

doi: 10. 19388/j. zgdzdc. 2018. 02. 10

引用格式: 李胜涛, 张森琦, 贾小丰, 等. 干热岩勘查开发工程场地选址评价指标体系研究[J]. 中国地质调查, 2018, 5(2): 64–72.

干热岩勘查开发工程场地选址评价指标体系研究

李胜涛^{1,2}, 张森琦¹, 贾小丰¹, 许天福², 任涛¹, 李甫成¹

(1. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 保定 071051; 2. 吉林大学环境与资源学院, 长春 130021)

摘要: 干热岩是储量大、用途广的新型、可再生绿色能源, 对其进行开发利用意义重大。就我国现状而言, 寻找适宜的干热岩勘查开发工程场地是成功实现干热岩开发利用的关键。从干热岩工程开发亟待解决的选址问题出发, 系统地总结了国内外干热岩勘查开发的选址经验, 从资源、技术、安全和经济4个方面建立了包含4个指标层共20个指标的干热岩勘查开发工程场地选址评价指标体系; 基于层次分析法, 计算了各评价指标的权重, 并提出了基于层次分析-综合评分法的干热岩勘查开发工程场地选址评价方法。该指标体系和评价方法对干热岩勘查开发工程场地选址具有一定指导意义。

关键词: 干热岩; 工程场地选址; 评价指标; 指标权重; 评价方法

中图分类号: P314

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2018)02-0064-09

0 引言

干热岩被视为未来的“清洁能源”, 是地热资源的重要组成部分, 极具研究价值和开发前景。发达国家对开发干热岩资源的呼声日益高涨, 1973年以来, 美国、日本、法国、德国和澳大利亚等国先后投入巨资开展研究, 建设了一批试验性干热岩增强型地热系统(enhanced geothermal systems, EGS), 甚至将其纳入国家开发计划^[1], 取得了较好的效果, 已在不同程度上实现了深部热源的提取^[2]。

相比发达国家, 我国干热岩资源勘查开发及其技术研究尚属起步阶段。就我国干热岩勘查开发现状而言, 寻找适宜的干热岩勘查开发工程场地才是成功实现干热岩开发利用的关键。苏正等^[3]对我国EGS选址问题进行了探讨; 李福^[4]在海南陵水地区进行了深层干热岩地热发电项目的勘查选址; 蔺文静等^[2]以福建漳州地热田为例, 初步提出干热岩开发的地热地质学指标; 张杨^[5]建立了沉积盆地干热岩有利勘查区选区评价指标体系并在松辽盆地进行了实践。但上述研究并未形成系统

的勘查开发场地选址评价指标体系和评价方法。

本研究从干热岩工程开发亟待解决的选址问题出发, 系统地总结了国内外干热岩勘查开发的选址经验, 从资源、技术、安全和经济4个方面建立了干热岩勘查开发场地选址评价指标体系, 并提出了基于层次分析-综合评分法的评价方法。该指标体系和评价方法对干热岩勘查开发工程场地选址具有一定的指导意义。

1 干热岩资源调查评价阶段划分

张森琦等^[6]基于区域地质、矿产地质及水文地质循序渐进的调查勘查理念和地热资源地质勘查规范(GB/T 11615—2010)等, 将我国干热岩资源调查评价工作阶段划分为全国陆域干热岩资源调查评价、区域级干热岩资源调查评价、地区级干热岩资源调查评价、场地级干热岩资源调查评价和工程级干热岩资源评价5大阶段。按干热岩资源调查评价精度由低到高, 依次称E、D、C、B、A级干热岩资源评价(表1, 图1)。

收稿日期: 2017-12-18; 修订日期: 2018-03-05。

基金项目: 中国地质调查局“天津潘庄凸起构造区地热资源调查(编号: DD20179621)”和“青海西宁—贵南地区地热资源调查(编号: DD20160192)”项目联合资助。

第一作者李胜涛(1982—), 男, 高级工程师, 主要从事水工环地质及地热热储工程研究工作。Email: lishengtao@mail.cgs.gov.cn。

表1 我国干热岩资源调查评价阶段划分方案

Tab.1 Division of hot dry rocks investigation and assessment stages in China

工作阶段	资源级别	评价结果	勘探阶段	方法	评价精度
全国陆域干热岩资源调查评价	E(预测的干热岩资源)	干热岩资源远景区	远景评价	资料搜集、遥感解译、野外调研、综合研究	1:100万~1:50万精度地热普查
区域级干热岩资源调查评价	D(推断的干热岩资源)	干热岩资源有利勘查开发区	调查评价	资料搜集、遥感解译、1:25万区域干热岩资源调查、对已有物探和钻孔分析、综合研究	1:25万~1:10万区域干热岩资源调查
地区级干热岩资源调查评价	C(控制的干热岩资源)	干热岩资源勘查目标靶区	预可行性勘查	资料搜集、遥感解译、1:5万综合地热地质调查、地球物理勘查、地球化学勘查、控制性地热钻井工程	1:5万~1:2.5万干热岩综合地质勘查
场地级干热岩资源调查评价	B(探明的干热岩资源)	勘查开发场地	可行性勘查	资料搜集、遥感解译、高精度地热地质勘查、地球物理勘查、地球化学勘查、地热钻探或探采结合钻井工程、开采井和注入井钻井、压裂、人工造储联通试验、数值模拟、示范性开采试验	1:1万以上精度干热岩地质勘查
工程级干热岩资源评价	A(工程验证的干热岩资源)	工程场地	工程化运行	建立干热岩开发工程监测评价与管理体系;建立准确的地热地质概念模型;查明区内地温梯度和勘查深度内地温场的空间变化规律;建立地热资源地理管理信息系统与地热资源评价的数学模型	量化监测动态评价

