

基于AHP的地热开发模式评价指标体系构建及权重分析

麻洪松

成都理工大学能源学院, 四川 成都

收稿日期: 2026年6月3日; 录用日期: 2026年7月16日; 发布日期: 2026年7月27日

摘要

为提高地热开发模式选择的科学性, 研究旨在构建一套全面、可量化的地热开发模式评价指标体系。研究采用层次分析法(AHP), 搭建包含目标层、准则层、指标层的三层评价框架, 筛选18项核心指标构建评价体系, 采用软件模拟5位行业专家构建判断矩阵, 经矩阵集成与一致性检验, 完成各层级指标权重赋值与定量分析。结果表明, 项目投资(26.94%)、地质工程风险(14.68%)、政策支持力度(8.57%)、经济成本风险(8.07%)、投资回收期(7.77%)是地热开发决策的关键影响因素, 模式选择应关注高权重指标以提高开发模式综合得分。本文构建的评价体系可为地热项目立项决策、方案优化及风险管控提供量化支撑, 对推动地热产业高质量发展、助力“双碳”目标实现具有理论价值与实践意义。

关键词

地热能, 开发模式, 层次分析法, 评价指标体系, 权重分析

Construction of Evaluation Index System and Weight Analysis for Geothermal Development Models Based on AHP

Hongsong Ma

College of Energy, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan

Received: June 3, 2026; accepted: July 16, 2026; published: July 27, 2026

Abstract

To enhance the scientific basis for selecting geothermal development models, this study aims to establish a comprehensive and quantifiable evaluation indicator system. Using the Analytic Hierarchy

Process (AHP), a three-tier evaluation framework comprising objective, criterion, and indicator layers was constructed. Eighteen core indicators were selected to form the evaluation system. Judgment matrices were simulated using software based on input from five industry experts. Through matrix integration and consistency testing, weights were assigned to indicators at each level, enabling quantitative analysis. Results show that project investment (26.94%), geological engineering risk (14.68%), policy support intensity (8.57%), economic cost risk (8.07%), and payback period (7.77%) are key influencing factors in geothermal development decisions. Model selection should prioritize high-weight indicators to improve overall performance scores. The developed evaluation system provides quantitative support for project initiation, scheme optimization, and risk management, offering both theoretical value and practical significance for promoting high-quality development of the geothermal industry and advancing the achievement of “dual carbon” goals.

Keywords

Geothermal Energy, Development Model, Analytic Hierarchy Process, Evaluation Index System, Weight Analysis

Copyright © 2026 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

在“双碳”目标推进的背景下，能源结构转型已成为各国实现可持续发展的重要方向。地热资源储量丰富、能量密度高、供能稳定、清洁可再生，实现地热资源科学、高效、可持续开发，对保障国家能源安全、加快构建清洁低碳安全高效的能源体系具有重要的战略意义和现实意义。我国地热资源禀赋优越，为产业发展提供了坚实的资源基础[1]。适应当地需求的开发模式优选是地热资源可持续开发的关键[2]。经过数十年发展，我国地热开发模式已形成直接利用与发电两大方向，高温地热资源主要用于发电，中温和低温地热资源则以直接利用为主[3]，在供暖、温室种植、医疗建设、温泉旅游等领域已实现规模化推广，截至2025年底全国地热供暖(制冷)总面积稳居世界第一[4]。开发模式的科学选择需综合考量资源禀赋、区域用能需求、技术成熟度与经济可行性，以实现资源高效利用与价值最大化。

现有研究多聚焦单一模式的技术优化[5]，尚未构建覆盖资源、技术、经济、环境等多维度的系统性量化评价体系，难以实现开发模式的科学比选、精准决策与风险有效管控。本文立足地热资源开发实际，旨在构建一套科学、全面、可量化的综合评价体系，为地热开发模式优选提供理论支撑与决策依据，推动地热产业规范化发展，助力我国能源结构转型。

2. 方法与原理

地热开发模式评价体系具有多指标、多维度的特点，涵盖了资源禀赋、经济成本、运营周期、环境效益及社会影响等全过程要素，需要将各层级指标重要性量化，呈现关键因素对开发模式选择的影响，从而对不同的开发模式进行科学评价，指导地热项目的开发利用。

层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)是美国运筹学家托马斯·赛迪[6]提出的一种高效决策分析方法。该方法的核心逻辑是首先通过构建层次结构模型分解复杂问题，随后采用特征向量法确定各层次因素的权重，结合定性分析与定量计算的比较，能明确各因素间的相对重要性次序，最终依据各方案计算出的所占权重来辅助决策。

2.1. 建立层次结构模型

地热开发项目是一项系统工程具有多维度、复杂的影响特征：地热资源条件是区域地热资源赋存特征、开发潜力与利用价值的核心表征，是开发模式选择的基础前提[7]；环境效益是地热开发可持续性的核心体现，直接决定项目的绿色发展水平[8]；经济评价是保障项目落地与长期运营的关键支撑，关乎投资可行性与收益稳定性[9]；开发运营风险是全生命周期可持续性的核心约束，贯穿资源勘探、工程建设到后期运维全过程[10]；社会影响是地热开发与区域发展协同的重要纽带，反映项目的民生价值与社会认可度。

结合地热开发的全生命周期特征、多维度影响因素，研究通过文献查阅与研究分析[7]，遵循科学性、针对性和层次性的指标选取原则，以上述 5 个核心维度为准则层，进一步整合 18 项代表性关键指标，构建了一套完整的地热开发模式层次结构模型，如图 1 所示，各项指标详细含义见表 1。

