

四川省地热资源综合利用开发对策研究

胡亚召^{1,2*}, 屈泽伟^{1,2}, 徐小青^{1,2}

¹四川省地质工程勘察院集团有限公司, 四川 成都

²四川省第一地质大队, 四川 成都

收稿日期: 2023年11月9日; 录用日期: 2023年12月21日; 发布日期: 2023年12月28日

摘要

四川省地热资源丰富, 但其利用方式仍以温泉洗浴等低层次应用为主, 利用方式单一且利用效率不高, 造成地热资源的严重浪费。本文通过省内现有地热点现状调查, 对四川省不同类型地热资源的差异性及其开发利用现状进行研究, 全面归纳总结了我省地热资源成因模式及资源潜力, 深入分析目前我省地热资源在开发利用过程中存在的主要问题。根据目前地热开发过程中存在的问题, 结合政策措施和管理现状, 深入剖析, 找出痛点和难点问题, 统筹资源禀赋、政策、市场等因素综合考虑, 根据地热资源潜力、勘探程度、利用现状, 结合政府需求及技术水平等进行综合利用开发对策研究, 从工程地热开发利用角度提出切实可行的建议、对策, 指导我省地热资源综合、高效及规模化利用开发。

关键词

四川省, 地热资源, 资源开发, 综合利用

Research on Comprehensive Utilization and Development Strategies of Geothermal Resources in Sichuan Province

Yazhao Hu^{1,2*}, Zewei Qu^{1,2}, Xiaoqing Xu^{1,2}

¹Sichuan Institute of Geological Engineering Investigation Group Co. Ltd., Chengdu Sichuan

²The 1st Geological Brigade of Sichuan, Chengdu Sichuan

Received: Nov. 9th, 2023; accepted: Dec. 21st, 2023; published: Dec. 28th, 2023

Abstract

Sichuan Province is rich in geothermal resources, but its utilization is still dominated by low-level

*第一作者。

applications such as hot spring bathing. The utilization method is single and the efficiency is not high, resulting in a serious waste of geothermal resources. Based on the investigation of the current situation of geothermal hotspots in the province, this paper studies the differences and development and utilization status of different types of geothermal resources in Sichuan Province, comprehensively summarizes the genetic model and resource potential of geothermal resources in our province, and deeply analyzes the main problems existing in the development and utilization of geothermal resources in our province. According to the existing problems in the geothermal development process, combined with policy measures and management status, in-depth analysis, it finds out the pain points and difficult problems, and comprehensively considers the factors such as resource endowment, policy and market. According to the potential of geothermal resources, exploration degree and utilization status, combined with government demand and technical level, the comprehensive utilization and development countermeasures are studied. From the perspective of engineering geothermal development and utilization, practical suggestions and countermeasures are put forward to guide our province's comprehensive, efficient and large-scale utilization and development of geothermal resources.

Keywords

Sichuan Province, Geothermal Resources, Resource Development, Comprehensive Utilization

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

地热能是一种清洁无污染、绿色低碳的可再生能源，具有分布广，储量大，低碳环保，可持续开采等特点，仅地壳上部 10 km 的地热能就能满足全球 2.17 亿年的能源需求[1] [2] [3] [4]，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[5] [6] [7]。四川省地热资源丰富，地热资源类型多、储量大，可利用总量位居全国第 3 位，单位面积可用资源量排在第 11 位[8] [9]，同时分布众多地热井和温泉点，上万口深度在 3000~5000 m 的油气钻井，可开采的热水产量十分可观。仅川西高原康定地区的深层地热资源发电潜力就可达 150 兆瓦以上[10]，四川盆地西部的成都平原热水储量也超过 13.9 万亿立方米，蕴含的浅层地热能资源折合标准煤高达 470 亿吨[11]。

