

张禄权, 左银辉, 孙义高, 等, 2023. 川中地区栖霞-茅口组地热资源评价探讨[J]. 沉积与特提斯地质, 43(2): 261-270. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.05008

ZHANG L Q, ZUO Y H, SUN Y G, et al., 2023. Geothermal Resource Evaluation of the Middle Permian Qixia-Maokou Formation in the Central Sichuan Basin, China[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 43(2): 261-270. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.05008

川中地区栖霞--茅口组地热资源评价探讨

张禄权1, 左银辉2*, 孙义高2, 郑 伟1, 崔龙庆2

(1. 中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院,四川 成都 610041; 2. 成都理工大学油气藏地质与开发工程国 家重点实验室,四川 成都 610059)

摘要: 含油气盆地在勘探和开发中,拥有大量的地质、地球物理和地球化学数据,对地质构造和地热储层有着全面的认识, 在地热能开发利用中具有得天独厚的优势。四川盆地作为中国重要的含油气盆地、同样富含水热型地热资、该文在收集相 关资料、总结以往油气勘探成果的基础上,确定了川中地区地温梯度大部均在 24℃/km 以上,大地热流大部均在 60 mW/m²以上,为四川盆地相对高值异常区。考虑到热储温度及埋深是地热开发是否具有经济效益的重要因素,重点选择埋 深相对较浅(3000~6000m)、热储温度相对较高(65~155℃)和热储相对较厚(280~380m)的川中地区栖霞-茅口组 热储进行地热资源潜力评价。研究中,基于盆地地层参数建立三维地质模型,结合现今地温场、岩石热物性参数,利用一 维稳态热传导方程计算得到栖霞-茅口组内部温度分布,最后利用体积法计算得到栖霞-茅口组的地热资源强度和资源量。 研究表明,川中地区栖霞-茅口组热储温度为65~155℃,地热资源总量为3.01×10²¹ J,折合标准煤1030.25亿吨;可开采 地热资源量 2.03×10²⁰ J, 折合标准煤 206.5 亿吨。且根据川中地区地热资源特征, 提出了优先以研究区中东部为中心开展中 低温地热发电、地热干燥、地热农业等综合开发利用和地热梯级利用示范工程的建议,为未来的油气废弃井的二次利用及 油田地热开发打下基础。

关键 词:川中地区;栖霞-茅口组;热储特征;体积法;地热资源评价 中图分类号: P314 文献标识码: A

Geothermal Resource Evaluation of the Middle Permian Qixia-Maokou Formation in the Central Sichuan Basin, China

ZHANG Luquan¹, ZUO Yinhui^{2*}, SUN Yigao², ZHENG Wei¹, CUI Longqing²

(1. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Southwest Oil & Gas field Company, Chengdu 610041, China; 2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: In the exploration and development of petroliferous basins, there are a large number of geological, geophysical, and geochemical data. They comprehensively understand the geological structure and geothermal reservoirs and have unique advantages in developing and utilizing geothermal energy. As an important petroliferous basin in China, Sichuan Basin is also rich in hydrothermal geothermal resources. Based on collecting relevant data and summarizing previous oil and gas exploration results, it is

收稿日期: 2022-11-10; 改回日期: 2023-04-09; 责任编辑: 黄春梅; 科学编辑: 崔晓庄

作者简介: 张禄权(1989—),男,工程师。主要从事油气田及地热开发方面的研究。E-mail: zhangluquan@petrochina.com.cn 通讯作者: 左银辉(1980—), 男, 教授。主要从事地热地质与石油地质方面的研究。E-mail: zuoyinhui@tom.com

资助项目: 国家自然科学基金开采过程多场时空演变规律与流动调控方法(52192622); 成都理工大学研究生拔尖 创新人才培育项目川南地区岩石圈热结构与地热资源效应(CDUT2022BJCX003)

determined that most of the geothermal gradients in the Central Sichuan Basin are above 24 °C/km and most of the terrestrial heat flow is above 60 mW/m², which is a relatively high-value anomaly area in Sichuan Basin. Considering that the geothermal reservoir temperature and buried depth are important factors for the economic benefits of geothermal development, the geothermal reservoir of Qixia-Maokou Formation in central Sichuan Basin with relatively shallow buried depth (3 000 ~ 6 000 m), relatively high geothermal reservoir temperature (65 \sim 155 °C) and relatively thick geothermal reservoir (280 \sim 380 m) is selected to evaluate the potential of geothermal resources. In the study, a three-dimensional geological model is established by using different strata thickness parameters. Combined with the current geothermal field and rock thermal physical parameters, the temperature distribution in the middle of the Qixia-Maokou Formation is calculated by using a one-dimensional steady-state heat conduction equation. Finally, the geothermal resource intensity and resource quantity of the Qixia-Maokou Formation are calculated by using the volume method. The results show that the geothermal reservoir temperature of the Qixia-Maokou Formation in central Sichuan is 65 ~ 155 °C, and the total geothermal resource is 3.01×10^{21} J, equivalent to 103.025 billion tons of standard coal. Exploitable geothermal resources 2.03×10^{20} J, equivalent to 20.65 billion tons of standard coal. According to the characteristics of geothermal resources in the Central Sichuan Basin, it is proposed to give priority to the central and eastern parts of the study area to carry out comprehensive development and utilization of medium and low-temperature geothermal power generation, geothermal drying, geothermal agriculture, and geothermal cascade utilization demonstration projects, laying the foundation for the secondary utilization of abandoned oil and gas wells and geothermal development in oil fields in the future.

