

岩溶地下水系统调蓄能力评价模型探讨

张春伟

(贵州大学, 贵州 贵阳 550025)

[摘要]岩溶地下水系统的调蓄能力决定着系统中岩溶地下水的开发利用能力。本文在分析影响地下水系统调蓄能力主要因子的基础上,建立了岩溶地下水系统调蓄功能评价的指标体系和评价等级标准。在层次分析法的基础上,建立一种适合于勘察程度较低、缺乏观测资料的岩溶地下水系统调蓄功能进行综合评价的模型。实例检验表明,该模型适用于岩溶区地下水系统。

[关键词]岩溶地下水系统;调蓄能力;指标体系

[中图分类号]P641 **[文献标识码]**A **[文章编号]**1000-5943(2015)01-0059-06

我国西南岩溶山区可有效开发利用的地表水资源缺乏,工程性缺水问题严重,但区内降水丰沛,在地质结构和岩溶作用的控制下,地下水系统的含水层中的岩溶空间对地下水具有良好的调蓄能力,合理利用地下水系统的这种调蓄能力开发利用地下水是解决工程性缺水的重要途径。然而,受地质构造和地形、水文网等条件控制,岩溶地下水系统小型多样,不同类型的地下水系统对地下水的调蓄能力差别较大,因此,在开发前期对所要开发的地下水系统的调蓄功能进行评价是很有必要的。

传统的评价方法主要包括:对地下河及岩溶大泉系统,利用流域出口枯季流量衰减过程序列资料,通过对枯水期地下水总排泄量的统计来实现估算;利用地下河系统含水层溶蚀空间几何模型,估算地下溶蚀空间来间接代替地下水系统的调蓄能力。对蓄水构造系统则主要利用较详细的勘探和试验成果,在查明含水层厚度、给水度等参数的基础上进行估算。这些方法对勘察程度较高的地下水系统是合适的,但是不能满足对勘察程度较低的地下水系统的评价,更不能满足规划阶段调查评价的需求。因此需要建立一种半定量的、适合于规划阶段对地下水系统调蓄能力评价的评价方法和指标体系。

本文针对岩溶石山区地下水系统的水文地质

条件,从水循环的系统性和整体性角度,^[1]充分考虑影响地下水系统调蓄能力的主要因素,探讨并建立了岩溶地下水系统的调蓄功能评价的数学模型及指标体系,力图实现为区域性的地下水系统调蓄能力评价提供一种方法。

岩溶地下水系统调蓄能力评价模型由数学模型、评价指标体系以及评价等级标准组成。

1 岩溶地下水系统调蓄能力评价模型建立

1.1 评价数学模型的选择

岩溶地下水系统是一个复杂的系统,影响其调蓄能力因素很多,适宜的评价方法为综合集成的系统方法。目前国内外关于综合评价法有数十种之多,根据计算权系数时原始数据来源以及计算过程的不同,这些方法大致可分为三大类:一类为主观赋权法,一类为客观赋权法,一类为主客观综合集成赋权法。本文评价方法选用主客观综合集成赋权法-层次分析法,并以其为基础,构建评价岩溶地下水调蓄能力的评价模型。

(1) 构造判断矩阵

设某层有 n 个因素, $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 比较它们对上一层某一准则的影响程度,采用 1-9

[收稿日期]2014-11-10

[基金项目]《贵州岩溶地下水赋存规律与找水关键技术研究》《贵州省岩溶地下水系统及水资源研究》

[作者简介]张春伟(1987-),男,河南周口人,在读硕士研究生,研究方向为水文地质。

标度方法(表1),确定在该层中相对于某一准则所占的比重。

表1 判断矩阵标度分级及含义

Table 1 Classification and meaning of matrix judging standard

标度	含义
1	两个因素相比较,具有同等重要性
3	两个因素相比较,一个因素比另一个因素稍重要
5	两个因素相比较,一个因素比另一个因素重要
7	两个因素相比较,一个因素比另一个因素重要的多
9	两个因素相比较,一个因素比另一个因素极其重要
2,4,6,8	介于上述两个相邻判断的中值
倒数	因素 i 和 j 比较得 a_{ij} , 则 j 和 i 比较得 $a_{ji} = 1/a_{ij}$

把低层次指标根据表1进行两两比较,得到判断矩阵:

$$A = (a_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

A-判断矩阵, a_{ij} -评价指标 i 和 j 比较所得标度, i, j-评价指标

(2) 权重值计算

采用和法,利用判断矩阵 A 计算权重值。

①将矩阵 A 的列向量归一化得:

$$\tilde{w}_{ij} = a_{ij} / \sum_{i=1}^n a_{ij} \quad (2)$$

②对 \tilde{w}_{ij} 按行求和得:

$$\tilde{w} = (\tilde{w}_1 \quad \tilde{w}_2 \quad \dots \quad \tilde{w}_n)^T \quad \tilde{w}_i = \sum_{j=1}^n \tilde{w}_{ij} \quad (3)$$

③归一化 \tilde{w} 得:

$$W = (w_1 \quad w_2 \quad \dots \quad w_n)^T \quad w_i = \tilde{w}_i / \sum_{i=1}^n \tilde{w}_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