在地热资源的开发利用过程中，往往会根据不同温度的热源来确定其开发利用方式[12] [13]。但不同的热应用在地热资源开发利用中，地热流体中的热能通常会转换为其他形式的能量而导致自身温度逐渐降低，受应用温度的限制，使得单一应用整体热效率相对低下[13]。但随着地热发电、供暖、热泵等技术越来越成熟，我国地热利用方式也发生了重要的变化，逐渐由单一应用逐渐向综合梯级利用、集成应用发展[14]。地热综合梯级利用技术已成为国内外地热能领域探索的热点方向[12]。与此同时，四川省的地热资源利用仍以温泉洗浴等低层次应用为主，利用方式单一且利用效率不高，综合利用开发的相关研究仍处于较浅层次，造成地热资源的严重浪费[15]。鉴于此，文章通过省内现有地热现状的调查，对四川省不同类型地热资源的差异性及其开发利用现状进行研究，全面归纳总结我省地热资源成因模式及资源潜力，深入分析了目前我省地热资源在开发利用过程中存在的主要问题，科学合理地提出地热资源的利用方向与前景。以期加快四川省地热资源综合利用开发的步伐，助力我国打赢“碳中和与碳达峰”攻坚战。

2. 地热资源类型

四川省兼具低、中、高温隆起山地型(对流型)与沉积盆地传导型地热资源,地热资源储量丰富。隆起山地型地热资源分布在除四川盆地以外的广大区域,多数地区地热条件受断裂控制。根据控热构造、热储的差异,结合地貌特点,分为川西高原高-中温地热区、川西南中低温地热区、盆周山地中-低温地热区以及阿坝州区[7]。沉积盆地型地热资源主要分布于四川盆地,即四川盆地沉积盆地传导型地热资源富集区[9],其分布见图1。

