

# Suitability Evaluation of Shallow Geothermal Energy on Analytic Hierarchy Process

—As an Example in the Central Urban Area of Lanzhou City

Linsen Wei<sup>1</sup>, Hongwei Ding<sup>2\*</sup>, Ting Wang<sup>1</sup>, Bin Fan<sup>1</sup>, Liang Kang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>No. 2 Geology and Mineral Exploration Team, Gansu Provincial of Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Lanzhou Gansu

<sup>2</sup>Gansu Provincial of Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Lanzhou Gansu  
Email: 3451880@qq.com, \*zydhw8029@163.com

Received: Oct. 5<sup>th</sup>, 2016; accepted: Oct. 25<sup>th</sup>, 2016; published: Oct. 28<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

## Abstract

Based on the actual survey data and the test data, the shallow geothermal energy of Lanzhou city center (the area of 384.7 km<sup>2</sup>) is evaluated and classified by the way of analytic hierarchy process (AHP). In the evaluation system, 3 criteria and 10 indicators are established for underground water source heat pump, 3 criteria and 8 factors for soil source heat pump, all levels of judgment matrix are constructed and precision through consistency checking. The results show that the area of underground water source heat pump suitable and suitable for the survey area with a total area of 38.99%, which mainly distributed in the fault basin, Yellow River level I - III and the large parts basin of Heping and Dingyuan that the water rich water content is better, the single well water inflow 1000 - 5000 m<sup>3</sup>/d, the mineralization degree is less than 1.0 g/L. The soil source heat pump suitable and suitable areas for 68.57% of the total area of the survey area, which mainly distributed on both sides of the Yellow River level III - IV higher-order region and the Loess Hilly transition zone, Heping and Dingyuan basin, which aeration with fine grain layer thickness is greater than 20 - 40 m, groundwater depth more than 25 m. The rest of the survey area is not suitable for the construction of shallow geothermal energy. The research results have an important guiding role for the development and utilization of shallow geothermal energy in the central urban area of Lanzhou city.

## Keywords

Shallow Geothermal Energy, Groundwater and Soil Source, Heat Pump, Suitability Division, Analytic Hierarchy Process (AHP)

\*通讯作者。

# 基于层次分析法的浅层地温能适宜性评价分析

## —以兰州市中心城区为例

魏林森<sup>1</sup>, 丁宏伟<sup>2\*</sup>, 王 婷<sup>1</sup>, 范 斌<sup>1</sup>, 康 亮<sup>2</sup>

<sup>1</sup>甘肃省地矿局第二地质矿产勘查院, 甘肃 兰州

<sup>2</sup>甘肃省地质矿产勘查开发局, 甘肃 兰州

Email: 3451880@qq.com, zydhw8029@163.com

收稿日期: 2016年10月5日; 录用日期: 2016年10月25日; 发布日期: 2016年10月28日

### 摘 要

依据实际勘查资料和测试数据, 采用层次分析法所建立的数学评价模型, 对兰州市中心城区面积 384.7 km<sup>2</sup> 的区域进行了浅层地温能适宜性评价分析。浅层地温能适宜性评价体系地下水源热泵共建立了 3 个属性准则和 10 个要素指标, 土源热泵共建立了 3 个属性准则和 8 个要素指标, 分别构建了各层次的判断矩阵, 并全部高精度通过一致性验证。评价结果, 地下水源热泵适宜、较适宜区占调查区总面积的 38.99%, 主要分布于断陷盆地及黄河黄河 I~III 级阶地区及和平、定远盆地大部等含水层富水性较好、单井涌水量 1000~5000 m<sup>3</sup>/d、矿化度小于 1.0 g/L 的地带; 土源热泵适宜、较适宜区占调查区总面积的 68.57%, 主要分布于黄河两岸 III~IV 级高阶地区与黄土丘陵过度地带及和平、定远盆地等包气带细颗粒地层厚度大于 20~40 m、地下水位埋深大于 25 m 的地带; 调查区其余地带不适宜浅层地温能的建设。评价结果对兰州市中心城区浅层地温能的开发利用具有重要的指导作用。

### 关键词

浅层地温能, 地下水源与土源, 热泵, 适宜性划分, 层次分析法

## 1. 引言

浅层地温能是指地表以下一定深度范围内(一般指恒温带至 200 m 埋深), 温度低于 25℃, 广泛存在于岩石、包气带土壤及地下水等介质中, 在当前技术经济条件下具备开发利用价值的地球内部的热能资源。目前, 浅层地温能的利用主要是通过热泵技术的热交换方式, 连续不断的将储存于浅部地层中的低品位热能转化为人类可以利用的高品位能源(供热、制冷), 具有取用方便、无污染、运行费用低等特点, 是全球各国特别是欧美发达国家(如美国、德国等)正在大面积推广利用的绿色环保能源[1]。