Key words: Central Sichuan Basin; Qixia-Maokou Formation; Thermal reservoir characteristics; volume method; geothermal resource evaluation

0 引言

地热能是一种清洁无污染、绿色低碳的可再 生能源,它具有分布广,储量大,低碳环保,可持续 开采等特点,其大规模开发利用是应对全球气候变 化和节能减排,实现中国"2030碳达峰、2060碳 中和"(简称"双碳战略")目标的重要路径之一 (汪集暘等, 2019; 王贵玲和陆川, 2022)。我国沉积 盆地地热资源极其丰富,资源总量折合标准煤高 达10600亿吨,是地热开发的重要潜力区(王贵玲 和陆川, 2022)。其在油气勘探和开发中, 不但拥有 丰富的地质与开发数据、成熟的钻完井技术和储 层压裂改造技术,且有成千上万口可以通过改造变 成地热井的废停井,在地热能开发利用中具有得天 独厚的优势(Wang et al., 2018; 赵铭海等, 2015)。 国内以环渤海湾盆地丰富的地热资源为基础,成功 打造的以政府主导、政企合作、技术先进、环境友 好、造福百姓为特点的"雄县模式",已成为国际 上地热供暖利用的典范(庞忠和等,2017)。

四川盆地作为中国重要的含油气盆地,同样富 含水热型地热资源(Wang et al., 2016; Zhu et al., 2022)。作为我国重要的天然气生产基地,四川盆 地不但拥有丰富的地质、钻井、测井、地震、重磁 等基础资料,且具有良好的地热资源背景和多种地 热系统类型,4000 m 以浅的中低温地热资源折合 准煤高达3280 亿吨,可开采量折合标准煤5.44 亿 吨,为各大中型沉积盆之首(王贵玲等,2017)。近 年来已有多位学者在对中国主要沉积盆地或含油 气盆地进行地热资源评价时对四川盆地地热资源 量进行了评价。但在以往对四川盆地进行地热资 源评价中,因资料掌握程度和评价精度不同,计算 结果存在较大差异,且多为浅部储层的概括性和整 体性评价,缺少对盆地主要热储的地热资源分布状 况的研究(Lin et al., 2013; Wang et al., 2019; 王贵玲 等,2011; 王贵玲等, 2017)。

随着川中地区的油气勘探开展,川中地区所积 累的大量详细地质及水化学资料,为该地区的地热 资源评价提供重要的数据支撑(Liu et al., 2018; Templeton et al., 2014)。根据四川盆地现有 1508 口废弃油气出水量及温度数据分析来看,栖霞-茅 口组无论目前产水量还是累计产水量均远高于其 他热储,目前产水量及温度最适宜开发利用;同时 考虑热储温度及埋深是地热开发是否具有经济效 益的重要因素(Kurek et al., 2021; Singh et al., 2016), 此次重点选择地温梯度及大地热流相对高值异常 区,埋深相对较浅(3000~6000 m)、热储温度相对 较高(65~155℃)和热储相对较厚(280~380 m)的 川中地区栖霞-茅口组热储进行地热资源潜力及展 布评价,并根据地质资源特征提出合理的地热资源 开发利用方案。

1 区域地质特征

1.1 地质概况

四川盆地位于扬子地台西北缘,面积约2.3× 10⁵km²,被龙门山、大巴山、米仓山等山系环绕,是 一个由克拉通盆地逐渐演化成前陆盆地的海相叠 合盆地(罗改等,2021)。受扬子地块、华北地块、 松潘-甘孜地块构造应力场作用,盆地主要经历了 晋宁运动、澄江运动、桐湾运动、加里东运动、云 南运动、东吴运动、印支运动、燕山运动和喜马拉 雅运动的构造改造。在经历了晋宁-澄江运动、加 里东运动和海西运动等一系列构造运动的水平侧 向、扭力挤压后,于印支期由海盆转变为陆盆,形 成了四川盆地的早期雏形,后经燕山运动、喜马拉 雅运动全面褶皱,形成现今构造地貌(拓明明, 2020)。从盆地内部来看,四川盆地主要划分了6 个次一级构造单元,分别是川西低隆褶带、川北低 平褶皱带、川中平缓褶皱带、川东高陡褶皱带、川 西南低陡褶皱带以及川南低陡褶皱带(图1)。