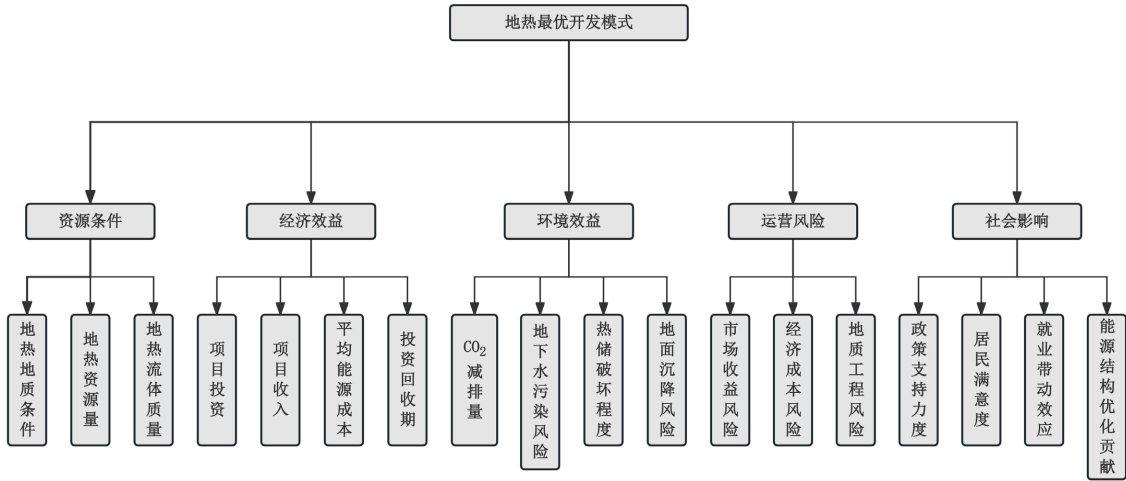


Figure 1. Hierarchical model for evaluating geothermal development patterns

图 1. 地热开发模式评价层次结构模型

Table 1. Indicator description table

表 1. 指标说明表

准则层	指标	指标含义
资源条件	地热地质条件	反映热储埋深，热、水运移通道，构造稳定性及可开采性。
资源条件	地热资源量	反映可利用热储规模、可采资源量和持续供能能力。
资源条件	地热流体质量	反映流体温度、矿化度、腐蚀性、结垢倾向等。
经济效益	项目投资	反映项目建设和运营所需的全部投入规模。
经济效益	项目收入	反映收益来源与盈利水平。
经济效益	平均能源成本	反映地热开发的经济性与市场竞争力。
经济效益	投资回收期	反映项目资金回收能力与投资风险水平。
环境效益	CO ₂ 减排量	反映替代化石能源后的碳减排贡献。
环境效益	地下水污染风险	反映开发过程对地下水环境造成影响的可能性。
环境效益	热储破坏程度	反映开采对热储压力、温度和可持续性的影响。
环境效益	地面沉降风险	反映流体开采对地面建筑、管网的破坏程度。

续表

运营风险	市场收益风险	反映热用户需求、价格波动和收益不确定性。
运营风险	经济成本风险	反映受因素影响导致的成本超支、盈利不及预期等风险。
运营风险	地质工程风险	反映开发过程中引发的地质灾害与工程安全风险。
社会影响	政策支持力度	反映区域能源发展的政策导向。
社会影响	居民满意度	反映公众对地热项目的认可程度。
社会影响	就业带动效应	反映项目对地方就业和相关产业的带动作用。
社会影响	能源结构优化贡献	反映项目对区域清洁能源替代和能源结构调整的贡献。

2.2. 构造判断矩阵

判断矩阵是 AHP 将定性判断量化的核心载体。研究针对构建的层次结构模型设计生成专家调查问卷，同时应用软件模拟了 5 位相关专业专家，依据 Saaty 1~9 标度法，如表 3 所示，针对上层某一准则，将下层 n 个因素进行两两重要性比较与打分，完成调查问卷，构建判断矩阵。研究中软件模拟的 5 位专家均构建 1 个准则层判断矩阵、5 个指标层判断矩阵，研究整合了 30 个判断矩阵数据，用于后续数据处理，模拟专家具体信息如表 2 所示。

Table 2. Simulation expert information table
表 2. 模拟专家信息表

专家编号	专业领域
模拟专家 1	地热资源勘查
模拟专家 2	地热工程开发
模拟专家 3	能源经济评价
模拟专家 4	环境影响评价
模拟专家 5	能源政策与项目管理

Table 3. Proportional scale of relative importance
表 3. 相对重要性的比例标度

Saaty 标度(见 Saaty 1~9 标度法)	含义
1	表示待比较的两个因素有相同的重要性
3	一个因素比另一个因素稍微重要
5	一个因素比另一个因素明显重要
7	一个因素比另一个因素强烈重要
9	一个因素比另一个因素极端重要
2, 4, 6, 8	因素之间重要性比较在上述描述之间
相应上述数的倒数	一个因素比另一个因素不重要的上述描述

将判断矩阵的各行向量进行几何平均，然后归一化，得到的行向量就是权重向量，从而得到矩阵最大特征值：

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(Mw)_i}{w_i}$$

(1)

其中 $(Mw)_i$ 为判断矩阵 M 与权重向量 w 乘积向量的第 i 个元素，即

$$(Mw)_i = \sum_{j=1}^n m_{ij} w_j$$

(2)

2.3. 一致性检验

由于研究中采用软件模拟专家进行打分存在偏差，完美的逻辑一致性难以实现，因此需通过一致性指标(CI)、平均随机一致性指标(RI)、一致性比率(CR)三步检验，判断偏差是否在可接受范围。

CI 为判断矩阵 M 的一般一致性指标，其计算式为：

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - i}{i - 1}$$

(3)

