



基于模糊层次分析法-粒子群优化模型的浅层地热能适宜性区划研究

杨 泽¹, 于慧明¹, 罗银花², 朱 巍¹, 倪 金¹, 毕立坤³, 张旭升³

1. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034; 2. 辽宁省地质矿产研究院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110032; 3. 辽宁水文地质工程地质勘察院, 辽宁 大连 116033

摘 要: 利用基于模糊一致矩阵的模糊层次分析法(FAHP)建立浅层地热能评价模型, 将结果的一致性检验与修正过程整合为非线性规划问题, 并通过粒子群算法(PSO)进行优化求解, 得到满足一致性要求的权重结果, 进而开展敏感度分析, 校验指标权重准确性, 提高地源热泵适宜性区划评价精度. 通过构建 4 个层次、9 个指标的评价体系, 根据获得的权重值开展大连地区浅层地热能适宜性分区评价, 为浅层地热能资源储量和潜力评价提供基础, 也为浅层地热能可持续开发利用提供理论依据. 评价结果表明, 适宜性区划模型和指标权重值可靠, 适宜区分布于研究区东部钻石湾、东港一带, 面积 32.87 km², 占评价总面积的 4.45%, 较适宜区分布于北部甘井子区, 面积 247.21 km², 占评价总面积的 33.47%.

关键词: 浅层地热能; 适宜性区划; 模糊层次分析法; 粒子群优化修正法; 综合指数法; 辽宁省

SHALLOW GEOTHERMAL ENERGY SUITABILITY ZONING BASED ON FUZZY ANALYTIC HIERARCHY PROCESS-PARTICLE SWARM OPTIMIZATION MODEL

YANG Ze¹, YU Hui-ming¹, LUO Yin-hua², ZHU Wei¹, NI Jin¹, BI Li-kun³, ZHANG Xu-sheng³

1. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China;

2. Liaoning Geology and Mineral Resources Institute Co., Ltd., Shenyang 110032, China;

3. Liaoning Hydrogeological and Engineering Geological Survey Institute Co., Ltd., Dalian 116033, Liaoning Province, China

Abstract: The paper establishes the evaluation model of shallow geothermal energy by fuzzy consistent matrix-based fuzzy analytic hierarchy process (FAHP), integrating the consistency testing and correction of the results into a nonlinear programming problem, using particle swarm optimization (PSO) for optimization solution and getting the weight results that meet the consistency requirements, and then checking the accuracy of index weights through sensitivity analysis to improve the accuracy of ground source heat pump suitability zoning evaluation. By constructing an evaluation system with 4 levels and 9 indicators, the suitability zoning evaluation of shallow geothermal energy in Dalian area is carried out according to the weight values obtained, which provides a research foundation for the shallow geothermal energy resource reserves and potential evaluation, and theoretical basis for its sustainable development and utilization as well. The results show that the suitability zoning model and index weight values are reliable. The suitable area is distributed in Diamond Bay and Donggang district in the east of the study area, with an area of 32.87 km², accounting for 4.45% of the total assessed area, while the less suitable area is distributed in Ganjingzi district in the north, with an area of 247.21 km², accounting for 33.47% of the total assessed area.

Key words: shallow geothermal energy; suitability zoning; FAHP; PSO; comprehensive index method; Liaoning Province

收稿日期: 2022-03-09; 修回日期: 2022-05-27. 编辑: 黄欣.

基金项目: 大连市自然资源局项目“大连市城市地质调查”(JHCG2018-0906).

作者简介: 杨泽(1981—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事水文地质、生态地质调查研究, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail//61421078@qq.com

通信作者: 朱巍(1979—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事自然资源综合调查研究, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail//zhuwei_1114@163.com

0 前言

浅层地热能埋藏在地表以下 200 m 内的岩土体和地下水中,分布广泛,储量较大,可以循环再生,是一种低碳、安全的清洁能源^①[1-2]。地源热泵技术可用于浅层地热能开发利用,其中地下水源热泵系统是重要的开发手段,也是本次适宜性评价的研究对象[3-5]。目前浅层地热能开发利用过程中暴露出一些问题:回灌不及时有可能引发地面沉降、地裂缝、地面塌陷;水源选择不当会引起水量不足、水温不适、供水不稳定,造成经济损失[6-8];水质较差引起设备的腐蚀[9-11]。科学开展适宜性区划是浅层地热能推广应用的基础。当前适宜性区划研究多采用层次分析法等相对单一的评价手段,指标权重合理性有待进一步提高。权重准确则区划结果就相对准确,就能够为实际开发利用提供可靠的技术保障,因此需要不断完善浅层地热能适宜性区划评价方法。辽宁省大连市城市地质调查项目在大连市主城区开展了水文地质、工程地质调查,为该区浅层地热能专项研究奠定了基础。本次研究依托该项目所取得的地质资料,基于模糊层次分析法(FAHP)-粒子群优化(PSO)模型,提取影响因素,构建评价体系,开展浅层地热能适宜性区划研究。

1 研究区概况

大连市主城区位于辽东半岛南部,面积 729.58 km²,丘陵多,平原少,年平均气温 10 ℃,年降水量 600~700 mm。第四系之下北部发育震旦系灰岩、白云岩,中部为青白口系板岩、千枚岩,南部为南华系石英岩、石英砂岩。地质构造处于辽东隆起区,导致震旦系、南华

