

西安市主城区地下水源热泵适宜性分区

马聪^{a,b}, 周维博^{a,b}, 李娜^{a,b}

((长安大学 a. 环境科学与工程学院; b. 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 西安 710054))

摘要: 根据西安市主城区水文地质条件和环境保护条件, 建立了西安市地下水源热泵适宜性评价体系, 利用最小信息熵原理将主观赋权法(层次分析法)和客观赋权法(熵值法)相结合得到各评价指标的组合权重。在确定了评分体系的基础上, 采用综合指数法得到西安市主城区水源热泵适宜性分区结果: 研究区范围内, 地下水源热泵适宜区面积为 171.228 km², 较适宜区面积为 369.234 km², 不适宜区面积为 160.407 km², 禁建区面积为 131.002 km²。研究结果为西安市水源热泵的规划选址提供了依据。

关键词: 水文地质条件; 水源热泵; 组合权重; 综合指数法; 适宜性分区; 西安

中图分类号: TK 523 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)03-0156-04

Suitability Zonation for Groundwater Source Heat Pumps in Xi'an

MA Cong^{a,b}, ZHOU Wei bo^{a,b}, LI Na^{a,b}

(a. College of Environmental Science and Engineering; b. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecology in Arid Areas Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: The suitability evaluation system of groundwater source heat pumps was constructed based on the hydrogeological and environmental conditions in Xi'an. The comprehensive weight of each evaluation index was determined using the combination method of subjective weighting method (analytic hierarchy process method) and objective weighting method (entropy method) based on the minimum information theory. On the basis of the determined scoring system, the comprehensive index method was used to determine the suitability zonation results of groundwater source heat pumps in Xi'an. The results indicated that the more suitable area for groundwater source heat pumps is about 171.228 km², the less suitable area is 369.234 km², the unsuitable area is 160.407 km², and the construction forbidden area is 131.002 km². The results can provide a scientific basis for planning and site selection of water source heat pumps in Xi'an.

Key words: hydrogeological conditions; water source heat pump; comprehensive weight; composite index method; suitability zonation; Xi'an

随着社会经济的快速发展, 能源和环保问题日益突出, 浅层地热能作为一种清洁可再生能源日益受到人们的广泛重视^[1-2]。地下水源热泵技术是利用浅层地热能的一项重要技术, 被广泛应用于各类建筑系统^[3]。然而, 水源热泵是一项系统工程, 在不适宜地区盲目建立水源热泵系统, 会导致诸如热泵系统失效、地下水水质污染和回灌困难等问题, 不但造成了地下水资源的浪费, 甚至会引发地面沉降等一系列环境地质问题^[4]。近年来, 我国学者对北京^[5]、沈阳^[6]、天津^[7]等城市进行了水源热泵适宜性分区的研究, 取得了良好的经济环境效益。本文针对西安市主城区地下水源热泵系统的应用进行适宜性分区研究, 为西安市水源热泵技术因地

制宜、合理开发利用提供依据。

1 研究区水源热泵开发利用概况

西安市主城区地处中国内陆腹地关中平原, 位于暖温带半湿润大陆性季风气候区, 四季分明, 北临渭河, 土地面积为 831.87 km², 包括碑林、未央、灞桥、莲湖、雁塔、新城 6 个行政区。市区属于渭河二级阶地, 地下水埋深 1~40 m, 单井涌水量 1 000~3 000 m³/d, 地下水温度为 15℃~28℃。

自 2003 年开始, 西安市迄今已有 24 个水源热泵系统正常运行^[8]。十年的工程实践表明, 水源热泵系统的经济社会和环境效益显著, 节能减排效果明显。但是在应用中出现回

收稿日期: 2013-11-11 修回日期: 2014-04-22 网络出版时间: 2014-05-08

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2014.03.033.html>

作者简介: 马聪(1990-), 男, 河北沧州人, 硕士研究生, 主要从事水文地质方面的研究。E-mail: 1198150815@qq.com

通讯作者: 周维博(1956-)男, 陕西乾县人, 教授, 博士生导师, 从事水资源与水环境与节水灌溉和地下水方面的教学与研究。E-mail: zwbzyz823@163.com