其中 i 为判断矩阵阶数，一致矩阵的 $CI = 0$ ($\lambda_{\max} = n$)，CI 越大，矩阵一致性越差。引入判断矩阵的平均随机一致性指标 RI 值，其取值如表 4 所示。

Table 4. RI value range
表 4. RI 取值范围

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46

计算一致性指标 CR：

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

(4)

当 $CR < 0.1$ 时，判断矩阵 M 可以接受，否则需要重新调整判断矩阵。若 $CR \geq 0.1$ ，则认为判断矩阵一致性较差，需重新调整打分，直至 $CR < 0.1$ 。

3. 结果

研究对 5 位模拟专家构建的判断矩阵进行一致性检验，检验通过后将 5 份专家矩阵进行几何平均集成处理，得到集成矩阵后再次根据公式对集成矩阵依次进行一致性检验并计算权重，将最终权重赋权结果汇总至表 6 中，一致性检验结果汇总至表 5。

Table 5. Consistency test results
表 5. 一致性检验结果

判断矩阵	模拟专家 1 CR	模拟专家 2 CR	模拟专家 3 CR	模拟专家 4 CR	模拟专家 5 CR	集成矩阵 CR	判断
准则层 A-B1~B5	0.01268	0.05043	0.01895	0.01901	0.01181	0.01067	通过
B1-C1~C3	0.00319	0.04668	0	0.00319	0.01581	0.0082	通过
B2-C4~C7	0.04573	0.09233	0.03277	0.04573	0.03912	0.0483	通过
B3-C8~C11	0.02892	0.05645	0.01711	0.02892	0.02503	0.02832	通过
B4-C12~C14	0.00794	0.01222	0.00319	0.00794	0.00794	0.00748	通过
B5-C15~C18	0.03277	0.03912	0.03894	0.03277	0.03277	0.03491	通过

将准则层、指标层最终权重赋值汇总，同时采用分级权重连乘的方法计算各指标综合权重，将一致性检验合格的准则层、指标层权重纳入计算体系，完成所有指标层指标综合权重计算，最终得到地热开发模式评价体系指标综合权重赋值结果，如表 6 所示。

Table 6. Weight assignment results of geothermal development mode evaluation system
表 6. 地热开发模式评价体系权重赋值结果

目标层(A)	准则层(B)	准则层权重(W _A)	指标层(C)	指标层权重(W _B)	综合权重(W)
地 热 最 优 开 发 模 式	资源条件(B1)	0.06047	地热地质条件(C1)	0.63701	0.0385
			地热资源量(C2)	0.24058	0.0145
			地热流体质量(C3)	0.12241	0.0074
	经济效益(B2)	0.41404	项目投资(C4)	0.65076	0.2694
			项目收入(C5)	0.04916	0.0204
			平均能源成本(C6)	0.11248	0.0466
			投资回收期(C7)	0.18759	0.0777
	环境效益(B3)	0.13826	CO ₂ 减排量(C8)	0.05788	0.0080
			地下水污染风险(C9)	0.5619	0.0777
			热储破坏程度(C10)	0.2413	0.0334
			地面沉降风险(C11)	0.13893	0.0192
	运营风险(B4)	0.25	市场收益风险(C12)	0.08999	0.0225
			经济成本风险(C13)	0.32299	0.0807
			地质工程风险(C14)	0.58701	0.1468
	社会影响(B5)	0.13723	政策支持力度(C15)	0.62462	0.0857
			居民满意度(C16)	0.12225	0.0168
			就业带动效应(C17)	0.05561	0.0076
			能源结构优化贡献(C18)	0.19752	0.0271

4. 案例分析

研究区为四川省甘孜藏族自治州康定市灌顶山温泉，如图 2 所示，地处青藏高原东缘褶皱断裂发育的高山峡谷极高山地貌区[11]，地理坐标为东经 101.96°，北纬 29.95°。研究通过野外实地调研工作，系统掌握研究区地质构造、温泉理化参数及工程建设现状等基础信息。结合实测资料，在项目开发前期对灌顶山温泉地热资源开展初步分析，判定该区地热资源具备开发利用条件。在评价指标体系模型的基础上，结合康定灌顶山温泉的资源特征与区域条件，分别对地热供暖、温泉旅游两种主流开发模式开展综合评价。根据评价结果对比分析各模式的适配性与优劣，为研究区地热资源最优开发模式的选取提供理论支撑与实践参考。

4.1. 地热开发模式评价

地热开发模式的评价受多重指标共同影响，为实现各项指标的定量化区分，本次研究结合各指标评价内容设置分级，级差设置为 10、20、30、50，制定指标分级系数表，如表 7 所示。

