

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202011003

朱文举, 平建华, 侯俊山, 等. 安阳市地下水源热泵系统建设水资源管理区划研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(1): 200-208.
ZHU Wenju, PING Jianhua, HOU Junshan, *et al.* A study of the water resources management and division of the groundwater heat pump system construction in Anyang[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(1): 200-208.

安阳市地下水源热泵系统建设水资源管理区划研究

朱文举¹, 平建华², 侯俊山³, 宁艺武¹, 耿文斌¹

(1. 郑州大学水利科学与工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学地热与生态地质研究中心, 河南 郑州 450001; 3. 安阳市彰武南海水库工程管理局, 河南 安阳 455000)

摘要: 为从赋存条件和水资源管理两个层面进行地下水源热泵系统建设的区划研究, 实施技术与管理的结合, 通过分析水文地质条件、水动力条件和水化学条件, 结合水资源管理分区, 建立了安阳市地下水源热泵系统水资源管理区划评价体系。采用云模型改进的层次分析法进行了一级评价, 在此基础上结合水资源管理分区利用 GIS 空间分析功能完成二级评价, 将研究区地下水源热泵系统划分了 3 个等级。结果表明: 研究区范围内地下水源热泵系统适宜发展区面积为 117.45 km², 主要分布在安阳河冲洪积扇中心强富水区, 部分分布在扇缘的外围区域; 限制发展区面积为 459.26 km², 分布在扇缘的西南和北部丘陵弱富水区以及扇体中心的地下降落漏斗区; 禁止发展区面积为 24.02 km², 分布在水源地和南水北调保护区以及铁路和高速公路两旁, 在研究区交错分布。在适宜性分区的基础上结合水资源管理的区划研究更全面合理, 可为地下水源热泵系统科学布局及合理的开发利用提供参考。

关键词: 地下水源热泵; 云模型; 水资源管理区划; 安阳市

中图分类号: P641.8; P314.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)01-0200-09

A study of the water resources management and division of the groundwater heat pump system construction in Anyang

ZHU Wenju¹, PING Jianhua², HOU Junshan³, NING Yiwu¹, GENG Wenbin¹

(1. School of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China;
2. Geothermal and Ecological Geology Research Center, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China; 3. Anyang City Zhangwu Nanhai Reservoir Engineering Administration, Anyang, Henan 455000, China)

Abstract: Considering the occurrence condition and water resources management, this paper studies the zoning of the groundwater heat pump system in the city of Anyang in Henan, makes the combination of technology and management and improves the evaluation standard, which is of more practicability. The evaluation of groundwater resources management and division is established by synthetically analyzing the hydrogeological, hydrodynamic and hydrochemical conditions of Anyang. The first-level evaluation is carried out by using the improved analytic hierarchy process of cloud model. The second-level evaluation is completed by using GIS spatial analysis

收稿日期: 2020-11-03; 修订日期: 2021-06-10

投稿网址: www.swdggcdz.com

基金项目: NSFC-河南人才培养联合基金(U1504404); 河南省科技厅重点攻关项目(122102210101); 河南省教育厅科学技术研究重点项目(12A170009)

第一作者: 朱文举(1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事浅层地热能开发利用研究。E-mail: 1534115813@qq.com

通讯作者: 平建华(1976-), 男, 博士, 教授, 主要从事水文地质教学和研究工作。E-mail: pingjianhua@zzu.edu.cn

function, dividing the groundwater heat pump system into three grades in the study area. The results show that the suitable development area for the groundwater heat pump system is 117.45 km^2 , which mainly distributes in the strong groundwater-abundant area in the center of the alluvial-proluvial fan of the Anyang River and partially distributes in the peripheral area at the fan edge. The restricted development area covers an area of 459.26 km^2 , which distributes in the hilly weak groundwater-abundant areas in southwest and north of the fan margin with the groundwater level drawdown funnel in the center of the fan body. The forbidden development area is of 24.02 km^2 and distributes crossly, covering the water source area, the protected area of the South-to-North Water Transfer Project, along the railway and expressway. It is more comprehensive and reasonable to take the groundwater resources management and division into account on the basis of the suitability zoning, which may provide references for the scientific layout and rational development and utilization of the groundwater heat pump system.

Keywords: groundwater heat pump; cloud model; water resources management and division; Anyang

近年来,在国家相关政策的支持下,浅层地热能的开发力度逐渐加大,取得了明显的环境和经济效益,浅层地热能因此被逐渐重视并呈现出广阔的发展前景^[1]。地下水源热泵系统作为开发利用浅层地热能的一项重要技术,得到了较广泛的应用^[2-3]。然而,若盲目建设地下水源热泵系统,忽视前期选址分析和水资源管理政策,将会给水资源管理带来挑战。

自我国开展浅层地热能开发利用以来,相关科研工作者对地下水源热泵系统适宜性分区做了很多研究。刘立才等^[4]根据地下水源热泵系统实际的抽水回灌模式,结合水文地质条件和水化学条件,将北京城市规划区地下水源热泵系统划分为三个区域,但该研究仅采用单一指标进行适宜性分区,未考虑地下水源热泵系统各个影响因素之间的联系。金婧等^[5]运用层次分析法结合富水性及渗透条件、水质及水温条件、地质及环境条件等对银川市进行了适宜性分区研究,但该研究缺乏群体专家的决策分析,计算结果会因为专家意见不同而产生较大的差异。马聪等^[6]在层次分析法和熵值法的组合赋权确定评价指标权重的基础上,采用综合指标法进行一级评价,并结合环境保护条件建立二级评价体系,完成地下水源热泵系统适宜性分区的相关研究,该研究评价体系与方法较以往有了较大的改善,但二级评价未考虑水资源管理相关政策,不利于水资源主管部门的管理审查。