兰州市是甘肃省政治、经济、文化和科技中心, 也是我国西北地区重要的交通枢纽。中心城区面积 384.7 km<sup>2</sup>, 包括城关、七里河、西固和安宁四个区, 总人口约 2.60 × 10<sup>6</sup> 人, 是全省人口最稠密、经济最发达的区域。受自然地理等条件的制约, 兰州市中心城区存在的生态环境脆弱、地质灾害频发、夏季电力能源负荷重、冬季燃煤取暖引起的大气污染等一系列问题, 严重影响着兰州市投资环境的改善和人民生活质量的提高。近年来, 随着国家“一带一路”战略的逐步实施, 兰州市经济呈现快速发展的态势, 对能源的需求日益增长, 为浅层地温能资源的开发利用创造了必要条件。因此, 研究浅层地温能的开发利用条件, 定量评价其应用的适宜性, 对于改善兰州市中心城区大气环境, 提升城市品位, 创造宜居宜游的投资环境, 实现 2020 年与全国同步进入小康社会的战略目标等, 均具有重要的现实意义。

## 2. 自然地理及水文地质条件

兰州市中心城区地处陇西黄土高原间的黄河上游谷地, 总体呈现“两山夹一谷”地貌特征。谷地呈长条型东西向展布, 长约 50 km, 宽约 1.0~7.5 km, 海拔 1500~1550 m; 南北两侧为黄土丘陵, 海拔 1700~2500 m。属大陆性温带半干旱季风气候区, 具有冬季漫长寒冷、春季风沙多、夏季短暂炎热、昼夜温差大、降水少且时空分布极不均匀等气候特征。多年平均气温 9.1℃; 多年平均降水量 316.7 mm, 7~9 月降水量占全年的 60% 以上; 蒸发量 1650 mm/a。黄河是主要过境河流, 自西向东穿越中心城区, 多年平均径流量 345.9 亿 m<sup>3</sup> (中山桥站)。

兰州市中心城区在大地构造上隶属于昆仑-秦岭地槽褶皱系祁连隆起带东部的断陷河谷盆地, 丘陵山地及盆地边界、基底褶皱及断裂构造发育。盆地周边及基底主要为古生界前寒武系( $An\in$ )深变质岩、加里东中期侵入岩( $\gamma_3^2$ )及中生界白垩系(K) - 新生界古近系(E)、新近系(N)碎屑岩组成; 盆地内则广泛分布数百米厚的第四系(Q)松散岩类, 其间所赋存的孔隙水甚为丰富。

松散岩类孔隙水可进一步划分为河谷潜水和断陷盆地潜水 - 微承压水(图 1)。河谷潜水主要分布于黄河 I~II 级阶地及河漫滩砂砾卵石中, 下伏以透水性较弱的新近系、白垩系泥质砂岩构成隔水底板; 地下水主要补给源为黄河径流入渗和河谷上游地下径流流入, 局部盆地边界存在丘陵区基岩裂隙水、碎屑岩类孔隙裂隙水的侧向补给; 地下水大致沿河流发育方向自上游向下游径流, 水力坡度 6‰~12‰; 现状主要以地下潜流的方式排泄于黄河; 水位埋深河漫滩一般小于 2 m, I~II 级阶地 5~15 m, III 级及以上阶地 20~60 m; 含水层以卵石、圆砾为主, 厚度 10~30 m, 单井涌水量一般 500~2000 m<sup>3</sup>/d; 低阶地地下水矿化度小于 1.0 g/L, 化学类型为 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Ca<sup>2+</sup>-Mg<sup>2+</sup>; III 级及以上阶地至南北丘陵地带矿化度一般大于 3.0 g/L, 地下水类型以 Cl<sup>-</sup>-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-Ca<sup>2+</sup>-Mg<sup>2+</sup> 为主。潜水-微承压水主要分布于河谷潜水区以外的第四纪断陷盆地内。地下水主要来源于黄河径流入渗和山区基岩裂隙水、碎屑岩类孔隙裂隙水的侧向补给, 以人工开采、泉水溢出和地下潜流的方式排泄; 含水层仍以卵石、圆砾等占主体, 期间夹有厚度不等的粉质粘土, 厚度 200~316 m, 上覆大厚度的黄土及黄土状粉土; 地下水埋深在黄河以南为 15~120 m, 黄河以北 15~30 m, 自南北两侧向中部黄河渐浅; 单井涌水量 3000~5000 m<sup>3</sup>/d, 地下水矿化度一般小于 1 g/L, 地下水类型以 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-Ca<sup>2+</sup>-Mg<sup>2+</sup> 或 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Ca<sup>2+</sup>-Mg<sup>2+</sup> 型为主[2]。另外, 调查区内无地面沉降及地裂缝等工程地质问题。为浅层地温能的开发利用提供了良好的地质、水文地质条件。