系基底出露地表,并在沿海区形成第四系松散沉积物。

研究区地下水类型包括第四系松散岩类孔隙水,呈带状、块状、舌状分布于山麓、山丘间沟谷及河谷阶地,含水层厚 2~10 m,地下水埋深 2~6 m;震旦系碳酸盐岩类裂隙岩溶水,在市区东北部和西北部震旦系地层中广泛分布,含水层厚 10~20 m,地下水埋深 10~15 m;基岩裂隙水,分布于区内的丘陵区,含水层厚 20~30 m,地下水埋深 10~20 m。大连市为滨海城市,海水入侵是突出的地质环境问题,海水入侵区分布在大连湾、周水子、龙王塘、营城子、革镇堡街一带,入侵面积达 66.11 km²。

目前区内浅层地热能开发工程近 20 项,其中水源热泵项目约 10 项,主要分布在南部主城区及重点建设区,集中在中心城区的高度建成区,以及金普新区的保税港区、小窑湾自贸区及临海装备制造业聚集区。利用浅层地温能供暖/制冷建设面积达 1 570×10⁴ m²。

2 浅层地热能评价方法与原理

浅层地热能适宜性区划评价需考虑多项影响地热分布和利用的赋存条件,其具有结构复杂、影响因素多等特点,评价体系具有层次性、模糊性和复杂性。目前适宜性区划一般采用定性和定量相结合的研究方法,将数学模型与适宜性区划方法研究综合运用^[12-21](表 1)。模糊层次分析法能够建立阶梯层次结构,综合指数法开展整体研究,两者可以互补,构建指标体系,比较判定重要性,减少主观性两两比较,使结果相对可靠、合理。因此选用两种方法联合构建评价研究模型,同时引入粒子群优化算法修正指标权重一致性检验过

表 1 适宜性区划评价方法对比表

Table 1 Comparison of evaluation methods for the suitability zoning of shallow geothermal energy

评价方法	主要优点	主要缺点
综合指数法	分散信息利用模型整合,集成综合特征,便于整体研究	指标层次少、资料少时不适用,反映系统的本质困难
模糊层次分析法	解决定量化难的问题,比较标度手段,对各指标重要性排序,复杂问题简单处理	一致性需要经过修正-检验的反复过程,且非常繁琐,计算工作量较大
主成分分析法	高维变量降维,减少综合变量,替换原始多维变量,消除相互影响,避免主观性	具有模糊性,并不具体,变量本身重要性考虑不到,只是定量相互比较
系统动力学法	分析复杂系统,解析结构、功能内在关系,应用于结构复杂并且高阶的非线性事件	指标因子相互之间的作用掌控较难,导致实际结果会出现偏差

① 自然资源部中国地质调查局,等. 中国地热能发展报告. 2018.

程,开展模型敏感度分析,为校验模型正确性提供可靠依据.

2.1 构造模糊互补判断矩阵

准则层为 C 层,因素层元素为 A_1, A_2, \dots, A_n , 元素对于准则层 C 的相对重要性即权重. A_1, A_2, \dots, A_n 对于 C 的重要性通过定性手段确定,权重确定选用两两比较方法.当支撑指标 A_i 和 A_j 的重要程度不能够直接比较,则对矩阵元素 a_i 和 a_j 的比较做变换.选取 0.1~0.9 标度赋予因素间数量标度(表 2).

表 2 比较标度表
Table 2 Scales for comparison

标度	定义	说明
0.1	绝对不重要	因素 a_i 比因素 a_j 绝对不重要
0.2	非常不重要	因素 a_i 比因素 a_j 非常不重要
0.3	比较不重要	因素 a_i 比因素 a_j 比较不重要
0.4	稍微不重要	因素 a_i 比因素 a_j 稍微不重要
0.5	同等重要	因素 a_i 与因素 a_j 同等重要
0.6	稍微重要	因素 a_i 比因素 a_j 稍微重要
0.7	比较重要	因素 a_i 比因素 a_j 比较重要
0.8	非常重要	因素 a_i 比因素 a_j 非常重要
0.9	绝对重要	因素 a_i 比因素 a_j 绝对重要

如果模糊矩阵 $A=(a_{ij})_{n \times n}$, 当矩阵元素满足 $a_{ij}+a_{ji}=1$, 矩阵 A 作为模糊互补矩阵. 根据标度对比表,对 a_1, a_2, \dots, a_n 两两比较,得到模糊判断矩阵

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

则矩阵 $A=(a_{ij})_{n \times n}$ 满足条件,即判断矩阵 $A=(a_{ij})_{n \times n}$ 是模糊互补判断矩阵.

对矩阵 $A=(a_{ij})_{n \times n}$ 各行求和

$$r_i = \sum_{k=1}^n a_{ik} \quad (i, k=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

数学变换后, $r_{ij}=r_i-r_j/2(n-1)+0.5$, 得到模糊一致性矩阵 $R=(r_{ij})_{n \times n}$, 对矩阵 R 进行归一化处理,得到因素排序向量:

$$W=(W_1, W_2, \dots, W_n)^T \quad (3)$$

W 向量具备

$$W_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} - 1 + n/2}{n(n-1)} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

如果 $W=(W_1, W_2, \dots, W_n)^T$ 为模糊判断矩阵 A 的重要性权重向量,并且 $\sum_{i=1}^n W_i=1, W_i \geq 0 (i=1, 2, \dots, n)$

则 $W_{ij} = \frac{W_i}{W_i+W_j} (\forall i, j=1, 2, \dots, n)$, 判断矩阵 A 特征矩阵为 n 阶矩阵 $W^*=(W_{ij})_{n \times n}$.