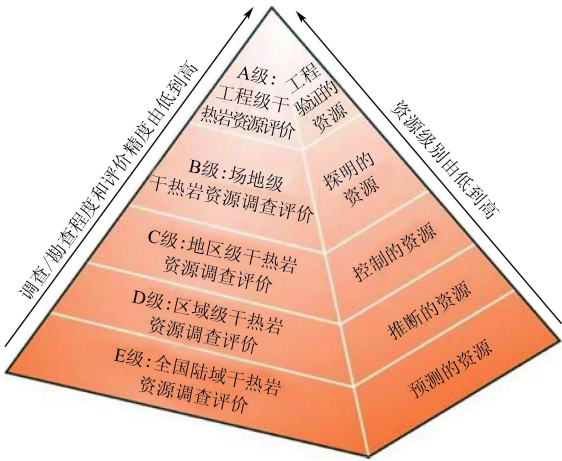


图1 中国干热岩调查评价阶段划分金字塔
Fig.1 Pyramid of hot dry rocks investigation and assessment stages in China

依据表1划分方案,干热岩勘查开发工程场地选址评价属于场地级干热岩资源调查评价阶段。该阶段工作具有以下特点:①地区级干热岩资源调查评价阶段筛选的干热岩勘探开发有利靶区,是本阶段工作的基本前提;②查清高温岩体的空间分布特征,即查明干热岩资源的赋存规律,是本阶段工作的基本任务;③干热岩开发场地和钻探宜井位置的确定,是本阶段工作的基本目标。

本次研究主要解决干热岩开发场地的

问题。从干热岩工程开发的角度出发,若拟选场地能满足干热岩开发利用需求,应具备以下4个条件:①具有足够的干热岩资源开发潜力;②具备干热岩钻探和储层压裂的技术条件;③具有地质安全性;④具有经济性。

2 干热岩勘查开发场地选址指标体系建立

为使干热岩工程开发场地选址评价有据可依,依据系统性、科学性、延续性、可比性、可操作性以及可量化性原则,建立场地选址评价指标体系。共包含4个指标层20个指标(表2)。

2.1 安全性指标

地质安全性指标层主要包括地震基本烈度、地震动峰值加速度和与居民点的距离3个指标。

2.1.1 地震基本烈度

该指标表示地震对地表及工程建筑物影响的强弱程度(或视为地震影响和破坏的程度)。地震活动会影响区域稳定性,对工程建筑物等有一定影响,总体来说地震基本烈度越小的区域越适宜干热岩的勘查开发。将地震基本度评价指标划分为3级:<6度,好;6度~8度,中;>8度,差。

表 2 干热岩勘查开发场地选址评价指标体系

Tab.2 Index system for project sites selection assessment of dry hot rocks

指标层	指标	评价等级		
		好	中	差
安全性指标	地震基本烈度/度	< 6	6 ~ 8	> 8
	地震动峰值加速度	< 0.05 g	0.05 ~ 0.2 g	> 0.2 g
	与居民点的距离/km	> 2.5	0.8 ~ 2.5	< 0.8
资源性指标	干热岩体埋深/km	< 3	3 ~ 4	> 4
	干热岩体压裂段温度/℃	> 200	150 ~ 200	< 150
	地温梯度/(℃ km ⁻¹)	> 80	45 ~ 80	< 45
	热储岩性	均质各向同性良好的中酸性花岗岩类	均质各向同性较好的花岗岩和变质岩类	均质各向同性一般的花岗岩和变质岩类
	分布面积/km ²	> 200	75 ~ 200	75
	可开采资源量/10 ¹³ kJ	> 40	2.5 ~ 40	< 2.5
	可发电量/MW _e	50	10 ~ 50	< 10
技术性指标	钻井深度/km	< 3	3 ~ 5	> 5
	地应力状况	清楚	基本清楚	不清楚
	储层压裂门限值/MPa	< 15	15 ~ 30	> 30
	天然裂隙发育情况	发育但无较大断层	较发育	不发育或发育较大断层
	可压裂体积/km ³	> 2	1 ~ 2	< 1
	场地资源使用寿命/a	> 100	30 ~ 100	< 30
经济性指标	土地利用现状	未利用土地	牧草地、林地、耕地和园地	居民点、工矿用地、交通用地和宗教用地
	场地施工条件	施工车辆可通行,易施工	需修路方可通行,施工场地需投入少量资金平整	不易通行,不具备施工条件或投资额巨大
	水源保障程度	具备	可协调解决基本具备	不具备
	发电并网条件	具备	可协调解决基本具备	不具备

