

地下水库调蓄能力综合评价的指标体系与模糊集方法

郑德凤^{1,2}, 王本德², 年廷凯²

(1. 辽宁师范大学城市与环境学院, 辽宁 大连 116029; 2. 大连理工大学土木水利学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 从维护生态平衡与水资源可持续开发利用的角度定义了地下水库的调蓄能力, 提出地下水库调蓄能力综合评价的指标体系。并在模糊模式识别理论与模型的基础上, 去除指标间的相关性, 建立一种适合于对多指标体系的地下水库调蓄能力进行综合评价的多层模糊模式识别交叉迭代模型。实例应用表明, 该模型具有能同时考虑定性定量指标, 又能将迭代结果与决策者经验知识相结合来确定多指标权重的优点, 便于推广应用。

关键词: 地下水库; 调蓄能力; 综合评价; 指标体系; 模糊模式识别

中图分类号: P641.25; P641.8; TV212.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2005)05-0720-06

利用地下水库调蓄方式对流域水资源进行时间和地域上的再分配, 将成为我国北方地区提高雨洪资源利用率, 实现水资源可持续利用的一种重要手段。在流域地表水与地下水资源联合调控管理过程中, 地下水库的调蓄能力大小对发挥流域防洪系统的总体功能, 实现水资源的可持续利用具有重要的决定作用。无论是联合调控的规划设计阶段还是实时调度管理阶段, 都需要对地下水库的调蓄能力做出相应评价, 为优选适宜开发利用的地下水库区和规划地下调蓄远景区奠定基础 and 提供依据。但利用地下水库蓄水在我国还处于起步阶段, 尚未形成系统的理论方法和应用规范。以往在研究地下水库调蓄能力时, 多是采用单个指标进行描述, 如利用调蓄库容、调蓄系数、复蓄指数等。而实际上地下水库的调蓄能力涉及到库区的水文地质条件、地形地貌条件、自然地理及气候条件、地下水开采与回灌补给条件、经济技术条件等多方面的因素, 是一个多层次多指标的复杂体系, 利用单个指标很难对其进行精确合理的评价。因此建立多指标评价体系, 并发展相应的评价方法对地下水库调蓄能力进行综合评价是十分必要的。

1 地下水库调蓄能力分析

1.1 地下水库及其调蓄原理

广义的地下水库是指存在于地下的天然大型储水空间, 是在地壳内外动力地质作用下自然形成的地下水富集区, 一般指厚度较大、范围较广的大型层状孔隙含水层、大型岩溶储水空间或大型含水断裂带等^[1~3]。本文所及的地下水库是利用地壳内的天然储水空间, 采用人工干预而形成的地下蓄水实体, 是调蓄水资源时空分配的一种地下水开发工程^[4]。大型地下水库都具有多年调节功能, 和大型地表水库一样起到调节水资源的作用。

利用地下空间调蓄径流的基本原理是在枯水季节动用地下储存量, 抽取超过天然径流量的地下水, 形成人工降落漏斗, 腾空地下介质空间(即地下水库调蓄库容), 以获得枯水期所需要的水资源量; 丰水季节再通过天然回灌或人工补给, 把调蓄库容重新充满, 补充恢复地下水储存量。

1.2 地下水库的调蓄能力

地下水库调蓄能力是指在一定经济技术条件下以工程手段为前提, 以可持续开发利用地下水为原则, 以维护生态环境良性发展为条件, 在地下水开发利用和补给更新过程中地下水库所能提供和容纳的水资源最大容

收稿日期: 2004-06-08; 修订日期: 2004-09-10

基金项目: 水利部重大科技资助项目(水规划[2002]341号)