多年的研究结果表明适宜性分区应用于地下水源热泵系统选址是可行的,但在以往的研究中缺乏对层次分析法本身的改进,数据较少,未考虑水资源管理分区,导致研究结果与实际情况可能不符,不利于地下水源热泵系统的开发利用。本文运用云模型改

进的层次分析法对安阳市进行适宜性分区,在此基础上结合国家和当地的水资源管理分区,完成地下水源热泵系统水资源管理区划研究,为更好地支撑浅层地热能开发利用提供参考。

1 研究区概况

1.1 浅层地热能赋存条件

研究区位于河南省北部,主要包括安阳市的北关区、文峰区、殷都区、龙安区,面积约 600 km^2 。研究区位于北方暖温带,属于半湿润大陆性季风气候,多年平均气温 $13.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$,年供暖(11月至次年3月)和制冷(5—9月)时间相当。

研究区地层岩性以砂、亚砂土、亚黏土和砂砾石为主,地下水类型为孔隙水,属安阳河冲洪积扇松散层。研究区城区一带位于冲洪积扇扇体中心,属强富水性区域,水位埋深 $11 \sim 22 \text{ m}$,含水层厚 $25 \sim 45 \text{ m}$,含水介质多为卵砾石和砂,单井涌水量大于 $3\,000 \text{ m}^3/\text{d}$,导水系数大于 $1\,000 \text{ m}^2/\text{d}$ 。在扇体中心外围区域,受新构造断裂影响,新近系抬升,第四系卵砾石含水层变薄到 $15 \sim 25 \text{ m}$,导水系数降到 $500 \text{ m}^2/\text{d}$,单井涌水量 $1\,000 \sim 3\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ 。扇缘的西南和北部丘陵区域,含水层厚度普遍小于 10 m ,导水系数小于 $500 \text{ m}^2/\text{d}$,单井涌水量小于 $1\,000 \text{ m}^3/\text{d}$,为弱富水性区或贫水区,水文地质条件总体较差(图1)。研究区地下水平均水温 $15.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$,水化学类型以 HCO_3-Ca 型为主,溶解性总固体小于 $1\,000 \text{ mg/L}$ 。

1.2 地下水源热泵系统开发利用现状

安阳市自2001年开始利用地下水源热泵系统以来,发展迅速(图1),是河南省使用地下水源热泵系统最多的城市,主要分布在城区强富水性区域,单井回灌率在60%以上,成井深度在 $80 \sim 150 \text{ m}$ 之间^[7]。多