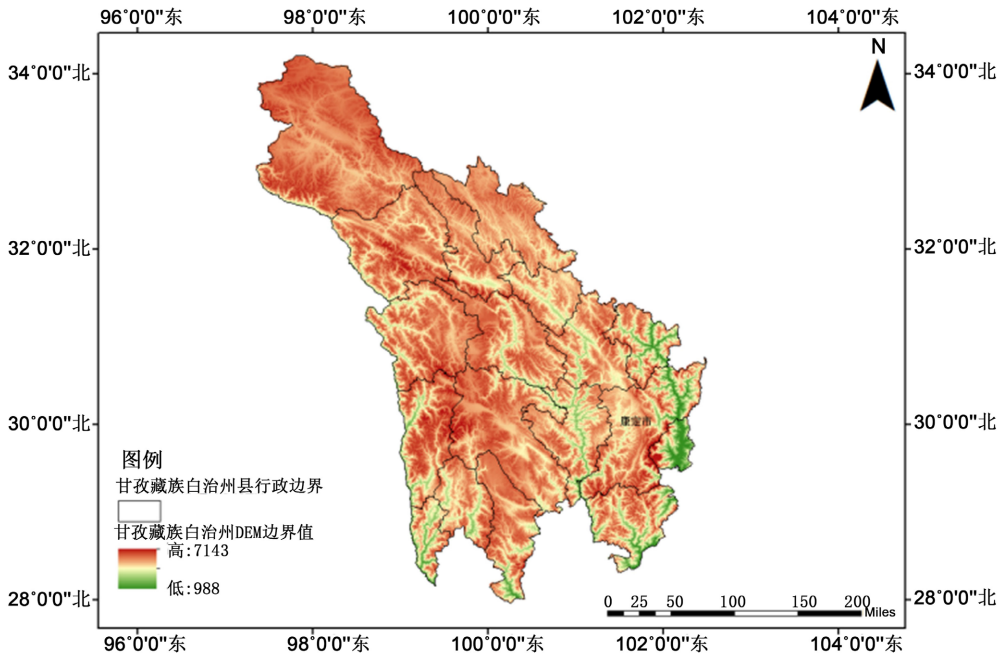


Figure 2. Map of Ganzi Tibetan Autonomous prefecture
图 2. 甘孜藏族自治州区域图

Table 7. Evaluation indicator grading standards
表 7. 评价指标分级标准

指标	分级系数	指标品质	分级内容
地热地质条件	100	最好	挤压背景下板块交界处，构造稳定，热储埋深适宜
	50	最差	挤压背景下板块内部隆起，构造稳定性差，热储条件差
地热资源量	100	最好	可采资源量充足
	70	普通	可采资源量较充足
	40	最差	可采资源量有限
地热流体质量	100	最好	高温、低矿化度、非腐蚀性、无结垢倾向
	80	较好	中高温、中等矿化度、半腐蚀性、轻微结垢
	60	较差	中低温、高矿化度、腐蚀性、明显结垢
	40	最差	低温、极高矿化度、强腐蚀性、严重结垢
项目投资	100	最好	投资规模极小，建设运营成本极低，资金压力可忽略
	90	次好	投资规模较小，建设运营成本较低，资金压力很小
	80	较好	投资规模偏小，建设运营成本偏低，资金压力较小
	70	普通	投资规模适中，建设运营成本中等，资金压力可控
	60	较差	投资规模偏大，建设运营成本偏高，资金压力较大
	50	很差	投资规模较大，建设运营成本很高，资金压力很大
	40	最差	投资规模极大，建设运营成本极高，资金压力不可控
项目收入	100	最好	收入来源多元，盈利水平高
	70	普通	收入来源较单一，盈利水平中等
	40	最差	收入来源单一，盈利水平低

续表

平均能源成本	100	最好	成本远低于传统能源，市场竞争力强
	50	最差	成本远高于传统能源，市场竞争力弱
投资回收期	100	最好	回收期短(≤ 5 年)，资金回收快，风险低
	70	普通	回收期中等(5~10 年)，资金回收一般，风险中等
	40	最差	回收期长(> 10 年)，资金回收慢，风险高
CO ₂ 减排量	100	最好	替代化石能源比例高，减排量大
	50	最差	替代化石能源比例低，减排量小
地下水污染风险	100	最好	无地下水污染风险，回灌工艺完善
	50	最差	高地下水污染风险，无回灌工艺
热储破坏程度	100	最好	开采强度低，热储压力、温度稳定，可持续性高
	50	最差	开采强度高，热储压力、温度骤降，可持续性差
地面沉降风险	100	最好	无地面沉降风险，地层稳定性极强
	80	较好	轻微地面沉降风险，地层稳定性较强
	60	较差	中等地面沉降风险，地层稳定性一般
	40	最差	高地面沉降风险，地层稳定性差
市场收益风险	100	最好	热用户需求稳定，价格波动小，收益确定性高
	70	普通	热用户需求较稳定，价格波动中等，收益确定性一般
	40	最差	热用户需求不稳定，价格波动大，收益确定性低
经济成本风险	100	最好	成本可控，无超支风险，盈利稳定
	80	较好	成本较可控，轻微超支风险，盈利较稳定
	60	较差	成本控制一般，中等超支风险，盈利波动大
	40	最差	成本失控，严重超支风险，盈利不及预期
地质工程风险	100	最好	地质构造稳定，无地质灾害与工程安全风险
	80	较好	地质构造较稳定，轻微地质灾害与工程安全风险
	60	较差	地质构造稳定性一般，中等地质灾害与工程安全风险
	40	最差	地质构造不稳定，高地质灾害与工程安全风险
政策支持力度	100	最好	国家/地方重点扶持，补贴与政策优惠充足
	70	普通	地方一般支持，补贴与政策优惠有限
	40	最差	无政策支持，甚至存在限制开发的规定
居民满意度	100	最好	居民认可，无负面反馈
	50	最差	居民认可度低，强烈反对开发
就业带动效应	100	最好	带动大量直接、间接就业，促进相关产业发展
	70	普通	带动一定就业，对相关产业有一定促进
	40	最差	带动就业少，对相关产业无明显促进
能源结构优化贡献	100	最好	清洁能源占比大幅提升，能源结构优化显著
	80	较好	清洁能源占比明显提升，能源结构优化较显著
	60	较差	清洁能源占比略有提升，能源结构优化一般
	40	最差	清洁能源占比无提升，能源结构无优化

