

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2024.01.05

引用格式: 王思维,王思微,姜峰,等. 吉林省伊舒盆地地热流体特性及储量计算[J]. 中国地质调查, 2024, 11(1): 36–44.
(Wang S W, Wang S W, Jiang F, et al. Geothermal fluid properties and reserve calculation in Yishu Basin of Jilin Province[J]. Geological Survey of China, 2024, 11(1): 36–44.)

吉林省伊舒盆地地热流体特性及储量计算

王思维, 王思微, 姜峰, 何双凤, 高鹤*

(吉林省水文地质调查所, 吉林 长春 130103)

摘要: 吉林省伊舒盆地地层富水性良好、地热资源丰富, 具有良好的地热资源开发利用前景。基于研究区伊舒盆地已有地热地质调查和评价资料, 结合相关标准、规范和水化学方法, 梳理分析研究区水文地质和地热地质条件, 探讨了研究区内地热流体赋存条件、水化学和同位素组成特征, 并利用热储岩体参数计算研究区的地热储量。结论表明: 研究区地热流体主要赋存于深层碎屑岩类裂隙孔隙中, 形成条件具有较高相似性和一定的同源性, 溶解性固体 (total dissolved solids, TDS) 较高、含氟和偏硅酸的低温碱性地下水, 水化学类型为 $\text{HCO}_3^- - \text{Na}^+$ 型。氢氧同位素组成表明, 研究区地下流体补给以古降水为主, 地热流体年龄为 27 Ka。地热流体储存水量为 $4.20 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 年可开采量为 $3\,446.94 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。研究成果可为吉林省后续地热资源管理、开发和利用提供科学依据。

关键词: 吉林省伊舒盆地; 地热流体; 水化学特征; 地热储量

中图分类号: P641.6

文献标志码: A

文章编号: 2095–8706(2024)01–0036–09

0 引言

地热资源是一种低碳、高效、可再生的综合性矿产资源, 在发电、采暖、医疗等方面有着广泛应用^[1–2]。

目前已有 50 多个国家将地热能开发利用作为新能源利用的重要方式^[3], 当前, 国内地热资源勘查及开发利用重点逐步转向中深部地热, 因该地地热资源分布具有明显规律性和地带性, 以沉积盆地型和隆起山地型地热资源为主^[4–6], 成为当前开发的热点。

吉林省伊舒盆地地热资源具有储量大、地层厚度大且富水性良好、开发利用前景好的特点^[7–10], 前期地质工作者对该地进行了不同程度的研究, 将伊舒盆地划分为具有 4 个隆起和 3 个凹陷的增温型地热田, 向斜盆地及西缘、东缘深断裂为该地构造主体^[11]。李文俊等^[12]认为伊舒南段地热流体赋存环境相对密闭, 循环时间较长。目前, 对于吉林省伊舒盆地地热流体的开发利用仍处于初步阶段,

部分区域仍属于地热勘查空白区。本文通过查明伊舒盆地地质及水文地质条件, 分析该地区地热流体赋存类型、水化学和同位素组成特征, 查明并计算热储岩体参数及地热流体储量, 为吉林省后续地热资源管理、开发和利用提供科学依据。

1 研究区概况

1.1 区域地质概况

研究区伊舒盆地位于吉林省中部, 呈 SW—NE 方向展布, 面积共 $3\,350 \text{ km}^2$ 。研究区属北温带大陆性干寒季风型气候, 多年平均气温 $5.2 \text{ }^\circ\text{C}$, 多年平均降水量 666.25 mm ^[13–16]。研究区内水系发育, 水文网密集, 地表水属松花江水系。

研究区为大黑山脉与吉林哈达岭山脉所夹持的低凹沉积型盆地, 北西、南东两侧依山, 整体地势具有东西两侧高、中部平坦开阔的特点, 地质构造如图 1 所示。该地以剥蚀堆积地貌和堆积地貌为主, 地层由老至新依次为古近系始新统双阳组、