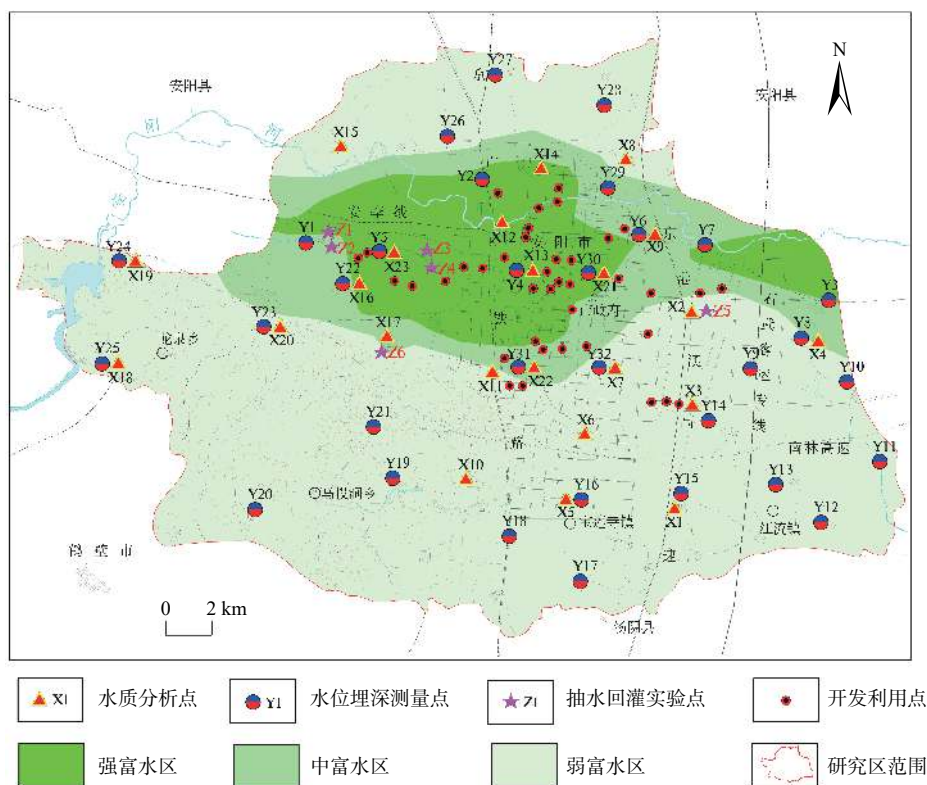


图 1 研究区位置与采样点分布

Fig. 1 Location of the study area and the sampling points

年实践表明,地下水源热泵系统相比于传统集中供暖制冷方式,不仅节能效益显著,也在一定程度上保护了环境^[8]。但部分地下水源热泵系统在实际的建设运行过程中,缺乏前期的选址规划,忽视当地水资源管理政策,导致建设的地下水源热泵系统腐蚀和回灌效率降低,与其他用户产生热贯通现象,严重影响了当地地下水源热泵系统的使用。同时,不合理的开发利用建设也可能导致地下水温失衡、水位下降及水质变差等地下水环境问题^[9]。因此,较为迫切需要进行地下水源热泵系统建设水资源管理区划的研究。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本次区划共计进行抽水回灌试验 6 组,基本查明研究区含水层岩性、厚度、水力坡度、富水性、回灌率等,这些都是水文地质条件是否满足地下水源热泵系统建设的重要体现。通过对水动力场的研究,分析研究区地下水流向、地下水降落漏斗分布,并对研究区进行地下水位埋深测量,共计调查样点 32 个,查明地下水年下降量以及地下水位埋深等。地下水化学特征也是地下水源热泵系统能否长期安全运行的关键,地下水水质较差可能会造成地下水源热泵机组和管

道结垢,导致回灌效率降低,影响地下水源热泵系统的使用寿命。为此,对研究区共进行水质全分析测试 23 组(图 1),查明研究区地下水化学类型、总硬度、溶解性总固体以及其水化学特征等,测试结果见表 1。

由表 1 可知,安阳河冲洪积扇扇中的 Z3 和 Z4 并含水层较厚,富水性和回灌能力较强,其余外围区域的水文地质条件相对较差;硬度和溶解性总固体除东部区域的部分井点(X8)较大外,其余区域基本满足水质要求;地下水位东南区域埋深较浅,西南丘陵以及市区中心埋深较大,市区地下水年变幅呈现下降趋势,外围区域地下水位有所回升。

2.2 研究方法

2.2.1 评价体系

首先从地下水源热泵系统赋存条件入手,结合水文地质条件进行一级评价。在此基础上,结合水资源管理分区进行二级评价,完成水资源管理区划研究(图 2)。一级评价采用云模型改进的层次分析法确定权重完成适宜性分区;水资源管理分区对区划结果具有决定性作用,故二级评价采用一票否决法,在适宜性分区结果上直接划定禁止发展区或限制发展区。

2.2.2 一级评价方法

层次分析法由于其简洁实用、所需数据较少^[10-12]

表 1 研究区适宜性分区指标基本特征

Table 1 Basic characteristics of the suitability zoning index of the study area

水文地质条件	编号	富水性/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	单井回灌率/%	含水层厚度/m	编号	富水性/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	单井回灌率/%	含水层厚度/m	
	Z1	518	54.44	19	Z4	5 112	75.11	36	
	Z2	677	44.65	17	Z5	756	65.71	42	
	Z3	5 232	91.74	38	Z6	1 735	65.56	45	
水化学条件	编号	水化学类型	硬度/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	溶解性总固体/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	编号	水化学类型	硬度/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	溶解性总固体/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	
	X1	$\text{HCO}_3\text{—Mg} \cdot \text{Ca}$	583.5	1 070	X13	$\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl—Ca}$	620.5	1 120	
	X2	$\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl—Ca}$	555.5	870	X14	$\text{HCO}_3\text{—Ca}$	540.0	900	
	X3	$\text{HCO}_3\text{—Ca}$	441.0	760	X15	$\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{—Ca}$	548.5	910	
	X4	$\text{SO}_4\text{—Na}$	200.0	1 150	X16	$\text{HCO}_3\text{—Ca}$	447.5	740	
	X5	$\text{HCO}_3\text{—Ca}$	696.5	1 160	X17	$\text{HCO}_3\text{—Ca}$	392.0	640	
	X6	$\text{HCO}_3\text{—Ca}$	286.5	480	X18	$\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{—Ca}$	499.5	780	
	X7	$\text{HCO}_3\text{—Ca}$	549.0	930	X19	$\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3\text{—Ca}$	419.5	700	
	X8	$\text{Cl} \cdot \text{SO}_4\text{—Ca}$	1 175.5	1 800	X20	$\text{HCO}_3\text{—Ca}$	348.5	590	
	X9	$\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl—Ca}$	768.0	1 380	X21	$\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl—Ca}$	691.5	1 190	
	X10	$\text{HCO}_3\text{—Ca} \cdot \text{Mg}$	318.5	550	X22	$\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{—Ca}$	596.5	1 010	
	X11	$\text{HCO}_3\text{—Ca}$	340.5	580	X23	$\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{—Ca}$	548.5	910	
水动力条件	编号	地下水位埋深/m	地下水位年变幅/m	编号	地下水位埋深/m	地下水位年变幅/m	编号	地下水位埋深/m	地下水位年变幅/m
	Y1	25.75	−0.13	Y9	10.02	0.97	Y17	4.68	−0.07
	Y2	14.60	−1.30	Y10	12.30	0.50	Y18	3.00	0.18
	Y3	13.26	−0.31	Y11	5.37	0.49	Y19	10.96	1.16
	Y4	19.24	−1.02	Y12	3.40	−0.43	Y20	26.28	0.92
	Y5	24.05	−3.69	Y13	6.23	1.45	Y21	30.64	−0.19
	Y6	25.80	−0.30	Y14	3.31	−0.74	Y22	30.70	0.50
	Y7	13.23	2.23	Y15	4.14	0.09	Y23	44.32	1.22
	Y8	10.12	0.05	Y16	4.76	−1.19	Y24	36.98	−2.97
							Y25	61.00	3.28
							Y26	20.10	1.60
							Y27	15.25	0.47
							Y28	17.48	1.03
							Y29	14.19	−0.37
							Y30	12.72	−0.28
							Y31	12.20	−0.90
						Y32	9.09	0.87	