作者简介: 郑德凤(1970-), 女, 黑龙江伊春人, 博士, 主要从事水文水资源及水环境研究。

E-mail: dfzheng@163.com

量。研究某一区域地下水水库调蓄能力，对制订流域防洪系统的防洪策略和水资源可持续利用战略有重要意义。

地下水水库的调蓄能力具有以下主要特征：
动态性。地下水水库的调蓄能力与具体的历史发展阶段有直接的关系，不同的发展阶段人类开发水资源的工程技术手段不同。随着现代经济技术条件的变化，地下水水库的调蓄能力亦呈动态变化；
相对极限性。在某一历史发展阶段地下水水库的地下调蓄空间、补给水源和工程提水技术能力都是有限的，因此地下水水库调蓄能力具有相对极限性；
模糊性。由于地下介质空间的复杂性和不确定因素的客观存在，以及人类认识的局限性，决定了地下水水库调蓄能力在具体的调蓄指标上存在着一定的模糊性。同时调蓄能力的大小也是一个内涵明确而外延不明确的模糊概念；
可调控性。通过人工干预手段可以控制地下水的补给、蓄存和开采量，起到调控地下水水库调蓄能力的作用。

2 地下水水库调蓄能力综合评价的指标体系

2.1 地下水水库调蓄能力综合评价指标体系的确定

对地下水水库调蓄能力进行综合评价的前提是必须确定评价指标体系，指标体系是系统进行量化分析的基础，只有选择具有代表性且可以获得数据的指标，才能正确分析系统各组成部分之间的关系。地下水水库调蓄能力多指标体系指标的选取应遵循具有代表性、全面性、可操作性、独立性、可靠性的原则。其影响因素可以从库区水文地质条件、蓄水水源条件、地下水开采与补给条件和现阶段经济技术条件 5 个方面加以考虑。根据指标选取的原则和地下水水库调蓄能力的影响因素，采用系统分析手段，选定若干个代表性好、针对性强、易于量化、便于相互比较的评价指标，然后按照每个指标的类型及其相互隶属关系，将各个指标划分为不同层次、不同方面，建立地下水水库调蓄能力综合评价指标体系的递阶层次结构(图 1)。

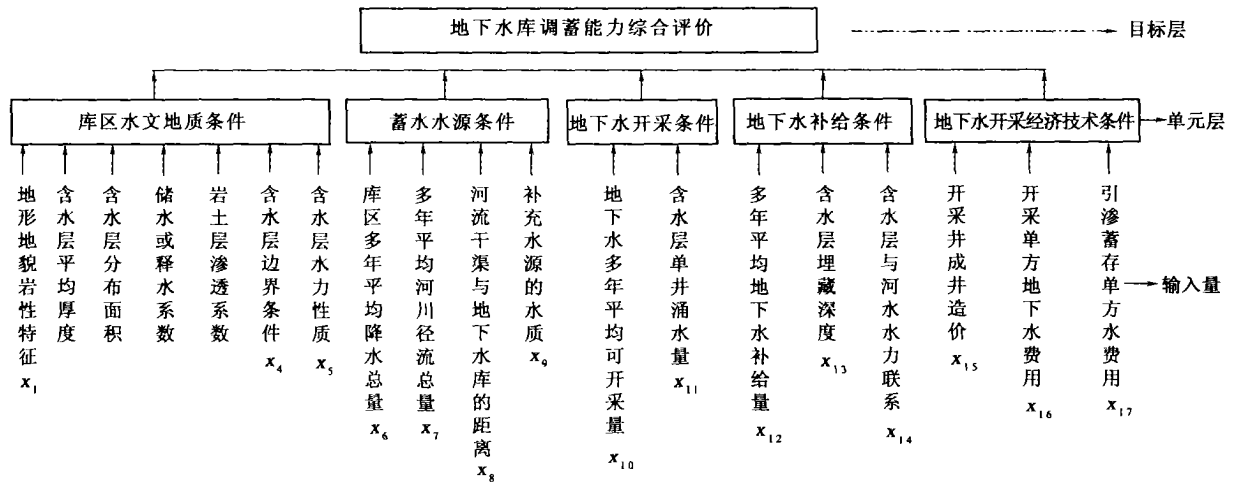


图 1 地下水水库调蓄能力综合评价指标的递阶层次结构

Fig. 1 Hierarchical structure of index system on regulation and storage capacity evaluation of an underground reservoir