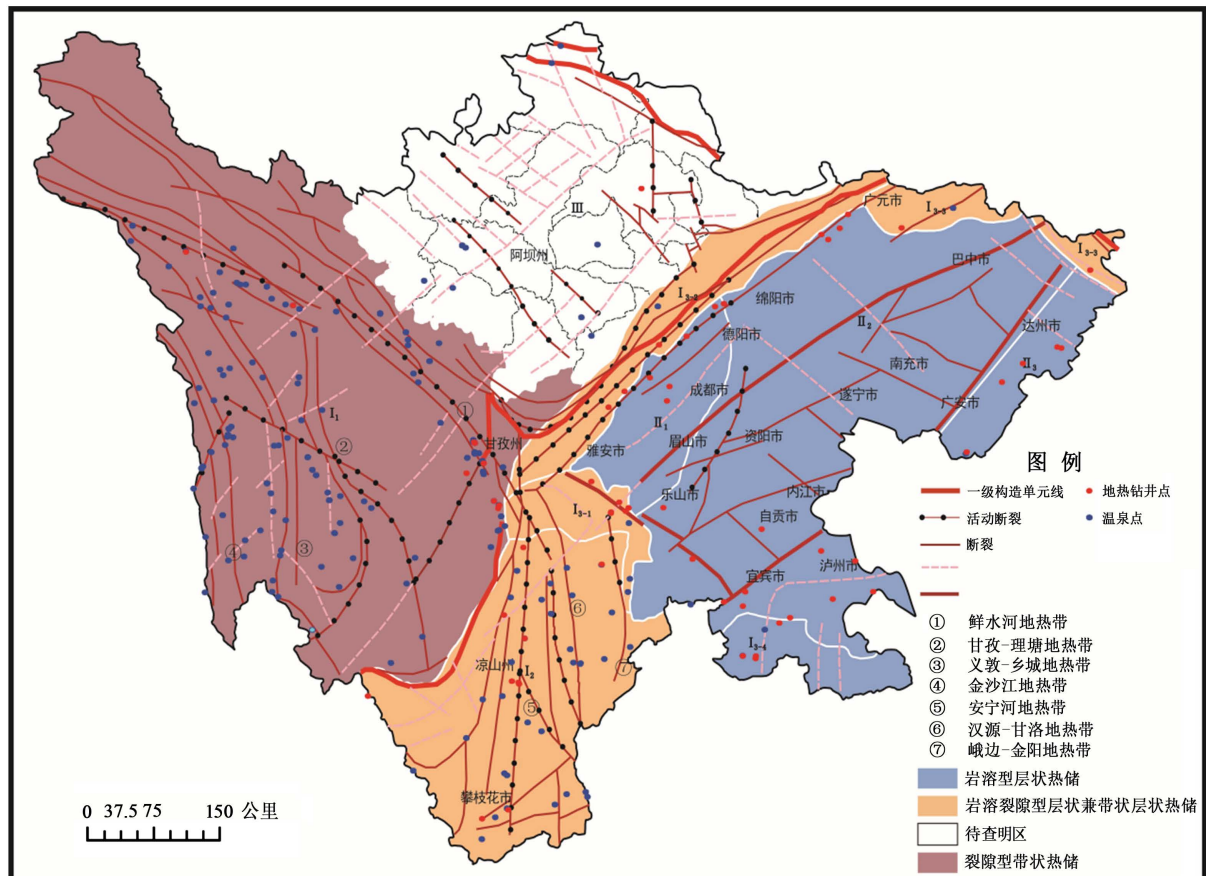


Figure 1. Types of geothermal resources and distribution of geothermal hot spots in Sichuan Province [9]

图1. 四川省地热资源类型及地热点分布图[9]

2.1. 隆起山地型地热资源

地质构造和地形地貌是影响隆起山地型地热资源地热自然露头出露的主要因素。四川省中-高温地热资源主要集中于川西高原,并有大量的露头;在此次核实调查的309个地热点中,该区自然出露温泉185处,地热井13处,受金沙江断裂、德格-乡城断裂、甘孜-理塘断裂、鲜水河断裂控制,温泉均沿断裂带依次展布,且多集中于断裂交汇处。区内温度多在 25°C ~ 92°C ,流量为 $0.011\sim 164\text{ L/s}$,以 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型水为主。温度最高为海螺沟2号营地温泉,位于甘孜州泸定县磨西镇,出水温度 92°C ,流量 1.03 L/s 。其他区域除阿坝州以往研究较少外,多为中-低温地热资源,且温泉露头数量相对较少。特别是盆周山地中-低温地热区,区内地热点以人工钻井为主,仅出露7处温泉地热点,最高出水温度仅为 45°C ,低于地热井水温(表1)。

目前国内对四川省的地热资源开发利用研究多集中于川西高原地区, 对其他区块, 特别是阿坝州地区的研究相对较少。经估算, 四川省隆起山地型地热资源总量为 3.64×10^{16} kJ, 流体可开采量 3.20×10^7 m³/a, 流体可开采热量 4.60×10^{16} kJ/a [10]。其中川西中 - 高温地热资源区的地热资源储量在整个四川省隆起山地型地热资源中占比最大, 地热资源总量为 2.48×10^{16} kJ, 流体可开采量 1.76×10^7 m³/a, 流体可开采热量 3.18×10^{12} kJ/a。

Table 1. Characteristics table of geothermal reservoir types in Sichuan Province
表 1. 四川省地热资源热储类型特征表

地热类型	四川地热资源分区/分带	热储类型	热储岩性	所属地热资源类型区	调查地点	温度	主要水化学类型
隆起山地型(I)	川西高原高 - 中温地热区(I ₁)	裂隙型带状热储	变质砂板岩、长石石英砂岩、千枚岩、砾岩、大理岩、灰岩、花岗岩等	鲜水河地热带①	198 处(温泉 185 处, 地热井 13 处)	25℃~92℃ (温泉 25℃~92℃, 地热井 28.5℃~85℃)	HCO ₃ -Na; HCO ₃ -Na-Ca
				甘孜 - 理塘地热带②			
				义敦 - 乡城地热带③			
				金沙江地热带④			
				安宁河地热带⑤			
	川西南中 - 低温地热区(I ₂)	裂隙型带状 + 岩溶型层状复合型热储	白云岩、灰岩、砂岩	汉源 - 甘洛地热带⑥	42 处(温泉 33 处, 地热井 9 处)	26℃~70℃ (温泉 25℃~92℃, 地热井 32℃~61℃)	HCO ₃ -Ca-Mg; HCO ₃ -SO ₄ -Ca-Mg
				峨边 - 金阳地热带⑦			
				峨眉山地热区 I ₃₋₁			
				龙门山地热区块 I ₃₋₂			
				广元巴中达州地热区 I ₃₋₃			
盆周山地中 - 低温地热区(I ₃)	岩溶型层状热储	白云岩、灰岩	叙永筠连地热区 I ₃₋₄	25 处(温泉 7 处, 地热井 18 处)	25.5℃~78℃ (温泉 25.5℃~45℃, 地热井 32℃~78℃)	Cl-Na; SO ₄ -Ca-Mg	
成都平原地热区 II ₁							
川中丘陵、低山地热区 II ₂							
沉积盆地型(II)	四川盆地低温地热区(II)	岩溶型层状热储	白云岩、灰岩	川东平行岭谷地热区 II ₃	31 处(温泉 3 处, 地热井 28 处)	25℃~93℃ (温泉 31℃~49℃, 地热井 25℃~93℃)	Na-Cl; SO ₄ -Ca; SO ₄ -Ca-Mg
				阿坝州(III)			