2.2 模糊互补判断矩阵一致性检验

判断权重值是否合理,需要对模糊互补判断矩阵开展一致性检验.某一层因素多,模糊判断矩阵可能不一致,此时需要综合判断,至模糊互补判断矩阵一致为止.对模糊互补判断矩阵一致性检验,选取模糊判断矩阵和它的特征矩阵相容性指标.

当矩阵 $A=(a_{ij})_{n \times n}$ 和 $B=(b_{ij})_{n \times n}$ 均为模糊判断矩阵,则是 A 与 B 的相容性指标.相容性指标 $I(A, W) \leq \alpha$ 时(α 是决策态度),判断矩阵满足一致性. α 值越来越小,一致性越来越高,此时需让 $I(A, W^*) \leq \alpha, \alpha=0.1$.

模糊判断矩阵一致性检验及修正通过优化函数

$$\min (f_1+f_2+f_3) = \frac{2}{n(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq ij}}^n |r_{ij} - (r_{ik} + r_{kj} - 0.5)| + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [a(W_i - W_j) + 0.5 - y_{ij}]^2 / n^2 + \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (Z_{ij} - \bar{Z}_i)^2} / n$$

实现. 目标函数优化变量是修正后矩阵 Y 右上三角位置,除第一行元素以外的各个元素,以及对应的权重值 W_i , 所以共有 $(n-1)(n-2)/2+n$ 个优化变量,直至得到一致性矩阵和各个元素权重.

2.3 粒子群优化修正

相容性指标是 $I(A, W)$ 非线性规划模型,验证迭代过程复杂,易产生误差,需借助粒子群优化算法,寻找最优解的特性提高结果准确性.首先确定指标适应度函数 $I(A, W)$, 调动指标评价位置变化函数方法,进而得到指标在评价目标层和准则层合理位置,最终利用粒子群优化算法对单项指标权重进行一致性修正和检验,达到减少浅层地热能适宜性评价指标权重误差的目的.

1) 确定粒子适应度函数 $I(A, W)$. 函数值越小,修正后的判断矩阵一致性越好. $I(A, W)=0$ 时,拥有完全一致性.

2)明确变量. 适应度函数中的未知数,在修正后矩阵右上三角位置,除第一行元素外的各个元素,以及各行的权重值 W_i ,所以共有 $(n-1)(n-2)/2+n$ 个优化变量,变量定义域是 $[0, 1]$.

3)种群初始化. 选取粒子基本变化参数做为标准参数,即粒子个数 $N=100$,因子 $C_1=2.0$, $C_2=2.0$,惯性权重 $m=0.2$,速度改变最大值 $V_{\max}=0.05$. 为防止寻解发散,迭代次数为 100 次,速度更改步长为 1. 采用随机数生成初始值,调用粒子位置函数计算粒子适应度函数值,得到当前最优值以及全局最优值.

4)更新迭代. 选用调动粒子运动、位置变化函数方法,得到新粒子位置,再次调用粒子的位置函数,计算得到新解,与当前粒子最优值以及全局最优值比较,及时更新.

5)最大迭代次数结束循环后,基于 Python 3.5.2 环境代码得到结论.

2.4 层次排序权重

1)层次单排序权重. 利用排序向量 $W=(W_1, W_2, \dots, W_n)^T$ 得到某层元素相对上层相关元素相对权重.

2)层次总排序权重. 因素层总排序,是评价元素相对目标层重要性排序权重,逐层进行. 上层 A 包含 n 个因素 A_1, A_2, \dots, A_n ,其在本层所占权重分别为 a_1, a_2, \dots, a_n ,下层 B 包含 m 个因素 B_1, B_2, \dots, B_m ,其对因素 A_j 层次单排序重要性权重分别为 $b_{j1}, b_{j2}, \dots, b_{jm}$ (B_k 与 A_j 无关则 $b_{kj}=0$). B 层总权重向量 (b_1, b_2, \dots, b_n) ,其余层权重依此进行,得到所有因素相对目标层权重排序.

$$b_j = \sum_{k=1}^m a_k b_{kj} \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

2.5 模型敏感度分析

判断矩阵的敏感度分析,是研究因素变化对评价结果影响的敏感程度,可以提高评价精度. 敏感度分析将参数量值扩大或缩小若干倍,输入模型,求解输出变化对权衡分析结果影响. 参数变化为不敏感区域,则对权衡分析结果影响很小. 判断因素的变化对结果的敏感程度,使得模型变量在特定范围变动,观察模型行为,观察变化情形. 变量异动时,模型变化不大则可靠,反之有风险. 敏感度分析,是在定量分析的数学模型里,分析不确定的影响因素对输出的变量影响程度的大小. 分析公式为:

$$S_{ij} = \frac{\Delta O_i / O_i}{\Delta I_j / I_j} \quad (6)$$

式中: S_{ij} — I_j 对 O_i 的敏感度, O_i —第 i 种指标值, I_j —第 j 种原始数据值.