(3) 一致性检验

衡量一个判断矩阵的一致性的指标为 CI

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(Aw)_i}{w_i} \quad (6)$$

式中: n-判断矩阵 A 的阶数; w_i -矩阵 W 中的

第 i 项; $(AW)_i$ -矩阵 A 与矩阵 W 乘积结果中的第 i 项; λ_{\max} -为判断矩阵 A 的最大特征值, n-判断矩阵的阶数。

CI 值反映判断矩阵 A 的非一致性的严重程度,但为了进一步明确非一致性是否可以接受。我们还需要引入随机一致性指标 RI。它是用从及其倒数中随机抽取的数字构造的阶正互反矩阵,算出相应的 CI,取充分大的样本,计算得的样本均值(表2)。

表2 随机一致性指标 RI 值

Table 2 RI value of random uniform norm

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51

当 $n \geq 3$ 时,把 CI 与 RI 之比定义为一致性比率 CR,

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (7)$$

当 $RI=0$,此时,定义 $CR=0$;当 $CR < 0.10$ 时,可以接受判断矩阵 A,否则要对判断矩阵 A 做修正。

(4) 综合评价

假设一级指标权重值向量 w 和二级指标的权重值 W_1, W_2, W_3 , 二级指标的实际评分向量为 R_1, R_2, R_3 ;

$$C_i = R_i \times w_i \quad (8)$$

式中: C_i 为一级指标得分。

$$C = (C_1 \quad C_2 \quad \dots \quad C_n)^T$$

综合评价结果 T:

$$T = W^T \times C \quad (9)$$

公式9 计算出的 T 值即为评价地下水系统调蓄能力的综合评价分值。

1.2 地下水系统调蓄能力评价因子体系建立

岩溶地下水系统的调蓄能力是系统接受补给能力、系统蓄水能力、系统给水能力的综合反应,因此,将系统接受补给能力、蓄水能力、给水能力的因子作为一级评价指标层。

选择年平均降水量、地形地貌、植被覆盖率、含水层埋藏深度、包气带土层类型、包气带基岩类型共6个因子作为系统接受补给能力的评价因子;选择含水层岩性、岩溶发育程度、含水介质组合类型、含水层体积、含水层破碎程度、系统边界

条件作为评价系统蓄水能力的评价因子;选择含水介质类型、含水层体积、边界条件、水力坡度作

为系统给水能力的评价因子,因此岩溶地下水系统调蓄能力评价指标体系(图 1)。

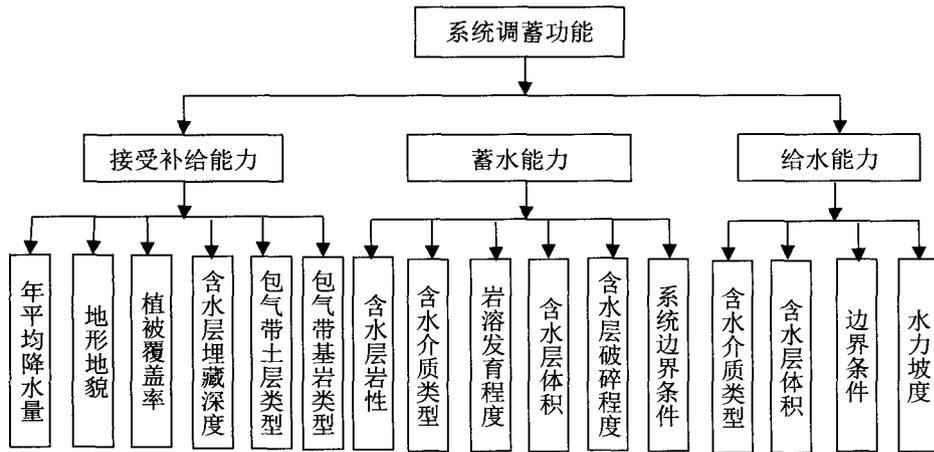


图 1 评价指标体系

Fig. 1 Judging index system

1.3 指标等级及权重值量化

1.3.1 评价等级标准量化

岩溶地下水系统的调蓄功能等级标准的建立是综合评价的前提,根据分级习惯,把调蓄功能分为三个等级:优、良、差,对应的百分制评级标准为:85-100、70-85、0-70,综合评价的分值在哪个区间内,调蓄功能就为该区间所属等级。地下水

系统评价目标层调蓄能力是三个一级指标综合评价得出,依次类推,一级指标由二级指标通过模型计算得出,二级指标的等级标准见表 3。为了数学计算需要,必须对指标进行量化,因此一级指标的三个等级必须用确定的百分值表示,分别为一级指标优级-90、良级-80、差级-60。遵循科学性、全面性的原则,结合岩溶地下水系统的地质结构特点,制定二级指标评价等级标准见表 3。