2.2. 沉积盆地型地热资源

四川盆地主要属于地幔热传导型地热资源,地温梯度变化(2.4℃~3.0℃/100 m) [16],热流分布呈现出西南高东北低的特点,其中川西-川中地区温度较高,是地热资源优先开发利用区域[4] [17]。区内开发利用地热点以人工钻井为主,温泉点相对较少,多出露在盆地边缘及东部褶皱地区,且温度较低(31℃~49℃)。同时油气勘探结果表明,四川盆地中从震旦系灯影组到侏罗系蓬莱镇组共有近 20 个热水层,主要热水层埋深在 3000~4500 m,平均水温在 70℃~150℃之间,中-低温地热资源异常丰富,仅 4000 以浅的地热资源量就高达 9.62×10^{21} J,折合标准煤为 3280.00 亿吨[18],在中国内陆各大含油气盆地中排名第一[19]。且经过近百年的油气、盐业等勘探开发,目前有近 15,000 余口废停井(直井为主)可用于地热开发,是地热田研究的天然示范基地。

3. 地热资源类型差异性对比

在区域热背景上,川西高原由于位于青藏高原“东构造结”,地壳构造变形及地震活动强烈,因此,具有高大地热流特征,是我国著名的热流异常区之一[20] [21]。四川盆地构造活动较为稳定,处于正常-偏低热流背景。不同区域热背景造成地热资源的品质也不尽相同,尽管川西高原为隆起山地型地热资源丰富区,但其兼具高、中、低温地热资源,而除川西高原外的隆起山地型地热资源与沉积盆地型地热资源均以中低温地热资源为主。

按照热储赋存的地质构造条件以及介质特征的差异,四川总体上可分为裂隙型带状热储、裂隙型带状+岩溶型层状热储、岩溶型层状热储三种。其中,裂隙型带状热储与裂隙型带状+岩溶型层状热储多位于隆起山地型地热资源,而岩溶型层状热储则多位于四川盆地内,为典型的沉积盆地型地热资源。

在热源及成因模式方面,对于沉积盆地型地热资源来讲,其热量主要来自地壳的正常增温。由于四川盆地地温梯度较小,因此,其热储温度相对较低;对于隆起山地型地热资源来讲,不同地区具有截然不同的热源,川西高原除地壳正常增温外,还具有断裂带摩擦生热、岩浆热源等热源。隆起山地型地热资源的形成过程可总结为:大气降水在入渗地下后开始深循环,在循环过程中由于其与周围围岩间的温度差异被加热,在负浮力作用下沿断裂带上涌,从而形成隆起山地型地热资源;相比之下,沉积盆地型地热资源的形成则基本可概括为有效的源(供热)-储(储热)-盖(绝热)组合。

在开发利用方面,受控于地热资源品质,川西高原的高温隆起山地型地热资源建议以中高温地热发电为主,而后基于发电尾水开展梯级利用,而四川盆地及的中低温沉积盆地型与隆起山地型地热资源建议以中低温地热发电+梯级利用与直接利用为主。