地下水水库调蓄能力评价指标体系的选择及确定直接关系到综合评价的精度。首先应对所有拟定指标进行相关分析,在同一层次中剔除完全线性相关或相关关系密切的正相关指标后,初步拟定 19 项指标构成指标体系。其中含水层厚度、分布面积和岩层储水(或释水)系数可综合体现在地下水水库的最大调蓄库容中,可将这 3 项指标合并为地下水水库的最大调蓄库容,作为地下水水库调蓄能力大小的一个影响因素 x_2 。同时可将岩(土)层渗透系数与含水层厚度两项指标合并为含水层导水系数 $x_3(m^2/d)$,最终确定 17 项指标作为地下水水库调蓄能力综合评价的指标体系,包括 5 项定性指标, 12 项定量指标,是一个多指标半结构性决策问题。

2.2 地下水库调蓄能力评价指标相关性的处理

在选取指标时虽遵循指标间彼此独立的原则,但指标间总会有一定相关性,综合时必然会导致信息重叠,影响到评价结果的合理性,甚至会歪曲评价对象间的相对位置。为此,可采用协方差法来去除指标间的相关性,这种利用正交化方法的思路,将指标间的相关性用协方差来衡量。通过将后面指标信息中的已被前面指标替代的部分逐渐扣除,来消除指标间的相关性。利用去除相关性的指标值评价地下水库调蓄能力结果更合理。

3 地下水库调蓄能力模糊集评价方法

由于地下水库调蓄能力综合评价指标体系的复杂性,决定其评价方法必须采用复杂大系统理论和综合集成方法,在定性分析下结合定量计算,将现代方法与传统方法结合起来。由于地下水库调蓄能力的大小并不存在绝对分明的界限,具有中介过渡性,属于模糊概念。本文在陈守煜提出的模糊模式识别理论基础上,去除指标间的相关性,建立一种适合于对多指标体系的地下水库调蓄能力进行综合评价的多层模糊模式识别交叉迭代模型。

3.1 模糊模式识别交叉迭代模型^[5]

设对模糊概念 A 进行识别的 n 个样本组成的样本集合,每个样本可用 m 个指标特征值向量表示,则样本集可用 $m \times n$ 阶指标特征值矩阵 $X = (x_{ij})$ 表示。 x_{ij} 为样本 j 指标 i 的特征值; $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$ 。由于 m 个指标特征值量纲不同,在进行识别时要先消除指标特征值量纲的影响,使指标特征值规格化。将指标特征值矩阵变换为相对隶属度矩阵 $R = (r_{ij})$, r_{ij} 为样本 j 指标 i 的特征值规格化数或相对隶属度, $0 \leq r_{ij} \leq 1$ 。

设将 n 个样本依据 m 个指标特征值按 c 个级别(或类别)加以识别,其模糊识别矩阵为 $U = (u_{hj})$, u_{hj} 为样本 j 隶属于级别 h 的相对隶属度; $h = 1, 2, \dots, c$ 。设级别 h 的 m 个指标特征值为标准指标特征值 y_{ih} , 则 c 个级别的指标特征可用 $m \times c$ 阶标准指标特征值矩阵 $Y = (y_{ih})$ 来表示,并将其变换为相应的标准指标相对隶属度矩阵 $S = (s_{ih})$, s_{ih} 为级别 h 指标 i 的标准指标特征值规格化数或相对隶属度, $0 \leq s_{ih} \leq 1$ 。

样本 j 的 m 个指标特征用相对隶属度向量表示为 $r_j = (r_{1j}, r_{2j}, \dots, r_{mj})^T$; 级别 h 的 m 个标准指标特征用相对隶属度向量表示为 $s_h = (s_{1h}, s_{2h}, \dots, s_{mh})^T$; 考虑不同指标对识别的影响不同,引入指标权向量 $w = (w_1, w_2, \dots, w_m)$, 满足 $\sum_{i=1}^m w_i = 1, 0 < w_i < 1$ 。并将相对隶属度定义为权重,则样本 j 与级别 h 之间的差异可用加权广义欧氏距离 D_{hj} 表示,样本 j 与 c 个级别的差异的综合权衡度量为

$$f_j(u_j, w) = \sum_{h=1}^c D_{hj}^2 = \sum_{h=1}^c \left\{ u_{hj} \sqrt{\sum_{i=1}^m w_i (r_{ij} - s_{ih})^2} \right\}^2 \quad (1)$$