等特点广泛应用于浅层地热能适宜性分区的研究,采用层次分析法在构造判断矩阵时常采用三标度法^[13]和九标度法^[14],然而这些标度都利用固定的数字对重要性进行判断,无法反映决策者的主观偏好,对判断矩阵自身的模糊性和随机性也无法进行精确描述^[15]。同时,层次分析法只能针对单个专家进行赋值计算,无法进行群决策分析。云模型通过 3 个数字将评价因素的随机性和模糊性紧密的联系在一起^[16-17],使判断结果更加客观可信,且云模型的浮动云集结可以将所有决策者的判断进行计算,降低了个别专家主观判断对结果的影响。利用云模型改进层次分析法计算指标权重的步骤如下:

(1)构建云模型标度

设定 9 个云模型对应 1~9 标度,同时设定期望 $Ex_1=1, \dots, Ex_9=9$ 为两因素重要性标度,数值越大表明前者比后者更重要。在 9 个标度中,1,3,5,7,9 这 5 个等级相对容易判断,对于其中的中间值评判较为模糊(表 2)。

采用黄金分割法^[18]得到各个模型的熵和超熵,其中,各个模型的熵为: $En_1=En_3=En_5=En_7=En_9=0.707, En_2=En_4=En_6=En_8=0.437$; 超熵为: $He_1=He_3=He_5=He_7=He_9=0.118, He_2=He_4=He_6=He_8=0.073$,由此构成两两重要性标度。

(2)构造判断矩阵

根据云模型标度表,专家组对指标进行两两重要性判断,每一位专家的意见作为一个独立的基云 $C_1(Ex_1, En_1, He_1)$,则第 m 位专家的基云为 $C_m(Ex_m, En_m, He_m)$,按照生成浮动云 $C(Ex, En, He)$ 的方法进行集结, m 朵基云的集结方式如下:

$$Ex = \eta_1 Ex_1 + \eta_2 Ex_2 + \dots + \eta_m Ex_m \tag{1}$$
$$En = (\eta_1 Ex_1 En_1 + \eta_2 Ex_2 En_2 + \dots + \eta_m Ex_m En_m) / Ex \tag{2}$$
$$He = \sqrt{He_1^2 + He_2^2 + \dots + He_m^2} \tag{3}$$

式中: $\eta_1, \eta_2, \dots$ ——可以调节的准则权重值。

集结得到专家组评价结果的浮动云后开始构造判断矩阵,其中对角线元素的期望为 1,熵和超熵都

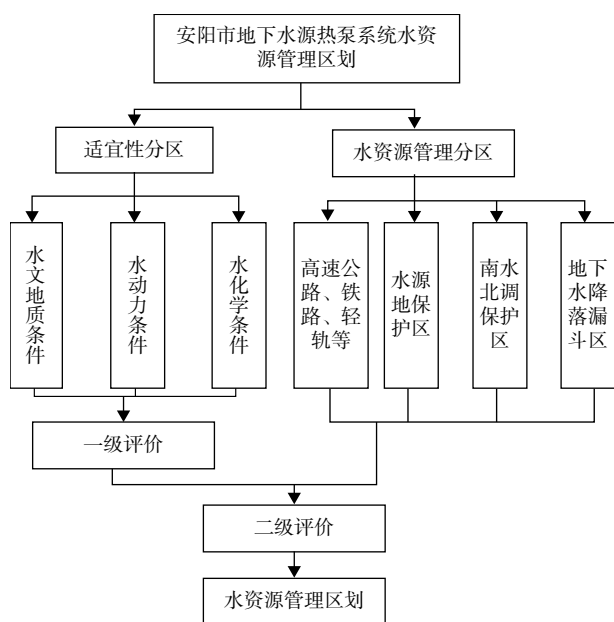


图 2 地下水源热泵系统水资源管理区划评价结构

Fig. 2 Evaluation system of groundwater resources management zoning of the groundwater heat pump system in Anyang

表 2 云模型重要性标度定义

Table 2 Definition of the importance scale of cloud model

标度	含义
$C_1(1, 0.707, 0.118), Ex_1=1$	两因素相比, 要素 <i>i</i> 和 <i>j</i> 具有同等重要性
$C_3(3, 0.707, 0.118), Ex_3=3$	两因素相比, 要素 <i>i</i> 和 <i>j</i> 具有稍微重要性
$C_5(5, 0.707, 0.118), Ex_5=5$	两因素相比, 要素 <i>i</i> 和 <i>j</i> 具有明显重要性
$C_7(7, 0.707, 0.118), Ex_7=7$	两因素相比, 要素 <i>i</i> 和 <i>j</i> 具有强烈重要性
$C_9(9, 0.707, 0.118), Ex_9=9$	两因素相比, 要素 <i>i</i> 和 <i>j</i> 具有极端重要性
$C_2(2, 0.437, 0.073), Ex_2=2$	
$C_4(4, 0.437, 0.073), Ex_4=4$	上述相邻重要性的中值
$C_6(6, 0.437, 0.073), Ex_6=6$	
$C_8(8, 0.437, 0.073), Ex_8=8$	