收稿日期: 2023–09–13; 修订日期: 2024–01–03。

基金项目: 吉林省自然资源厅“吉林省伊舒断陷盆地地热流体富集规律研究 (编号: 2022–04)”项目资助。

第一作者简介: 王思维 (1993—), 男, 工程师, 主要从事水文地质方面的研究工作。Email: 1798295277@qq.com。

通信作者简介: 高鹤 (1980—), 男, 高级工程师, 主要从事地热地质方面的研究工作。Email: 76464883@qq.com。

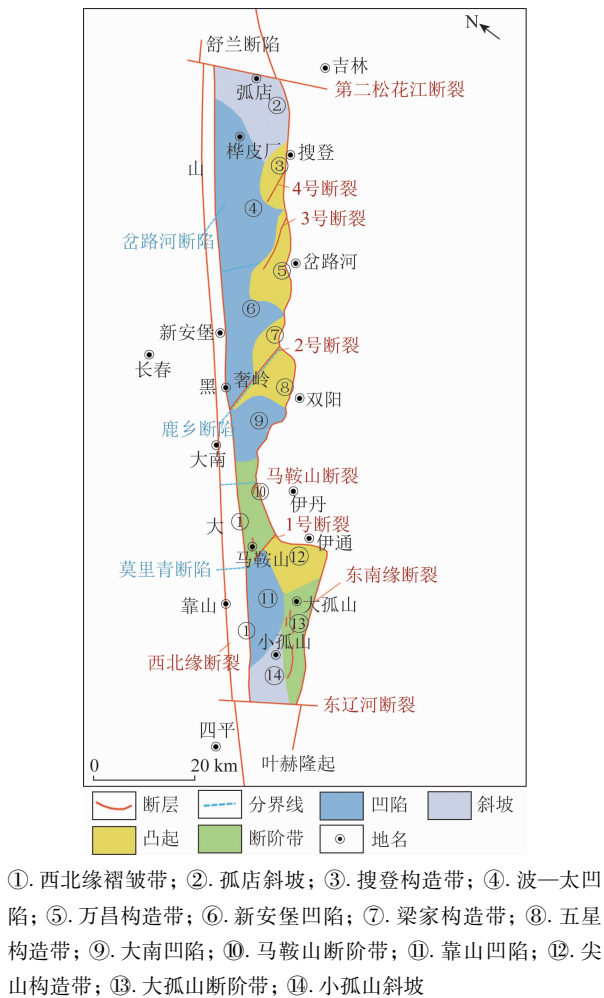


图 1 研究区地质构造图

Fig.1 Geological structure map of the study area

奢岭组、永吉组，古近系渐新统万昌组、齐家组，新近系中新统岔路河组，第四系下更新统白土山组，中更新统冲洪积层，第四系全新统冲积层。

1.2 水文地质条件

研究区内地下水的形成、赋存和运移受自然地理和地质构造影响，与古近系及新近系地质空间环境密切相关。古近系以来，研究区堆积了以河湖相为主、分布广泛、层理稳定、多韵律旋回的较厚碎屑沉积物。其中，泥岩、砂砾岩成岩较差，泥质胶结弱，较为发育的孔隙为地下水赋存运移提供了良好的地质空间环境，而厚度较大的泥岩、粉砂质泥岩因其层位稳定、致密性好、渗透性差，可充当承压水隔水顶板。

根据研究区地下水多孔介质的地质时代、赋存条件、水理性质及水力特征，将区内地下水划分为松散岩类孔隙潜水、中浅层裂隙孔隙承压水、深层碎屑岩类裂隙孔隙承压水，研究区水文地质条件见图 2。其中，松散岩类孔隙潜水分布于研究区大部分地区，岩性介质主要为砂及砂砾石，上部多为亚砂土、亚黏土，渗透性好，孔隙较为发育，水量较丰富，pH 值为 6.50 ~ 7.85。中浅层裂隙孔隙承压水埋藏深度大于 500 m，赋存于新近系中新统岔路河组和古近系渐新统齐家组碎屑岩中，地下水赋存条件一般，补给条件较差，水量中等。

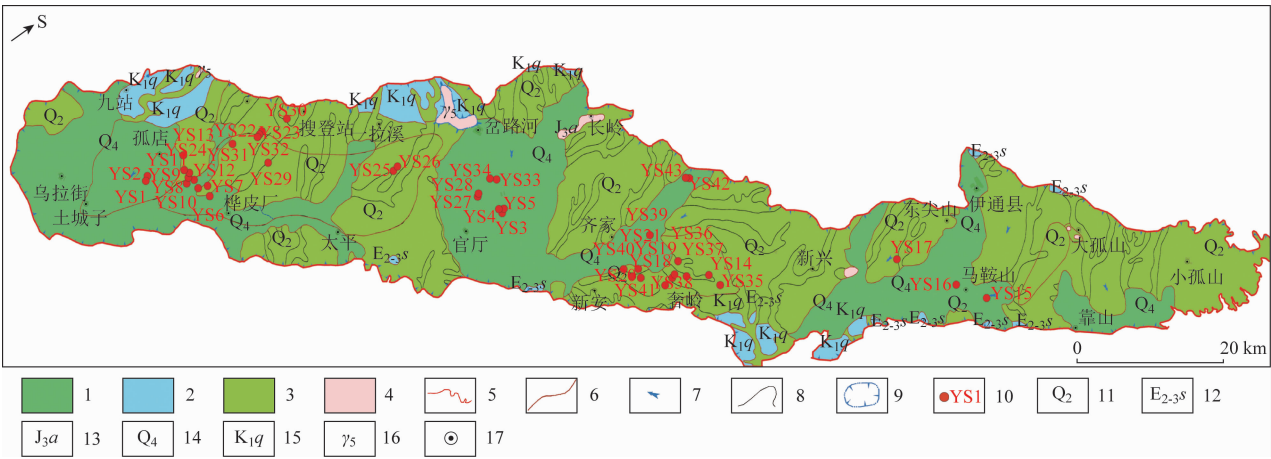


图 2 研究区水文地质简图及采样点分布

Fig.2 Hydrogeological sketch and sampling point distribution of the study area

2 地热流体水化学特征

2.1 地热流体水化学类型

采样前用 10% HCl 洗涤取样瓶并用自来水冲洗,再用待取水样润洗 3 遍后,采集研究区内 42 组地热流体水样,瓶口密封储存。常规离子、偏硅酸、pH 值及溶解性固体(total dissolved solids, TDS)等由吉林省地质科学研究所测试,参照《GB 8538—2022 食品安全国家标准 饮用天然矿泉水检验方

法》^[17]进行分析测试,由分析检测结果可知:地热流体 pH 值为 7.60~9.10,45.24% 的地下热水 pH 值大于Ⅲ类地下水界限值 8.50^[18],整体呈碱性;TDS 含量为 363.14~5 925.59 mg/L,50% 地热流体的 TDS 含量大于Ⅲ类地下水界限值 1 000 mg/L^[18],以上测试结果表明,地热流体矿化度较高。阳离子以 Na⁺ 为主,其含量为 120~1 590.24 mg/L,阴离子以 HCO₃⁻ 为主,其含量为 283~4 057.4 mg/L,Na⁺ 和 HCO₃⁻ 毫克当量百分数绝大多数大于 90%,根据图 3 可知,研究区地热流体水化学类型为 HCO₃⁻-Na⁺ 型。