川中地区即为四川盆地川中平缓褶皱带,位于 西部龙门山冲断推覆带和东部华蓥山褶皱带及北 边大巴山冲断褶皱带之间的地势平缓区域(Dai et al.,2017),主要发育构造为南充构造。研究区基底 岩层为太古界-下元古界的结晶基底。基底之上的 沉积盖层由震旦系至侏罗系组成,受加里东时期构 造隆升运动影响,研究区泥盆系及石炭系缺失,志 留系及部分中上奥陶统剥蚀严重(图 2)。基底之 上自下而上主要发育有下二叠统栖霞-茅口组、下 三叠统飞仙关组、下三叠统嘉陵江组、中三叠统雷 口坡组、上三叠统须家河组和侏罗系 6 套热储。

1.2 现今地温场特征

基于大量的测温数据和岩石热物理测试数据, 截止到目前为止四川盆地现有大地热流汇编数据 85个(Jiang et al., 2019),其中A类数据仅35个,占 比41.2%,低于目前全国的热流数据库中A类数据 占比49.3%。四川盆地现今地温梯度为17.7~ 33.4℃/km,平均22.7℃/km(Xu et al., 2011),为低-中温型地温梯度区(图3);大地热流值介于35.4~



图 1 四川盆地构造单元划分 Fig. 1 Division of tectonic units in the Sichuan Basin

界	系	统	组	地层 代号	年龄	·岩性柱	构造旋回	构造运动	图例
新	第四系			Q	2.5	· · · · · · · · · ·	古可や	青山にお田	00000
生思	新近系			N	-2.5-	000000000	音与拉 雅旋回	━━━━━ω ⊆ 幼 Ⅲ━ ━−喜山运动 Ⅱ━	
チト	百近系			E	-65-	••••		-燕山运动 V-	「你石
	日堂系			K	-145-			燕山运动III	••••
		上统	蓬莱镇组	$J_{3}P$			燕		••••• 砂岩
		-9L	遂宁组	$J_{3}sn$			Щ		
	佚 罗	中统	沙溪庙组	J_2s			旋回		业业业 业业业业
中生界	糸	下统	凉高山组	J_1l	-201-	•••••••			们的石
			自流井组	J.z				- 印支运动III-	
	二二、桑宜る水	上	<u> </u>	т _х					页岩
		统	沙 豕西纽	1 ₃ X		• • • • • • • •		印本行动Ⅱ	
		中统	雷口坡组	$T_2 l$			印支旋回	-叩又运幼11-	
		下统	嘉陵江组	Τ _J j					白云岩
			飞仙关组	$T_{i}f$					
		上	长兴组	$P_{3}c$	-232-				火石
	二_叠系	统	龙潭组	P_3l	-298-		海西 旋	太무눈권	••
		7	茅口组	P_2m				一小天运动	含砂泥岩
古生界		统		$\frac{P_2q}{P_1}$			旦		
			<u> </u>	$\frac{\mathbf{I}_{2}\iota}{\mathbf{S}_{2}hx}$				—加里东运动—	+ + + +
	志留系		韩家店组	S_2h					
			小河坝组	$S_1 x$		• • • • • • • • •			化冈石
	~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~		龙马溪组	$\frac{S_1l}{2}$	-443- -485-		лт		
	哭陶尔	H L	洲	$\frac{0}{\epsilon r}$		•••••••			
	寒武系	□ 〒 上 (统	高台组	$\frac{\epsilon_{3}x}{\epsilon_{2}g}$			里		煤
			龙王庙组	$\epsilon_1 l$			「东旋回		× _× ×
		下统	沧浪铺组	$\epsilon_1 c$					
			筇竹寺组	$\epsilon_1 q$					火山岩
元古	æ	上统			-542			—桐湾运动 II—	
	震 日		灯影组	$Z_2 dn$				—桐湾运动 -	~~~ ~~~~
	系	下统	陡山沱组	$Z_1 d$				澄江运动	冰碛岩
界	前単生		南沱组	Nh ₂		******** ********	+7 7		~ ~ ~
	晨 <u>系</u> 日 ≢ ⊆		连沱组	Nh_1	850-		扬子 旋回	_晋宁运动 _	
	三 		板溪组						

图 2 川中地区地层综合柱状图(苏桂萍, 2021) Fig. 2 Stratigraphic column of the Central Sichuan Basin (after Su, 2021)

Zhu et al., 2022), 为低热流背景区(图 4)。川中地 60~68.8 mW/m², 为四川盆地相对高值异常区。

68.8 mW/m², 平均值为 53.2 mW/m²(Xu et al., 2011; 区地温梯度为 22~32℃/km, 大地热流大部介于



图 3 四川盆地地温梯度等值线图(Xu et al., 2011) Fig. 3 Geothermal gradient contour map in the Sichuan Basin