为 0; 对于后者比前者重要的倒数标度, 运用云模型倒数计算得到:

若 $y_{ij}=C(Ex_{ij}, En_{ij}, He_{ij})$ 则:

$$y_{ji} = \frac{1}{C(Ex_{ij}, En_{ij}, He_{ij})} = C\left(\frac{1}{Ex_{ij}}, \frac{En_{ij}}{(Ex_{ij})^2}, \frac{He_{ij}}{(Ex_{ij})^2}\right) \quad (4)$$

(3) 特征向量和一致性检验

利用方根法计算判断矩阵的特征向量, 并引入云模型的乘法运算求取特征向量 $W_i^0 (Ex_i^0, En_i^0, He_i^0)$ 的期望、熵和超熵^[19-20]:

$$Ex_i^0 = \frac{Ex_i}{\sum_{i=1}^m Ex_i} = \frac{\left(\prod_{j=1}^m Ex_{ij}\right)^{\frac{1}{m}}}{\sum_{i=1}^m \left(\prod_{j=1}^m Ex_{ij}\right)^{\frac{1}{m}}} \quad (5)$$

$$En_i^0 = \frac{En_i}{\sum_{i=1}^m En_i} = \frac{\left(\prod_{j=1}^m Ex_{ij} \sqrt{\sum_{j=1}^m \left(\frac{En_{ij}}{Ex_{ij}}\right)^2}\right)^{\frac{1}{m}}}{\sum_{i=1}^m \left(\prod_{j=1}^m Ex_{ij} \sqrt{\sum_{j=1}^m \left(\frac{En_{ij}}{Ex_{ij}}\right)^2}\right)^{\frac{1}{m}}} \quad (6)$$

$$He_i^0 = \frac{He_i}{\sum_{i=1}^m He_i} = \frac{\left(\prod_{j=1}^m Ex_{ij} \sqrt{\sum_{j=1}^m \left(\frac{He_{ij}}{Ex_{ij}}\right)^2}\right)^{\frac{1}{m}}}{\sum_{i=1}^m \left(\prod_{j=1}^m Ex_{ij} \sqrt{\sum_{j=1}^m \left(\frac{He_{ij}}{Ex_{ij}}\right)^2}\right)^{\frac{1}{m}}} \quad (7)$$

得到特征向量后对期望进行一致性检验:

$$CI = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1) \quad (8)$$

$$CR = CI/RI \quad (9)$$

式中: $\lambda_{\max}$ ——判断矩阵的最大特征值;

CI ——一致性指标;

n ——判断矩阵阶数;

CR ——一致性比率;

RI ——随机一致性指标。

若一致性比率 $CR < 0.1$, 则证明判断矩阵通过一致性检验, 否则重复以上计算。同样, 熵和超熵也可通过上述步骤进行一致性检验, 在此不再赘述。

2.2.3 二级评价方法

对于水资源管理分区, 采取一票否决法, 即若处于水资源管理分区范围内, 无论适宜性分区结果如何, 都直接划分为禁止发展区或者限制发展区。为此, 在地下水源热泵适宜性分区的基础上, 剔除水资源管理的禁止发展区和限制发展区, 同时将适宜性分区中的不适宜区也划为限制发展区, 除此以外的区域划为地下水源热泵系统适宜发展区, 最终完成研究区地下水源热泵系统水资源管理区划。

3 结果与讨论

3.1 一级评价

3.1.1 权重计算

本文采用数位具有经验的专家进行重要性评判, 构造判断矩阵并进行一致性检验, 通过云模型改进的层次分析法计算, 最终得到各个要素的合成权重, 并与专家 1 和专家 2 进行对比分析。由计算结果(表 3)可知, 水文地质条件所占权重较大, 表明在一级评价中水文地质条件具有主导作用。

通过分析计算, 专家 1 和专家 2 的权重结果有很

表 3 云模型改进层次分析法的权重计算结果

Table 3 Weight calculation results of the cloud model improved AHP

属性层	权重计算			要素层	权重计算			合成权重			传统的权重计算	
	Ex	En	He		Ex	En	He	Ex	En	He	专家1	专家2
水文地质条件	0.627	0.611	0.613	富水性	0.563	0.556	0.560	0.353	0.340	0.343	0.207	0.349
				回灌率	0.306	0.315	0.314	0.192	0.192	0.192	0.361	0.124
				含水层厚度	0.131	0.129	0.126	0.082	0.079	0.077	0.080	0.066
水动力条件	0.238	0.246	0.245	地下水位埋深	0.688	0.688	0.874	0.164	0.169	0.214	0.153	0.260
				地下水位年变幅	0.313	0.313	0.126	0.074	0.077	0.031	0.077	0.130
水化学条件	0.135	0.143	0.142	水化学类型	0.546	0.544	0.547	0.074	0.078	0.078	0.066	0.038
				硬度	0.288	0.285	0.287	0.039	0.041	0.041	0.036	0.012
				溶解性总固体	0.166	0.171	0.166	0.022	0.024	0.024	0.020	0.021

大差别,表明传统的层次分析法过分依赖单个专家的主观判断,得到的结果客观性较差,同时无法进行群决策分析。云模型改进的层次分析法不仅可以迅速进行集体专家的群决策分析,减弱个别专家的主观判断,还可以用云模型的熵和超熵表示专家的模糊性和随机性,反映决策者的主观偏好,计算结果较为客观。