建立目标函数式(2),构造拉格朗日函数,对其求导可解得模糊模式识别交叉迭代模型式(3)、式(4)。

$$\text{Min} \left\{ F(U, w) = \sum_{j=1}^n f_j(u_j, w) \right\} \quad (2)$$

$$w_i = \left\{ \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{h=1}^c u_{hj} (r_{ij} - s_{ih})^2}{\sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{h=1}^c u_{hj} (r_{kj} - s_{kh})^2} \right\}^{-1} \quad (3)$$

$$u_{hj} = \begin{cases} 0 & d_{kj} = 0, k \neq h \\ \left\{ \frac{\sum_{i=1}^m w_i (r_{ij} - s_{ih})^2}{\sum_{i=1}^m w_i (r_{ij} - s_{ik})^2} \right\}^{-1} & d_{hj} > 0 \\ 1 & d_{hj} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

根据以上交叉迭代模型,可解得满足迭代精度要求的最优指标权向量 w^* 与最优模糊识别矩阵 (u_{ij}^*) 。对复杂系统中的模式识别与优选问题, 指标权向量的确定十分重要, 主要有主观赋权法、客观赋权法和主客观结合赋权法 3 种。本文采用主客观结合赋权法, 首先应用模糊模式识别交叉迭代模型式(3)、式(4)确定指标权向量(称为指标权向量初值), 然后根据决策者的经验知识对指标权向量进行调整。最后再按调整后的指标权向量, 应用模糊模式识别模型式(4), 计算样本对各级的相对隶属度和级别特征值。

3.2 地下水库调蓄能力综合评价的多层模糊模式识别交叉迭代模型

设地下水库调蓄能力多指标评价体系可分解为 3 层, 即输入层、单元层与目标层(图 1)。对目标层评价的实现, 可通过以下评序完成, 即将第 1 层输入层对单元层的评价看成第 1 级评价, 将单元层对目标层的评价看成第 2 级评价, 由此构成一个 2 级 3 层递进式的评价体系模型。若最低输入层有 17 个目标相对优属度输入到第 2 层的 5 个并列的单元系统。该层每个单元系统均有多个目标相对优属度输入, 每个目标有不同的权重 w_i 。分别利用模糊模式识别交叉迭代模型对每个单元系统计算输出——方案相对优属度向量 $u_i = (u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{in})$, ($i = 1, 2, \dots, 5$), 它们组成第 3 层即目标层单元系统的输入。令 $(u_{ij}) = (r_{ij})$, 设第 2 层 5 个并列单元系统的权向量为 $w = (w_1, w_2, \dots, w_5)$, 且 $\sum_{i=1}^5 w_i = 1$ 。由于第 3 层只有一个单元系统, 对此单元系统再次应用模糊模式识别交叉迭代模型, 可得最高的目标层单元系统的输出——方案相对优属度向量 $u = (u_1, u_2, \dots, u_n)$, 据此可对地下水库调蓄能力多层次多指标系统进行综合评价, 优选出适宜开发利用的地下水库区。

4 下辽河平原各区地下水库调蓄能力综合评价

下辽河平原位于辽宁省中部, 地势平坦, 为一断陷盆地, 区域基底为上第三系碎屑岩, 局部是灰岩和变质岩, 上部覆盖着深厚的松散堆积物, 第四系孔隙水较丰富, 是区域地表水和地下水的汇聚场所。库区东西两侧为对称分布的山前冲洪积扇与倾斜平原, 中部为冲积平原, 南部为滨海三角洲平原。含水层自东西两侧向中部变厚, 从北到南含水层厚度逐渐增大, 使地下具有很大调蓄库容, 是典型的地下水库, 开发潜力很大^[6]。

表 1 下辽河平原各区地下水库调蓄能力综合评价的指标特征值

Table 1 Index eigenvalue on regulation and storage capacity evaluation of underground reservoirs in lower Liaohe River watershed