Fig. 4 Heat flow contour map in the Sichuan Basin

1.3 栖霞-茅口组热储特征

川中地区基底之上自下而上发育的6套热储 除上三叠统须家河组及侏罗系为砂岩型热储外均 为碳酸盐岩型热储,其中又以栖霞-茅口组热储最 为典型。川中地区栖霞-茅口组岩性以灰岩、白云 质灰岩为主,是由海侵-海退旋回组成的海相碳酸 盐岩地层(Xiao et al., 2016)。地层埋深为3000~ 6000 m(图 5),热储厚 280~380 m(图 6),岩石平 均密度为 2.71×10³ kg/m³,孔隙度平均为 3.90%,渗 透率平均为 3.3×10⁻⁴ µm²(王世兴, 2016)。受二叠 系沉积末东吴运动的影响(陈涛等, 2022),茅口组 顶部遭受剥蚀,在川中地区形成了岩溶发育较好的 岩溶高地(冯许魁等, 2023)。

栖霞-茅口组在研究区呈层状单斜产出,厚度 稳定,构造简单,隐伏断层少量发育,为典型层状热 储特征。结合研究区周边钻孔资料可知,热储上覆 发育为上二叠统龙潭组,厚100~170 m,岩性以泥



图 5 川中地区二叠统栖霞-茅口组底部埋深

Fig. 5 Bottom burial depth of the Qixia-Maokou Formation in the Central Sichuan Basin



图 6 川中地区二叠统栖霞-茅口组热储厚度 Fig. 6 Thickness of the thermal reservoir of the Qixia-Maokou Formation in the Central Sichuan Basin

质页岩、粉砂岩夹黑色页岩及煤层为主,构成了良好的盖层。其下伏地层为下二叠统梁山组,厚 3~22 m,在垂向上出现含碳质页岩、砂质泥岩及粉砂岩,造就了地热水形成和赋存较为有利的热储条件(饶诗怡等,2022)。

2 评价方法

2.1 概念模型

本次地热资源评价工作主要通过利用不同热 储地层厚度、孔隙度、岩性等参数建立三维地质模 型,并基于 Monto Carlo 概率方法量化岩石热导率、 生热率、比热容和密度等热物性参数的空间各向 异性特征;利用一维稳态热传导方程模拟计算得到 栖霞-茅口组内部温度分布;基于体积法计算得到 栖霞-茅口组的地热资源强度,并利用积分的方法 将地热资源强度转变为地热资源量,实现了地热地 质模型可视化和地热资源评价的自动化。

四川盆地深层温度分布与大地热流具有良好 的相关性,主要受大地构造和岩石圈热结构的影响 (Zhu et al., 2022)。川中地区主要为基底隆起聚热 型地热地质成因模式(宁金野和徐洪苗, 2011),基 底大地热流在向上传导过程中受地层不同导热系 数的影响逐渐向川中隆起区聚集,形成了川中地区 较高的区域热背景(邱楠生等, 2022)。同时由于四 川盆地二叠统茅口组沉积后期受东吴运动的影响 整体抬升,在川中等地区形成了独特的大陆型早成 岩期层控岩溶系统(Xiao et al., 2016; Yang et al., 2015; Yang et al., 2021), 岩溶水十分丰富。其岩溶 地下水主要在华蓥山背斜及盆地周边等海拔高的 地区接受大气降水补给,在静水压力的作用下向盆 地内部运移。同时由于川中地区的质纯灰岩渗透 性较低,热储层埋藏较深,且补给区较远,其中也混 入一部分盆地内部的沉积水(Zhao et al., 2021),故 水质以 Cl-Na 型水为主, 部分为 HCO3·Cl-Na·Ca 型 水。地下水在长距离运移中,不断吸收围岩的热量, 现今温度达到 70℃ 以上,逐渐形成赋存条件相对 较好的中-低温型地热资源(图7)。

2.2 计算方法

体积法计算所得的地热资源量为该套热储岩 体和水中所含全部能量,即地热能的积存量,等于 热储体积、岩体温度、孔隙率和岩石与水的比热、 密度之积(邱楠生等,2019)。此次评价主要是基于 所建立三维地质模型,在计算热储地热资源强度 (式1)分布的基础上,利用积分的方法将地热资源 强度转变为地热资源量(式2)。其公式为:

$$R = H(T - T_0) \left[\rho_r C_r (1 - \varphi) + \rho_w C_w \varphi \right] \qquad (1)$$

$$Q = \iint_{D} Rd_{\sigma} \tag{2}$$

式中, *R* 为地热资源强度, 单位为 J/m²; ρ ,为岩石密 度、 ρ _w为水的密度, 单位为 kg/m³; *C*,为岩石的比热、 C_w为水的比热, 单位为 J/(kg·K); *H* 为热储厚度, 单位为 m; φ 为岩石的孔隙度, 单位为 %; *T* 为热储 温度, 单位为 ℃; *T*₀ 为基准温度, 单位为 ℃; *Q* 为计 算区域热储地热资源量, 单位为 J; D 为计算热储分 布区域。