注：g 为重力加速度。

2.1.2 地震动峰值加速度

根据《中国地震动参数区划图》^[7] (GB 18306—2015)对地震动峰值加速度复核,指标分为 3 级: <0.05 g,好; 0.05 ~ 0.2 g,中; >0.2 g,差。

2.1.3 与居民点的距离

干热岩开发场地选址尚无与居民点距离相关的限制性规范。由于国内外干热岩开发尚未形成商业化场地,干热岩开发的潜在风险国内外研究案例极少,诸多未知风险仍然存在。本文采取“就高不就低”和“以人为本”的原则,综合参考《危险废物填埋污染控制标准 (GB 18598—2001)》^[8]选址规定的“距离居民点不应小于 800 m”和《核电厂环境辐射防护规定 (GB 6249—2011)》^[9]规定的“非居住区限制范围应为 2.5 km”2 个标准,制定该指标并将指标分为 3 级: >2.5 km,好; 0.8 ~ 2.5 km,中; <0.8 km,差。

2.2 资源性指标

资源性指标层主要包括干热岩体埋深、干热岩体压裂段温度、地温梯度、热储岩性、分布面积、可

开采资源量和可发电量 7 个指标。

2.2.1 干热岩体埋深

为方便量化,干热岩体埋深以 150 ℃等温线埋深为依据,主要影响钻探成本。美国圣地亚哥国家实验室开发的 Wellcost Lite 模型在评估 EGS 井的成本时,将深度范围在 1.5 ~ 10 km 的井分为 3 类:浅井(1.5 ~ 3 km)、中等深度井(4 ~ 5 km)和深井(6 ~ 10 km)^[1]。目前,干热岩以中浅深度为宜。因此,将干热岩体埋深指标划分为 3 级: < 3 km,好; 3 ~ 4 km,中; > 4 km,差。

2.2.2 干热岩体压裂段温度

压裂段温度决定了干热岩开发利用方式和成本。MIT 在其关于 EGS 的权威展望报告中提出: EGS 的经济成储温度定为 150 ℃,最佳开采温度为 200 ℃左右^[1],这也成为目前国际公认的标准。尽管随着干热岩开发技术,尤其是压裂技术的进步和成本的下降,广义的干热岩可能将不受限于温度,本次仍以现状经济效益考量,将目标干热岩体压裂段温度指标分为 3 级: >200 ℃,好; 150 ~ 200 ℃,中; <150 ℃,差。

2.2.3 地温梯度

地温梯度是划分干热岩资源品级的重要指标。《地球科学大辞典》^[10]给出的干热岩地温梯度区间值,将干热岩资源的品级划分为高级 80 °C/km、中级 50 °C/km 和低级 30 °C/km。美国采用“易于开发的高地温梯度区”地温梯度大于 45 °C/km^[1]。综合上述标准,将该指标分为 3 级: >80 °C/km, 好; 45 ~80 °C/km, 中; <45 °C/km, 差。

2.2.4 热储岩性

热储岩性对人工压裂具有重要影响,干热岩的热能赋存于各种变质岩或结晶岩类岩体内,较常见的有花岗岩、花岗闪长岩和黑云母片麻岩等,主要是各种变质岩或结晶岩类岩体^[11]。芬顿山 EGS 项目干热岩地热系统建于前寒武纪岩体中,岩性为均质黑云母花岗闪长岩;日本 Ogachi EGS 项目区,上部 200 m 为古近纪—新近纪凝灰岩,下部为花岗岩和花岗闪长岩;英国 Rosemanowes EGS 项目区为早二叠世花岗岩岩基;法国 Soultz EGS 项目上部为古近纪—新近纪沉积砂岩,下部为古生代花岗岩;澳大利亚 Cooper 盆地上覆地层厚度为 3 668 m,上部为中元古代变质沉积岩,下部为年代较新的花岗岩;青海共和恰卜恰地区为印支晚期花岗岩。尽管干热岩也可以赋存于沉积岩或层状变质岩地层中,但考虑到压裂造缝对均质性的要求,目前多认为不适宜进行 EGS 人工储层建造。因此,干热岩热储岩性评价指标 3 级划分方案为:均质各向同性良好的中酸性花岗岩类,好;均质各向同性较好的花岗岩和变质岩类,中;均质各向同性一般的花岗岩和变质岩类,差。

2.2.5 分布面积

干热岩分布面积是评价干热岩场地是否适合工程开发的直观指标之一。一般来说,装机容量 200 MW_e左右时,其所需的干热岩体平面面积为 150 ~200 km²^[5]。以不小于 10 MW_e装机容量为目标,为保守起见,采用 10 倍装机容量(100 MW_e)进行估算,干热岩体平面面积应在 75 ~100 km²之间。因此,将干热岩分布面积划分为 3 级: >200 km², 好; 75 ~200 km², 中; <75 km², 差。