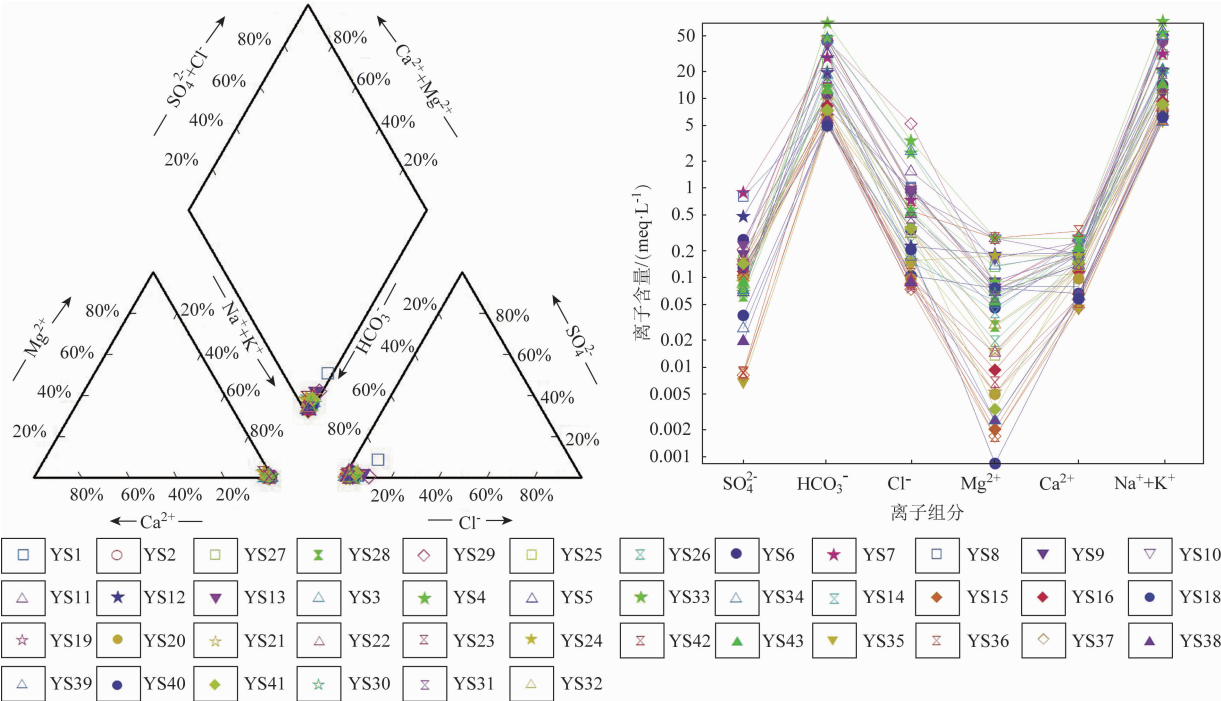


图3 研究区地热流体 Piper 图(左)和 Schoeller 图(右)

Fig.3 Piper diagram (left) and Schoeller diagram (right) of geothermal fluid in the study area

本次研究同样对地热流体水样中的总铁(total Fe, TFe)、CO₃²⁻、F⁻、偏硅酸、温度等组分进行检测,分析可知地热流体中除 YS27 外均可检测到铁离子,但总铁含量普遍较低,最高含量为 YS10 样品中的 1.28 mg/L。不同水样的 CO₃²⁻ 含量差异较大,测得最高含量为 YS5 处的 597.9 mg/L,有 10 组地热流体水样内未检出 CO₃²⁻。结合《GB/T 11615—2010 地热资源地质勘查规范》^[19]、《GB 8537—2018 食品安全国家标准 饮用天然矿泉水》^[20]、《GB 5084—2021 农田灌溉水质标准》^[21] 导则分析,地热流体水样内 F⁻ 含量为 0.73~17.82 mg/L,且在每组地热流体水样内均能检测到 F⁻,仅有 3 组地热流体水样内 F⁻ 含量没有

达到有医疗价值浓度,33 组地热流体水样内 F⁻ 含量达到命名矿水浓度。地热流体水样内偏硅酸含量为 28.83~87.31 mg/L,所有地热流体水样中偏硅酸含量均达到有医疗价值浓度的标准,15 组地热流体水样中偏硅酸含量达到命名硅水浓度。研究区地热流体温度为 40.0~73.8 ℃,属于低温地热资源。因此,研究区地热流体为矿化度较高、含 F⁻ 和偏硅酸的低温碱性地下热水,适宜作为含氟化物和偏硅酸的复合型理疗温矿水,不宜作为饮用天然矿泉水直接饮用,也不宜直接用于农田灌溉用水和水产养殖用水。对比分析 42 组地热流体样品主要离子组分特征并绘制 Schoeller 图(图 3),由图 3 可知不同地热

井地热流体主要离子组分变化趋势基本一致,说明研究区不同分区地热流体的形成条件具有较高相似性和一定的同源性。

2.2 地热流体同位素水化学特征

本研究采集研究区内饮马河及岔路河地表水、浅层地下水和 6 件地热流体水样,由中国地质科学院水文地质环境地质研究所利用 PE1220 QUAN-TULUS 型超低本底液体闪烁谱仪参照《DZ/T 0064.79—2021 地下水水质分析方法 第 79 部分: 氡的测定放射化学法》^[22]测试水样中的氡含量,氡最低检测限和不确定度均 < 1.0 TU。利用水同位素分析仪 Picarro L2130i 测试水样中的 δD 、 $\delta^{18}O$ 含量并绘制 δD 和 $\delta^{18}O$ 关系图(图 4)。