灌困难和水资源浪费等问题,因此对西安市地下水源热泵进行系统化、标准化的评价十分必要。

2 地下水源热泵适宜性评价指标体系的建立

在水源热泵适宜性评价时,既要考虑适宜的水文地质条件,也要考虑环境地质因素的影响,但现有报道大都未考虑环境保护因子。鉴于此,笔者根据《浅层地热能勘查评价规范》^[9],将地下水源热泵适宜性评价体系分为2级:一级评价为考虑文地质条件的初步评价;二级评价为考虑环境保护要素的综合评价。

2.1 水文地质条件

水文地质条件是决定一个地区能否建设地下水源热泵的关键因素^[10]。通过对西安市主城区水源热泵系统开发利用影响因素的分析,结合当地的水文地质资料,确定了西安市地下水源热泵适宜性一级评价体系。该评价体系从顶层到底层分别由目标层、属性层和指标层3级层次结构构成:系统目标层为水文地质条件决定的适宜性初步评价;属性层由赋存条件、富水性及回灌条件、水化学条件组成;一级评价指标包括渗透系数、潜水埋深、含水层厚度、潜水富水性、抽灌比、承压水富水性、矿化度、水温和硬度等9项指标。

2.2 环境保护条件

地下水源热泵的开发利用应该以环境保护为先决条件。环境保护区主要包括水源地保护区、地面沉降严重区和地裂缝地区等。为了防止地质灾害的发生,将沉降速率大于100 mm/a的地区设为水源热泵禁建区;将距离地裂缝小于1500 m的地区作为界限指标,设为禁建区。

本文在对西安市主城区水文地质条件进行初步评价的基础上,将一级评价结果与环境保护要素进行叠加,“剔除”其中不利于保护环境的区域,最终得到西安市地下水源热泵适宜性分区结果。图1为构建的西安市地下水源热泵适宜性评价体系。

果数学理论依据很强,缺点是有时确定的权重值与实际情况不符。

为了尽可能的避免由主、客观赋权法的片面性对适宜性评价产生的影响,本文分别采用层次分析法和熵值法确定指标的主观权重和客观权重,然后将两种方法确定的权重值有效结合得到组合权重,在一定程度上克服了单一赋权法的不足,既兼顾到了专家对各评价指标的偏好,又规避了赋权的主观性,计算的组合权重更加合理。

3.1 层次分析法

层次分析法(Aalytic Hierarchy Process,简称AHP)是一种定性定量相结合的系统分析方法,被广泛地用于处理那些难以完全量化的决策问题^[11]。层次分析法采用“1~9”标度方法,将决策者对各评价指标的主观判断定量化,将评价指标之间的差异数值化。其建模过程包括以下四步:建立层次结构模型、构造判断矩阵、层次单排序及一致性检验、层次总排序及一致性检验。

3.2 熵值法

熵是由德国物理学家克劳修斯提出的用以描述系统状态的参量。信息熵的大小表示了系统不确定性的程度,某评价指标的熵值越小,表明该指标对决策的作用越大^[12]。熵值法是一种客观赋权方法,其根据同一指标观测值之间的差异来确定指标权重。本文利用研究区范围内18个观测点的评价指标值根据熵值法赋权步骤确定各评价要素的客观权重,计算结果见表1。

3.3 组合赋权

如上所述,利用层次分析法确定了指标的主观权重 $w_1(i)$,利用熵值法确定了指标的客观权重 $w_2(i)$ 后,为了使组合权重 $w(i)$ 与 $w_1(i)$ 和 $w_2(i)$ 尽可能接近,根据最小信息熵原理^[7]:

$$\min F = \sum_{i=1}^9 w(i) [1 \ln w(i) - \ln w_1(i)] + \sum_{i=1}^9 w(i) [1 \ln w(i) - \ln w_2(i)]$$

$$s. t. \sum_{i=1}^9 w(i) = 1, w(i) > 0$$

用Lagrange乘子法求解上述最优优化问题得:

$$w(i) = [w_1(i) w_2(i)]^{0.5} / \sum_{i=1}^9 [w_1(i) w_2(i)]^{0.5} \quad (i = 1, 2, \dots, 9)$$

表1为由以上方法计算得到的一级评价各指标的主观权重、客观权重和组合权重。

表1 一级评价指标权重计算结果

Table 1 Calculated weight values of level I evaluation indexes

权重	渗透系数	潜水埋深	含水层厚度	潜水富水性	抽灌比	承压水富水性	矿化度	水温	硬度
主观权重	0.195	0.060	0.114	0.178	0.178	0.178	0.051	0.016	0.030
客观权重	0.166	0.064	0.072	0.147	0.174	0.151	0.085	0.058	0.083
组合权重	0.184	0.063	0.092	0.165	0.180	0.167	0.067	0.031	0.051