## 3. 数据来源与评价方法

### 3.1. 数据来源

2012~2013 年, 我院承担完成了中国地质调查局“兰州市浅层地温能调查评价”项目[2]。调查精度为 1:2.5 万, 其中中心城区调查面积为 384.7 km<sup>2</sup>; 完成各类调查点 103 个(中心城区, 下同), 对每个调查点进行了 GPS 精确定位和地形地貌、地质构造、地层包气带岩性、地下水类型、水位埋深、地下水开采量及建筑物覆盖率等方面的调查; 对区内已有 18 处浅层地温能开发利用工程进行了热源形式、供暖制冷面积、机组配备及功率、运行效率等方面进行了调查; 完成水文地质钻探 1150 m/9 孔, 其中抽水回灌试验孔 355.00 m/5 孔, 进行稳定流、非稳定流抽水试验 240 h/5 孔, 回灌试验 360 h/5 孔, 热响应试验孔 795.00 m/4 孔, 热响应试验 48 h/4 组, 进行了无负荷及 3~5 kW、6~10 kW 负荷的循环测试; 完成地温监测 474 次/14 点, 地下水位、水温监测 2897 次/29 点; 采集包气带原装土样 210 组、水样 82 组(地下水 81 组、地表水 1 组)。

根据浅层地温能适宜性评价体系, 对确定参与评价的所有要素指标分别编绘了平面分区图系, 其中地下水源热泵包括含水层出水能力分区图、含水层结构分区图、含水层回灌能力分区图、有效含水层厚

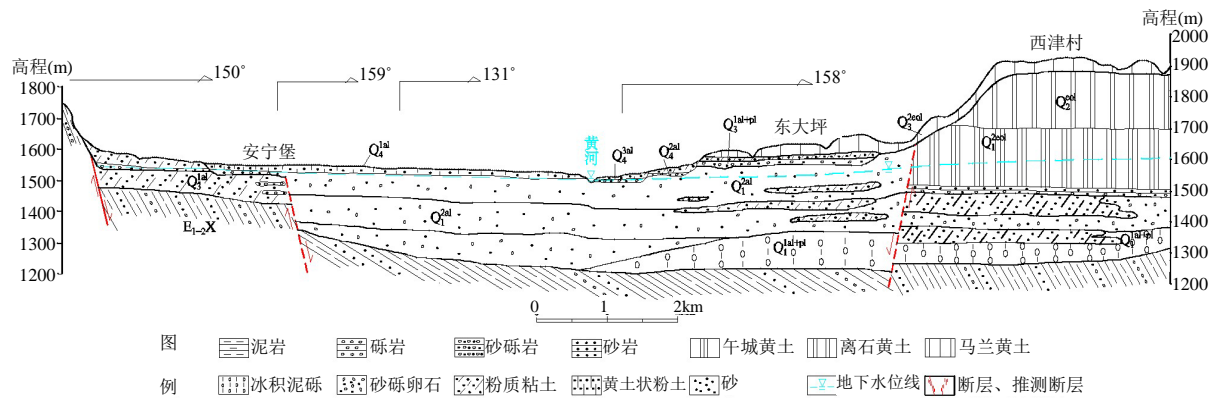


Figure 1. The hydrogeological profile the north to south of Lanzhou City

图 1. 兰州市城区南北向水文地质剖面图

度分区图、地下水位埋深分区图、含水层渗透系数分区图、地下水补给模数分区图、地下水位动态分区图、地下水矿化度分区图、地下水总硬度分区图共计 10 个图层；土源(地埋管式，下同)热泵包括第四系松散层厚度分区图、地下水径流坡度分区图、地层平均比热容分区图、地层综合热传导系数分区图、钻进条件分区图、城市覆盖率分区图共计 8 个图层。为了提高评价精度，将调查区按照  $1\text{ km} \times 1\text{ km}$  规则网格剖分为 387 个单元，平均单元面积为  $0.9941\text{ km}^2$ ，提取中心网格点坐标并编号，依据平面分区图系分别计取每个单元中心点的各要素指标值，形成数据库以备使用。

### 3.2. 评价方法及步骤

采用层次分析法(Analytic Hierarchy Process, 简称 AHP 法)对浅层地温能适宜性进行评价。该方法是一种集系统化和层次化为一体的多目标决策分析方法，能够将实测数据、专家评分及分析者的客观判断有效地结合起来。其特点是能够将决策者的经验判断给予量化，在目标因素结构复杂且缺乏必要数据的情况下使用更为方便。层次分析法基本思路为：首先，依据所分析问题的性质及要达到目标，将各评价指标及因子按照其属性和隶属关系建立指标评价体系；其次，将同层不同评价指标及因子相互比较，并给各指标的相对重要性予以量化描述，构造判断矩阵；然后，由判断矩阵计算每层各指标的相对重要性次序值(权重)，并做一致性检验；最终，依据建立的评价数学模型确定指标层影响因子对系统总目标的综合评价结果。限于篇幅，详细评价方法及步骤见文献[3] [4]。