单元层	评价指标	权重	西部山前平原					东部山前平原					中部冲积平原		
			1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	
库区水文地质条件	x_1	0.064	砂砾石中粗砂	砂砾、含砾粗砂	砂砾石中粗砂	砂砾石砾卵石	砂砾石中细砂	砂砾石为主	砂砾石砾卵石	卵石	砂砾石为主	中粗砂中细砂	中细砂中细砂	中细砂	中细砂
	$x_2 / 10^8 m^3$	0.579	0.436	4.711	4.794	7.269	12.011	19.330	11.988	35.479	4.675	42.164	22.383	15.025	
	$x_3 / (m^2 \cdot d^{-1})$	0.311	131.25	1031.25	616.67	1812.50	199.38	893.75	906.25	2712.50	483.33	170.83	151.04	132.50	
	x_4	0.031	弱透水	弱透水	中等	弱透水	透水	弱透水	弱透水	弱透水	弱透水	略隔水	透水	透水	弱透水
	x_5	0.015	微承压 - 承压	微承压 - 承压	潜水 - 微承压	潜水 - 承压	潜水 - 微承压	潜水 - 承压	潜水 - 微承压	潜水 - 微承压	微承压	微承压 - 承压	微承压 - 承压	潜水 - 微承压	潜水 - 承压
蓄水水源条件	$x_6 / (10^6 m^3 \cdot a^{-1})$	0.319	121.900	170.316	151.392	303.300	1414.615	760.120	609.102	499.845	237.558	3721.315	1769.500	806.625	
	$x_7 / (10^6 m^3 \cdot a^{-1})$	0.478	17.490	25.398	23.107	48.528	233.719	147.120	133.380	120.530	41.616	543.885	249.146	116.154	
	x_8 / m	0.084	5	0	0	0	12.5	2.5	0	0	0	7.5	5	12.5	
	x_9	0.119	3级	3级	3级	4~5级	3级	3~4级	3级	3级	3级	4~5级	3~5级	3~5级	
开采条件	$x_{10} / (10^6 m^3 \cdot a^{-1})$	0.600	73.28	63.25	15.70	70.20	181.03	77.94	85.19	28.11	72.97	548.46	179.99	82.05	
	$x_{11} / (m^3 \cdot d^{-1})$	0.400	3000	7500	7500	12500	1250	7500	7500	9500	3000	1200	1500	600	
补给条件	$x_{12} / (10^6 m^3 \cdot a^{-1})$	0.692	93.03	80.30	19.93	96.85	229.82	107.18	116.13	76.09	115.85	747.70	247.52	112.83	
	x_{13} / m	0.231	3~7	1~10	0~13	5~10	1~12	5~10	0~5	5~10	<5	5~35	<10	<5	
	x_{14}	0.077	密切	密切	密切	密切	中等	密切	密切	密切	密切	密切	中等	中等	
经济技术条件	$x_{15} / (\text{元} \cdot m^{-1})$	0.112	800~1000	800~1000	800~1000	800~1000	800~1000	800~1000	800~1000	800~1000	800~1000	800~1000	800~1000	800~1000	
	$x_{16} / (\text{元} \cdot m^{-3})$	0.444	1~15	1~15	1~15	1~15	1~15	1~15	1~15	1~15	1~15	1~15	1~15	1~15	
	$x_{17} / (\text{元} \cdot m^{-3})$	0.444	1~15	1~15	1~15	1~15	1~15	1~15	1~15	1~15	1~15	1~15	1~15	1~15	

根据该区的水文地质条件和地形地貌条件, 将下辽河平原地下水库区划分成 3 类 12 个分区, 依次为东沙

河冲洪积扇(1)、羊肠河冲洪积扇(2)、黑鱼沟河冲洪积扇(3)、大小凌河冲积扇(4)、西部扇前(间)平原(5)、辽河冲洪积扇(1)、浑河冲洪积扇(2)、太子河冲洪积扇(3)、海城河冲洪积扇(4)、东部扇前(间)平原(5)、新民 - 辽中平原(1)、辽中 - 台安平原(2), 各分区指标特征值见表 1。对定性指标 1、4、5、9、14, 需逐一考虑各个地下水库区方案关于每一个定性指标对优越性的二元比较定性排序, 确定定性排序一致性矩阵, 再用语气算子与相对隶属度的关系表即可得到定性指标的相对优属度向量^[5]。定量指标 2、3、6、7、10、11、12 属于越大越优型, 即指标特征值越大地下水调蓄能力越大; 而指标 8、13、15、16、17 则属于越小越优型, 指标特征值越小, 地下水调蓄能力越大。首先把决策方案的各定量指标无量纲化, 计算各指标间的协方差, 去除指标间的相关性。对两种类型的指标再分别利用式(5)、式(6)计算各指标的相对优属度。