3.1.2 数据的标准化

数据的标准化是将各要素按一定原则转化为无量纲数值,以是否有利于开发利用地下水源热泵系统为准则进行赋分,赋分范围为 1~9,分数越高说明该种要素越有利于地下水源热泵系统的开发利用(表 4)。

3.1.3 综合分析

综合数位专家意见和相关方法的研究,本次采用综合指标法^[21]对基础数据进行处理,计算公式如下:

$$K=\sum_{i=1}^n\omega_i\gamma_i\tag{10}$$

式中: K ——适宜性分区的综合指数;

ω_i ——分区要素权重;

γ_i ——分区要素赋分值;

n ——分区要素数量。

将研究区每隔 500 m 间距剖分成若干个网格点,并对每个网格点按照表 4 进行赋值处理。采用综合指标法,运用 GIS 空间分析功能^[22],将每个要素的权重值分别乘以相应的网格点数值,最后相加得到每一个网格点的总分值。总分值在 0~5 之间的划分为不适宜区,总分值在 5~9 之间的划分为适宜区,按照以上原则得到最终的适宜性分区图,完成地下水源热泵系统水资源管理区划的一级评价。

根据一级评价结果可知,研究区地下水源热泵系统适宜区面积 189.39 km²,分布在安阳河冲洪积扇扇中和扇中外围区域,单井涌水量大于 1 000 m³/d,回灌

率大于 50%,属富水区和中富水区,含水层 20~45 m,岩性主要以砂卵石,中细砂为主。不适宜区面积 411.34 km²,分布在扇缘的西南和北部的部分丘陵区,单井涌水量小于 1 000 m³/d,回灌率小于 50%,为弱富水区和贫水区,水文地质条件较差,见图 3(a)。

3.2 二级评价

为保证安阳市水源地供水安全与生态健康,在地

表 4 指标赋分分级

Table 4 Index scoring

项目	分级	赋值
富水性/(m ³ ·d ⁻¹)	(0,500)	1
	[500,1 000]	3
	(1 000,3 000]	6
	(3 000,6 000)	9
回灌率/%	(0,50)	4
	[50,75]	6
	(75,100)	9
含水层厚度/m	(0,10)	3
	[10,30]	5
	(30,50)	8
地下水位埋深/m	(0,5)	1
	[5,10]	5
	(10,15]	7
	(15,100)	9
地下水位年变幅/m	(-5,-1.5)	3
	[-1.5,-0.8]	6
	(-0.8,5)	8
	HCO ₃ -Ca	8
	HCO ₃ ·Cl-Ca	6
水化学类型	HCO ₃ ·SO ₄ -Ca	5
	Cl-SO ₄ -Ca	3
硬度/(mg·L ⁻¹)	(0,200)	7
	[200,450]	4
	(450,1 500)	2
溶解性总固体/(mg·L ⁻¹)	(0,500)	9
	[500,1 000]	7
	(1 000, 2 000)	4

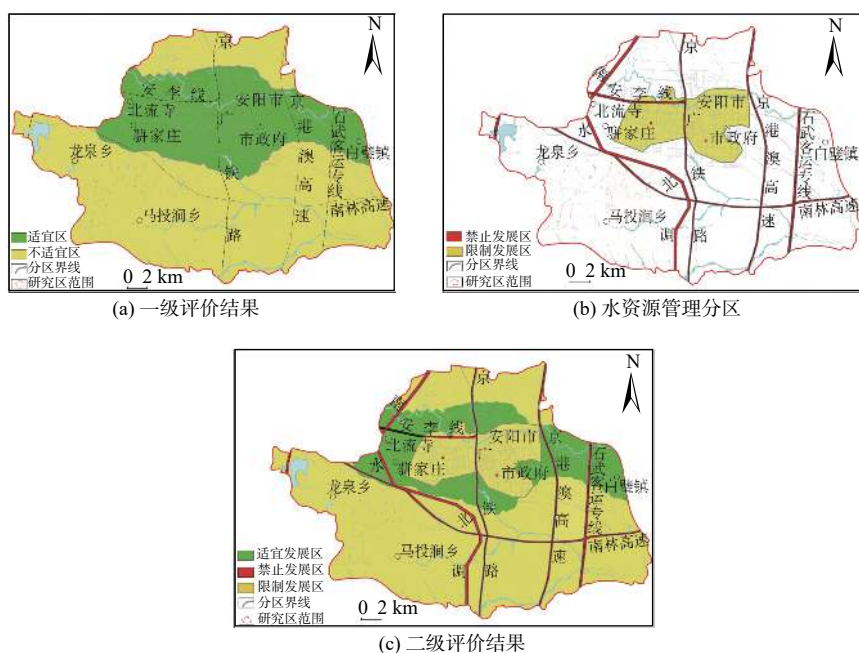


图 3 安阳市地下水源热泵系统水资源管理区划

Fig. 3 Groundwater resources management division of the groundwater heat pump system in Anyang

下水源地保护区范围内,禁止建设地下水源热泵系统,以防止地下水污染;根据南水北调相关管理条例,在南水北调保护区范围内禁止打井等危害工程安全和供水安全的行为,此次区划将南水北调保护区也划分为禁止发展区;此外,根据《铁路安全管理条例》和《城市轨道交通运营管理办法》,为保证相关工程的安全运行,在城市地铁、轻轨两旁 50 m 范围内以及高铁、铁路、高速公路两旁 200 m 范围内也禁止新建取水工程。根据《安阳市市区地下水监测报告》,安阳市地下水降落漏斗面积自 2010 年开始以等水位线 60 m 划分,漏斗面积受降水量及开采量影响。近年来,由于采取有效的防护措施,安阳市地下水降落漏斗面积显著下降,但剩余区域地下水超采问题仍不容忽视,因此本次将地下水降落漏斗区划为限制发展区。在以上水资源管理分区范围内,采用一票否决法直接划定地下水源热泵系统水资源管理分区,见图 3(b)。