## 4. 评价数学模型

### 4.1. 建立评价指标体系

合理确定浅层地温能评价指标体系是对其适宜性进行正确评价的基础[5] [6] [7]。根据兰州市中心城区浅层地温能影响因素的特点，并通过对国内外已有研究成果的分析研判，分别建立了地下水源热泵(图 2)和土源热泵(图 3)浅层地温适宜性评价体系。评价体系由三个层次构成，第一层次为体系目标层，即地下水源热泵和土源热泵适宜性评价；第二层次为属性准则层，对地下水源热泵而言对应的是水文地质条件、地下水动力场条件和地下水化学场条件，对土源热泵而言对应的是地质及水文地质条件、地层热物理性质系数、施工条件；第三层次为要素指标层，对地下水源热泵而言对应的是 3 个准则层下属的含水层出水能力等 10 个要素指标，对土源热泵而言对应的是 3 个准则层下属的第四系松散层厚度等 8 个要素指标。

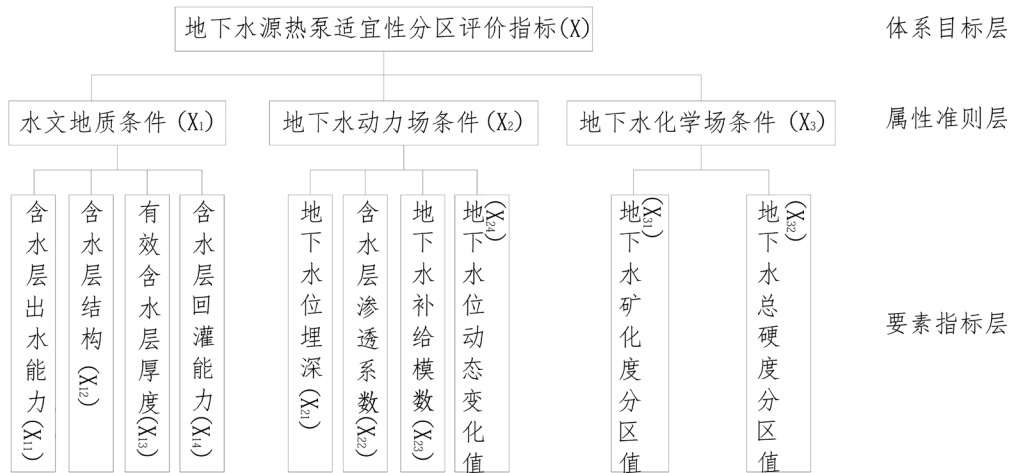


Figure 2. Suitability evaluation system of groundwater source heat pump  
图 2. 地下水热源适宜性评价体系



Figure 3. Suitability evaluation system of soil source heat pump  
图 3. 土源热泵适宜性评价体系

#### 4.2. 各层次判断矩阵确定

在层次结构中,对隶属于(或影响)上一层的每个因素的同一层诸因素进行两两比较,比较其对于准则的重要程度,并按事前规定的标度定量化,构成判断矩阵。判断矩阵中各元素的数值由多名经验丰富的专业技术人员集中群体智慧对其相对重要性进行评估打分[5] [6] [7] [8] [9]。本文采用指数标度构造各层次判断矩阵(表 1),并构建了调查区地下水源和土源热泵要素指标层判断矩阵(表 2、表 3)。

#### 4.3. 影响因素权向量确定及判断矩阵一致性检验

根据判断矩阵,利用线性代数知识,精确求出判断矩阵最大特征根所对应特征向量。所求特征向量即为各评价因素的重要性排序,经归一化处理后即为同一层次相应因素对于上一层次某因素相对重要性的排序权值。为检验根据判断矩阵求出的特征向量的合理性,需对判断矩阵的一致性进行检验,其检验公式为:  $Rc = Ic/I_R$ , 其中:  $Rc$  为一致性比例;  $Ic$  为一致性指标,  $Ic = (\lambda_{max} - n)/(n - 1)$ ,  $\lambda_{max}$ ——判断矩阵最大特征值;  $n$ ——地下水源或土源热泵要素指标数量;  $I_R$  为平均随机一致性指标,其取值见表 4。当  $Rc < 0.1$  时,认为判断矩阵的一致性满足要求,否则需对判断矩阵进行修正;  $Rc$  值越小,判断矩阵一

**Table 1.** Index scale of  $a^n$  ( $a = 1.316$ )  
**表 1.** 指数标度  $a^n$  ( $a = 1.316$ )

$n$	0	2	4	6	8
标度 $a_{jk}$	1.000	1.732	3.000	5.194	9.000
评语	同等重要	稍微重要	明显重要	强烈重要	极端重要
中间插值	需要做这种处理时(k=1, 3, 5, 7)按照公式 $1.316^n$ 计算				