研究基于灌顶山温泉基本信息，结合地热供暖、温泉旅游两种开发模式的建设特征与适配性差异，参照评价指标分级标准，完成不同开发模式下各评价指标的分级系数赋值。指标分级系数赋值严格贴合研究区实际资源条件、区位特征、建设成本、运营风险及区域发展环境，确保赋值结果客观贴合研究区真实开发场景。以权重占比最高的项目投资指标为例：从地热供暖开发模式来看，灌顶山温泉区位远离市区，开展集中供暖需铺设长距离输送管网，工程建设流程复杂，配套设备、人力运维等建设运营成本较高，项目资金投入压力大，综合判定该模式下项目投资指标分级系数为 60 (较差)。从温泉旅游开发模式来看，研究区可开展小规模温泉开发，无需大规模基建投入，整体资金门槛低、投资压力小，但受区域区位偏僻、同类温泉竞品较多等因素制约，综合判定该模式下项目投资指标分级系数为 80 (较好)。

结合赋值逻辑与研究区资料，确定其余 17 项指标的分级系数 S1 (地热供暖开发模式)、S2 (温泉旅游开发模式)。依据各指标综合权重，以各指标综合权重与对应分级系数相乘，分别计算地热供暖模式、温泉旅游模式下的单指标量化评分 Y1、Y2，汇总至表 8。对各项指标量化得分进行汇总后，得到地热供暖模式量化评分 Y1 = 69.684，温泉旅游模式量化评分 Y2 = 70.432。对比结果表明，康定市灌顶山温泉的最优开发方向为温泉旅游模式。

Table 8. Quantitative scoring results of Guandingshan hot spring development model in Kangding city
表 8. 康定市灌顶山温泉开发模式量化评分结果

指标	综合权重(W)	分级系数 S1	分级系数 S2	量化评分 Y1	量化评分 Y2
地热地质条件(C1)	0.0385	50	50	1.925	1.925
地热资源量(C2)	0.0145	70	70	1.015	1.015
地热流体质量(C3)	0.0074	80	100	0.592	0.74
项目投资(C4)	0.2694	60	80	16.164	21.552
项目收入(C5)	0.0204	40	70	0.816	1.428
平均能源成本(C6)	0.0466	100	50	4.66	2.33
投资回收期(C7)	0.0777	40	70	3.108	5.439
CO ₂ 减排量(C8)	0.008	100	50	0.8	0.4
地下水污染风险(C9)	0.0777	100	50	7.77	3.885
热储破坏程度(C10)	0.0334	50	50	1.67	1.67
地面沉降风险(C11)	0.0192	80	80	1.536	1.536
市场收益风险(C12)	0.0225	70	40	1.575	0.9
经济成本风险(C13)	0.0807	80	60	6.456	4.842
地质工程风险(C14)	0.1468	80	80	11.744	11.744
政策支持力度(C15)	0.0857	70	100	5.999	8.57
居民满意度(C16)	0.0168	50	50	0.84	0.84
就业带动效应(C17)	0.0076	40	70	0.304	0.532
能源结构优化贡献(C18)	0.0271	100	40	2.71	1.084

4.2. 敏感性分析

为验证评价模型的稳定性与结论可靠性，研究选取综合权重最高的项目投资(C4)、地质工程风险(C14)、政策支持力度(C15)三项指标作为敏感性因素，分别按±5%、±10%幅度调整其权重，同时保证其他权重等

比例缩放，权重总计仍为 100%，重新计算两种开发模式的综合得分。

统计三项敏感指标在不同权重扰动下，地热供暖模式量化评分 Y1 与温泉旅游模式量化评分 Y2，并计算二者得分差值，相关结果汇总至表 9~11。同时基于统计数据，绘制各敏感指标权重扰动下开发模式评分变化统计图，如图 3。

Table 9. Quantitative scoring statistics under the weight disturbance of project investment indicators
表 9. 项目投资指标权重扰动下量化评分统计

扰动幅度	量化评分 Y1	量化评分 Y2	得分差值
-10%	70.0409	70.0790	0.0381
-5%	69.8622	70.2553	0.3931
0	69.6840	70.4320	0.7480
5%	69.5053	70.6083	1.1030
10%	69.3298	70.7874	1.4576

Table 10. Quantitative scoring statistics of geological engineering risk indicators under weight disturbance
表 10. 地质工程风险指标权重扰动下量化评分统计

扰动幅度	量化评分 Y1	量化评分 Y2	得分差值
-10%	69.5061	70.2670	0.7609
-5%	69.5950	70.3495	0.7545
0	69.6840	70.4320	0.7480
5%	69.7727	70.5143	0.7416
10%	69.8612	70.5963	0.7351

Table 11. Quantitative scoring statistics under the weight disturbance of policy support indicators
表 11. 政策支持力度指标权重扰动下量化评分统计

扰动幅度	量化评分 Y1	量化评分 Y2	得分差值
-10%	69.6808	70.1546	0.4738
-5%	69.6820	70.2930	0.6110
0	69.6840	70.4320	0.7480
5%	69.6852	70.5703	0.8851
10%	69.6865	70.7087	1.0222

图 3 中，三条黑色虚线分别表示地热供暖开发模式下在扰动项目投资、政策支持力度、地质工程风险三项敏感指标时的量化得分(Y1)波动(靠近左侧纵轴由上至下依次排列)。三条红色实线分别表示温泉旅游开发模式下在扰动相同三项敏感指标时的量化得分(Y2)波动(靠近右侧纵轴由上至下依次排列)。横轴为敏感指标权重扰动幅度，范围由-10%至 10%，左右纵轴分别对应两种开发模式的综合量化得分。

当项目投资指标权重正向增加时，温泉旅游模式得分(Y2)呈持续上升趋势，地热供暖模式得分(Y1)呈持续下降趋势，两者得分差值逐步扩大。当项目投资指标权重负向减小时，温泉旅游模式得分(Y2)逐步下降，地热供暖模式得分(Y1)逐步上升，两者得分差值逐步收窄。