4. 地热资源开发利用现状及存在的问题

4.1. 地热资源开发利用现状

尽管四川盆地地热资源储量丰富,但地热资源开发与利用率不高,且缺少整体规划,开发利用规模低下[15]。主要开发利用方式依旧以建筑供热(制冷)、旅游疗养、居民洗浴、水产养殖和温室种植为主,工业开发利用相对较少。在本次调查的 217 个已开发地热点中,居民洗浴与旅游疗养依旧是最为主要的利用方式,其中居民洗浴 115 处,旅游疗养 85 处(兼水产养殖 6 处),利用区域多集中于盆周山区及川西、攀西地区。水产养殖和温室种植开发利用地热点相对较少,其中水产养殖 10 处,养殖种类以罗非鱼为主,均位于川西南地区;温室种植 6 处,川西高原、四川盆地、阿坝地区均有分布(图 2)。

经过多年发展,四川省地热开发利用中在建筑供暖(制冷)方面有所增加,如成都东客站、新世纪环球

中心等集中供暖等项目多有开展,但利用区域依旧多集中在成都市,且除川西高原有少处建筑供暖(制冷)项目外,其余地区仅在省内零星分布。在地热发电方面四川省仅康定及遂宁地区利用高温地热水和油气井废热水开展过小型地热发电试验,产业规模较小,与丰富的地热资源储量严重不符。

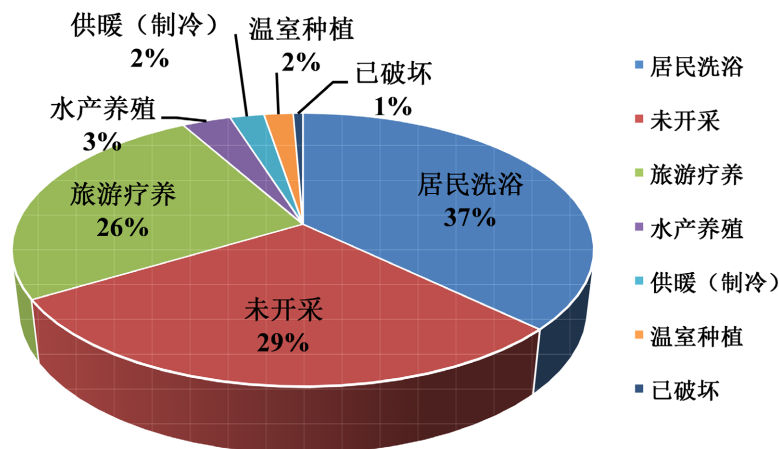


Figure 2. Development and utilization status map of geothermal resources in Sichuan Province
图 2. 四川省地热资源利用现状图

总的来说,四川省境内已开发利用地热点的形式单一、开发利用规模低下,极少实现综合开发或地热流体梯级开发。仅凉山州和甘孜州的 6 个地热点实现了以医疗保健 + 水产养殖或医疗保健 + 地震监测的方式开发利用[22]。在目前的利用方式下,地热水资源浪费严重,如康定雅拉河与榆林河,90%的地热水资源处于天然排放状态。若全面启动四川省地热资源的开发利用,对提升能源供应保障能力,保障我国能源安全具有长远的战略意义。

4.2. 存在问题

(1) 缺乏统一的勘查规划

四川省地热资源总量丰富,在全国居前,具有广阔的开发利用价值。然而,省内地质构造复杂,地热资源分布不均,地热勘查难度大、风险高,基本处于“就热找热”阶段,存在整体资源家底不清、勘查工作程度较低,地热资源蕴藏量底数掌握不够的问题。虽各地勘单位及研究机构均在省不同区域地热资源评价的相关研究[9] [15] [23] [24],但评价尺度、方法及精度不一,评价结果相差较大,缺少统一勘查规划,难以满足地热资源规模化、产业化开发利用需要。

(2) 开发利用形式单一,缺乏综合开发利用的实践思路与模式

四川省地热资源禀赋较高,开发利用各方面基础良好,但地热资源利用形式单一且开发利用效率低下,医疗保健依旧为四川省地热资源主要利用方式。虽在“十一五”、“十二五”、“十三五”期间由于国家对可再生能源利用出台了针对示范项目、示范市(县)的补贴政策,我省在建筑供暖(制冷)及地热发电示范方面有所增加,但依旧缺乏综合开发利用的实践思路与模式,地热示范项目示范作用不强。