**Table 2.** Factor index layer contrast matrix of groundwater source heat pump  
**表 2.** 地下水源热泵要素指标层对比矩阵

水文地质条件	含水层出水能力	含水层结构	有效含水层厚度	含水层回灌能力
含水层出水能力	1.000	5.194	3.000	9.000
含水层结构	1.732	1.000	2.279	1.732
有效含水层厚度	9.000	1.732	1.000	5.194
含水层回灌能力	5.194	6.835	5.194	1.000
地下水动力场条件	水位埋深	渗透系数	地下水补给模数	水位动态变化值
地下水位埋深	1.000	3.000	1.732	1.732
含水层渗透系数	1.732	1.000	5.194	1.732
地下水补给模数	1.732	5.194	1.000	1.732
水位动态变化值	1.732	1.732	3.000	1.000
地下水化学场条件	矿化度分区值		总硬度分区值	
矿化度分区值	1.000		3.000	
总硬度分区值	5.194		1.000	

**Table 3.** Factor index layer contrast matrix of soil source heat pump  
**表 3.** 土源热泵要素指标层对比矩阵

地质及水文地质条件	第四系松散层厚度	水位埋深	地下水径流坡度	地下水矿化度
松散层厚度	1.000	5.194	3.000	9.000
水位埋深	1.732	1.000	2.279	1.732
地下水径流坡度	9.000	1.732	1.000	5.194
地下水矿化度	5.194	6.835	5.194	1.000
地层热物理性质参数	地层平均比热容		地层热传导系数	
地层平均比热容	1.000		5.194	
地层热传导系数	3.000		1.000	
施工条件	钻进条件		城市覆盖率	
钻进条件	1.000		5.194	
城市覆盖率	3.000		1.000	

**Table 4.** Random consistency checking index of index scale  
**表 4.** 平距随机一致性指标

矩阵阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$I_R$	0	0	0.36	0.58	0.72	0.82	0.88	0.93	0.97	0.99	1.01	1.03	1.04

致性检验越高,建立的数学评价模型越合理。由此,最终确定了调查区地下水源和土源热泵要素指标层对属性准则层和体系目标层权重,并全部通过了一致性检验(表 5、表 6)。计算结果表明,地下水源和土源热泵要素指标层所占体系目标层权重的一致性检验结果分别为 0.0185 和 0.0120,说明所建立的浅层地温能适宜性评价指标体系属性准则层、要素指标层齐全,构建的判断矩阵及计算的各层次权重合理。

#### 4.4. 建立评价数学模型

##### 1) 指标层影响因素数值无量纲化处理

由于指标层各影响因素的量纲不同,且其量值相差较大,为便于计算与分析,需将指标层各影响因素实测值进行无量纲化处理,处理方法为:

$$X_{ijw} = (X_{ij} - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (1)$$

其中:  $X_{ijw}$  为指标层各影响因素处理后值;  $X_{ij}$  为指标层各影响实测值;  $X_{\max} = \max[X_{ij}]$ ;  $X_{\min} = \min[X_{ij}]$ 。

##### 2) 浅层地温能适宜性评价数学模型

根据构建的评价体系、选取的要素指标因子和确定的要素指标因子权重,形成的浅层地温能适宜性评价数学模型为:

$$B = \sum_j^n a_j X_j \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

其中:  $B$ ——浅层地温能适宜性评价指标指数;  $a_j$ ——第  $j$  个要素指标因子在目标层中所占的权重;  $X_j$ ——第  $j$  个要素指标因子的赋值;  $n$ ——地下水源或土源热泵指标要素数量。

### 5. 浅层地温能适宜性分区结果及评价

#### 5.1. 浅层地温能适宜性分区标准

根据公式(2)B 值计算结果,结合区内已建成的地源热泵工程,并参考北京、天津浅层地温能适宜性分区标准[5] [6],将评价区浅层地温能热泵(地下水源、土源热泵)适宜性划分为适宜( $B = 7\sim 9$ )、较适宜( $B = 5\sim 7$ )和不适宜( $B < 5$ )三个区。

#### 5.2. 浅层地温能适宜性分区结果及评价

##### 1) 浅层地温能适宜性分区结果

按上述适宜性评价模型计算结果(图 4、图 5),兰州市中心城区地下水源热泵适宜区面积为  $35.6 \text{ km}^2$ ,占调查区总面积的 9.25%,共有 31 个网络点分布于该区, B 值介于 7.0128~9.2201 之间;地下水源热泵较适宜区面积为  $114.4 \text{ km}^2$ ,占调查区总面积的 29.74%,共有 104 个网络点分布于该区, B 值介于 5.0217~6.9935 之间;地下水源热泵不适宜区面积为  $234.7 \text{ km}^2$ ,占调查区总面积的 61.01%,共有 252 个网络点分布于该区, B 值介于 0.2485~4.8977 之间。地下水源热泵适宜区、较适宜区面积为  $123.65 \text{ km}^2$ ,占调查区总面积的 38.99%。

