表 8 林甸地热田储量各计算区导水系数和导压系数

Table 8 The water conductivity coefficient and pressure conductivity coefficient of each calculation area of Lindian geothermal field reserves

序号	计算区	导水系数 /($\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$)	释水系数	导压系数 /($\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$)
I	乌裕尔凹陷	24	3.016×10^{-3}	7.96×10^3
II	克山-依龙背斜	47	1.308×10^{-4}	3.59×10^5
III	黑鱼泡凹陷	17.6	6.25×10^{-5}	2.82×10^5
IV	齐家-古龙凹陷	16.26	5.20×10^{-3}	3.13×10^3

表 7 林甸地热田储量各计算区可布开采井数量

Table 7 The number of exploitation wells that could be arranged in each calculation area of Lindian geothermal field reserves

序号	计算区	面积/ km^2	可布开采井 数量/个
I	乌裕尔凹陷	1215	135
II	克山-依龙背斜	597	66
III	黑鱼泡凹陷	1404	156
IV	齐家-古龙凹陷	345	38

4 地热流体水位动态变化特征

根据多口井动态监测资料显示,天然状态下林甸地热田地热流体水位(压力)基本不变。地热流体水位变化仅受人工开采影响。经统计,林甸地热田地热流体整体开采程度不高,仅在林甸镇达到规模化开采,其他地区零星开采。以林甸镇集中开采区为例,该区地热流体自 2000 年开始开采,2012 年以前开采量较小,水位下降趋势较缓,2012 年以后开采量骤增,水位下降速率加快,到 2017 年开采量达到最大值,水位降到最低点,超出了最大允许开采量。2017 年县政府采取了一些措施,减少了开采量,开采中心区水位有所回升(图 8)。

5 结论

(1)林甸地热田属沉积盆地型(传导型)地热田,其热源主要为幔源热、基底花岗岩放射性元素衰变产热及深大断裂摩擦生热。地热田热储以各类砂岩为主,中生代白垩系泉头组三四段、青山口组和姚家组为热储主要发育层位。林甸断裂、林甸

表 9 水位降深值计算结果

Table 9 Calculation result of water level drop

序号	计算区	最大限制降 深值/m	100 年最大降深 计算值/m
I	乌裕尔凹陷	340	303.20
II	克山-依龙背斜	230	211.08
III	黑鱼泡凹陷	315	283.43
IV	齐家-古龙凹陷	370	187.03

表 10 林甸地热田地热流体可开采量计算结果

Table 10 Calculation results of recoverable amount of thermal fluid in Lindian geothermal field

序号	计算区	单井可开采量 /($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	可布开采井 数量/个	可开采量	
				/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	/($\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)
I	乌裕尔凹陷	900	135	121500	4.43×10^7
II	克山-依龙背斜	600	66	39600	1.45×10^8
III	黑鱼泡凹陷	500	156	78000	2.85×10^7
IV	齐家-古龙凹陷	800	38	30400	1.11×10^7
	合计		395	269500	9.84×10^7

表 11 林甸地热田产能计算参数

Table 11 Energy calculation parameter table of Lindian geothermal field

序号	计算区	地热流体可开采量		地热流体 温度/ $^{\circ}\text{C}$	当地年平均 气温/ $^{\circ}\text{C}$
		/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	/($\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$)		
I	乌裕尔凹陷	121500	1406.26	60	2.5
II	克山-依龙背斜	39600	458.34	50	2.5
III	黑鱼泡凹陷	78000	902.78	52	2.5
IV	齐家-古龙凹陷	30400	351.85	55	2.5

表 12 林甸地热田产能计算成果及规模评价

Table 12 Evaluation table of Lindian geothermal field capacity calculation results and scale

序号	计算区	地热田产能 /kW	规模
I	乌裕尔凹陷	338544.44	大型
II	克山-依龙背斜	91151.45	大型
III	黑鱼泡凹陷	187098.09	大型
IV	齐家-古龙凹陷	77339.09	大型
	合计	694133.07	大型

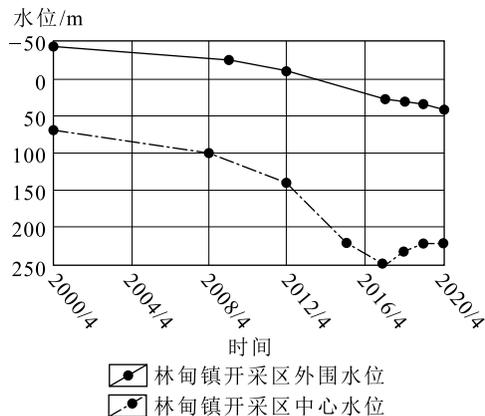
图 8 林甸地热田地热流体水位动态变化特征
(水位正数为地面以下,负数为地面以上)

Fig. 8 Dynamic variation characteristics of thermal fluid water level in Lindian geothermal field

东断裂、黑鱼泡凹陷西部边界断层 3 条深大断裂为深部热量向上部地层中传导的良好通道。同时,白垩系热储层之上沉积了嫩江组、四方台组、明水组巨厚泥性岩层,为良好的隔热盖层。