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max_j x_{ij} + \min_j x_{ij}} \quad (5)$$

$$r_{ij} = 1 - \frac{x_{ij}}{\max_j x_{ij} + \min_j x_{ij}} \quad (6)$$

根据我国传统的 5 级分制, 即优(1 级)、良(2 级)、中(3 级)、可(4 级)、劣(5 级), 采用各个目标相对优属度 5 级标准值向量为 $s_i = (1, 0.8, 0.6, 0.3, 0)$ 。首先对单元层中第一个单元系统(库区水文地质条件)应用模糊模式识别交叉迭代模型式(3)、式(4), 取 $c = 5$, 迭代精度 $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 10^{-4}$, 初始权向量取为 $w^0 = (0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2)$, 解得满足迭代精度要求的指标权向量后, 再与决策者的知识与经验相结合, 最后确定的指标权向量为 $w = (0.064, 0.579, 0.311, 0.031, 0.015)$ 。将指标相对优属度矩阵 R , w , s_i 中的有关数据代入模糊模式识别模型式(4), 得到 12 个地下水库区对 5 个级别: 优、良、中、可、劣的相对隶属度矩阵

$$U = \begin{pmatrix} 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0402 & 0.0000 & 0.0326 & 0.0089 & 0.2178 & 0.0163 & 0.2356 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0073 & 0.0386 & 0.0282 & 0.0724 & 0.0000 & 0.0752 & 0.0172 & 0.6866 & 0.0273 & 0.3127 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0131 & 0.0800 & 0.0576 & 0.1573 & 0.0674 & 0.3086 & 0.0456 & 0.0723 & 0.0549 & 0.2615 & 0.3667 & 0.1083 \\ 0.0550 & 0.5219 & 0.4165 & 0.5429 & 0.7825 & 0.5250 & 0.8804 & 0.0163 & 0.3616 & 0.1266 & 0.5075 & 0.7598 \\ 0.9245 & 0.3594 & 0.4978 & 0.1872 & 0.1501 & 0.0586 & 0.0480 & 0.0069 & 0.5400 & 0.0636 & 0.1258 & 0.1319 \end{pmatrix}$$

根据级别特征值公式

$$H = \sum_{h=1}^c u_{hj} h \quad j = 1, 2, \dots, 12 \quad (7)$$

得到第一个单元系统输出的方案特征值向量

$$H_1 = (4.8968, 4.2022, 4.3838, 3.7645, 4.0827, 3.5018, 3.9414, 1.9079, 4.3816, 2.4699, 3.7590, 4.0235)。$$

由 $s = (1, 0.8, 0.6, 0.3, 0)$, 按相邻 2 个级别间线性内插, 得单元系统输出的方案相对优属度向量为 $u_1 = (0.0310, 0.2394, 0.1849, 0.3707, 0.2752, 0.4495, 0.3176, 0.8184, 0.1855, 0.7060, 0.3723, 0.2929)$

依此类推, 可求得其它 4 个单元系统(蓄水水源条件、地下水开采条件、地下水补给条件、经济技术条件)输出的方案特征值向量 H_2, H_3, H_4, H_5 , 再利用线性内插转换成单元系统输出的方案相对优属度向量

$$u_2 = (0.0762, 0.1703, 0.1672, 0.1811, 0.3431, 0.3022, 0.3150, 0.3016, 0.1914, 0.8416, 0.4135, 0.2441)$$

$$u_3 = (0.1691, 0.2747, 0.2412, 0.5018, 0.2816, 0.2849, 0.2899, 0.3468, 0.1678, 0.6749, 0.2854, 0.0883)$$

$$u_4 = (0.3164, 0.3033, 0.2508, 0.2985, 0.3476, 0.3069, 0.3521, 0.2815, 0.3521, 0.7817, 0.4138, 0.3392)$$

$$u_5 = (0.54, 0.54, 0.54, 0.54, 0.54, 0.54, 0.54, 0.54, 0.54, 0.54, 0.54, 0.54)。$$