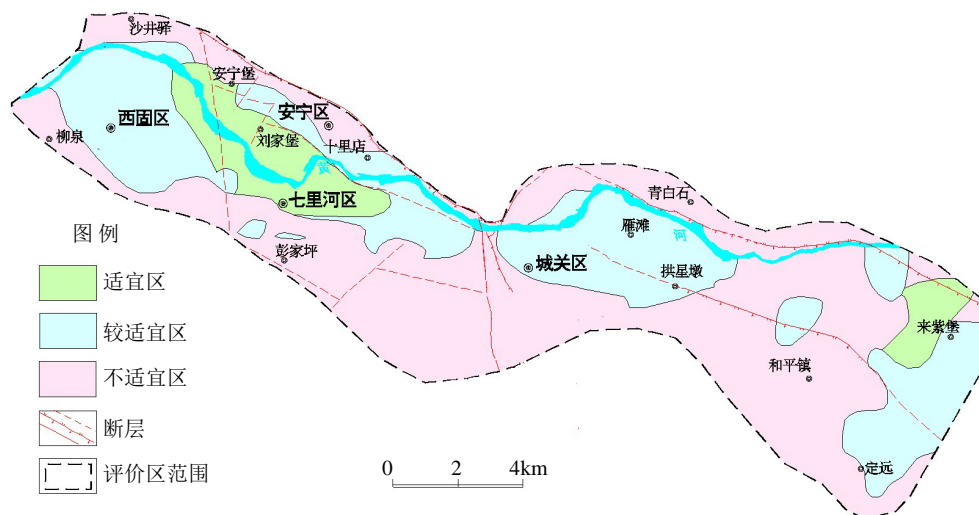
兰州市中心城区土源热泵适宜区面积为  $67.9 \text{ km}^2$ ,占调查区总面积的 17.65%,共有 52 个网络点分布于该区, B 值介于 7.0007~9.3543 之间;土源热泵较适宜区面积为  $195.9 \text{ km}^2$ ,占调查区总面积的 50.92%,共有 188 个网络点分布于该区, B 值介于 5.0023~6.9981 之间;土源热泵不适宜区面积为  $120.9 \text{ km}^2$ ,占调查区总面积的 31.43%,共有 147 个网络点分布于该区, B 值介于 2.5487~4.9695 之间。土源热泵适宜区、较适宜区面积为  $263.80 \text{ km}^2$ ,占调查区总面积的 68.57%。

**Table 5.** The weight and consistency test results of groundwater source heat pump at different levels  
**表 5.** 地下水源热泵各层次所占权重及一致性检验结果

体系目标层	属性准则层/占体系目标层权重 一致性检验结果	要素指标层/占属性准则层权重 一致性检验结果	要素指标层占体系目标层权重 一致性检验结果
地下水 源热泵 适宜性	水文地质条件 /0.6667	含水层出水能力/0.3315	0.2210
		含水层结构/0.1716	0.0446
		有效含水层厚度/0.1473	0.0848
		含水层回灌能力/0.3315	0.2210
		地下水位埋深/0.2589	0.0741
	地下水动力场条件 /0.2222	含水层渗透系数/0.2476	0.0952
		地下水补给模数/0.3315	0.1366
		水位动态变化值/0.1342	0.0256
	地下水化学场条件 /0.1110	矿化度分区值/0.6667	0.0370
		总硬度分区值/0.3333	0.0416

**Table 6.** The weight and consistency test results of soil source heat pump at different levels  
**表 6.** 土源热泵各层次所占权重及一致性检验结果

体系目标层	属性准则层/占体系目标层权重 一致性检验结果	要素指标层/占属性准则层权重 一致性检验结果	要素指标层占体系目标层权重 一致性检验结果
土源热 泵适宜 性	地质及水文地质条 件/0.3275	松散层厚度/0.3919	0.2599
		地下水位埋深/0.2396	0.1767
		地下水径流坡度/0.1634	0.0859
		地下水矿化度/0.1970	0.0972
	地层热物理性质参 数/0.4126	地层平均比热容/0.6667	0.2063
		地层热传导系数/0.3333	0.1153
	施工条件/0.2599	钻进条件/0.5000	0.0211
		城市覆盖率/0.5000	0.0256



**Figure 4.** The groundwater source heat pump suitability division in central area of Lanzhou City  
**图 4.** 兰州市中心城区地下水水源热泵适宜性分区图