2.6 建立综合评价模型

适宜性区划评价指标体系,需要对准则层、指标层要素综合评价. 综合评价选取综合指数法,评价模型如下式:

$$M_i = \sum_{j=1}^n Z_j W_j = \sum_{j=1}^n (\sum_{i=1}^n p_{ji} W_i) \quad (i, j=1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

式中: M_i —适宜性区划综合评价指数, Z_j —第 j 准则层评价指数, W_j —第 j 准则层权重, p_{ji} —第 j 准则层对应指标层第 i 项指标评分, W_i —第 i 指标权重. 根据各层指标权重以及评分值,得到最终评价结果. 适宜性区划等级分为适宜、较适宜、不适宜 3 种程度.

3 构建适宜性评价体系

3.1 选取适宜性评价指标

浅层地热能适宜性评价指标体系的构建,考虑静态与动态两方面,综合反映能源赋存条件,便于进行综合管理与调控. 本次评价开展地下水地源热泵适宜性分区,为体系中目标层;准则层由地下水赋存条件、地下水动力条件、地下水水化学条件和地质环境条件 4 个方面组成;指标层由地层岩性、地下水埋深、有效含水层厚度、含水层富水性和回灌能力、渗透系数、地下水腐蚀性和结垢性、海水入侵 9 个指标构成(图 1).

地下水赋存条件是影响地下水分布规律的重要因素. 研究区岩性变化较复杂,使其富水性各有差异. 有效含水层厚度表征含水层单井出水能力,地下水位埋深、地层岩性是含水层单井回灌能力影响因素,同时地层岩性决定地下水地源热泵系统钻孔施工的可钻进难度.

地下水动力条件控制地下水资源量和运移能力:含水层富水性影响地下水地源热泵系统循环水量大小;渗透性影响单井出水能力和回灌能力;回灌能力关系热泵系统运行可持续性和地下水资源的保护.

地下水化学条件决定地下水是否符合热泵系统利用条件. 研究区地下水腐蚀和结垢问题较突出,地下水会腐蚀管道,结垢严重影响地下水源热泵系统运行.

研究区为滨海城市,海水入侵是突出的地质环境问题. 超量开采地下水,造成地下水位持续下降,引起

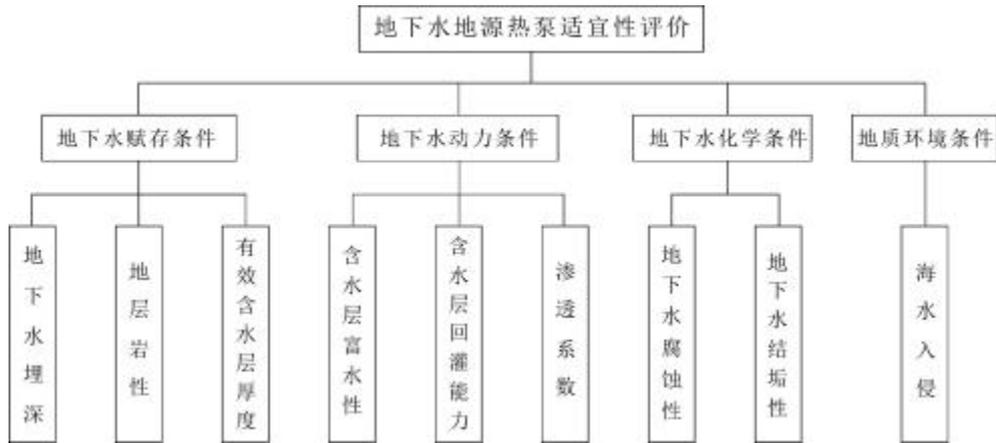


图 1 地下水地源热泵系统适宜性评价指标体系

Fig. 1 Suitability evaluation indexes for groundwater source heat pump system

表 3 适宜性评价指标分级

Table 3 Grading of suitability evaluation indexes

赋值	1	2	3	4	5
潜水埋深/m	<3	3~6	6~9	9~12	≥12
承压水埋深/m	<5 或 ≥50	5~10	10~20	20~30	30~50
地层岩性(地层可钻性)	石英砂岩(困难)	互层(较难)	板岩(一般)	灰岩(较易)	
有效含水层厚度/m	<5	5~10	10~20	20~30	≥30
含水层富水性/(m ³ /d)	<100		100~500		≥500
含水层回灌能力	极弱区	较弱区	一般区		较强区
地层渗透系数/(m/d)	<1	1~3	3~6	6~9	≥9
地下水腐蚀性	腐蚀性水		半腐蚀性水		非腐蚀性水
地下水结垢性	很多		多	少	很少
海水入侵	严重入侵	中等入侵	轻度入侵		非入侵

海水或高矿化咸水向陆地淡水含水层运移, 恶化地下水水质, 造成地下水源热泵系统水质发生变化.

3.2 评价指标体系分级

评价体系中, 指标类型和数据量纲均不同, 无法直接比较, 评价前需进行数据标准量化. 以是否适宜建设地下水地源热泵系统为比较标准, 对指标因子分段分级, 选取 1~5 标度分值, 最大值取 5, 最小值取 1. 利用 GIS 评价平台属性模块, 对分区属性赋值, 越利于地源热泵开发利用, 赋值分数越高, 将数据转化为无量纲数值(表 3).

3.3 确定指标因子权重

依据研究区地质环境背景, 对影响因子两两比较,

构建比较矩阵. 根据模糊层次综合指数-粒子群优化修正模型评价, 综合各评价因子权重评价结果, 对各因子综合权重进行组合, 获取每个评价因子的最终组合权重. 权重评价结果见表 4、5.