(3) 扶持政策不充分,管理权责不明晰

与传统能源相比,地热资源开发利用前期投入依旧较高。虽然地热资源浅层地热开发利用等技术已趋于成熟,但我国地热能产业扶持政策不充分,目前关于地热能财税支持方面的法律法规,缺乏实施条款和落实细则,对优惠税率和补贴力度等激励政策没有统一明确的标准。同时地热管理涉及到能源、自然资源、水利、住建等部门,我省还没有对管理部门管理权责进行清晰的划分,管理体系尚需进一步完善。

5. 综合利用开发对策建议

5.1. 积极统筹规划地热资源勘查工作，摸清地热资源底数

针对我省地热资源勘查开发程度不高，开发利用局限于分散的点上的特点。未来我省应积极统筹规划地热资源勘查工作，抓好四川省“十四五”地热资源开发利用规划落实落细，分步骤开展全省地热资源详查和评价，精准了解地热资源分布全貌，以实现全面开发与利用的系统规划方针。

5.2. 深入挖掘地热资源的潜力与可持续利用，开展地热伴生资源研究

进一步探索地热资源在供暖、制冷、发电等方面的综合利用，发展高效的地热能转换技术和系统，提高能源利用效率，注重环境友好型地热能的开发与利用。并开展地热伴生资源研究(如锂、氦气等)，聚焦盆地油气田等伴生地热勘探开发。在建立废停井中低温水热型地热发电技术的同时，研发高效开发热水层伴生的锂、氦等矿产资源技术，提高地热资源开发利用中的经济价值，逐渐形成适合四川省不同地质条件下地热发电及伴生资源开发原创性技术体系。

5.3. 确定可持续发展示范区，打造资源辐射经济带

在资源详查的基础上，根据不同地区控热构造、岩性岩相、产出特征等条件差异，以及地热资源类型与分布的不同特点，确定合适的开发利用模式，以实现全方位、全过程、全覆盖的综合梯级利用。在川西理塘、四川盆地等地热资源优势地带，实施四川省地热产业推进扶持专项计划，建成集地热能发电、制冷、干燥、温室种养、浴疗、温泉休闲、养老等多种利用方式组合的梯级利用模式和产业聚集区，打造西部地区典型地热资源辐射经济带。通过示范带动，快速推动地热能多产业、集群化、高质量开发利用，扩大地热能的应用规模，提高在终端能源消费的占比，努力创建国家级地热资源开发利用可持续发展示范区，为加快发展清洁能源支撑的绿色产业体系提供示范和探索。

5.4. 优化政策工具顶层设计，加强地热资源管理与政策支持

与发达国家的地热产业政策对比，我国的地热产业政策存在管理制度和机制不健全、产业规划难以落实、税收政策的目标不明确等问题，导致地热资源的开发利用不足。在未来的地热资源的规划、开发和利用过程中，我省需要加强顶层设计，建立健全的政策法规和管理体系，加强监测和评估，确保地热资源的可持续利用，同时给予相关产业合理的财政补贴和税收优惠，统筹协调促进区域地热产业协调发展。

6. 结论

四川省地热资源总量丰富，具有广阔的开发利用价值，但地热资源开发与利用率不高，且缺少整体规划，开发利用规模低下。未来应积极统筹规划地热资源勘查工作，分步骤开展全省地热资源详查和评价，精准了解地热资源分布全貌，深入挖掘地热资源的潜力与可持续利用，进一步探索地热资源在供暖、制冷、发电等方面的综合利用，开展地热伴生资源研究。同时完善我省管理部门，以明文规定确定各方权责问题，为地热资源规范开发和利用提供依据。通过示范带动，快速推动地热能多产业、集群化、高质量开发利用，扩大地热能的应用规模，加快四川省地热资源的开发利用步伐，助力我国打赢“碳中和与碳达峰”攻坚战。