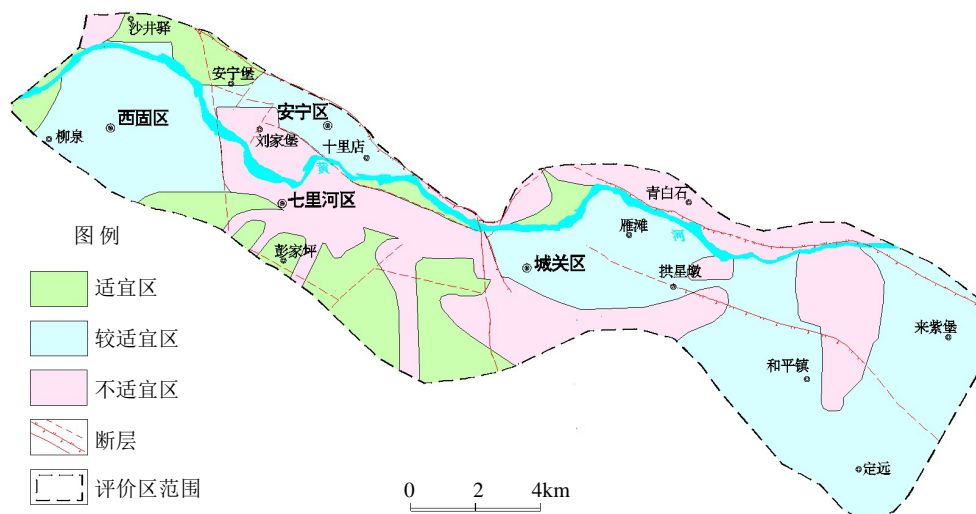


Figure 5. The soil source heat pump suitability division in central area of Lanzhou City  
图 5. 兰州市中心城区土源热泵适宜性分区图

## 2) 浅层地热能适宜性分区评价

地下水源热泵适宜区仅分布于中心城区断陷盆地内的七里河区~安宁区黄河两岸 I~II 级阶地及城关区东部的来紫堡西北, 区内第四系砾卵石含水层厚度一般为 150~200 m, 最厚处可达 340 m, 单井涌水量一般为 3000~5000 m<sup>3</sup>/d, 最大可达 5000 m<sup>3</sup>/d 以上, 矿化度小于 1.0 g/L, 化学类型为 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Ca<sup>2+</sup>-Mg<sup>2+</sup>, 开采井和回灌井比例为 1:1; 地下水源热泵较适宜区分布于除断陷盆地外黄河河谷 I~III 级阶地地区及和平、定远盆地大部, 地层岩性具有二元结构, 下部第四系砾卵石含水层厚度一般为 3~25 m, 单井涌水量 1000~3000 m<sup>3</sup>/d, 矿化度小于 1.0 g/L, 化学类型为 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Ca<sup>2+</sup>-Mg<sup>2+</sup>或 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-Ca<sup>2+</sup>-Mg<sup>2+</sup>, 开采井和回灌井比例为 1:1~1:2; 地下水源热泵不适宜区分布于黄河水域、安宁区沙井驿~十里店、西固区柳泉乡~城关区五泉山、城关区皋兰山~桑园子、城关区白塔山~圆湾子等黄河高阶地与黄土丘陵、基岩山地过度地带及和平、定远盆地四周丘陵山区, 含水层厚度一般小于 3 m 或不含水, 单井涌水量小于 100 m<sup>3</sup>/d, 矿化度多大于 1.0~3.0 g/L, 开采井和回灌井比例大于等于 1:3。

土源热泵适宜区分布于西固区柳泉乡、安宁区沙井驿~安宁堡、七里河区五星坪~西津坪、骚狐滩、城关区盐场堡等黄河 III~IV 级高阶地与黄土丘陵的过度地带, 区内包气带黄土厚度大于 20~40 m, 地层热导率 2.2~2.8 W/m·°C, 比热容 0.3~0.6 kJ/Kg·°C, 地下水位埋深大于 25 m; 土源热泵较适宜区分布于西固区西固城、安宁区安宁堡~十里店、城关区西关~桑园子等除适宜区以外的黄河 I~IV 阶地及和平、定远盆地, 包气带黄土、粉土、砂砾卵石厚度大于 20 m, 地层热导率 2.2~2.8 W/m·°C, 比热容 0.3~0.6 kJ/Kg·°C, 基底为新近系、白垩系泥岩夹砂岩或前寒武系片岩, 地下水位埋深大于 20 m; 土源热泵不适宜区分布于黄河水域、断陷盆地北部及安宁区十里店-圈湾子、皋兰山-姚树坪、营盘山等基岩山区或黄土丘陵, 包气带细颗粒地层厚度小于 15 m, 下部为大厚度的砾卵石层和前寒武系片岩、侵入岩, 且大部分地带崩塌、滑坡、泥石流地质灾害发育。

## 6. 结论

1) 兰州市地处西北黄土高原间的黄河上游河谷地带, 人口稠密, 重工业发达, 近几十年来强烈的人类工程活动及特殊的地形地貌、气象水文等自然地理条件, 使得区内地质灾害发育, 大气污染问题突出, 成为制约社会经济可持续发展的瓶颈, 而相对优越的地质及水文地质禀赋条件为浅层地温能的规模利用