2.2.6 可开采资源量

通常,在估算可开采能源部分时设定岩体的平均温度只下降 10 °C,则从温度为 200 °C、体积为 1 km³的立方岩体中可开采的热能为 2.5×10^{13} kJ,

而其四周则含有 4×10^{14} kJ 的热能^[1]。干热岩可开采量不应低于该岩体本身可开采的资源量,以能够采出大于周边岩体的资源量为最佳。实际计算中,应尽可能通过数值模拟的方法计算。该指标分为 3 级: > 40×10^{13} kJ, 好; $2.5 \times 10^{13} \sim 40 \times 10^{13}$ kJ, 中; < 2.5×10^{13} kJ, 差。

2.2.7 可发电量

利用干热岩发电是干热岩开发利用的主要目标。从现有 EGS 工程发电潜力或装机容量看,1984 年美国芬顿山建成了世界上第一座高温岩体地热发电站,装机容量为 10 MW_e^[12];法国 Soltz 在首次示范生产(发电量 1.5 MW_e)基础上开展发电量为 20 ~30 MW_e的规模化电力生产^[1];2013 年澳大利亚在 Cooper 盆地 Hobanero 场地新建的 EGS 示范性工程装机容量为 1 MW_e,具备扩展到 25 MW_e的发电潜力^[13];2010 年,韩国启动的 EGS 开发计划,计划在 2015—2018 年间建成一个 1 MW_e级的干热岩发电站,到 2020 年扩展到 20 MW_e^[14]。而考虑到我国尚无干热岩发电工程,建立一座 1 MW_e级装机容量的干热岩示范电站应是近期的主要目标,发电潜力应不低于 10 MW_e。因此,将可发电量指标划分为 3 级: >50 MW_e, 好; 10 ~50 MW_e, 中; <10 MW_e, 差。

2.3 技术性指标

技术性指标层主要包括钻井深度、地应力状况、储层压裂门限值、天然裂隙发育情况、可压裂体积和场地资源使用寿命 6 个指标。

2.3.1 钻井深度

钻井深度以干热岩最佳开采温度 200 °C 等温线深度为量化依据。钻井深度一方面影响钻探经济性,另一方面影响钻探施工难易程度。目前国内外干热岩开采深度主要集中在 3 ~5 km,澳大利亚 Cooper 盆地 4.25 km,法国 Soultz 场地 3 ~4.75 km,温度均大于 200 °C。因此,将钻井深度指标划分为 3 级: <3 km, 好; 3 ~5 km, 中; >5 km, 差。

2.3.2 地应力状况

人工储层建造是干热岩体开发最关键的步骤,且直接关系到 EGS 工程的成本和经济性,多年来国际上多采用巨型水力压裂法建造人工储层。在原生裂隙极不发育、相对均质和各向同性的高温花岗岩体中,水力压裂产生的裂缝严格受地应力场的控制,裂缝的扩展方向一般都垂直于最小主应力方

向。因此,准确掌握干热岩体的天然应力状态是建造人工储层的重要环节。根据地应力条件是否清楚,将地应力状况指标划分 3 级:清楚,好;基本清楚,中;不清楚,差。

2.3.3 储层压裂门限值

该指标也称为岩层起裂压力,是评价热储岩性是否易于人工压裂的指标,主要由开发场地的应力状态决定。尽管还没有足够的资料来确定 EGS 地热开发的最佳应力状态,但从已有示范工程来看,储层压裂门限值为在十几或几十个 MPa。如美国 Fenton Hill 场地压力值为 19 MPa;法国 SoltzGPK2 和 GPK3 这 2 个钻孔的压力值分别为 15.5 MPa 和 16 MPa;德国 Landan 压力值为 13 MPa;澳大利亚 Cooper 盆地 Habanero-1 压力值为 58 MPa;瑞士 Basel-1 压力值为 29.6 MPa;德国 Groose-Schoenebeck 压力值为 58.6 MPa^[15-16]。张庆^[17]研究表明,花岗岩的起裂压力为 20.4 MPa。一般情况下,干热岩储层压裂应优先使其原生裂隙张开,次之再考虑压裂岩石本身制造新的裂隙系统。综合上述信息,将储层压裂门限值指标划分为 3 个等级: <15 MPa,好; 15~30 MPa,中; >30 MPa,差。

2.3.4 天然裂隙发育情况

天然裂隙类型主要用来预测压裂后裂隙系统发展情况,可通过岩心、测井或露头分析获得。干热岩体天然裂隙发育情况直接关乎压裂的难易程度,但干热岩体不应发育较大断层,较大的断层易形成储层短路,造成人工造储失败。因此,将天然裂隙发育情况指标划分为 3 级:发育但无较大断层,好;较发育,中;不发育或发育较大断层,差。