综合适宜性分区结果和水资源管理分区,完成安阳市地下水源热泵系统水资源管理区划结果,见图 3(c)。由研究区地下水源热泵系统水资源管理区划结果可知,适宜发展区主要分布在北流寺、驸家庄、白璧镇一带,面积为 117.45 km^2 ,占研究区总面积的 20%,由于受地下水降落漏斗的影响,市中心一带面积较小。限制发展区分布在市区中心的地下水降落漏斗区和研究区北部以及西南部丘陵一带,为弱富水性区和贫水区,面积为 459.26 km^2 ,占研究区总面积的 76%。禁

止发展区包括水源地保护区和南水北调经过区域、铁路和高速公路两旁区域以及其他需要禁止开发利用地下水的区域,在研究区交错分布,面积为 24.02 km^2 ,占研究区总面积的 4%。

根据层次分析法权重计算结果可知水文地质条件所占权重较大,这与赖光东等^[23]的研究结果一致,但是层次分析法自身计算过程多采用专家意见进行评价,当专家意见发生分歧时,计算结果就会出现较大差异^[24-25],运用云模型进行改进能有效解决层次分析法无法进行综合决策的不足,使研究结果更加接近实际情况。

本研究通过两级评价得到的水资源管理区划结果,同前人仅考虑赋存条件而忽视水资源管理政策的适宜性分区具有较大差异^[26-27]。同时,由于每个地区水资源管理政策不尽相同,基于适宜性分区的二级评级也不尽相同,应结合当地实际情况,确定最佳的开发利用方式。

4 结论

(1)通过云模型改进的层次分析法对研究区进行适宜性分区,不仅减弱了个别人为因素的主观判断,而且使各要素结果的随机性和模糊性更加直观地呈现出来,确保了适宜性分区结果的合理性。

(2)适宜性分区是评价地下水源热泵系统水资源管理区划的重要部分,反映出当地水文地质条件是否

适合开发利用地下水源热泵系统。同时,水资源管理具有决定性因素,表明水源热泵系统的建设还必须服从当地的水资源管理。

(3) 研究区地下水源热泵系统限制发展区主要分布在西南和北部丘陵水文地质条件较差区和市区中心地下水降落漏斗区,面积 459.51 km², 占总面积的 76%, 说明安阳市不适宜大范围发展地下水源热泵系统。

参考文献 (References):

- [1] 孔维臻, 郭明晶, 陈萌, 等. 基于模糊 AHP 的浅层地热能适宜性分区评价方法研究 [J]. 中国矿业, 2013, 22(2): 107 - 110. [KONG Weizhen, GUO Mingjing, CHEN Meng, et al. Study on evaluation method of regionalization of shallow geothermal energy based on fuzzy AHP [J]. China Mining Magazine, 2013, 22(2): 107 - 110. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 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 Jiaping, MA Zuiliang. The state of research and development of groundwater heat pump systems [J]. Building Energy & Environment, 2004, 23(2): 26 - 31. (in Chinese with English abstract)]
- [3] RUSSO S L, TADDIA G, BACCINO G, et al. Different design scenarios related to an open loop groundwater heat pump in a large building: Impact on subsurface and primary energy consumption [J]. Energy and Buildings, 2011, 43(2/3): 347 - 357.
- [4] 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, 33(6): 15 - 17. [LIU Licai, WANG Jinsheng, ZHANG Ni, et al. Suitability division for water source heat pumps in the central districts of Beijing [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006, 33(6): 15 - 17. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 金婧, 席文娟, 陈宇飞, 等. 基于 AHP 的浅层地热能适宜性分区评价 [J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(3): 91 - 93. [JIN Jing, XI Wenjuan, CHEN Yufei, et al. Assessment of suitability of shallow geothermal energy based on AHP [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2012, 23(3): 91 - 93. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 马聪, 周维博, 李娜. 西安市主城区地下水源热泵适宜性分区 [J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(3): 156 - 159. [MA Cong, ZHOU Weibo, LI Na. Suitability zonation for groundwater source heat pumps in Xi'an [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(3): 156 - 159. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 陈文芳, 杜尚海, 张一博, 等. 水源热泵运行中多组份溶质的反应迁移模拟 [J]. 工程勘察, 2017, 45(7): 32 - 38. [CHEN Wenfang, DU Shanghai, ZHANG Yibo, et al. Reactive transport simulation of multi-component solute in the operation of water source heat pump system [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2017, 45(7): 32 - 38. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 冯连威, 王林, 马爱华, 等. 梯级利用地下水储能的地源热泵空调系统分析 [J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2020, 41(3): 20 - 26. [FENG Lianwei, WANG Lin, MA Aihua, et al. Exergy analysis of ground source heat pump air-conditioning system with cascade utilization of ground water energy storage [J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2020, 41(3): 20 - 26. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 闫峭. 地下水源热泵抽灌井群理论及应用研究——以西安市为例 [D]. 西安: 长安大学, 2017. [YAN Qiao. Study on the theory and application of the ground-water heat pump wells: Taking Xi'an city as an example [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 李颖智, 蔡五田, 耿婷婷, 等. 区域地下水污染调查取样点布设量化分配方法 [J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(5): 24 - 30. [LI Yingzhi, CAI Wutian, GENG Tingting, et al. Quantitative sample distribution in regional groundwater contamination investigation [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(5): 24 - 30. (in Chinese with English abstract)]
- [11] AKAA O U, ABU A, SPEARPOINT M, et al. A group-AHP decision analysis for the selection of applied fire protection to steel structures [J]. Fire Safety Journal, 2016, 86: 95 - 105.
- [12] ZHOU X Y, HU Y, DENG Y, et al. A DEMATEL-based completion method for incomplete pairwise comparison matrix in AHP [J]. Annals of Operations Research, 2018, 271(2): 1045 - 1066.
- [13] 苑雷, 陈刚. 改进层次分析法下的浅层地温能适宜性评价 [J]. 可再生能源, 2013, 31(7): 112 - 115. [YUAN Lei, CHEN Gang. Assessment of suitability of shallow geothermal energy based on improved analytic hierarchy process [J]. Renewable Energy Resources, 2013, 31(7): 112 - 115. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 张向营, 张春山, 孟华君, 等. 基于 Random Forest 和