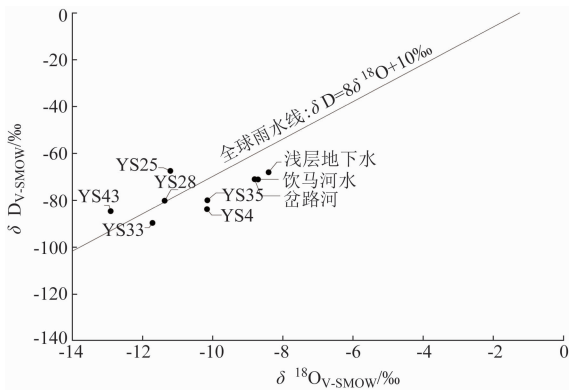


图 4 研究区 δD 与 $\delta^{18}O$ 关系曲线图^[23]
Fig. 4 Relationship between δD and $\delta^{18}O$ in the study area^[23]

检测结果为研究区地表水同位素含量 δD 值为 $-70.90‰ \sim -71.10‰$ 、 $\delta^{18}O$ 值为 $-8.80‰ \sim -8.70‰$ 、氡含量为 $1.15 \sim 1.42$ Bq/L; 浅层地下水同位素含量 δD 值为 $-68.00‰$ 、 $\delta^{18}O$ 值为 $-8.40‰$ 、氡含量为 1.39 Bq/L, 地热流体同位素含量 δD 值为 $-89.70‰ \sim -67.30‰$ 、 $\delta^{18}O$ 值为 $-11.70‰ \sim -10.60‰$ 、氡含量大多小于 0.16 Bq/L。由图 5 可知,地表水、浅层地下水和地热流体稳定同位素 δD 和 $\delta^{18}O$ 的千分偏差值点均落在全球雨水线附近,说明其补给来源均为大气降水。地热流体较浅层地下水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值明显偏低,发生了显著的氢氧同位素漂移,尤其是 $\delta^{18}O$ 漂移明显,说明地热流体不是直接接受当地大气降水补给,而是经过径流深循环后得到补给^[24],这也表明研究区地热流体补给条件较差,以古降水为主,其次为大气降水和地表水侧向补给。

大气中含氡原子的重水分子在降水入渗地下的过程中,可利用氡随着自身衰变而不断降低其浓度的特性来估算地热流体年龄^[25],根据测试结果计算可知地热流体补给年龄大于 50 a。根据中国地质科学院水文地质环境地质研究所利用的 PE1220 QUANTULUS 型超低本底液体闪烁谱仪对同位素¹⁴C 的测定结果表明,研究区地热流体年龄为 27 Ka^[26],不确定度 $\sigma \approx 0.1$ 万 a。

3 地热储量计算分析

3.1 地热源及热储类型

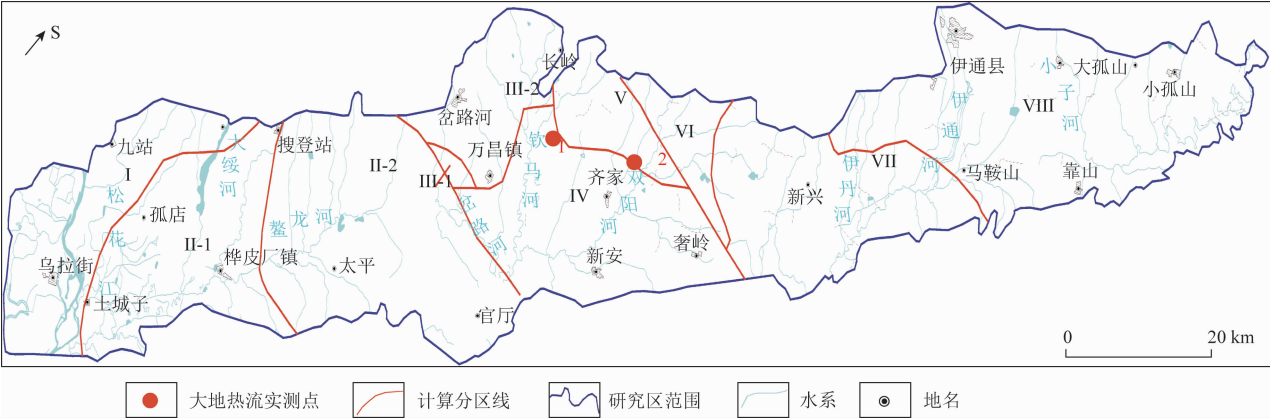
研究区新生代地层内赋存的热能主要来自地球内部热能传导^[27],研究区内莫霍面深度为 $34 \sim 36$ km,杨丽芝等^[28]总结前人成果认为莫霍面处地温为 $400 \sim 1\,000$ $^{\circ}C$,岩石圈底部温度约 $1\,000$ $^{\circ}C$,上下地幔界线附近约 $1\,650$ $^{\circ}C$,较高的内外地温差异可使热量向浅部地壳进行传导,同时表明盆地内具有良好热源。地球内部放射性元素产生的热量数量巨大且不易散失,也是地球增温的主要因素^[29],研究区基底由大面积海西期和燕山期的导热率较高的花岗岩构成,其中 U^{238} 等放射性元素衰变而产生的热量会在地下聚集从而为上部储层供热,加之上部中生界沉积岩类导热率较低,可使下部传递来的热量能被保存在岩石中,起到保温作用。研究区内南北两条断裂逐渐下切发育,深度穿透莫霍面到达上地幔,具体表现为沿断裂带发育处伴随有一系列火山喷发活动,这两条断裂构成地下深部地幔热源与上部热储的热力通道,形成了古近系和上地幔之间的热力联系,成为研究区内的供热导热通道,为区内的地热资源形成提供了必要热源通道^[30-33]。