同时体积法计算地热资源时,需要明确热储的 温度分布特征。故此次在建立川中地区三维地质 模型的基础上,利用一维热传导方程对热储中部的 温度分布进行模拟计算(式 3),并以此计算热储地 热资源量,其公式为:

$$T_Z = T_0 + \frac{qZ}{K} - \frac{AZ^2}{2K} \tag{3}$$

式中, *Tz* 为深度 *Z*(m)处的地温, 单位为 \mathbb{C} ; *T*₀ 为当 地恒温带的温度, 单位为 \mathbb{C} ; *q* 为大地热流, 单位 为 mW/m²; *K* 为岩石热导率, 单位为 W/(m·K); *A* 为岩石生热率, 单位为 μ W/m³;

2.3 基本参数

根据钻孔岩石样品测试数据,研究区热储岩石 平均密度为 2.71×10³ kg/m³,比热容为 842.3 J/(kg·K),孔隙度为 0.10%~14.16%,平均孔隙度





Fig. 7 Genetic model of geothermal resources in the Central Sichuan Basin

为 3.90%(王世兴, 2016); 岩石热导率 1.742~3.246 W/m·K, 平均为 2.91 W/m·K(Xu et al., 2011); 岩石 放射性生热率 0.116~3.327 µW/m³, 平均为 0.935 µW/m³(Xu et al., 2011)。

3 结果与讨论

3.1 评价结果

受基底古隆起的影响,川中地区构造为南浅北 深的大型缓坡构造,整体向北倾斜,除少量背斜外, 主要发育低矮褶皱构造。栖霞-茅口组岩性以海相 碳酸盐岩为主,埋深相对较浅,储层厚度为 280~380 m。根据所建立的三维地质模型,利用一 维稳态热传导方程可计算得到其顶面温度分布在 65~150℃(图 8),底面温度分布在 70~155℃ (图 9),顶底温差相对较小,平面上受基底埋深影



图 8 川中地区二叠统栖霞-茅口组顶部温度分布 Fig. 8 Top surface temperature distribution for the Qixia-Maokou Formation in the Central Sichuan Basin





响,除龙女寺构造附近出现温度异常外,整体随地 层埋深分布表现为南低北高的特点,主要为中-低 温地热资源。

根据所建立的三维地质模型,基于体积法计算 得到的栖霞-茅口组的地热资源强度,通过积分得 到栖霞-茅口组的岩石骨架及地热流体地热资源量, 其中二叠系中统栖霞-茅口组地热流体资源量为 1.91×10²⁰ J,折合标准煤 65.27 亿吨;岩石骨架资源 量为 2.82×10²¹ J,折合标准煤 964.98 亿吨;地热资 源总量为 3.01×10²¹ J,折合标准煤 1 030.25 亿吨;若 回收率取 20%(中华人民共和国自然资源部, 2020), 可开采地热资源量 2.03×10²⁰ J,折合标准煤 206.5 亿吨。

3.2 评价结果分析

根据所收集资料,在2013年、2017年和2019 年不同学者分别采用体积法、热储法和单元容积 法对四川盆地地热资源量进行了计算(Wang et al., 2019; 蔺文静等, 2013; 王贵玲等, 2017), 计算结果 分别为 7.78×10²¹ J、9.62×10²¹ J和 4.47×10²¹ J。但 是评价中存在以下主要问题:(1)仅采用温泉点数 据;(2)采用平均热储参数进行计算;(3)计算热储 层位或范围相差较大;导致计算结果存在较大误差, 且没有对热储温度及地热资源平面分布进行刻画, 很难指导实际地热开发利用。本次评价主要是针 对川中地区二叠系中统栖霞-茅口组,利用四川盆 地不同地层厚度、孔隙度分布、岩性等建立三维地 质模型,再结合四川盆地岩石热物性参数、地温梯 度和大地热流数据,可以更精准、更全面地的选取 及计算热储不同点位的地热学参数,并以此计算出 川中地区二叠系中统栖霞-茅口组地热资源总量为 3.01×10²¹ J, 与以往有所不同。在利用三维地质模 型基于地热资源强度分布计算整体地热资源量的 同时,探讨地热资源的形成及分布特征,为今后的 勘探开发提供重要的理论依据和技术支撑。

3.3 地热资源潜力分级

川中地区的地热资源是热传导型地热资源,其 主要由地幔在相对较薄的地壳背景下来自深部地 幔的大量热上涌控制(Jiang et al., 2021)。因此,川 中地区的地热资源靶区优选工作应以寻找导热地 热资源为目标。地热储层温度主要由岩石的地热 梯度,埋藏深度和热物性质决定(汪集旸等, 2015)。 本文结合热储温度、热储厚度等数据制得二叠统 栖霞-茅口组地热资源分布图(图 10),并根据地热