2.3.5 可压裂体积

可压裂的干热岩岩体体积即人工激发储层体积,是计算干热岩可利用资源量的直接依据。国际上普遍认为理想经济的 EGS 工程,激发储层体积应达到 0.1 km^3 ,有效热交换面积应达到 100 万 m^2 。目前而言,国际上很多 EGS 工程储层激发体积已远远超过 0.1 km^3 的目标,但热储有效换热面积距商业化的要求还有一定的差距,主要原因在于激发过程中对裂隙系统的控制还不够理想^[18-19]。美国芬顿山的经验表明,采用水力加压法可以在足够大的岩石体积中($>1 \text{ km}^3$)创建开放的裂隙网络,以维持长期热能提取。现有 EGS 工程人工储层压裂体积多在 $1 \sim 2 \text{ km}^3$ 之间,因此,将可压裂干热岩体积指标划分为 3 级: $>2 \text{ km}^3$,好; $1 \sim 2 \text{ km}^3$,中;

$<1 \text{ km}^3$,差。

2.3.6 场地资源使用寿命

该指标为场地资源、装机容量和设备选型的综合考量指标。世界上几个老地热项目已经运行超过 30 a,而且大多数对未来地热项目的规划都假设每个电厂至少会运行 30 a。赵阳升等^[20]按照 MIT 高温岩体地热开发模型,预测羊八井热田、云南腾冲高温岩体和海南琼北高温岩体地热电站有效使用寿命均在 100 a 以上。因此,将场地资源使用寿命指标划分为 3 个等级: >100 a,好; 30~100 a,中; <30 a,差。

2.4 经济性指标

经济性指标层主要包括土地利用现状、场地施工条件、水源保障程度和发电并网条件 4 个指标。

2.4.1 土地利用现状

一方面干热岩勘探开发工程施工要占用一定面积的土地,需考虑土地准入问题;另一方面工程施工易产生噪声或微地震等不利影响,不能建设在人口密集区。因此,需对土地利用状况进行评价,将此指标分为 3 个等级:未利用土地,好;牧草地、林地、耕地和园地,中;居民点、工矿用地、交通用地和宗教用地,差。

2.4.2 场地施工条件

场地施工条件主要考虑场地是否具备大型施工车辆通行条件和大型机械施工条件。将此指标分为 3 个等级:施工车辆可通行、易施工,好;需修路方可通行、施工场地需投入少量资金平整,中;不易通行、不具备施工条件或投资额巨大,差。

2.4.3 水源保障程度

水源保障程度是评价场地施工能否满足干热岩开发利用过程中钻探、压裂和开发水源条件的指标。将此指标分为 3 个等级:具备,好;可协调解决,基本具备,中;不具备,差。

2.4.4 发电并网条件

干热岩开发利用的主要方式是发电,发电能否并网是干热岩场地选址的基本条件。将此指标分为 3 个等级:具备,好;可协调解决,基本具备,中;不具备,差。

3 评价方法

3.1 评价方法选取

依据本次建立的干热岩勘查开发工程场地选

址评价指标体系(表2),采用层次分析-综合评分法进行评价。评价时,先依据层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)求出各指标权重,再进行综合评分,计算公式为

$$P = \sum_{i=1}^n P_i A_i (i = 1, 2, 3, \cdots, n)。$$
 (1)

式中: P 为干热岩勘查开发场地选址评价综合评分值; n 为评价指标的总数; P_i 为第 i 个评价指标的给定指数值, 每个评价指标根据评价等级定为3级, 依据“好”、“中”、“差”分别赋值为9、6、3; A_i 为第 i 个评价指标的权重, 根据 AHP 输出结果确定。

3.2 指标权重确定

本次评价指标具有明显的层次性, 因此采用

AHP 确定评价指标权重。该方法又称多层次权重分析法, 是应用网络系统理论和多目标综合评价方法提出的一种层次权重分析方法^[21], 将与评价(决策)有关的元素分解成目标、准则和方案等层次, 在此基础上进行定性与定量相结合的评价方法, 通过系统规划和评价将复杂现象和决策思维过程系统化、模型化、数量化。