表 4 评价准则层结论(权重)表

Table 4 Conclusions (weights) of evaluation criterion layer

准则层	全局权重	同级权重	目标层
地下水赋存条件	0.2833	0.2833	地下水地源热泵适宜性区划
地下水动力条件	0.4167	0.4167	
地下水化学条件	0.2	0.2	
地质环境条件	0.1	0.1	

表 5 评价因素层结论(权重)表

Table 5 Conclusions (weights) of evaluation factor layer

因素层	全局权重	同级权重	准则层
地层岩性	0.0567	0.2	
地下水位埋深	0.1322	0.4667	地下水赋存条件
有效含水层厚度	0.0944	0.3333	
含水层回灌能力	0.1806	0.4329	
含水层富水性	0.1528	0.3671	地下水资源条件
地层渗透系数	0.0833	0.2	
地下水腐蚀性	0.08	0.4	地下水化学条件
地下水结垢性	0.12	0.6	
海水入侵	0.1	1	地质环境条件

3.4 评价模型敏感度分析

敏感度分析是模型的变量变动时观察模型行为或变化情形的一种科学分析方式,是研究与分析一个系统(或模型)的状态或输出变化对系统参数或周围条件变化的敏感程度的方法.敏感度分析评价结果显示,构造判断矩阵时的评价因素使指标权重值产生变化很小,即变量异动时,模型的变化不大,代表本次研究的评价模型是可靠的(图 2).

3.5 数据处理及综合区划

选取栅格数据处理方法,利用 GIS 平台,采取 500 m×500 m 网格自动剖分方法,剖分评价区,形成 6 070 个网格.通过 GIS 空间的分析模块功能,对评价因子进行空间叠加分析,对每一个剖分单元获取对应量化值,提取单指标因子栅格图层赋值.采用综合指数法,每个网格点属性赋值相应权重,汇总每个栅格对应分值,

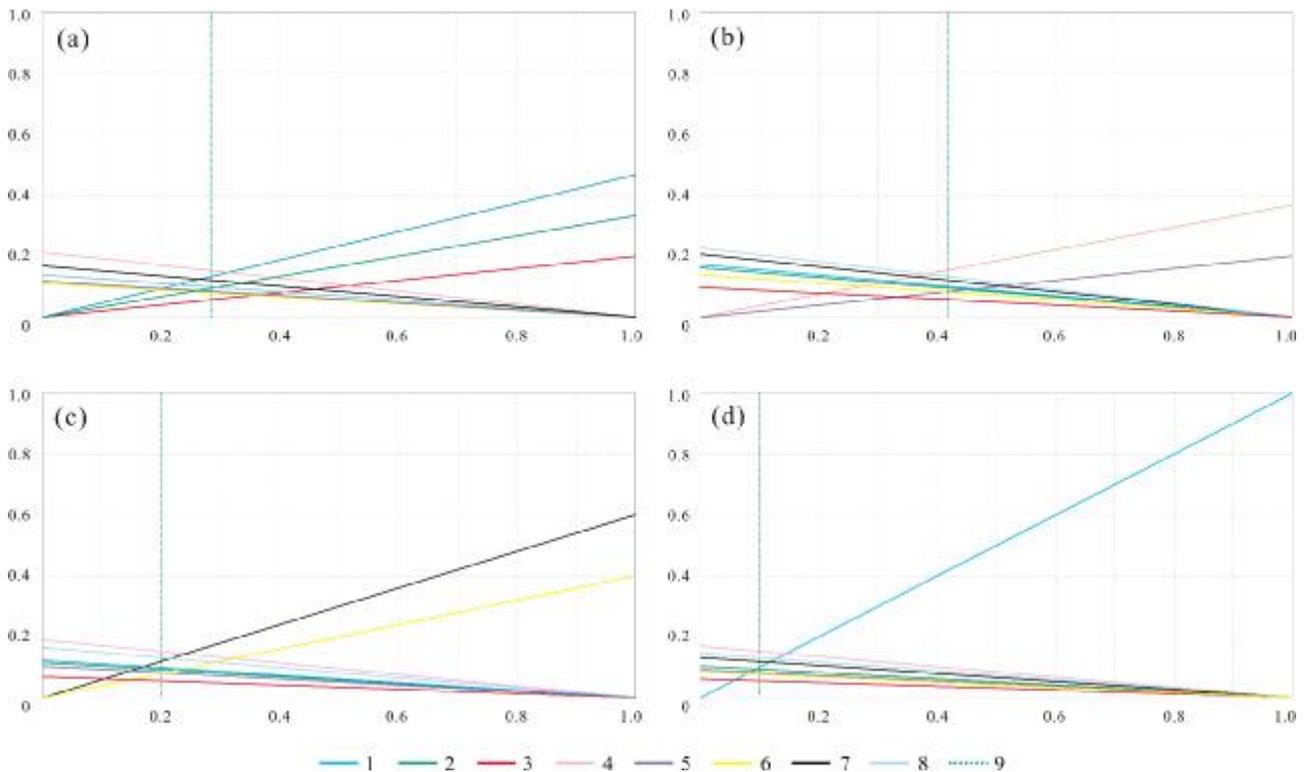


图 2 大连地区浅层地下水地源热泵评价模型敏感度分析图

Fig. 2 Sensitivity analysis diagrams of evaluation model for shallow groundwater source heat pump in Dalian area

a—地下水赋存条件评价敏感度(sensitivity of groundwater occurrence condition evaluation); b—地下水动力条件评价敏感度(sensitivity of groundwater dynamic condition evaluation); c—地下水化学条件评价敏感度(sensitivity of groundwater chemical condition evaluation); d—地质环境条件评价敏感度(sensitivity of geological environment condition evaluation); 1—地下水位埋深(groundwater depth); 2—有效含水层厚度(effective aquifer thickness); 3—地下水回灌能力(recharge capacity of groundwater); 4—含水层富水性(water abundance of aquifer); 5—地层渗透系数(permeability coefficient of formation); 6—地下水腐蚀性(corrosiveness of groundwater); 7—地下水结垢性(scaling performance of groundwater); 8—海水入侵(seawater intrusion); 9—当前值(current value)