- AHP的贵德县北部山区滑坡危险性评价[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(4): 142 - 149. [ZHANG Xiangying, ZHANG Chunshan, MENG Huajun, et al. Landslide hazard evaluation in the northern mountainous area of Guide County based on Random Forest and AHP[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(4): 142 - 149. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 夏亮, 王永攀, 杨江平, 等. 一种基于云模型标度的改进层次分析法[J]. 空军预警学院学报, 2019, 33(2): 112 - 115. [XIA Liang, WANG Yongpan, YANG Jiangping, et al. A modified analytical hierarchy process based on scale of cloud model[J]. Journal of Air Force Early Warning Academy, 2019, 33(2): 112 - 115. (in Chinese with English abstract)]
- [16] PENG Y X, WU L, ZUO Q J, et al. Risk assessment of water inrush in tunnel through water-rich fault based on AHP-Cloud model[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2020, 11(1): 301 - 317.
- [17] 张彪, 戴兴国. 基于有限区间云模型和距离判别赋权的岩体质量分类模型[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(5): 150-157. [ZHANG Biao, DAI Xingguo. A classification model of rock mass based on finite interval cloud model and distance discrimination weighting[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(5): 150 - 157. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 王洪利, 冯玉强. 基于云模型标度判断矩阵的改进层次分析法[J]. 中国管理科学, 2005, 13(增刊1): 32 - 37. [WANG Hongli, FENG Yuqiang. Improved AHP based on judgment matrix scaled with cloud model[J]. Chinese Journal of Management Science, 2005, 13(Sup1): 32 - 37. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 江迎. 基于云模型和GIS/RS的坝堤溃决风险分析及灾害损失评估研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012. [JIANG Ying. Study on risk analysis and disaster loss assessment of dam break based on cloud model and GIS/RS[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012. (in Chinese with English abstract)]
- [20] LI N. Basketball culture event detection based on comprehensive integrated method[J]. Personal and Ubiquitous Computing, 2020, 24(47): 193 - 206.
- [21] 潘俊, 张宗禹, 关昊鹏, 等. 地下水源热泵热源井布设合理性评价指标体系[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2016, 32(3): 560 - 568. [PAN Jun, ZHANG Zongyu, GUAN Haopeng, et al. Rationality evaluation index system on the design of heat source well for groundwater source heat pump[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2016, 32(3): 560 - 568. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 梁乃森, 钱程, 穆文平, 等. 大牛地气田区地下水水质模糊综合评价[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(3): 52 - 59. [LIANG Naisen, QIAN Cheng, MU Wenping, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of groundwater quality of the Daniudi gas field area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(3): 52 - 59. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 赖光东, 周维博, 姚炳光. 西安地区浅层承压水水源热泵适宜性评价[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(12): 22 - 27. [LAI Guangdong, ZHOU Weibo, YAO Bingguang. Suitability evaluation for shallow confined water source heat pump in Xi'an[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(12): 22 - 27. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 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(增刊1): 380 - 385. [LIU Jiulong, LIN Li, CHENG Wanqing. Suitability zoning for groundwater source heat pump systems in Tianjin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(Sup1): 380 - 385. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 闫佰忠, 孙剑, 王昕洲, 等. 基于GIS-FAHP的石家庄市地下水源热泵适宜性分区[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(4): 1172 - 1181. [YAN Baizhong, SUN Jian, WANG Xinzhou, et al. Suitability zoning of groundwater source heat pump in Shijiazhuang based on GIS-FAHP[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(4): 1172 - 1181. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 赵静. 水源热泵对地温场的影响及适宜性评价研究——以郑州市为例[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2009. [ZHAO Jing. Impact of GWSHP on groundwater temperature field and suitability assessment: A case study in Zhengzhou city[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2009. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 胡元平, 刘红卫, 柯立, 等. 武汉市都市发展区地下水源热泵适宜性评价[J]. 资源环境与工程, 2014, 28(6): 981 - 984. [HU Yuanping, LIU Hongwei, KE Li, et al. The suitability evaluation of groundwater heat pump in the urban development area of Wuhan[J]. Resources Environment & Engineering, 2014, 28(6): 981 - 984. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 汪美华