3.2.1 层次分析结构建立

依据前文所述干热岩勘查开发场地选址评价指标体系, 结合 AHP 原理, 可划分出层次结构如图2。其中第一层为目标层, 第二层为准则层, 第三层为方案层。

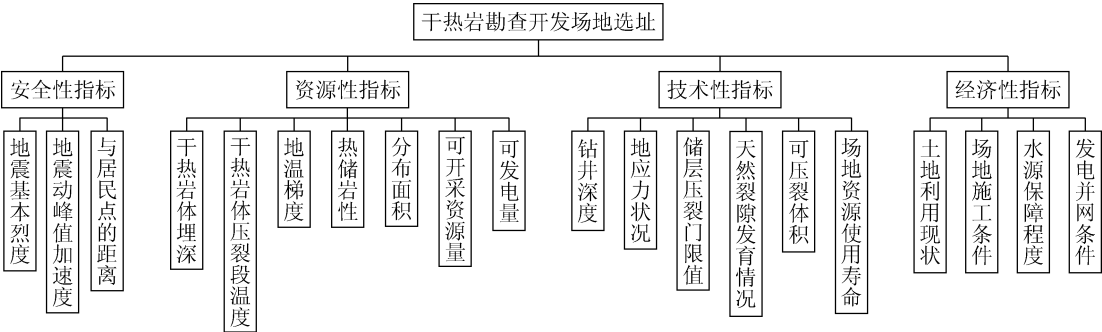


图2 干热岩勘查开发场地选址评价指标体系层次结构

Fig. 2 Hierarchical chart of EGS project site selection assessment index system

3.2.2 判断矩阵构建

依据建立的指标体系, 通过各指标层和各单一指标相互之间重要性的对比, 采用“1~9”标度对其进行赋值, 建立重要性对比判断矩阵。计算方法为: 以 A 表示目标, 其所支配的下一层因子为 $u_1, u_2, \cdots, u_n$, a_{ij} 表示元素 u_i 到 u_j 相对于目标的重要性的比例标度, 采用“1~9”标度对其进行赋值, 标度含义如表3所示。

表3 “1~9”标度含义
Tab.3 “1~9” scale and meaning

标度	含义
1	表示2个因子相比, 具有同等重要性
3	表示2个因子相比, 前者比后者稍重要
5	表示2个因子相比, 前者比后者明显重要
7	表示2个因子相比, 前者比后者强烈重要
9	表示2个因子相比, 前者比后者极端重要
2, 4, 6, 8	表示1, 3, 5, 7, 9 相邻判断的中间值
上述值的倒数	表示2个因子相比, 后者比前者重要的程度

由此对于目标 A , 由 n 个因子两两之间相对重要性的比较得到一个判断矩阵, 即

$$A = (a_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \cdots & 1 \end{bmatrix}。$$
 (2)

3.2.3 相对权重计算

通过求解判断矩阵的最大特征根, 得到相应的特征向量, 进而得到每个指标对应的权重。计算方法为: 根据因子 $u_1, u_2, \cdots, u_n$, 对于某一准则的判断矩阵 A , 求出其对于该准则的相对权重向量 $W = (w_1, w_2, \cdots, w_n)^T$ 。通过求解判断矩阵 A 的最大特征根 $\lambda_{\max}$, 得到相应的特征向量 W , 即

$$AW = \lambda_{\max} W，$$
 (3)

这时, W 的分量 $(w_1, w_2, \cdots, w_n)$ 就是相应于 n 个因子的权重。为确保评价层次排序的合理性, 还需对判断矩阵的评定结果进行一致性检验。一致性较差时, 需对矩阵进行重新调整。本文建立的判断矩阵和权重如表4—8。

表 4 准则层指标重要性判断矩阵与权重($\lambda_{\max} = 4.228\ 1$)

Tab. 4 Importance judgment matrix and weight of the indexes in criterion layer

指标	安全性指标	资源性指标	技术性指标	经济性指标	相对权重 W_i
安全性指标	1.000 0	0.142 9	0.200 0	3.000 0	0.091 5
资源性指标	7.000 0	1.000 0	3.000 0	7.000 0	0.574 1
技术性指标	5.000 0	0.333 3	1.000 0	5.000 0	0.282 1
经济性指标	0.333 3	0.142 9	0.200 0	1.000 0	0.052 3

表 5 方案层安全性指标重要性判断矩阵与权重($\lambda_{\max} = 3.000\ 0$)

Tab. 5 Importance judgment matrix and weight of the safety index in scheme layer

指标	地震动峰值加速度	与居民区的距离	地震基本烈度	相对权重 W_i
地震动峰值加速度	1.000 0	3.000 0	1.000 0	0.428 6
与居民区的距离	0.333 3	1.000 0	0.333 3	0.142 9
地震基本烈度	1.000 0	3.000 0	1.000 0	0.428 6

表 6 方案层资源性指标重要性判断矩阵与权重($\lambda_{\max} = 7.418\ 9$)

Tab. 6 The importance judgment matrix and relative weight of the resource index in scheme layer

指标	干热岩体埋深	干热岩体压裂段温度	地温梯度	分布面积	热储岩性	可开采资源量	可发电量	相对权重 W_i
干热岩体埋深	1.000 0	0.333 3	3.000 0	1.000 0	1.000 0	0.142 9	0.200 0	0.056 7
干热岩体压裂段温度	3.000 0	1.000 0	5.000 0	3.000 0	3.000 0	0.200 0	0.333 3	0.129 9
地温梯度	0.333 3	0.200 0	1.000 0	0.333 3	1.000 0	0.142 9	0.200 0	0.034 0
分布面积	1.000 0	0.333 3	3.000 0	1.000 0	3.000 0	0.142 9	0.200 0	0.067 9
热储岩性	1.000 0	0.333 3	1.000 0	0.333 3	1.000 0	0.142 9	0.200 0	0.041 4
可开采资源量	7.000 0	5.000 0	7.000 0	7.000 0	7.000 0	1.000 0	3.000 0	0.431 1
可发电量	5.000 0	3.000 0	5.000 0	5.000 0	5.000 0	0.333 3	1.000 0	0.238 9

表 7 方案层技术性指标重要性判断矩阵与权重($\lambda_{\max} = 6.608\ 3$)