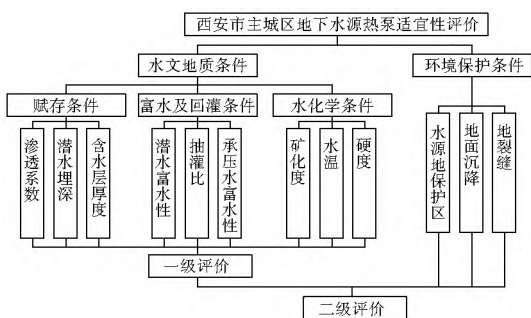


图1 西安市主城区地下水源热泵适宜性评价体系

Fig. 1 Suitability evaluation system of groundwater source heat pump systems in Xi'an

3 权重体系的确定

确定权重方法主要有主观赋权法和客观赋权法,两者各有优缺点。主观赋权法(如层次分析法、德尔菲法等)根据决策者的经验确定指标权重,得到的结果符合人们的常识,缺点是具有较大的主观性;客观赋权法(如熵值法、主成分分析法等)根据评价指标所提供的信息确定指标权重,得到的结

4 评分体系的建立

利用Surfer 9和MapGIS 6.7软件绘制各评价因子分区图^[13],包括渗透系数分区图、潜水埋深分区图、含水层厚度

分区图、潜水富水性分区图、抽灌比分区图、承压水富水性分区图、矿化度分区图、水温分区图、硬度分区图、水源地保护区分布图、地面沉降分布图、地裂缝分布图^[14]。

根据专家小组打分确定一级评价各指标不同分区的评分,分数越高,表明该区域越有利于应用地下水源热泵系统。对于渗透系数、含水层厚度、潜水富水性、抽灌比和承压水富水性等指标,其值越大,评分越高。由于矿化度、硬度、水温等指标会影响系统的热交换效率,其值越大,评分越低。对于潜水埋深,若埋深过浅,则回灌水位和静水位之间水头差太小,自流回灌困难;若埋深过大,则抽回灌井成井深度增加,在一定程度上加大了工程投资。结合实际情况,潜水埋深在 1 030 m 时地下水的抽回灌都比较适宜,故评分最高。表 2 给出了一级评价各指标的适宜性评分值。

表 2 一级评价指标评分值

Table 2 Score values of level I evaluation indexes

指标	分级	评分	指标	分级	评分
渗透系数 $/(m \cdot d^{-1})$	> 16	9	承压水 富水性 $/(m^3 \cdot d^{-1})$	> 5000	10
	13~ 16	8		3000~ 5000	8
	10~ 13	6		1000~ 3000	6
	7~ 10	4		500~ 1000	5
	4~ 7	2		100~ 500	3
	< 4	1		< 100	2
潜水埋深 $/m$	> 50	3	矿化度 $/(mg \cdot L^{-1})$	< 400	10
	30~ 50	6		400~ 500	9
	10~ 30	8		500~ 600	8
	< 10	3		600~ 700	7
含水层厚度 $/m$	> 130	10	水温(°C)	> 700	6
	110~ 130	9		< 17	10
	90~ 110	8		17~ 18	9
	70~ 90	7		18~ 19	8
	50~ 70	6		19~ 20	7
	< 50	5		> 20	6
潜水富水性 $/(m^3 \cdot d^{-1})$	> 5000	10	硬度 $/(mg \cdot L^{-1})$	< 110	10
	3000~ 5000	8		110~ 160	9
	1000~ 3000	6		160~ 210	8
	500~ 1000	5		210~ 260	7
	100~ 500	3		260~ 310	6
	< 100	2		> 310	5
抽灌比	< 1: 3	0			
	1: 3~ 1: 2.5	4			
	> 1: 2.5	8			

5 地下水源热泵适宜性分区

在确定了权重体系和评分体系的基础上,首先运用 Arc GIS 软件对一级评价各个指标的分区图赋予相应的评分^[15],并使用 Analysis tools 的 Intersect 工具对指标分区图进行矢量叠加;然后结合各个评价指标的权重,采用综合指数法计算得到每个区的综合适宜性指数值;最后根据西安市水源热泵适宜性分区标准(见表 3),将综合评分相同等级的区域合并,得到水源热泵一级评价的适宜性分区图。