基金项目

四川省地质局科技项目(SCDZ-KJXM202301)经费支持。

参考文献

- [1] Cadelano, G., Cicolin, F., Emmi, G., *et al.* (2019) Improving the Energy Efficiency, Limiting Costs and Reducing CO₂ Emissions of a Museum Using Geothermal Energy and Energy Management Policies. *Energies*, **12**, Article No. 3192. <https://doi.org/10.3390/en12163192>
- [2] Lu, S. (2018) A Global Review of Enhanced Geothermal System (EGS). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **81**, 2902-2921. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.097>
- [3] Lund, J.W., Bjelm, L., Bloomquist, R.G., *et al.* (2008) Characteristics, Development and Utilization of Geothermal Resources; a Nordic Perspective. *Episodes*, **31**, 140-147. <https://doi.org/10.18814/epiiugs/2008/v31i1/019>
- [4] 张禄权, 左银辉, 孙义高, 等. 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, 2023, 43(2): 261-270.
- [5] 邱楠生, 胡圣标, 何丽娟. 沉积盆地地热学[M]. 北京: 中国石油大学出版社, 2019.
- [6] 汪集暘, 庞忠和, 程远志, 等. 全球地热能的开发利用现状与展望[J]. 科技导报, 2023, 41(12): 5-11.
- [7] 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.
- [8] 罗强. “双碳”视域下四川地热产业的发展路径[J]. 中国国情国力, 2022(9): 4-8.
- [9] 倪高倩, 韦玉婷, 屈泽伟, 等. 四川省地热资源分布及特征简析[J]. 四川地质学报, 2016, 36(2): 239-242.
- [10] 王贵玲. 中国地热资源[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [11] 龙小军. 四川省甘孜州康定县高原地热井施工工艺[J]. 中国煤炭地质, 2014(7): 60-62, 77.
- [12] 余春梅, 张超, 杨宇, 等. 川西地热资源综合梯级利用[J]. 天然气勘探与开发, 2021, 44(3): 102-111.
- [13] Kaczmarczyk, M., Tomaszewska, B., Operacz, A. (2020) Sustainable Utilization of Low Enthalpy Geothermal Resources to Electricity Generation through a Cascade System. *Energies (Basel)*, **13**, Article No. 2495. <https://doi.org/10.3390/en13102495>
- [14] 黄璜, 刘然, 李茜, 等. 地热能多级利用技术综述[J]. 热力发电, 2021, 50(9): 1-10.
- [15] 王贵玲, 蔺文静, 张薇, 等. 中国地热志——西南卷一[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [16] 徐明, 朱传庆, 田云涛, 等. 四川盆地钻孔温度测量及现今地热特征[J]. 地球物理学报, 2011, 54(4): 1052-1060.
- [17] 兰镛, 左银辉, 冯仁朋, 等. 川东地区大地热流及其对地热资源评价的启示[J]. 地球学报, 2023, 44(1): 169-179.
- [18] 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): 449-459.
- [19] 王社教, 李峰, 闫家泓, 等. 油田地热资源评价方法及应用[J]. 石油学报, 2020, 41(5): 553-564.
- [20] Jiang, G., Hu, S., Shi, Y., *et al.* (2019) Terrestrial Heat Flow of Continental China: Updated Dataset and Tectonic Implications. *Tectonophysics*, **753**, 36-48. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2019.01.006>
- [21] Zhang, C., Mines, M., Wu, M., *et al.* (2021) Numerical Modeling of Heat Flow of Kangding Area with New Borehole Data for Purpose of Geothermal Resources Development Evaluation. *International Conference on Innovations in Energy Engineering & Cleaner Production IEECP21*, San Francisco, 29-30 July 2021, 1-6.
- [22] 温鹏. 论四川省地热资源开发利用现状及建议[J]. 水电站设计, 2015, 31(3): 37-38.
- [23] 阚艳伶, 王成锋, 陈怡西. 四川盆地中西部红层区地热资源赋存规律研究[J]. 地下水, 2019, 41(2): 35-39.
- [24] 屈泽伟, 张恒, 胡亚召, 等. 川西地区地热资源概况及开发区划探讨[J]. 矿产勘查, 2019, 10(5): 1233-1242.