研究区属于沉积盆地型层状热储,热储层主要集中在古近系双阳组、奢岭组、永吉组、万昌组和齐家组下部,由砂岩、砂砾岩、细砂岩地层构成,一般埋深为 $900 \sim 2\,500$ m,厚度 $160 \sim 450$ m。分布于全区,含水层岩性主要为砂岩、砂砾岩与泥岩互层。因受新构造运动影响,盆地内基底起伏变化较大,盆地内隆起处基底最浅埋深为 $1\,352$ m,凹陷处基底最大埋深大于 $4\,000$ m。根据 2016 年《中国大陆地区大地热流数据汇编(第四版)》^[34]统计资料,编制研究区 1 号、2 号点位实测大地热流值(表 2)和

区域大地热流图(图 5)。我国大地热流值为 23 ~ 319 mW/m²,平均值为(61.5 ± 13.9) mW/m²,东北地区松辽盆地及长白山一带热流值为 44.4 ~ 90.0 mW/m²,平均高达(70.9 ± 14.4) mW/m²^[35],表 2 说明研究区属于我国大地高热流地区,具备良好热源条件。

表 2 研究区 1 号、2 号点位实测大地热流值
Tab.2 Measured heat flow data at Points 1 and 2 in the study area

编号	深度范围/ m	地温梯度/ (℃·km ⁻¹)	热导率/(W·k ⁻¹ ·m ⁻¹)	大地热流值/ (mW·m ⁻²)
1 号点	1 150 ~ 2 050	2.94	2.20	64.62
2 号点	1 700 ~ 2 270	4.03	2.11	85.10



I. 孤店斜坡; II-1. 波一太凹陷亚区 1; II-2. 波一太凹陷亚区 2; III-1. 万昌构造带亚区 1; III-2. 万昌构造带亚区 2; IV. 新安堡凹陷; V. 梁家构造带; VI. 五星构造带; VII. 大南凹陷; VIII. 莫里青凹陷

图 5 研究区大地热流及计算分区

Fig.5 Terrestrial heat flow map and computation portition

3.2 地热流体储量计算

3.2.1 热储岩体参数

将研究区按地形地貌构造划分为 8 个地热流体计算分区(图 5),其中波一太凹陷和万昌构造带内南北部地热流体单位产水量有较大差异,分别划分为亚区 1 和亚区 2。通过野外踏勘及现场

抽水试验分别统计计算各分区面积、平均井口水温、热储有效厚度、热储岩石和地热流体的比热容和密度数值,因未收集到梁家构造带及大南凹陷处基础勘查资料,所以 V、VII 分区不做计算,引用资料计算结果^[13-16],其余分区参数如表 3 所示。

表 3 研究区各分区热储岩体参数

Tab.3 Thermal storage rock mass parameters for each zone of the study area

地热流体计算分区	分区面积/ km ²	平均井口 水温/℃	热储有效 厚度/m	热储岩石		地热流体	
				密度/ (kg·m ⁻³)	比热容/ (J·kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	密度/ (kg·m ⁻³)	比热容/ (J·kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹)
孤店斜坡(I)	217.73	63.800	304.70	2 600	877.8	994.09	4 186.8
波一太凹陷亚区 1(II-1)	283.31	57.610	184.35	2 600	877.8	994.09	4 186.8
波一太凹陷亚区 2(II-2)	348.43	52.900	104.70	2 600	877.8	994.09	4 186.8
万昌构造带亚区 1(III-1)	7.74	65.500	70.00	2 600	877.8	992.25	4 186.8
万昌构造带亚区 2(III-2)	122.07	61.756	84.00	2 600	877.8	994.09	4 186.8
新安堡凹陷(IV)	258.83	55.670	310.97	2 600	877.8	994.09	4 186.8
梁家构造带(V)	62.63	-	-	-	-	-	-
五星构造带(VI)	106.40	45.800	93.75	2 600	877.8	995.17	4 186.8
大南凹陷(VII)	276.05	-	-	-	-	-	-
莫里青凹陷(VIII)	348.26	51.100	192.06	2 600	877.8	994.09	4 186.8

注：“-”为未收集到资料。

3.2.2 储量计算

通过计算研究区各分区的地热流体年可开采量、热储中的地热流体储量和年开采累计可利用热能,可查明热储层中所含地热流体储量及可开采量,为后续地热资源开发利用奠定基础。计算公式如下所示。

(1) 地热流体年可开采量为

$$Q_{\text{年}} = Q_{\text{单}} \times \frac{A}{\pi R^2} \quad (1)$$

式中: $Q_{\text{年}}$ 为区域内地热流体年可开采量, m^3/a ; $Q_{\text{单}}$ 为单井地热流体年可开采量, m^3/a ; A 为计算区面积, km^2 ; R 为影响半径, km , 综合前期研究区不同地段项目成果^[13-16]和野外实际情况确定本研究区影响半径经验值为 2 km。