综合指数法计算公式:

$$R_j = \sum_{i=1}^n \alpha_i \beta_{i,j}$$

式中: R_j 为第 j 个子区的综合适宜性指数值; α_i 为第 i 个评价指标的权重; $\beta_{i,j}$ 为第 i 个指标在第 j 个子区的评分值。

表 3 西安市主城区地下水源热泵适宜性分区标准

Table 3 Suitability zonation standards of groundwater source heat pumps in Xi'an

综合评分	0~ 5	5~ 7	7~ 10
适宜性分区	不适宜区	较适宜区	适宜区

地下水源热泵的建设以保护环境为前提,水源地保护区、地面沉降严重区和地裂缝地区不能修建水源热泵系统。在 ArcGIS 中将绘制的水源地保护区分布图、沉降速率分区图、地裂缝分布图与一级评价适宜性分区图进行叠加,最终得到西安市主城区地下水源热泵适宜性分区图,如图 2 所示。

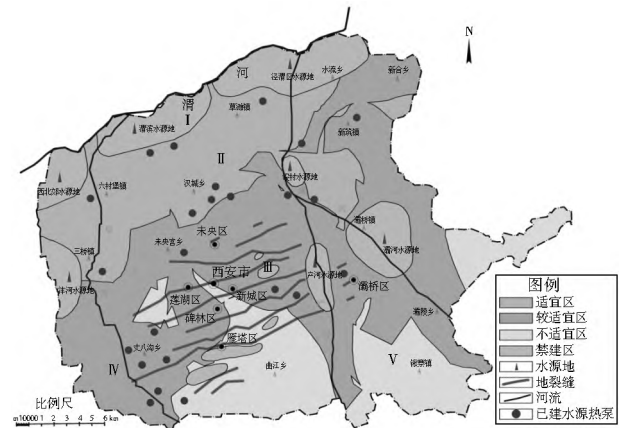


图 2 西安市主城区地下水源热泵系统适宜性分区

Fig. 2 Suitability zonation map of groundwater source heat pump systems in Xi'an

评价结果表明,西安市主城区范围内,适宜区面积为 171. 228 km²,较适宜区面积为 369. 234 km²,不适宜区面积为 160. 407 km²,禁建区面积为 131. 002 km²;适宜区和较适宜区面积占总面积的 64. 97%,不适宜区和禁建区占总面积的 35. 03%。从图 2 中可以看出,西安市已建水源热泵集中于适宜区和较适宜区,适宜性从西北到东南呈递减趋势,分成五个典型区域:Ⅰ区为水源地保护区,禁止建设水源热泵系统;Ⅱ区离渭河较近,含水层以砂卵石为主,回灌能力强,渗透系数大,富水性好,适宜建设水源热泵系统;Ⅲ区地面沉降严重,地裂缝分布较多,不能建设水源热泵;Ⅳ区地处西安高新区,具备建设水源热泵的经济条件,水源热泵系统分布集中;Ⅴ区含水层以砂、粉砂为主,富水性差,回灌困难,不适宜建设水源热泵系统。

6 结论

(1) 水文地质条件是决定一个地区能否建设地下水源热泵系统的关键因素。同时,在进行水源热泵系统的规划选址时,还必须考虑环境保护因子。

(2) 将层次分析法和熵值法相结合得到评价指标的组合权重,不但反映了决策人员对各指标的主观信息,而且兼顾到客观的数学方法,得到的权重更加合理、可靠。

(3) 目前西安市已建水源热泵系统大都集中于适宜区和较适宜区范围内, 本文分析结果为西安市地下水源热泵更合理的应用提供了理论依据。

需要说明的是, 本文评价结果只能在宏观上给出西安市主城区地下水源热泵的适宜程度, 在实地建设地下水源热泵时, 应该针对拟建区的实际情况具体分析。

参考文献(References):