Fig. 10 Geothermal resources intensity distribution and grading plan the Central Sichuan Basin

资源强度使用 ArcGIS 软件中的自然断点分级法将 地热资源开发潜力由强到弱分为三级(Su et al., 2022)(表 1),首次对该地区的地热资源潜力及分 布特征进行了系统研究,为今后的地热资源开发利 用提供数据支持。

根据分级结果可知,一级区域主要分布在研究 区北部及西北少量地区,受地层埋深影响,地热资 源强度为102~115 GJ/m²,地温梯度为22~23℃/km, 大地热流为59~64 mW/m²,热储温度135~155℃, 热储厚度为320~380 m,地热资源量为6.87×10²⁰ J, 热储温度多在130℃以上,地热资源开发潜力较大。 二级区域地热资源潜力相对较弱,但在研究区中部 大范围分布,地热资源强度为62~102 GJ/m²,地温 梯度为22~31℃/km,大地热流为56~67 mW/m², 热储温度90~140℃,热储厚度为280~380 m,地 热资源量为1.98×10²¹ J,同时受基底埋深影响,热 储温度在龙女寺构造附近表现为相对高值异常区, 开发利用条件相对较好。三级区域主要集中于研究区南部,地热资源强度为 35~62 GJ/m²,地温梯度为 22~25℃/km,大地热流为 56~66 mW/m²,热储温度 75~100℃,热储厚度为 280~360 m,热储资源量为 3.45×10²⁰ J,其热储温度多在 90℃ 以下,但底部埋深较浅(2600~3800 m),距威远隆起地区相对较近。

为发挥其最大经济效益,应首先选择热储相对 较厚(280~380 m),温度较高(90~140℃),热储埋 深中等、废弃井分布较为密集的川中地区中部优 先开展中低温地热发电、地热干燥、地热农业等综 合开发利用和地热梯级利用示范工程,占领四川省 油田地热开发利用高地,助力四川省打赢"碳中和、 碳达峰"攻坚战。同时在后续工作中,我们也将根 据上述川中地区栖霞-茅口组地热资源分布,结合 现今地温场特征,与油气公司合作在地热田有利区 域进行废弃井优选,最后指出了该地区地热勘探和

	Table 1 Grad	ling table of geot	hermal resource po	otential in the Centr	al Sichuan Basin	
分级区域	地热资源强度 (GJ/m ²)	地温梯度 (℃/km)	大地热流 (mW/m ²)	热储温度 (℃)	热储厚度 (m)	热储资源量 (J)
一级区域	>102	22~23	59~64	135~155	320~380	6.87×10 ²⁰
二级区域	$62\!\sim\!102$	22~31	$56 \sim 67$	90~140	$280 \sim 380$	1.98×10^{21}
三级区域	<62	$22 \sim 25$	$56 \sim 66$	$75 \sim 100$	$280 \sim 360$	3.45×10^{20}

表 1 川中地区地热资源潜力分级表 Fable 1 Grading table of geothermal resource notential in the Central Sichuan Basin

利用的方向;在川中地区中部选择合适废弃井,开 展中低温地热发电、地热干燥等示范项目。

4 结论

(1)川中地区主要为沉积盆地型地热资源,具 有层状热储特征,地温梯度为 22~32℃/km,大地 热流大部介于 60~68.8 mW/m²,为四川盆地相对 高值异常区。同时栖霞-茅口组埋深相对较浅,热 储温度较高,岩溶系统发育,岩溶水十分丰富,是川 中地区地热资源开发的优选目的层。

(2)川中地区栖霞-茅口组地热资源量为 3.01×10²¹ J,折合标准煤1030.25 亿吨;可开采地热 资源量2.03×10²⁰ J,折合标准煤206.5 亿吨。

(3)本文根据川中地区地热资源强度将其地热 资源潜力分为三级,并以此提出了以西南为中心优 先开展中低温地热发电、地热干燥、地热农业等综 合开发利用和地热梯级利用示范工程的建议,为未 来的废弃井的二次利用及油田地热资源开发打下 基础。

致谢:对两位匿名审稿人的建设性意见表示 感谢。

References

- Chen T, Li Z W, Li J Xi, et al., 2022. A comparative study of the central Sichuan paleo–uplift and the northwest Sichuan paleo–uplift during the Caledonian period[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology: 1–15.
- Dai X, Zhang M, Jiang Q, et al., 2017. Karst reservoirs seismic prediction of lower Permian Maokou formation in central Sichuan basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 44 (1): 79-88.
- Feng X K, Yang Y, Zhu Y D, et al., 2023. Development Characteristics, Distribution Patterns and Favorable Exploration Zones of Permian Reef Shoals in Sichuan Basin[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology: 1 – 17.
- Jiang G, Hu S, Shi Y, et al., 2019. Terrestrial heat flow of continental China: updated dataset and tectonic implications [J]. Tectonophysics, 753: 36 - 48.
- Jiang S, Zuo Y, Yang M, et al., 2021. Reconstruction of the Cenozoic tectonic-thermal history of the dongpu depression, bohai bay basin, china: constraints from apatite fission track and vitrinite reflectance data [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 205: 108809.
- Kurek K A, Heijman W, Ophem J, et al., 2021. The contribution of the geothermal resources to local employment: a case study from Poland [J]. Energy Reports, 7: 1190 – 1202.