(2) 热储中的地热流体储量

$$Q_1 = A\varphi d \quad (2)$$

$$Q_2 = A\mu H \quad (3)$$

$$Q_r = Ad\rho_r C_r(1 - \varphi)(t_r - t_0) \quad (4)$$

$$Q_w = Q_L C_w \rho_w (t_r - t_0) \quad (5)$$

$$Q_L = Q_1 + Q_2 \quad (6)$$

$$Q = Q_r + Q_w \quad (7)$$

式中: Q 为热储中的地热流体量, J ; Q_r 为岩石中储存的热量, J ; Q_L 为热储中储存的水量, m^3 ; Q_w 为地热流体中储存的热量, J ; Q_1 为截止到计算时刻热储孔隙中地热流体的静储量, m^3 ; Q_2 为水位降低到目前取水能力深度时所释放的水量, m^3 ; A 为计算区面积, km^2 ; d 为热储厚度, m ; t_r 为热储温度, $^{\circ}\text{C}$; t_0 为当地年平均气温, $^{\circ}\text{C}$, 取吉林省年平均气温 5.2°C ; ρ_r 为热储岩石密度, kg/m^3 ; C_r 为热储岩石比热, $\text{J}/\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$; ρ_w 为地热流体密度, kg/m^3 ; C_w 为地热流体的比热, $\text{J}/\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$; μ 为弹性释水系数; H 为计算起始点以上高度, m ; φ 为热储岩石的孔隙度, 取资料值 0.1。

(3) 年开采累计可利用热能为

$$W_i = 4.1868Q(t - t_0) \quad (8)$$

$$\sum W_i = 86.4DW_i/K \quad (9)$$

式中: W_i 为热功率, kW ; Q 为地热流体流体可开采量, m^3/a ; t 为地热流体温度, $^{\circ}\text{C}$; t_0 为当地多年平均气温, $^{\circ}\text{C}$, 取吉林省年平均气温 5.2°C ; $\sum W_i$ 为开采一年可利用的热能, MJ ; D 为全年开采日数, d ; K 为热效比, 按燃煤锅炉热效率 0.6 计算, 计算结果见表 4。

表 4 研究区地热流体计算储量及可开采量

Tab. 4 Calculated geothermal reserves and recoverable quantities in the study area

地热流体计算分区	年可开采量($\times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}$)	计算储量($\times 10^9 \text{ m}^3$)	计算热量($\times 10^{18} \text{ J}$)	年可利用热能($\times 10^8 \text{ MJ}$)
孤店斜坡(I)	37.07	6.63	9.600 0	1.52
波-太凹陷亚区 1(II-1)	90.58	5.22	6.760 0	3.31
波-太凹陷亚区 2(II-2)	1 937.64	3.65	4.300 0	64.50
万昌构造带亚区 1(III-1)	158.82	5.42	0.080 6	6.68
万昌构造带亚区 2(III-2)	284.24	1.03	1.430 0	11.20
新安堡凹陷(IV)	320.88	8.05	10.000 0	11.30
梁家构造带 ^[13-16] (V)	198.38	3.97	4.480 0	5.42
五星构造带(VI)	82.25	8.05	1.000 0	2.33
大南凹陷 ^[13-16] (VII)	287.65	5.75	8.480 0	7.06
莫里青凹陷(VIII)	49.44	6.69	7.580 0	1.58
合计	3 446.94	42.00	53.700 0	115.00

由表 4 可知,研究区地热流体年可开采量为 $3\,446.94 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$,热储中的地热储量为 $5.37 \times 10^{19} \text{ J}$,年可利用热能为 $1.15 \times 10^{10} \text{ MJ}$,地热流体开采一年所获热量可节约煤量为 392 092.60 t,说明研究区地热流体储能丰富、可开采量大、低碳环保、具备良好的经济利用价值。

4 结论与建议

(1) 吉林省伊舒盆地地热流体主要赋存于深层

碎屑岩类裂隙孔隙中,形成条件具有较高相似性和一定同源性,为矿化度较高、含氟和偏硅酸的低温碱性地下热水,水化学类型为 $\text{HCO}_3^- - \text{Na}^+$ 型。地热流体补给以古降水为主,地热流体年龄为距今 27 Ka。可作为含氟化物和偏硅酸的复合型理疗温矿水,不宜作为饮用天然矿泉水、农田灌溉用水和水产养殖用水。

(2) 吉林省伊舒盆地内地热流体年可开采量 $3\,446.94 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$,地热流体计算水量为 $4.20 \times 10^{10} \text{ m}^3$,地热流体计算热量 $5.37 \times 10^{19} \text{ J}$,地热流体开

采一年可利用的热能为 1.15×10^{10} MJ, 地热流体开采一年所获热量与之相当的节煤量为 392 092.60 t。

(3) 吉林省伊舒盆地地热储层补给条件较差, 属于消耗性地热流体资源, 在开采过程中应开展回灌技术方法相关研究, 根据地热流体长期动态监测资料 and 不同地热资源开发利用方案, 制定相应回灌方案, 提高地热资源利用率。

参考文献 (References):

[1] 王贵玲, 张薇, 蔺文静, 等. 全国地热资源调查评价与勘查示范工程进展[J]. 中国地质调查, 2018, 5(2): 1-7.
Wang G L, Zhang W, Lin W J, et al. Project progress of survey, evaluation and exploration demonstration of national geothermal resource[J]. Geological Survey of China, 2018, 5(2): 1-7.

[2] 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 G L, Liu Y G, Zhu X, et al. The status and development trend of geothermal resources in China[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(1): 1-9.

[3] 何诗霏. 各国地热能开发“升温”[N]. 国际商报, 2023-09-14(03).
He S F. The Development of Geothermal Energy In Various Countries is “Heating Up”[N]. International Business News, 2023-09-14(03).