Tab. 7 Importance judgment matrix and weight of the technology index in scheme layer

指标	天然裂隙发育情况	可压裂体积	储层压裂门限值	钻井深度	地应力状况	场地资源使用寿命	相对权重 W_i
天然裂隙发育情况	1.000 0	0.333 3	0.333 3	0.200 0	1.000 0	3.000 0	0.074 1
可压裂体积	3.000 0	1.000 0	5.000 0	3.000 0	5.000 0	7.000 0	0.410 5
储层压裂门限值	3.000 0	0.200 0	1.000 0	0.200 0	5.000 0	3.000 0	0.132 1
钻井深度	5.000 0	0.333 3	5.000 0	1.000 0	5.000 0	5.000 0	0.290 8
地应力状况	1.000 0	0.200 0	0.200 0	0.200 0	1.000 0	1.000 0	0.050 4
场地资源使用寿命	0.333 3	0.142 9	0.333 3	0.200 0	1.000 0	1.000 0	0.042 1

表 8 方案层经济性指标重要性判断矩阵与权重($\lambda_{\max} = 4.154\ 5$)

Tab. 8 Importance judgment matrix and weight of the economy index in scheme layer

指标	土地利用现状	场地施工条件	水源保障程度	发电并网条件	相对权重 W_i
土地利用现状	1.000 0	3.000 0	3.000 0	3.000 0	0.487 4
场地施工条件	0.333 3	1.000 0	3.000 0	3.000 0	0.276 2
水源保障程度	0.333 3	0.333 3	1.000 0	1.000 0	0.118 2
发电并网条件	0.333 3	0.333 3	1.000 0	1.000 0	0.118 2

3.2.4 权重合成与排序

将各准则层下的指标权重进行加权计算,本次建立的干热岩勘查开发场地选址评价指标权重如表 9 所示。计算方法为:假定已求出第 $k - 1$ 层上 n 个元素相对于总目标的权重向量为

$$\mathbf{W}^{(k-1)} = (w_1^{(k-1)}, w_2^{(k-1)}, \dots, w_n^{(k-1)})^T, \quad (4)$$

第 k 层上某一元素对第 $k - 1$ 层上各元素的相对权

重向量为

$$\mathbf{P}^{(k)} = (p_1^{(k)}, p_2^{(k)}, \dots, p_l^{(k)})^T, \quad (5)$$

则第 k 层上元素对总目标的合成权重为

$$\mathbf{W}^{(k)} = (w_1^{(k)}, w_2^{(k)}, \dots, w_n^{(k)})^T = \mathbf{P}^{(k)} \mathbf{W}^{(k-1)}, \quad (6)$$

进而可得递推合成权重为

$$\mathbf{W}^{(k)} = \mathbf{P}^{(k)} \mathbf{P}^{(k-1)} \dots \mathbf{W}^{(k-1)}. \quad (7)$$

表9 评价指标权重排序

Tab.9 Ranked list of assessment index weight		
序号	指标	权重
1	可开采资源量	0.247 5
2	可发电量	0.137 2
3	可压裂体积	0.115 8
4	钻井深度	0.082 0
5	干热岩体压裂段温度	0.074 6
6	地震动峰值加速度	0.039 2
7	地震基本烈度	0.039 2
8	分布面积	0.039 0
9	储层压裂门限值	0.037 3
10	干热岩体埋深	0.032 6
11	土地利用现状	0.025 5
12	热储岩性	0.023 8
13	天然裂隙发育情况	0.020 9
14	地温梯度	0.019 5
15	场地施工条件	0.014 5
16	地应力状况	0.014 2
17	与居民区的距离	0.013 1
18	场地资源使用寿命	0.011 9
19	发电并网条件	0.006 2
20	水源保障程度	0.006 2

4 结论与建议

(1)我国干热岩资源调查评价工作可划分为A—E 5个阶段,干热岩勘查开发工程场地选址属于场地级干热岩资源调查评价阶段,是干热岩勘查开发的关键阶段。

(2)从干热岩工程开发的角度看,拟选场地若满足干热岩开发利用需求,应具备以下4个条件:①具有足够的干热岩资源开发潜力;②具备干热岩钻探和储层压裂等技术条件;③具有地质安全性;④具有经济性。

(3)依据系统性、科学性、延续性、可比性、可操作性 and 可量化性原则,从资源、技术、安全和经济4个方面建立了工程场地选址评价指标体系,共包含4个指标层20个指标。其中,地质安全性评价指标层包括地震基本烈度、地震动峰值加速度和与民点的距离3个指标;资源性指标层包括干热岩体埋深、干热岩体压裂段温度、地温梯度、热储岩性、分布面积、可开采资源量和可发电量7个指标;技术性指标层主要包括钻井深度、地应力状况、储层压裂门限值、天然裂隙发育情况、可压裂体积和场地资源使用寿命6个指标;经济性指标层主要包括土地利用现状、^{万方数据}场地施工条件、水源保障程度和发电