- Lin W J, Liu Z M, Wang W L, et al., 2013. The assessment of geothermal resources potential of China[J]. Geology in China, 40 (1): 312-321.
- Lin W, Liu Z, Wang W, et al., 2013. Geothermal resources and potential evaluation in China[J]. Geology in China, 40 (1) : 312 – 321 (in Chinese with English abstract).
- Liu X, Falcone G, Alimonti C, 2018. A systematic study of harnessing low-temperature geothermal energy from oil and gas reservoirs[J]. Energy, 142: 346 – 355.
- Luo A, Wang Q W, Qin Y L, et al., 2021. Geotectonic unit division and its basic characteristics in Sichuan Province[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 41 (4) : 633 – 647 (in Chinese with English abstract).
- Ning J Y, Xu H M, 2011. Potential evaluation of geothermal resources in the Hefei area[J]. Geology of Anhui Province, 21 (1) : 40 43 (in Chinese with English abstract).
- Pang Z H, Kong Y L, Pang J M, et al., 2017. Study on geothermal resources, development, and utilization in Xiongan New Area[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 32 (11) : 1224 – 1230 (in Chinese with English abstract).
- Qiu N, Hu S, He L, 2019. Geothermal in Sedimentary Basin [M]. Qingdao: China University of Petroleum Press.
- Qiu N S, Tang B N, Zhu C Q, 2022. Deep thermal background of hot spring distribution in mainland China. Acta Geologica Sinica, 96 (01) : 195 – 207.
- Rao S Y, Fu M Y, Deng H C, et al., 2022. A new method for restoring sedimentary palaeogeomorphology based on petrographic and geochemical characteristics: A case study of Qixia Formation in central Sichuan [J]. Bulletin of Geological Science and Technology: 1-9.
- Singh H K D, Quoc B T, Yong T C, et al., 2016. Mpd closed loop cementing in high-pressure, high-temperature wells in Vietnam [C]//International Petroleum Technology Conference.
- Su G, 2021. Study on structural characteristics and tectonic evolution in the northern slope of Central Sichuan paleo–uplift and their influences on hydrocarbon accumulation [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology.
- Su Y, Su C, Xie Y, et al., 2022. Controlling non-grain production based on cultivated land multifunction assessment[G]//International Journal of Environmental Research and Public Health.
- Templeton J D, Ghoreishi-Madiseh S A, Hassani F, et al., 2014. Abandoned petroleum wells as sustainable sources of geothermal energy[J]. Energy, 70: 366 - 373.
- Tuo M M, 2020. Characteristics and genesis of the thermal groundwater of basin-anticline outcropping type near the main urban area of Chongqing in the Eastern Sichuan Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing).
- Wang G L, Liu Z M, Lin W J, et al., 2011. Evaluation of geothermal resources potential in China [C]// Geothermal Energy Development and Utilization and Low Carbon Economy Seminar -- The 14th session of the 13th Annual Meeting of the China Association for Science and Technology abstract collection, 17 – 28.