[4] 王贵玲, 张薇, 梁继运, 等. 中国地热资源潜力评价[J]. 地球学报, 2017, 38(4): 448-459.
Wang G L, Zhang W, Liang J Y, et al. Evaluation of geothermal resources potential in China[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2017, 38(4): 448-459.

[5] 张英, 冯建赞, 何治亮, 等. 地热系统类型划分与主控因素分析[J]. 地学前缘, 2017, 24(3): 190-198.
Zhang Y, Feng J Y, He Z L, et al. Classification of geothermal systems and their formation key factors[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(3): 190-198.

[6] 王国建, 宁丽荣, 李广之, 等. 沉积盆地型与隆起山地型地热系统地表地球化学异常模式差异性分析[J]. 地质论评, 2021, 67(1): 117-128.
Wang G J, Ning L R, Li G Z, et al. Analysis of the differences of surface geochemical anomaly patterns between the sedimentary basin type geothermal system and the rifted mountain type geothermal system[J]. Geological Review, 2021, 67(1): 117-128.

[7] 牛世臣, 王文双. 吉林省伊舒盆地地热资源及勘探开发建议[J]. 吉林地质, 2007, 26(3): 35-39.
Niu S C, Wang W S. Geothermal energy resource and exploration mining suggestion of the Yi-shu Basin, Jilin Province[J]. Jilin Geology, 2007, 26(3): 35-39.

[8] 吴景华, 谢俊革, 陈树义, 等. 吉林省地热资源状况与评价研究[J]. 长春工程学院学报: 自然科学版, 2008, 9(2): 49-52.
Wu J H, Xie J G, Chen S Y, et al. Status and valuation studies of

geothermal resources in Jilin province[J]. Journal of Changchun Institute of Technology (Natural Science Edition), 2008, 9(2): 49-52.

[9] 饶文迪, 刘慧, 赵依, 等. 吉林省地热资源补给来源分析[J]. 河北农机, 2017(9): 63.
Rao W D, Liu H, Zhao Y, et al. Analysis of geothermal resource supply sources in Jilin Province[J]. Hebei Agricultural Machinery, 2017(9): 63.

[10] 高鹤, 何双凤, 满晓兵. 吉林省水热型地热资源勘查评价综述[J]. 吉林地质, 2020, 39(3): 15-19.
Gao H, He S F, Man X B. Overview on the exploration and evaluation of geothermal resources of hydrothermal type in Jilin Province[J]. Jilin Geology, 2020, 39(3): 15-19.

[11] 牛世臣, 王文双. 吉林省伊舒盆地地热资源及勘探开发建议[J]. 吉林地质, 2007, 26(3): 35-39.
Niu S C, Wang W S. Geothermal energy resource and exploration mining suggestion of the Yi-shu Basin, Jilin Province[J]. Jilin Geology, 2007, 26(3): 35-39.

[12] 李文俊, 刘聪, 张丽玲, 等. 吉林省伊舒盆地南段地热流体水化学及同位素特征[J]. 吉林地质, 2022, 41(4): 66-71.
Li W J, Liu C, Zhang L L, et al. Hydrogeochemical and isotopic characteristics of geothermal fluids in the southern section of Yishu Basin in Jilin Province[J]. Jilin Geology, 2022, 41(4): 66-71.

[13] 吉林省水文地质调查所. 1:5 万吉林省伊舒断陷盆地(饮马河-岔路河段)地热资源普查报告[R]. 2019:15.
Jilin Provincial Institute of Hydrogeological Survey. 1:50,000 Geothermal Resources Census Report in the Yishu Fault Basin (Yinma River-Chalu River Section) in Jilin Province[R]. 2019:15.

[14] 吉林省地质调查院. 1:5 万吉林省伊舒断陷盆地(伊通段)地热资源普查报告[R]. 2020:5.
Jilin Provincial Geological Survey. 1:50,000 Geothermal Resources Survey Report in the Yishu Fault Basin (Yitong Section) of Jilin Province[R]. 2020.

[15] 吉林省水文地质调查所. 1:5 万吉林省伊舒断陷盆地(桦皮厂-九站段)地热资源普查报告[R]. 2015.
Jilin Provincial Institute of Hydrogeological Survey. 1:50,000 Geothermal Resources Survey Report in the Yishu Fault Basin (Huabichang-Jiuzhan Section) in Jilin Province[R]. 2015.

[16] 吉林省水文地质调查所. 1:5 万吉林省伊舒断陷盆地(岔路河-太平段)地热资源勘查报告[R]. 2019.
Jilin Provincial Institute of Hydrogeological Survey. 1:50,000 Geothermal Resources Exploration Report in the Yishu Fault Basin (Chaluhe-Taiping Section) in Jilin Province[R]. 2019.

[17] 国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. GB 8538—2022 食品安全国家标准 饮用天然矿泉水检验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. GB 8538—2022 National Food Safety Standard for Drinking Natural Mineral Water