结果表明，在所有扰动情景下，温泉旅游开发模式的综合得分始终高于地热供暖模式，两类曲线未

发生交叉,未出现结论反转现象。表明项目投资指标是影响评价结果的高敏感因子,验证了“温泉旅游为灌顶山温泉最优开发模式”的结论具有较强稳健性,所构建的评价模型科学可靠。

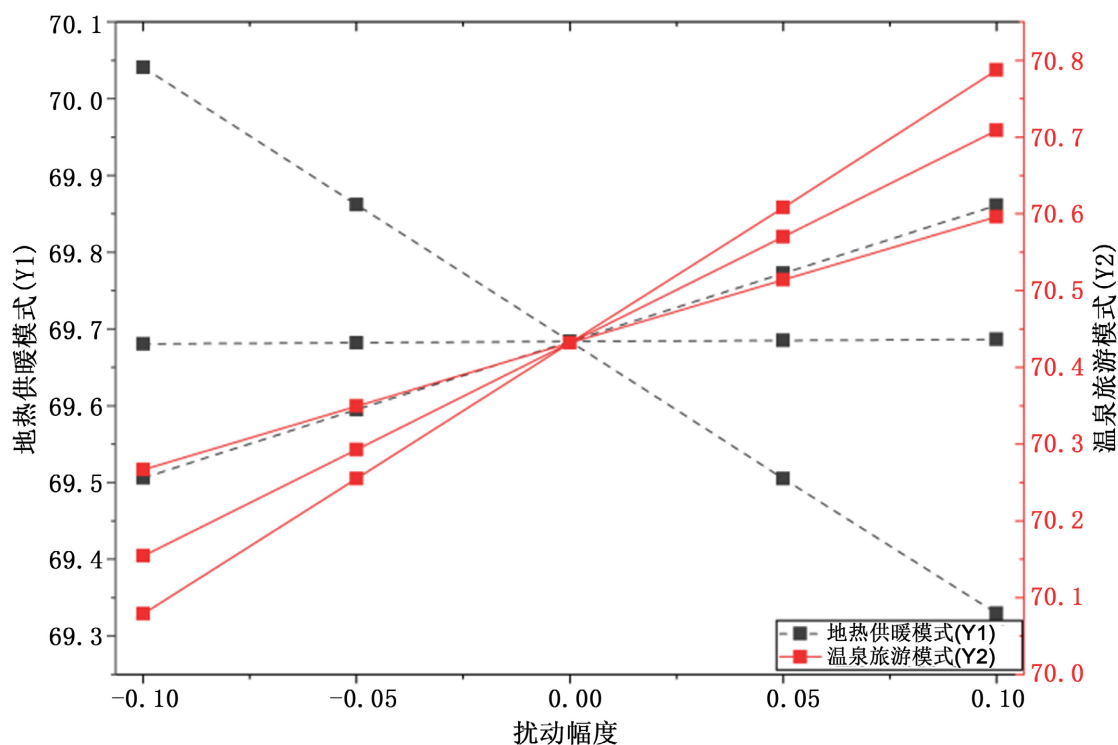


Figure 3. Statistical chart of quantitative scoring of development mode under sensitive indicator weight disturbance
图 3. 敏感指标权重扰动下开发模式量化评分统计图

5. 讨论

基于层次分析法(AHP)构建的地热开发模式评价体系,经 5 位模拟专家打分、矩阵合并集成及一致性检验,确保所有判断矩阵 $CR < 0.1$,满足逻辑自洽性要求,最终形成的权重结果清晰揭示了地热开发模式选择的核心影响因素与优先级特征。

5.1. 由经济指标权重结果反映的经济约束

从准则层权重分布来看(W_A),经济效益以 0.41404 的权重占据绝对主导地位。在经济效益维度上,项目投资以 0.65076 的指标层权重与 0.2694 的综合权重,成为全体系最关键因素。经济性约束已成为地热开发项目的核心制约因素,这一结论与当前阶段我国地热产业面临的经济困境契合。

在资源层面,我国地热资源分布具有显著的地域不均衡性,资源富集区与能源消费中心呈现典型的逆向分布格局。在资源富集区人口密度低开发动力不足,在需求旺盛区资源品位不高。这一空间错配已成为制约地热产业规模化发展的基础性矛盾[4]。在建设层面,我国地热系统类型多、成因复杂,资源富集机理不清,资源预测缺乏成熟理论指导[12],在粗放式的勘查现状下,勘探开发的商业风险与项目前期投入成本均大大提高。同时,中深层地热开发依赖的核心技术研发与应用成本居高不下[13],地热开发前期工程费用占比超 60%,钻井、勘探及事故处理等高成本叠加,单井钻井成本常达千万元级别。在运营层面,地热流体的法律属性双重性导致审批周期冗长,严重制约了项目的及时落地与投产运营。地热开发面临独特的重复纳税与税负不公问题,隐性运营成本负担、热用户收费率不及预期等问题,持续侵蚀

盈利空间。在政策层面,扶持体系不健全、勘探财政投入不足、价格机制不完善,导致资源家底不清、项目激励不足、现金流承压[14]。

5.2. 基于地热开发模式评价指标体系关于开发模式的参考意见

地热地质条件是资源条件维度的核心指标,但其综合权重偏低,印证了资源优势难以弥补经济短板的行业现实。尽管资源条件权重不高,但在资本加速涌入地热产业的背景下,优质地热资源的争夺已趋于白热化[4],良好的资源禀赋仍是项目开发的必要前提。经济维度上,当前地热项目普遍存在投资回报周期长、单位供能成本竞争力弱于光伏与风电等新能源、收益来源单一、碳交易等附加价值尚未充分转化等突出问题[9]。在运营风险维度,深部地质条件不确定性高[15]、前期巨额投资易形成沉没成本,叠加运维成本、人工支出及补贴退坡等因素,持续对项目收益构成压力。在环境效益维度,地热开发存在潜在水土环境风险,地下水污染风险与热储破坏程度为核心考量指标,开发过程须严格落实尾水回灌合规要求并强化热储保护。社会影响维度上,地热项目应发挥正向带动作用,助力地方经济发展与能源结构优化。