提供了得天独厚的开发利用环境。

2) 依据“兰州市浅层地温能调查评价”项目实测数据,采用目前国内外流行的层次分析法(AHP)对兰州市中心城区(面积 384.7 km<sup>2</sup>)浅层地温能适宜性进行了评价。地下水源热泵评价指标划分为水文地质条件、地下水动力场条件、地下水化学场条件 3 个属性准则层和含水层出水能力、含水层结构、有效含水层厚度、水位埋深、地下水矿化度等 10 个要素指标层;土源热泵评价指标划分为地质及水文地质条件、地层热物理参数、施工条件 3 个属性准则层和第四系松散层厚度、水位埋深、地层平均比热容、地层综合热传导系数等 8 个要素指标层;构建了各评价体系各层次的判断矩阵和各要素指标对属性准则层、体系目标的权重,并全部高精度的通过了一致性检验,说明各评价体系属性准则层和要素指标层齐全,相对重要性量化合理,所占权重计算正确,进而建立了兰州市中心城区浅层地温能适宜性数学评价模型。

3) 根据数学评价模型计算结果,兰州市中心城区地下水源热泵适宜区、较适宜区面积为 123.65 km<sup>2</sup>,占调查区总面积的 38.99%,主要分布于中心城区断陷盆地及黄河两岸 I~III 级阶地区及和平盆地、定远盆地大部,含水层富水性较好,单井涌水量 1000~5000 m<sup>3</sup>/d,局部地带大于 5000 m<sup>3</sup>/d,矿化度小于 1.0 g/L,化学类型为 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Ca<sup>2+</sup>-Mg<sup>2+</sup>或 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-Ca<sup>2+</sup>-Mg<sup>2+</sup>,开采井和回灌井比例为 1:1~1:2;其他地带由于含水层富水性弱,不适宜地下水源热泵工程的建设,面积为 234.7 km<sup>2</sup>,占调查区总面积的 61.01%。兰州市中心城区土源热泵适宜区、较适宜区面积为 263.80 km<sup>2</sup>,占调查区总面积的 68.57%,主要分布于黄河两岸 III~IV 级高阶地区与黄土丘陵过度地带及和平、定远盆地,区内包气带黄土厚度大于 20~40 m,地层热导率 2.2~2.8 W/m·°C,比热容 0.3~0.6 kJ/Kg·°C,地下水位埋深大于 25 m;其他地带由于包气带细颗粒地层厚度小于 15 m,下部为大厚度的砾卵石层和前寒武系片岩、侵入岩,且地表崩塌、滑坡、泥石流地质灾害发育,不适宜地埋管式热泵工程的建设,面积为 120.9 km<sup>2</sup>,占调查区总面积的 31.43%。兰州市中心城区土源热泵适宜性远大于地下水源热泵,有巨大的供暖、制冷潜力。

4) 从本次评价结果看,兰州市中心城区浅层地温能适宜性划分与当地地质及水文地质条件高度吻合,评价结果符合实际条件。说明选择的评价方法合理,评价要素齐全,建立的数学评价模型正确。评价结果不但对兰州市中心城区浅层地温能建设具有重要的指导作用,而且可以在西北类似地区浅层地温能资源开发利用方面推广应用。

## 基金项目

中国地质调查局兰州市浅层地温能调查项目(121201120052、1212011220829)资助。

## 参考文献 (References)

- [1] 廖汉光. 地源热泵在欧美国国家的发展概况[J]. 工程建设与设计, 2007, 12(3): 6-10.
- [2] 魏林森, 张凌鹏, 王婷. 兰州市浅层地温能调查评价报告[R]. 兰州: 甘肃省地矿局第二地质矿产勘查院, 2013: 10-102.
- [3] Saaty, T.L. (1980) The Analytical Hierarchy Process. McGraw Hill, New York.
- [4] Lulseged, A., Hiromitsu, Y. and Hideaki, M. (2005) Landslides in Sado Island of Japan: Part II. GIS-Based Susceptibility Mapping with Comparisons of Results from Two Methods Verifications. *Engineering Geology*, 432-445.
- [5] 卫万顺, 李宁波, 冉伟彦. 中国浅层地温能资源[M]. 北京: 中国大地出版社, 2010: 30-85.
- [6] 卫万顺, 郑桂森, 栾英波. 北京平原区浅层地温场特征及其影响因素研究[J]. 中国地质, 2010, 37(6): 1733-1739.
- [7] 栾英波. 浅层地温能资源开发利用发展综述[M]. 地质与勘探, 2013, 49(2): 379-383.
- [8] 韩再生, 冉伟彦, 佟红兵. 浅层地热能勘查评价[J]. 中国地质, 2007, 34(6): 1115-1121.
- [9] 赵军. 地源热泵技术与建筑节能应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007: 45-95.

**期刊投稿者将享受如下服务：**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[ag@hanspub.org](mailto:ag@hanspub.org)