并网条件4个指标。
(4)基于层次分析法,计算了各评价指标的权重,并提出了基于层次分析—综合评分法的干热岩勘查开发工程场地选址评价方法。

本文研究偏重于理论方面,下一步应选取典型开发利用场地开展案例研究,并通过实际案例研究进一步改进,以便更好地支撑干热岩开发利用工程实践。

参考文献:

[1] MIT. The future of geothermal energy :Impact of enhanced geother-
mal systems (EGS) on the United States in the 21st Century
[R]. Boston, MA, USA: Massachusetts Institute of Technology ,
2006:372.
[2] 蔺文静,王凤元,甘浩男,等. 福建漳州干热岩资源选址与开
发前景分析[J]. 科技导报,2015,33(19):28-34.
[3] 苏正,王晓星,胡剑,等. 我国增强型地热系统选址问题探讨
[J]. 地球物理学进展,2014,29(1):386-391.
[4] 李福. 海南陵水地区深层干热岩地热发电项目的勘查选址
[J]. 地热能,2010(3):21-27.
[5] 张杨. 干热岩形成机理及开发潜力研究:以松辽盆地为例
[D]. 西安:长安大学,2016.
[6] 张森琦,贾小丰,李胜涛,等. 青藏高原北缘重点区1:5 万水文
地质(干热岩)调查报告[R]. 保定:中国地质调查局水文地
质环境地质调查中心,2016.
[7] 中国地震地球物理研究所,中国地震灾害防御中心,中国地
震局工程力学研究所,等. GB 18306—2015 中国地震动参数
区划图[S]. 北京:中国标准出版社,2016.
[8] 中国环境科学研究院固体所. GB 18598—2001 危险废物填埋
污染控制标准[S]. 北京:中国标准出版社,2002.
[9] 苏州热工研究院有限公司,环境保护部核与辐射安全中心.
GB 6249—2011 核动力厂环境辐射防护规定[S]. 北京:中
国标准出版社,2011.
[10] 《地球科学大辞典》编委会. 地球科学大辞典·应用学科卷
[M]. 北京:地质出版社,2005.
[11] 王贵玲,马峰,蔺文静,等. 干热岩资源开发工程储层激发研
究进展[J]. 科技导报,2015,33(11):103-107.
[12] 陆川,王贵玲. 干热岩研究现状与展望[J]. 科技导报,2015,
33(19):13-21.
[13] Beardsmore G,Budd A,Huddleston - Holmes C,et al. Country
update - Australia[C]//Proceedings World Geothermal Congress
2015. Melbourne, Australia:[s. n.],2015:11.
[14] Song Y,Lee T J,Jeon J,et al. Background and progress of the Ko-
rean EGS pilot project[C]//Proceedings World Geothermal Con-
gress 2015. Melbourne, Australia:[s. n.],2015:5.
[15] 许天福,张延军,曾昭发,等. 增强型地热系统(干热岩)开发
技术进展[J]. 科技导报,2012,30(32):42-45.
[16] 马峰,王潇媛,王贵玲,等. 浅层地热能 with 干热岩资源潜力及
其开发前景对比分析[J]. 科技导报,2015,33(19):49-53.

[17] 张庆. 增强型地热系统人工压裂机理研究及应用[D]. 长春: 吉林大学, 2014.

[18] 曾玉超, 苏正, 吴能友, 等. 增强型地热系统储层试验与性能特征研究进展[J]. 矿业研究与开发, 2012, 32(3): 22 - 27, 63.

[19] 康玲, 王时龙, 李川. 增强地热系统 EGS 的人工热储技术[J]. 机械设计与制造, 2008(9): 141 - 143.

[20] 赵阳升, 万志军, 康建荣. 高温岩体地热开发导论[M]. 北京: 科学出版社, 2004.

[21] Saaty T L. Modeling unstructured decision problems: The theory of analytical hierarchies[J]. Mathem Comp Simul, 1978, 20(3): 147 - 158.

Index system research of project site selection for dry hot rocks exploration

LI Shengtao^{1,2}, ZHANG Senqi¹, JIA Xiaofeng¹, XU Tianfu², REN Tao¹, LI Fucheng¹

(1. Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, China Geological Survey, Baoding 071051, China;

2. College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130021, China)

Abstract: Dry hot rocks are innovative and renewable green energy , with the characteristics of huge reserve and wide range of utilization. It is of great importance to develop and utilize the dry hot rocks . Finding out a suitable project site is the key to the successful exploration of dry hot rocks under the current situation in China . Focusing on the key issue of project site selection for dry hot rocks , the authors summarized the site selection experience of dry hot rocks exploration at home and abroad . From the aspects of resource , technology, safety, and economy, this research established an index system for site selection assessment including 4 index layers and 20 indicators. Based on the analytic hierarchy process , the weight of each evaluation index is calculated . In addition, a site selection assessment method is proposed on the basis of analytic hierarchy process and comprehensive scoring method . The index system and assessment method proposed in this study have some guiding significance for project site selection.

Key words: hot dry rocks ;project site selection ;assessment index ;index weight ; assessment method

(责任编辑: 刘丹)