本评价体系各指标具有的权重占比及指标背后反映的行业现状,可为后续模式筛选提供参考:在后续开展具体开发模式综合评价时,应优先关注项目投资、地质工程风险、政策支持力度、经济成本风险和投资回收期等高权重指标。对于成本型和风险型指标,应通过低投资、短回收期、低地质不确定性等方向提高综合得分。对于效益型指标,则应重点提升政策适配性、能源结构优化贡献和社会接受度。

5.3. 地热能多维度评价指标体系发展现状

国外对地热能多维度评价起步早、体系成熟,逐步从单一技术经济测算转向多维度综合评价,方法论与应用场景迭代完善。2014年 Borzoni M 等人[16]针对意大利阿米阿塔山地热开发存在的多方利益分歧问题,以意大利阿米阿塔山地热区为研究对象,构建社会多准则评价方法开展地热开发方案综合评估。评价体系涵盖经济、社会、环境三大维度,共选取发电量、公司盈利能力、市政收入、地热直接利用、温室气体减排量、硫化氢、汞、氨、砷排放、含水层扰动及视觉影响等11项评价指标。研究设置7种地热开发方案,并结合敏感性分析检验评价结果的稳健性,最终完成不同开发方案的比选与研判。Bilić T 等人[17]在2020年运用加权多准则决策法,从地质、技术、经济、环境、社会五个层面出发,选取地热梯度、流体温度、热流量、装机容量、最大热效率、腐蚀与结垢特性、负荷系数、距电网距离、全球效率、环境影响、社会影响、平准化供热成本(LCOH)共计12项评价指标,以克罗地亚 Beničanci、Bizovac、Karlovac、Lunjkovec-Kutnjak、瓦拉日丁温泉五处地热场地为研究对象,分别面向农业利用、地热发电、区域集中供暖三大终端利用模式进行分类评价。

我国地热评价研究在借鉴国际成果的基础上,立足本国资源特征、开发形式与政策环境开展多维度评价,应用场景十分广泛。Meng Fanao [18]以中国长白山地区为研究对象,选取浅层地温、断层线、温泉分布、玄武岩分布、等重力线五大评价因子,依托地理信息系统(GIS)平台构建多准则决策分析模型,综合运用层次分析法与熵权法计算各指标组合权重,开展地热资源潜力分区评价研究将潜力区划分为六个等级。王卓卓[19]以地热资源条件、环境影响作用、社会经济技术条件为准则层,构建了包含26项指标的地热资源环境承载力评价指标体系,提出地热资源环境承载力评价的分级标准。何东博[7]以沉积盆地型中深层水热地热资源为研究对象,旨在实现地热资源品质的定量化评价。从地热地质条件、地热资源量、地热流体质量三大维度切入,筛选出16项核心评价指标,运用层次分析法完成指标权重赋值,以此构建地热资源品质评价体系,并依据评价结果将研究区中深层水热型地热资源划分为三级七类。

与已有研究相比,研究构建的指标评价体系全面升级,区别于评价体系仅聚焦技术、经济、环境、

社会的局限,借鉴多准则评价思路,构建覆盖资源、经济、环境、社会、运营风险多重约束的全维度评价体系。纳入风险评价维度,兼顾多方利益诉求。模型稳健性验证完善,选取项目投资、地质工程风险、政策支持力度三大核心敏感因子,开展权重扰动敏感性分析,有效提升了指标体系的可信度与实践落地性。进一步拓展了地热多维度评价方法在开发模式优选领域的应用,为地热资源开发利用决策提供了更科学的支撑。

5.4. 研究局限性

本文基于层次分析法构建地热开发模式评价体系,依据研究虽已完成指标筛选、权重计算,重新审视指标体系,仍存在四个方面的局限性。首先,指标选取存在局限性,静态指标占比过高,动态指标缺失。本研究指标体系虽覆盖资源、经济、环境、风险、社会五大维度,但指标侧重资源禀赋、成本、环境影响等静态参数,对地热开发技术迭代、能源文旅价格波动等长期动态风险考量不足,指标完备性仍有提升空间。其次,在权重赋值方面具有主观局限性。研究采用软件模拟专家打分完成调查问卷确定权重,虽经一致性检验保证逻辑合理,但模拟方式无法完全复刻真实专家认知差异,主观倾向仍会对权重分配产生一定影响,难以完全规避主观偏好对结果的干扰。同时,评价体系差异化设计不足,研究评价对象的普适性有限。本文聚焦中低温水热型地热资源,未区分浅层、中深层及干热岩等不同资源类型,采用一套指标体系套用所有模式,未针对地热供暖、温泉旅游、发电的运营逻辑、约束条件做精细化区分,区域特色指标缺失,对高温地热、增强型地热系统(EGS)等场景适用性不足。最后,案例验证范围有限。本文仅对康定市灌顶山温泉为案例开展分析,完成评价指标体系在开发模式选择上的示范应用,得出开发模式选择建议。尚未结合具体地热开发项目或典型开发模式进行工程实践验证,评价体系的实际适用性与判别能力仍需通过更多案例研究进一步验证。