- Wang G L, Lu C, 2022. Progress of geothermal resources exploitation and utilization technology driven by carbon neutralization target[J]. Geology and Resources, 31 (3) : 412 – 425 (in Chinese with English abstract).
- Wang G L, Zhang W, Liang J Y, et al., 2017. Evaluation of geothermal resources potential in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 38 (4) : 449 – 459 (in Chinese with English abstract).
- Wang J Y, Pang Z H, Hu S B, et al., 2015. Geothermology and its application [M]. Beijing: Science Press.
- Wang J Y, Kong Y L, Cheng Y Z, 2019. Distribution, development, and utilization of geothermal resources in China [C]. // International Clean Energy Forum (Macau). International clean energy industry development report (2019). Chinese yanshi press, 81 – 88.
- Wang K, Yuan B, Ji G, et al., 2018. A comprehensive review of geothermal energy extraction and utilization in oilfields[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 168: 465 – 477.
- Wang S, Hu J, Yan J, et al., 2019. Assessment of geothermal resources in petroliferous basins in China[J]. Mathematical Geosciences, 51 (3): 271 – 293.
- Wang S, Yan J, Li F, et al., 2016. Exploitation and utilization of oilfield geothermal resources in China[J]. Energies, 9 (10) : 798.
- Wang S X, 2016. Study on Logging Reservoir Evaluation of the Qixia and Maokou Formation of Lower Permian in Sichuan Basin[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China).
- Xiao D, Tan X, Xi A, et al., 2016. An inland facies-controlled exogenetic karst of the carbonate reservoir in the middle Permian Maokou formation, southern Sichuan basin, SW China[J]. Marine and Petroleum Geology, 72: 218 – 233.
- Xu M, Zhu C Q, Tian Y T, et al., 2011. Borehole temperature logging and characteristics of subsurface temperature in the Sichuan basin[J]. Chinese Journal of Geophysics, 54 (2) : 224 – 233.
- Yang G, Wang H, Shen H, et al., 2015. Characteristics and exploration prospects of middle Permian reservoirs in the Sichuan basin[J]. Natural Gas Industry B, 2 (5): 399-405.
- Yang M, Zuo Y, Zhang J, et al., 2021. Hydrocarbon kitchen evolution in the early cretaceous bayingebi 2 formations in the chagrin depression, yingen-ejinaqi Basin, north-central China[J]. Acs Omega, 6 (18) : 12194 – 12204.
- Zhao J, Wang G, Zhang C, et al., 2021. Genesis of geothermal fluid in typical geothermal fields in western Sichuan, China[J]. Acta geologica Sinica (Beijing), 95 (3): 873 – 882.
- Zhao M H, Li X Y, Song M S, et al., 2015. Research on geothermal resources assessment of the Guantao-Dongying Formation in Jiyang depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 22 (4) : 1 – 5 (in Chinese with English abstract).
- Ministry of Natural Resources, PRC, 2020. Evaluation methods and estimation procedures for geothermal resources DZ/T 0331-2020[S]: Domestic --- Industry Standards-Industry Standards-Geological CN-DZ.

Zhu C, Xu T, Qiu N, et al., 2022. Distribution characteristics of the deep geothermal field in the Sichuan basin and its main controlling factors[J]. Frontiers in Earth Science, 10.

附中文参考文献

- 陈涛,李智武,李金玺,等,2022.川中-川西北加里东期古隆起对 比研究[J]. 沉积与特提斯地质:1-15.
- 冯许魁,杨雨,朱亚东,等,2023.四川盆地二叠纪礁滩体发育特征、分布模式及有利勘探区带[J]. 沉积与特提斯地质:1-17.
- 蔺文静,刘志明,王婉丽,等,2013.中国地热资源及其潜力评估
 [J].中国地质,40(1):312-321.
- 罗改,王全伟,秦宇龙,等,2021.四川省大地构造单元划分及其 基本特征[J].沉积与特提斯地质,41(4):633-647.
- 宁金野,徐洪苗, 2011. 合肥地区地热资源潜力评价[J]. 安徽地质, 21(1):40-43.
- 庞忠和,孔彦龙,庞菊梅,等,2017.雄安新区地热资源与开发利用研究[J].中国科学院院刊,32(11):1224-1230.
- 邱楠生,胡圣标,何丽娟,2019. 沉积盆地地热学[M]. 青岛:中国石油大学出版社.
- 邱楠生,唐博宁,朱传庆,2022.中国大陆地区温泉分布的深部热 背景[J].地质学报,96(1):195-207.
- 饶诗怡,伏美燕,邓虎城,等,2022.基于岩相和地球化学特征的 沉积古地貌恢复新方法:以川中栖霞组为例[J].地质科技通报: 1-9.
- 苏桂萍,2021.川中古隆起北斜坡区构造特征、演化及其对油气成 藏影响研究[D].成都:成都理工大学.
- 拓明明,2020.四川盆地东部重庆主城区附近盆地—背斜出露型地 下热水特征及成因机制[D].北京:中国地质大学(北京).
- 王贵玲,刘志明,蔺文静,等,2011.中国地热资源潜力评估[C]// 中国科学技术协会,天津市人民政府,中国地质学会.地热能开发 利用与低碳经济研讨会——第十三届中国科协年会第十四分会 场论文摘要集,17-28.
- 王贵玲,陆川, 2022.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,31(3):412-425.
- 王贵玲,张薇,梁继运,等, 2017.中国地热资源潜力评价[J].地 球学报,38(4):449-459.
- 汪集旸, 庞中和, 胡圣标, 等, 2015. 地热学及其应用[M]. 北京: 科学出版社.
- 汪集暘, 孔彦龙, 程远志, 2019. 中国地热资源分布与开发利用 [C]//国际清洁能源论坛(澳门).国际清洁能源产业发展报告 (2019).中国言实出版社, 81-88.
- 王世兴,2016.四川盆地下二叠统栖霞组和茅口组测井储层评价研 究[D].青岛:中国石油大学(华东).
- 赵铭海,李晓燕,宋明水,等,2015.济阳坳陷东营组—馆陶组地 热资源评价[J].油气地质与采收率,22(4):1-5.
- 中华人民共和国自然资源部,2020.地热资源评价方法及估算规程 DZ/T 0331-2020[S]:国内-行业标准-行业标准-地质 CN-DZ.