- [1] 韩再生, 冉伟彦, 佟红兵, 等. 浅层地热能勘查评价[J]. 中国地质, 2007, 34(6): 1115-1121. (HAN Zaisheng, RAN Weiyang, TONG Hongbing, et al. Shallow Geothermal Energy Exploration and Evaluation[J]. Geology in China, 2007, 34(6): 1115-1121. (in Chinese))
- [2] 杨如辉, 邹声华, 刘彩霞. 浅层地热能开发利用[J]. 徐州工程学院学报, 2011, 26(2): 69-72. (YANG Ruyue, ZOU Shengming, LIU Caixia. Discussion about the Development and Utilization of Shallow Geothermal Energy[J]. Journal of Xuzhou Engineering Institute, 2011, 26(2): 69-72. (in Chinese))
- [3] 倪龙, 封家平, 马最良. 地下水源热泵的研究现状与进展[J]. 建筑热能通风空调, 2004, 23(2): 26-31. (NI Long, FENG Jiaoping, MA Zuiliang. The Research Status and Progress of the Groundwater Source Heat Pumps[J]. Building Energy and Air Conditioning, 2004, 23(2): 26-31. (in Chinese))
- [4] 贾惠艳, 孙雨, 张军. 基于模糊层次分析法的沈阳市地下水源热泵适宜性分区[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(4): 108-111. (JIA Yuehui, SUN Yu, ZHANG Jun. Suitability Division for Groundwater Source Heat Pumps Based on Fuzzy Analytic Hierarchy Process in Shenyang[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(4): 108-111. (in Chinese))
- [5] 刘立才, 王金生, 张霓, 等. 北京城市规划区水源热泵系统应用适宜性分区[J]. 水文地质工程地质, 2006, (6): 15-17. (LIU Licai, WANG Jingsheng, ZHANG Ni, et al. Suitability Division for Water Source Heat Pumps in the Central Districts of Beijing[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2006, (6): 15-17. (in Chinese))
- [6] 臧海洋. 沈阳城区地下水源热泵适宜性评价及应用[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2011. (ZANG Haiyang. Shenyang City Groundwater Source Heat Pumps Suitability Evaluation and Application[D]. Shenyang: Shenyang Architecture University, 2011. (in Chinese))
- [7] 刘九龙, 林黎, 程万庆. 天津市地下水源热泵系统适宜性分区[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(1): 380-385. (LIU Jiulong, LIN Li, CHENG Wanqing. Suitability Division for Groundwater Source Heat Pump Systems in Tianjin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science), 2012, 42(1): 380-385. (in Chinese))
- [8] 周维博, 云涛, 于林弘, 等. 西安市水源热泵空调系统抽回灌井试验研究报告[R]. 西安: 长安大学, 2012. (ZHOU Weibo, YUN Tao, YU Linrong, et al. Xi'an Pump and Recharge Water of Water Source Heat Pump Air Conditioning Systems Survey Report[R]. Xi'an: Chang'an University, 2012. (in Chinese))
- [9] DZ/T 0025, 浅层地热能勘查评价规范[S]. (DZ/T 0025, Specification for Shallow Geothermal Energy Investigation and Evaluation[S]. (in Chinese))
- [10] 刘晓宇. 西安市北郊水源热泵抽回灌系统影响因素的分析[D]. 西安: 长安大学, 2011. (LIU Xiaoyu. Analysis of the Influential Factors of Water Source Heat Pump Systems in the North of Xi'an[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011. (in Chinese))
- [11] 刘建霞, 原晓军, 索立涛. 基于层次分析法的鲁东地区浅层地热能适宜性评价[J]. 海洋地质前沿, 2012, 28(10): 65-70. (LIU Jianxia, YUAN Xiaojun, SUO Lita. Suitability Evaluation of Shallow Geothermal Energy Based on Analytic Hierarchy Process in Eastern [J]. Marine Geology Frontier, 2012, 28(10): 65-70. (in Chinese))
- [12] 孟宪萌, 胡和平. 基于熵权的集对分析模型在水质综合评价中的应用[J]. 水利学报, 2009, 40(3): 257-262. (MENG Xianmeng, HU Heiping. Application of Set Pair Analysis Model Based on Coefficient of Entropy in Comprehensive Evaluation of Water Quality[J]. Journal of Water Conservancy, 2009, 40(3): 257-262. (in Chinese))
- [13] Michael F G, Robe P H. GIS and Spatial Data Analysis: Converging Perspectives, Regional Science[J]. Papers Reg Sci, 2004, 83: 363-385.
- [14] 周维博, 马聪, 董起广, 等. 西安市水源热泵空调系统应用调查评价[R]. 西安, 长安大学, 2013. (ZHOU Weibo, MA Cong, DONG Qiguang, et al. Survey Evaluation on Water Source Heat Pump Air Conditioning Systems in Xi'an[R]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese))
- [15] 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. (WANG Yanfei. Study on Shallow Geothermal Energy Evaluation Model Based on GIS in Yiwu [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2012. (in Chinese))