6. 结论

(1) 研究构建了一套地热开发模式评价指标体系,该体系基于 5 大维度(资源条件、经济效益、环境效益、运营风险、社会影响),共提炼出 18 项子指标。这一研究在一定程度上弥补了当前地热开发模式评价体系不够完善,难以实现开发模式的科学比选、精准决策与风险有效管控的问题。研究对关键影响因素进行了量化与识别,项目投资、地质工程风险、政策支持力度、经济成本风险、投资回收期是地热开发决策的主要约束因素,排名前十的关键影响因素占总权重的 88.36%,为开发模式选择提供了指导参考。AHP 方法及软件模拟专家打分的适应性已经得到验证,所有矩阵 CR 值小于 0.1,同时研究进行了案例分析,将评价指标体系应用于康定市灌顶山温泉开发模式选择,完成了敏感性分析,在所有扰动情景下研究结果均未发生反转,证实了地热评价体系的可靠性。

(2) 构建的地热开发模式评价指标体系具备明确实践应用价值。理论层面,本研究依据地热行业现实背景选出关键的 18 个指标,丰富地热开发可行性评价的理论内涵,将定性评价转化为定量权重体系,填补了地热开发评价体系的空白。实践层面,可为项目前期立项、方案优化、风险管控提供科学决策依据,帮助规避投资沉没风险、降低开发成本、提升综合效益。为地热开发选择提供参考意见:在后续开展具体开发模式综合评价时,应优先关注项目投资、地质工程风险、政策支持力度、经济成本风险和投资回收期等高权重指标。

(3) 本文构建的评价指标体系可为地热项目前期论证、方案比选和风险识别提供参考,但研究仍存在指标选取局限性、模拟专家判断主观性、评价体系差异化不足以及缺少工程实践验证等局限。后续研究可进行细分场景的差异化评价,针对浅层地温能、中深层水热、干热岩、地热梯级利用、地热与光伏、风电、储能耦合的综合能源系统等不同模式,构建分类型、分地区的专属评价体系,形成模式优选指南,提升综合效益与系统稳定性,并结合实际项目数据对评价体系进行验证和优化。

参考文献

- [1] 周博睿. 我国地热能开发利用现状与未来趋势[J]. 能源, 2022(2): 77-80.
- [2] 袁潮, 黄少鹏, 魏正安, 等. 广东惠州惠热-1 井地热资源经济性评价与开发模式优选[J]. 深圳大学学报(理工版), 2025, 42(6): 631-640.
- [3] 王社教, 施亦做, 方朝合, 等. 中国油田地热开发利用现状与发展方向[J]. 岩性油气藏, 2024, 36(2): 23-32.
- [4] 贺志铎. 我国地热产业发展现状与“十五五”发展路径研究[J]. 石油石化绿色低碳, 2026, 11(1): 66-73.
- [5] Shi, W., Xu, Z., Chen, G., Feng, B., Wang, M., Song, F., *et al.* (2025) Mining Geothermal Energy by Electrically Enhanced Geothermal System (EEGS): A New Development Model of Hot Dry Rock. *Energy*, **337**, Article ID: 138599. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.138599>
- [6] Saaty, T.L. (1977) A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures. *Journal of Mathematical Psychology*, **15**, 234-281. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5)
- [7] 何东博, 任路, 郝杰, 等. 基于层次分析法的地热资源评价体系研究——以河北省曹妃甸地区中深层水热型砂岩储层为例[J]. 油气藏评价与开发, 2023, 13(6): 713-725, 740.
- [8] 许天福, 陈敬宜, 冯波, 等. 地热资源开发过程中潜在地下水环境问题[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(4): 1149-1162.
- [9] 荆克尧. 地热开发项目经济评价方法研究[J]. 石油化工技术与经济, 2021, 37(4): 20-23.
- [10] 丁明. 中深层地热供暖项目经济评价研究[J]. 中国总会计师, 2025(9): 135-137.
- [11] 《中国河湖大典》编纂委员会. 中国河湖大典[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014: 1-410.
- [12] 孙焕泉, 毛翔, 吴陈冰洁, 等. 地热资源勘探开发技术与发展方向[J]. 地学前缘, 2024, 31(1): 400-411.
- [13] 葛伟丽, 张春明, 高娟娟. 我国地热资源开发利用现状及展望[J]. 内蒙古科技与经济, 2025(8): 132-135.
- [14] 湛洋. 我国地热能高质量开发利用面临的问题及对策建议[J]. 水电与新能源, 2025, 39(5): 1-4.
- [15] Witter, J.B., Trainor-Guitton, W.J. and Siler, D.L. (2019) Uncertainty and Risk Evaluation during the Exploration Stage of Geothermal Development: A Review. *Geothermics*, **78**, 233-242. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.12.011>
- [16] Borzoni, M., Rizzi, F. and Frey, M. (2014) Geothermal Power in Italy: A Social Multi-Criteria Evaluation. *Renewable Energy*, **69**, 60-73. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.03.026>
- [17] Bilić, T., Raos, S., Ilak, P., Rajšl, I. and Pašičko, R. (2020) Assessment of Geothermal Fields in the South Pannonian Basin System Using a Multi-Criteria Decision-Making Tool. *Energies*, **13**, Article 1026. <https://doi.org/10.3390/en13051026>
- [18] Meng, F., Liang, X., Xiao, C. and Wang, G. (2021) Geothermal Resource Potential Assessment Utilizing GIS-Based Multi Criteria Decision Analysis Method. *Geothermics*, **89**, Article ID: 101969. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101969>
- [19] 王卓卓. 中深层水热型地热资源环境承载力评价系统及建立方法[J]. 城市地质, 2021, 16(2): 147-155.