形成栅格图层。

利用三角网格剖分方法,整合属性模块栅格图层,形成地下水地源热泵适宜性综合区划。结果显示,区内综合评分最小值为 2.1,最大值为 4.47,综合评分划分 3 个等级(表 6)。

表 6 地下水源热泵适宜性评价区划指标表
Table 6 Suitability evaluation zoning indexes of groundwater source heat pump

评价分值	≤3.0	3.0~4.2	≥4.2
适宜性区划	不适宜区	较适宜区	适宜区

4 评价结果与分析

评价结果表明,地下水地源热泵适宜区分布于研究区东部钻石湾、东港一带,地层岩性主要为千枚岩、粉砂岩。区内富水性较强,抽灌条件好,单位涌水量 500~1000 m³/d,含水层厚度大,适合地下水的抽灌。该区面积 32.87 km²,占总面积 4.45%(图 3,表 7)。

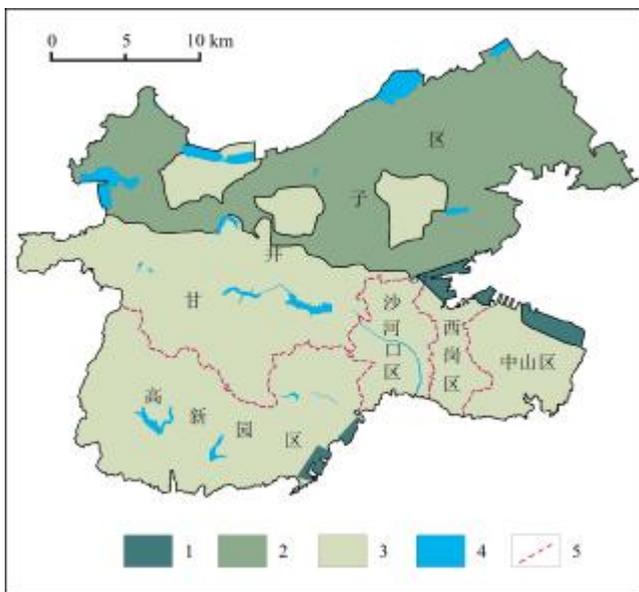


图 3 大连市主城区地下水地源热泵适宜性区划成果图

Fig. 3 Suitability zoning results of groundwater source heat pump in the main urban area of Dalian City

1—适宜区(suitable area); 2—较适宜区(less suitable area); 3—不适宜区(unsuitable area); 4—地表水体(surface water); 5—区界(district boundary)

较适宜区分布于北部甘井子区的营城子、革镇堡、大连湾一带,地层岩性为灰岩,地下水抽灌条件相对

较好,强—中等富水性,单位涌水量 100~500 m³/d,局部大于 500 m³/d,含水层厚度 20~30 m。该区面积 247.21 km²,占总面积 33.47%。

表 7 地下水源热泵适宜性区划表

Table 7 Suitability zoning of groundwater source heat pump

分区	面积/km ²	占比/%
适宜区	32.87	4.45
较适宜区	247.21	33.47
不适宜区	438.97	59.43
地表水体	19.56	2.65
合计	738.61	100.00

不适宜区分布于高新园区、沙河口区、西岗区等地,地层岩性为石英砂岩、板岩,富水性差,回灌能力较弱,地层补给条件差,单位涌水量小于 100 m³/d,含水层厚度 10~30 m。该区面积 438.97 km²,占总面积的 59.43%。

区内地表水体主要为大西山水库、龙王塘水库、马栏河以及人工围海养殖区等,面积 19.56 km²,占总面积 2.65%。

5 结论

结合大连市城市地质调查工作的数据,根据浅层地热能的赋存特征,在相关评价方法研究基础上,选取模糊层次分析-粒子群优化修正法进行适宜性评价方法的改进,对浅层地热能适宜性进行分区评价,取得如下成果:

1) 针对以往浅层地热能适宜性区划评价方法单一,指标权重准确度不高的问题,本研究采用模糊层次分析法确定权重,粒子群算法优化检验与修正一致性,综合指数法集成单项指标,同时进行敏感度分析,校验指标权重准确性,提高了适宜性区划评价精度。

2) 依据自然间断点分级法将研究区浅层地热能适宜性分为 3 个等级,分别为适宜区、较适宜区和不适宜区。地下水地源热泵适宜性分区评价主要考虑地下水埋深、地层岩性、有效含水层厚度、含水层富水性、含水层回灌能力、地层渗透系数、地下水腐蚀性、地下水结垢程度、海水入侵等 9 项指标。

3) 地下水地源热泵系统建设适宜性根据地质特征

的差异呈现不同. 适宜区分布于东部钻石湾、东港一带, 面积 32.87 km²; 较适宜区分布于北部甘井子区的营城子、革镇堡、大连湾一带, 面积 247.21 km²; 不适宜区分布于高新园区、沙河口区、西岗区等地, 面积 438.97 km².