(2) 林甸地热田地热资源储量丰富。经计算,地热能储量为 6.95×10^{19} J, 地热流体储存量为 9.78×10^{10} m^3 , 地热流体可开采量为 9.84×10^7 m^3/a , 产能为 694.13 MW, 属大型地热田。

(3) 对林甸地热田的成因机制与资源量评价进行综合研究,为今后在该区进一步开展地热资源勘查和研究起到较大借鉴作用。同时,在该区开采地热流体,要加强监测和回灌,在做好保护的基础上,科学合理可持续地利用好地热资源。

致谢:感谢吉林大学杨峰田副教授,黑龙江省生态地质调查研究院地热资源勘查院曹冠男、刘天、李秀海、王建平工程师在论文撰写过程中给予的帮助,感谢审稿专家对本文提出的指导与修改意见。

参考文献

- [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.
- [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.

- [3] 施尚明,孙小洁,于清华.松辽盆地林甸地区地温场特征[J].大庆石油学院学报,1998,22(4):77-79,102-103.
- [4] 张树林,施尚明,郭升.松辽盆地林甸地区热储水的补给及其水动力条件[J].大庆石油学院学报,1998,22(4):80-82.
- [5] 刘妍.对林甸地区地热资源的初步认识[J].油气井测试,2003,12(5):69-70.
- [6] 全红伟,陈正国,孔登锋.基于林甸地热田砂岩孔隙热储回灌的初步分析[J].黑龙江水利科技,2011,39(5):10-12.
- [7] 董俊领.长青林场地热资源潜力评价[D].吉林大学硕士学位论文,2013.
- [8] 常立新.黑龙江省林甸地热田形成条件及主要热储层资源量[J].内蒙古石油化工,2015,(22):34-37.
- [9] 李永利,于长生,姜智超,等.松嫩盆地北部林甸地热田供暖尾水处理试验[J].水文地质工程地质,2021,48(1):188-194.
- [10] Yang F T, Li D, Zhou X J, et al. Microbial Community Composition in Thermal Waters from the Lindian Geothermal Field (Songliao Basin, North-Eastern China) [J]. Water, 2022, 14: 632.
- [11] 朱瑞杰,周学军,詹涛,等.黑龙江林甸地热田热水微生物多样性与群落结构分析[J/OL].中国地质. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20220413.1014.004.html>.
- [12] Yang F T, Zhu R J, Zhou X J, et al. Artificial neural network based prediction of reservoir temperature: A case study of Lindian geothermal field, Songliao Basin, NE China [J]. Geothermics, 2022, 106: 102547.
- [13] 马永法,周学军,董俊领,等.黑龙江林甸地区深部咸水层 CO₂地质储存条件与潜力评估[J].水文地质工程地质,2022,49(6):179-189.
- [14] 大庆油田石油地质志编写组.中国石油地质志(卷二),大庆、吉林油田(上册)[M].北京:石油工业出版社,1987.
- [15] 李四光.地质力学概论[M].北京:科学出版社,1973.
- [16] 黄少鹏.中国大陆地区大地热流和地壳厚度的变化[J].地球物理学报,1992,35(4):441-450.
- [17] 高瑞祺,蔡希源.松辽盆地油气田形成与分布规律[M].北京:石油工业出版社,1997.
- [18] 徐世光,郭远生.地热学基础[M].北京:科学出版社,2009.
- [19] 柯柏林.北京市平原区北部孙河断裂的地热地质特征[J].现代地质,2009,23(1):43-48.
- [20] 段启杉,宋小庆,孟凡涛.贵州东部变质岩区地热水赋存规律研究[J].地下水,2015,37(4):37-39.
- [21] 王永波,丁文萍,田月,等.河北牛驼镇地热田高温地热水成因分析[J].城市地质,2016,11(3):59-64.
- [22] 安百州,曾昭发,闫照涛,等.鄂尔多斯盆地西缘热储构造模式及地热资源分布特征[J].吉林大学学报(地球科学版),2022,52(4):1286-1301.
- [23] 汪集旸.中低温对流型地热系统[M].北京:科学出版社,1993.
- [24] 汪在君.松辽盆地北部的地热资源及其开发利用方向[J].自然资源学报,2003,18(1):8-10.
- [25] 宾德智,刘延忠,郑克桠,等.地热资源地质勘查规范(GB/T 11615—2010)[S].北京:中国标准出版社,2011.
- ①石义强,张梅桂,王强,等.黑龙江省林甸县林甸镇地热资源详查报告.黑龙江省第二水文地质工程地质勘察院,2000.
- ②隋学文,刘玉,时影达.黑龙江省林甸县地热资源勘探报告.黑龙江省第二水文地质工程地质勘察院,2010.
- ③孙梓耀,李博,杜永晶,等.黑龙江省林甸县巨浪牧场地热资源预可行性勘查报告.黑龙江省地质调查研究总院,2013.
- ④周学军,詹涛,史珍珍,等.林甸县地热资源调查报告.黑龙江省第二水文地质工程地质勘察院,2017.
- ⑤大庆市地热研究课题组.大庆市林甸地区地热资源特征及地热资源评价研究.大庆石油学院,大庆市地热开发办,1998.