以上 5 个单元系统输出的方案相对优属度向量组成最高层(目标层)单元系统的输入, 令 $(u_{ij}) = (r_{ij})$, 对目标层单元系统应用模糊模式识别交叉迭代模型式(3)、式(4), 求得单元层 5 个单元系统的权向量为 $w = (0.404, 0.270, 0.134, 0.134, 0.058)$ 。代入式(4)可求出 12 个地下水库区对 5 个级别的相对隶属度矩阵, 再应用级别特征值式(7)可求得目标层单元系统输出的方案特征值向量

$H = (4.7352, 4.0660, 4.1868, 3.9729, 3.9996, 3.8565, 3.9968, 2.7762, 4.1575, 2.1892, 3.9091, 4.0157)$ 。

根据级别特征值越小方案越优的选优原则，将各区地下水库的级别特征值 H_i 从小到大排列，可得下辽河平原各区地下水库调蓄能力大小的优劣排序。分析其排序规律可知地下水库调蓄能力在 2~3 级之间的依次为 5、3；调蓄能力接近 4 级的依次为 1、1、4、2、5、2、2；调蓄能力在 4~5 级间的依次为 4、3、1。上述评价结果可为下辽河平原优选适宜开发利用的地下水库区提供依据。

5 结 语

本文对地下水库的概念、调蓄原理和调蓄能力的分析与评价进行了初步探讨，提出地下水库调蓄能力的定义并建立地下水库调蓄能力综合评价的指标体系。在去除指标间相关性的基础上，建立一种适合于对多指标体系的地下水库调蓄能力进行综合评价的多层模糊模式识别交叉迭代模型。利用此模型对下辽河平原各区地下水库的调蓄能力进行综合评价，结果表明该模型具有能同时考虑定性定量指标，又能将迭代结果与决策者经验知识相结合来确定多指标权重的优点，为地下水库调蓄能力多层次多指标系统综合评价提供了一条新途径。

参考文献：

- [1] 杜汉学, 常国纯, 张乔生, 等. 利用地下水库蓄水的初步认识[J]. 水科学进展, 2002, 13(5): 618 - 622.
- [2] 赵天石. 关于地下水库几个问题的探讨[J]. 水文地质工程地质, 2002(5): 65 - 67.
- [3] 余 强, 赵云章, 苗晋祥, 等. 南水北调中线工程地下水库的基本特征与调控管理[J]. 水科学进展, 2003, 14(2): 209 - 212.
- [4] 郑德凤, 王本德. 流域防洪系统中地下水库调蓄能力分析[J]. 大连理工大学学报, 2005, 45(1): 132 - 137.
- [5] 陈守煜. 复杂水资源系统优化模糊识别理论与应用[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2002.
- [6] 谭世燕. 下辽河平原地下水库资源及其开发潜力分析[J]. 国土与自然资源研究, 1995(5): 33 - 39.

Index system and fuzzy sets theory for comprehensive evaluation on regulation and storage capacity of underground reservoir *

ZHENG De-feng^{1,2}, WANG Ben-de², NIAN Ting-kai²

(1. School of Urban and Environment, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China;

2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The regulation and storage capacity of an underground reservoir is defined with the viewpoint of keeping ecological balance, the sustainable development and utilization of water resources of a watershed. Then the index system of the comprehensive evaluation on regulation and storage capacity is established. Furthermore, this paper presents a recognition model of fuzzy pattern with cross iteration for multi-objective and multi-layer system to assess the regulation and the storage capacity of an underground reservoir on condition that the index correlation is eliminated. The model can consider qualitative and quantitative indexes and determine the index weights in multi-objective system through combining cross iteration results with the experience and preference of the decision makers. Finally, the model is applied to evaluate and optimize the regulation and storage capacity of the underground reservoirs in the lower watershed of Liaohe river. The case study shows that the new framework and methodology are scientific, reasonable and easy to use in practice.

Key words: underground reservoir; regulation and storage capacity; comprehensive evaluation; index system; fuzzy pattern recognition model

* The study is financially supported by the Key of Science and Technology, Ministry of Water Resources (No. [2002]341).