4) 适宜性评价是综合考虑影响热泵系统建设因素的结果, 需不断优化系统, 保证适宜性评价的科学合理. 当前部分地区地下水地源热泵的地下水回路未完全密封, 使外界的空气与地下水接触, 导致地下水中离子氧化和气泡增多, 造成地下水污染、回灌井堵塞, 回灌困难造成水资源的浪费. 建议采用密闭系统, 保证热泵机组长期稳定运行, 防止地下水污染, 使地下水通过板式换热器与水源热泵机组间接换热.

参考文献(References):

- [1] 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, 341.
Wang G L, Lu C. Progress of geothermal resources exploitation and utilization technology driven by carbon neutralization target[J]. Geology and Resources, 2022, 31(3): 412-425, 341.
- [2] 卫万顺, 李宁波, 冉伟彦, 等. 中国浅层地温能资源[M]. 北京: 中国大地出版社, 2010.
Wei W S, Li N B, Ran W Y, et al. Shallow geothermal energy resources in China[M]. Beijing: China Land Press, 2010. (in Chinese)
- [3] 关键, 方石. 地热系统的概念与传热机制综述[J]. 地质与资源, 2021, 30(2): 207-213, 206.
Guan J, Fang S. Concept and heat transfer mechanism of geothermal system: A review[J]. Geology and Resources, 2021, 30(2): 207-213, 206.
- [4] 郝爱兵, 林良俊, 刘桂英, 等. 浅层地温能开发利用现状和问题及对策研究[C]//中国能源研究会地热专业委员会. 中国地热能: 成就与展望——李四光倡导中国地热能开发利用 40 周年纪念大会暨中国地热发展研讨会论文集. 北京: 地质出版社, 2010: 131-136.
Hao A B, Lin L J, Liu G Y, et al. Research on the present situation, problems and countermeasures of shallow geothermal energy development and utilization[C]//Geothermal Professional Committee of China Energy Research Association. China geothermal energy: Achievements and prospects. Beijing: Geological Publishing House, 2010: 131-136. (in Chinese)
- [5] 刘爱斌, 翟如伟, 景家俊, 等. 江苏徐州城市规划区浅层地温能潜力评价及环境效益分析[J]. 地质与资源, 2017, 26(3): 296-302.
Liu A B, Zhai R W, Jing J J, et al. Potential assessment and environmental benefit analysis of shallow geothermal energy in the Urban planning area of Xuzhou, Jiangsu Province[J]. Geology and Resources, 2017, 26(3): 296-302.
- [6] 王华军, 赵军, 沈亮. 地源热泵系统长期运行特性的实验研究[J]. 华北电力大学学报, 2007, 34(2): 52-54.
Wang H J, Zhao J, Shen L. Experimental investigation on long-term performance of ground source heat pump system[J]. Journal of North China Electric Power University, 2007, 34(2): 52-54.
- [7] 唐永香. 滨海新区浅层地热能赋存规律及其开发利用对策研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2014.
Tang Y X. Study on the occurrence conditions and utilization of shallow geothermal energy resources in Binhai New area[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014.
- [8] 李波. 天津地热资源可持续开发利用对策研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
Li B. Study on sustainable development and utilization countermeasure of geothermal resources in Tianjin[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [9] 王衍斐. 基于 GIS 的义乌市浅层地温能评价模型研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2012: 2-5.
Wang Y F. Research on the evaluation model of shallow geothermal energy based on GIS[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2012: 2-5.
- [10] 张洪梅. 辽宁大民屯凹陷地热资源形成条件分析[J]. 地质与资源, 2013, 22(1): 25-29.
Zhang H M. Analysis on the forming conditions of geothermal resources in Damintun Sag, Liaoning Province[J]. Geology and Resources, 2013, 22(1): 25-29.
- [11] 张戈, 姜玉成, 邵景力, 等. 辽宁地热资源与开采潜力研究[J]. 地质与资源, 2004, 13(1): 22-25, 42.
Zhang G, Jiang Y C, Shao J L, et al. Study on the situation and exploitation potential of geothermal resources in Liaoning Province[J]. Geology and Resources, 2004, 13(1): 22-25, 42.
- [12] 元云丽. 基于模糊层次分析法(FAHP)的建设工程项目风险管理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
Yuan Y L. The research on the construction engineering project risk management based on fuzzy analytic hierarchy process[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [13] 回广荣. 基于层次分析法的秦皇岛地下水源热泵适宜性区划[J]. 地下水, 2015, 37(6): 9-12.
Hui G R. The suitability zoning division for groundwater source heat pump based on analytic hierarchy process in Qinhuangdao[J]. Ground Water, 2015, 37(6): 9-12.
- [14] 张旭高. 基于区间矩阵修正方法的信息系统安全态势评估研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2020.
Zhang X G. Research on information system security situation assessment based on interval matrix modification method[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2020.