- Inspection Method[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 14848—2017 地下水质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 14848—2017 Standard for Groundwater Quality[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 11615—2010 地热资源地质勘查规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 11615—2010 Geologic Exploration Standard of Geothermal Resources[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [20] 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, 2018.
- National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. GB 8537—2018 National Food Safety Standard for Drinking Natural Mineral Water[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.
- [21] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. GB 5084—2021 农田灌溉水质标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. GB 5084—2021 Standard for irrigation water quality[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [22] 中华人民共和国自然资源部. DZ/T 0064. 79—2021 地下水质分析方法 第79部分: 氡的测定放射化学法[S]. 北京: 地质出版社, 2021.
- Ministry of Natural Resources, People's Republic of China. DZ/T 0064. 79—2021 Methods for Analysis of Groundwater Quality - Part 79: Determination of Tritium - Radiochemical Method[S]. Beijing: Geology Press, 2021.
- [23] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 1961, 133(3465): 1702 - 1703.
- [24] 张保建. 鲁西北地区地下热水的水文地球化学特征及形成条件研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011.
- Zhang B J. Hydrogeochemical Characteristics and Formation Conditions of the Geothermal Water in Northwestern Shandong Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2011.
- [25] 裴永伟. 岩孔背斜矿泉水中的氡研究[J]. 贵州地质, 1989, 6(3): 253 - 260.
- Pei Y W. Researches on tritium in mineral water from Yankong anticline[J]. Guizhou Geology, 1989, 6(3): 253 - 260.
- [26] 吉林省地质环境监测总站. 1:50万吉林省地热资源调查评价与区划[R]. 2014.
- Jilin Geological Environment Monitoring Center. 1:500,000 Geothermal Resources Survey, Evaluation and Zoning of Jilin Province[R]. 2014.
- [27] 邱楠生, 唐博宁, 朱传庆. 中国大陆地区温泉分布的深部热背景[J]. 地质学报, 2022, 96(1): 195 - 207.
- Qiu N S, Tang B N, Zhu C Q. Deep thermal background of hot spring distribution in the Chinese continent[J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(1): 195 - 207.
- [28] 杨丽芝, 杨雪珂. 清洁能源 地热[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 2016.
- Yang L Z, Yang X K. Clean Energy Geothermal[M]. Ji'nan: Shandong Science and Technology Press, 2016.
- [29] 伍小雄. 松辽盆地北部干热岩地热资源研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2019.
- Wu X X. Research of Geothermal Resources on Hot Dry Rock in North Songliao Basin[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2019.
- [30] 吉林省水文地质调查所. 1:5万吉林省吉林市圣德泉地热资源可行性勘查报告[R]. 2019.
- Jilin Provincial Institute of Hydrogeological Survey. 1:50,000 Feasibility Exploration Report on Shengdequan Geothermal Resources in Jilin City, Jilin Province[R]. 2019.
- [31] 吉林旭升地质勘测有限公司. 1:5万吉林市金达温泉地热资源详查报告[R]. 2019.
- Jilin Xusheng Geological Survey Co., Ltd. 1:50,000 Jilin City Jinda Hot Spring Geothermal Resources Detailed Investigation Report[R]. 2019.
- [32] 吉林省水文地质调查所. 1:5万长春市双阳区奢岭地热田地热资源详查报告[R]. 2015.
- Jilin Provincial Institute of Hydrogeological Survey. 1:50,000 Detailed Investigation Report on Geothermal Resources in Sheling Geothermal Field, Shuangyang District, Changchun City[R]. 2015.
- [33] 吉林省水文地质调查所. 1:5万吉林省永吉县万昌镇孤家子村地热资源详查报告[R]. 2018.
- Jilin Provincial Institute of Hydrogeological Survey. 1:50,000 Detailed Investigation Report on Geothermal Resources in Gujiazi Village, Wanchang Town, Yongji County, Jilin Province[R]. 2018.
- [34] 姜光政, 高棚, 饶松, 等. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第四版)[J]. 地球物理学报, 2016, 59(8): 2892 - 2910.
- Jiang G Z, Gao P, Rao S, et al. Compilation of heat flow data in the continental area of China (4th edition)[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(8): 2892 - 2910.
- [35] 石岩, 李明奇, 张清晨, 等. 吉林省中深层地热供暖资源量评估分析[J]. 北方建筑, 2022, 7(6): 31 - 35.
- Shi Y, Li M Q, Zhang Q C, et al. Analysis on evaluation of the geothermal energy heating resources in middle - deep strata of Jilin province[J]. Northern Architecture, 2022, 7(6): 31 - 35.

Geothermal fluid properties and reserve calculation in Yishu Basin of Jilin Province

WANG Siwei, WANG Siwei, JIANG Feng, HE Shuangfeng, GAO He
(Jilin Provincial Institute of Hydrogeological Survey, Jilin Changchun 130103, China)

Abstract: Yishu Basin in Jilin Province has good water – rich strata and rich geothermal resources, indicating good development and utilization prospects. Based on the existing geothermal geological survey and evaluation data of Yishu Basin, the authors in this article combed and analyzed the hydrogeological and geothermal geological conditions of the basin, combined with relevant standards, specifications and hydrochemical methods. Besides, the occurrence conditions, hydrochemistry and isotope composition of geothermal fluids in the basin were also discussed, and the geothermal reserves were estimated using the parameters of thermal storage rock mass. The conclusion shows that the geothermal fluid in Yishu Basin mainly exists in the compressed water of deep clastic rock fissures and pores, and the formation conditions have high similarity and certain homology, which are low – temperature alkaline underground hot water with high total dissolved solids (TDS), fluorine containing, metasilicic acid and chemical type of $\text{HCO}_3^- - \text{Na}^+$. The composition of hydrogen and oxygen isotopes shows that the supply of underground hot water is mainly ancient precipitation, and the age of the geothermal water is 27 Ka. The geothermal fluid storage volume is $4.20 \times 10^{10} \text{ m}^3$, and the recoverable volume is $3\,446.94 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$. The results of this research could provide scientific basis for the subsequent management, development and utilization of geothermal resources in the area.

Keywords: Yishu Basin of Jilin Province; geothermal fluid; hydrochemical characteristics; geothermal reserves
(责任编辑: 王晗)