(下转第 382 页/Continued on Page 382)

- Xu M J, Xu W L, Wang F, et al. Geochronology and geochemistry of the Early Jurassic granitoids in the central Lesser Xing'an Range, NE China and its tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(2): 354-368.
- [48] 陈飞, 和钟铨, 张春蕾, 等. 内蒙古塔儿气地区花岗岩的形成时代与岩石成因[J]. *地质通报*, 2016, 35(5): 776-789.
Chen F, He Z H, Zhang C L, et al. The ages and petrogenesis of granite porphyry in Tarqi area, Inner Mongolia [J]. *Geological Bulletin of China*, 2016, 35(5): 776-789.
- [49] 唐杰, 许文良, 王枫, 等. 古太平洋板块在欧亚大陆下的俯冲历史: 东北亚陆缘中生代-古近纪岩浆记录[J]. *中国科学: 地球科学*, 2018, 48(5): 549-583.
Tang J, Xu W L, Wang F, et al. Subduction history of the Pale-Pacific slab beneath Eurasian continent: Mesozoic-Paleogene magmatic records in Northeast Asia[J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, 61(5): 527-559.
- [50] 宫响迪, 李碧乐, 李治华, 等. 大兴安岭北段小柯勒河花岗岩斑岩脉成因及地质意义: 锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学及 Hf 同位素制约[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2021, 51(6): 1753-1769.
Gong Y D, Li B L, Li Z H, et al. Petrogenesis and geological significance of granite porphyry dike from Xiaokelehe in north Da Hinggan Mountains: Constraints from zircon U-Pb age, geochemistry and Hf isotopic composition [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2021, 51(6): 1753-1769.
- [51] 孟恩, 许文良, 杨德彬, 等. 满洲里地区灵泉盆地中生代火山岩的锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2011, 27(4): 1209-1226.
Meng E, Xu W L, Yang D B, et al. Zircon U-Pb chronology, geochemistry of Mesozoic volcanic rocks from the Lingquan Basin in Manzhouli area, and its tectonic implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(4): 1209-1226.
- [52] Koppers A A P, Morgan J P, Morgan J W, et al. Testing the fixed hotspot hypothesis using $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age progressions along seamount trails [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 185 (3/4): 237-252.
- [53] 张旗. 中国东部中生代岩浆活动与太平洋板块向西俯冲有关吗? [J]. *岩石矿物学杂志*, 2013, 32(1): 113-128.
Zhang Q. Is the Mesozoic magmatism in eastern China related to the westward subduction of the Pacific Plate? [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2013, 32(1): 113-128.
- [54] 吴福元, 刘志超, 刘小驰, 等. 喜马拉雅淡色花岗岩[J]. *岩石学报*, 2015, 31(1): 1-36.
Wu F Y, Liu Z C, Liu X C, et al. Himalayan leucogranite: Petrogenesis and implications to orogenesis and plateau uplift [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(1): 1-36.
- [55] Metelkin D V, Vernikovskiy V A, Kazansky A Y, et al. Late Mesozoic tectonics of Central Asia based on paleomagnetic evidence [J]. *Gondwana Research*, 2010, 18(2/3): 400-419.
- [56] 黄始琪, 董树文, 张福勤, 等. 蒙古-鄂霍茨克构造带中段构造变形及动力学特征[J]. *地球学报*, 2014, 35(4): 415-424.
Huang S Q, Dong S W, Zhang F Q, et al. Tectonic deformation and dynamic characteristics of the middle part of the Mongolia-Okhotsk collisional belt, Mongolia [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2014, 35 (4): 415-424.

(上接第 434 页/Continued from Page 434)

- [15] 韩春阳, 潘俊, 康然然, 等. 沈阳城区水源热泵适宜性评价[J]. *地下水*, 2011, 33(3): 48-49.
Han C Y, Pan J, Kang R R, et al. Application of water source heat pump in Shenyang urban area[J]. *Ground Water*, 2011, 33(3): 48-49. (in Chinese)
- [16] 赵智强. 咸阳市地下水地源热泵适宜性评价[D]. 北京: 中国地质大学, 2016.
Zhao Z Q. Suitability evaluation of groundwater source heat pump in Xianyang [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016.
- [17] 李卫洲. 山东省临沂市浅层地热能特征及开发利用[D]. 北京: 中国地质大学, 2019.
Li W Z. Characteristics and development-utilization of shallow geothermal energy in Linyi City, Shandong Province [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019. (in Chinese)
- [18] 周阳, 穆根胥, 刘建强, 等. 基于层次分析法的关中盆地主要城市浅层地热能适宜性分区特征研究[J]. *节能*, 2017, 36(2): 24-27.
Zhou Y, Mu G X, Liu J Q, et al. Geothermal energy zoning in shallow layer of major cities in Guanzhong Basin based on analytic hierarchy process [J]. *Energy Conservation*, 2017, 36(2): 24-27. (in Chinese)
- [19] 王涛. 宁夏沿黄河经济带重点城市浅层地热能利用适宜性评价研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
Wang T. Suitability evaluation on the shallow geothermal energy in major cities along the Yellow River, Ningxia section [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [20] 侯娟. 渭南市浅层地温能开发利用适宜性分区与资源评价[D]. 西安: 长安大学, 2016.
Hou J. Research the suitable and evaluate the energy of the shallow geothermal resources in Weinan City [D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.
- [21] 王楠. 长春市城区浅层地热能评价及地下水源地热泵采灌模式研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
Wang N. Research on the evaluation of shallow heat energy and the pumping-reinjection mode of groundwater source heat pump in Urban Area of Changchun [D]. Changchun: Jilin University, 2016.