表 3 指标等级标准

Table 3 Standard of index grade

评价指标	评价等级标准		
	优(90)	良(80)	差(60)
二级指标	优(90)	良(80)	差(60)
年平均降水量 X_1	>1 200 mm	800 ~ 1 200 mm	<800 mm
地形地貌 X_2	岩溶谷地、盆地	斜坡	台地
植被覆盖率 X_3	>85%	70% ~ 85%	<70%
含水层埋藏深度 X_4	0 ~ 50	50 ~ 100	>100
包气带土层类型 X_5	砂土	壤土	粘土
包气带基岩类型 X_6	碳酸盐岩	不纯碳酸盐岩	非碳酸盐岩
含水层岩性 X_7	厚层灰岩	厚层白云岩	碳酸盐岩夹其它岩层
含水介质 X_8	溶隙-裂隙	裂隙-孔隙	孔隙
岩溶发育程度 X_9	存在岩溶管道、溶洞	溶孔、溶穴	岩溶发育差,只有溶孔
含水层体积 X_{10}	$\geq 1\ 000 \times 10^4\ m^3$	$100 \times 10^4\ m^3 \sim 1\ 000 \times 10^4\ m^3$	$0 \sim 100 \times 10^4\ m^3$
含水层破碎程度 X_{11}	区内有大型断裂、褶皱发育,岩层破碎	区内有多个小型构造发育,岩层较破碎	区内无构造,岩层较完整
系统的边界条件 X_{12}	全封闭	半封闭	开放型
含水介质 X_{13}	溶隙-裂隙	溶隙-孔隙	裂隙-孔隙
含水层体积 X_{14}	$\geq 1\ 000 \times 10^4\ m^3$	$100 \times 10^4\ m^3 \sim 1\ 000 \times 10^4\ m^3$	$0 \sim 100 \times 10^4\ m^3$
边界条件 X_{15}	全封闭	半封闭	开放型
水力梯度 X_{16}	>6%	3% ~ 6%	<3%

1.3.2 评价指标权重值量化

1. 评价指标体系一级指标通过表1构造的判断矩阵A确定

表4 判断矩阵A示意表

Table 4 Sheet of A matrix judgment

一级指标	接受补给能力	蓄水能力	给水能力
接受补给能力	1	1/5	1
蓄水能力	5	1	5
给水能力	1	1/5	1

把矩阵A按列进行归一化,得矩阵:

$$\begin{bmatrix} 0.14 & 0.14 & 0.14 \\ 0.71 & 0.71 & 0.71 \\ 0.14 & 0.14 & 0.14 \end{bmatrix}$$

把该矩阵按行相加得 w_0 :

$$w_0 = (0.43 \quad 2.14 \quad 0.43)^T$$

将 W_0 归一化得 W :

$$W = (0.14 \quad 0.71 \quad 0.14)^T$$

利用近似公式求判断矩阵的最大特征值 λ_{max} ,把数据带入公式3、公式2、公式4得:

$\lambda_{max} = 3.04; CI = 0.03; CR = 0.04 < 0.10$,结果一致性符合标准。

2. 根据表1构造接受补给能力二级指标的判断矩阵 B_1 :

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 7 & 5 & 6 & 4 \\ 1/3 & 1 & 5 & 4 & 5 & 3 \\ 1/7 & 1/5 & 1 & 1/2 & 1 & 1/3 \\ 1/5 & 1/4 & 2 & 1 & 2 & 1/5 \\ 1/6 & 1/5 & 1 & 1/2 & 1 & 1/3 \\ 1/4 & 1/3 & 3 & 5 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

由判断矩阵 B_1 得系统接受补给能力的影响因子权重向量为:

$$w_1 = (0.43 \quad 0.26 \quad 0.05 \quad 0.08 \quad 0.05 \quad 0.13)^T$$

$\lambda_{max} = 6.16; CI = 0.03; RI = 1.24; CR = 0.02 < 0.10$

系统蓄水能力判断指标矩阵 B_2

$$B_2 = \begin{bmatrix} 1 & 7 & 5 & 5 & 1 & 1/3 \\ 1/7 & 1 & 1/3 & 1/3 & 1/7 & 1/9 \\ 1/5 & 3 & 1 & 1 & 1/5 & 1/5 \\ 1/5 & 3 & 1 & 1 & 1/5 & 1/7 \\ 1 & 7 & 5 & 5 & 1 & 1/2 \\ 3 & 9 & 5 & 7 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

由判断矩阵 B_2 得:

$$w_2 = (0.22 \quad 0.03 \quad 0.06 \quad 0.23 \quad 0.39)^T$$

$\lambda_{max} = 6.20; CI = 0.04; RI = 0.03; CR = 0.03 < 0.10$,结果一致性符合标准。

3. 根据表1构造给水能力二级指标判断矩阵 B_3

$$B_3 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 2 & 5 \\ 1/3 & 1 & 1/3 & 3 \\ 1/2 & 3 & 1 & 4 \\ 1/5 & 1/3 & 1/4 & 1 \end{bmatrix}$$

由判断矩阵 B_3 得:

$$w_3 = (0.39 \quad 0.18 \quad 0.34 \quad 0.08)^T$$

$\lambda_{max} = 4.18; CI = 0.06; RI = 0.90; CR = 0.07 < 0.10$,结果一致性符合标准。

由上文的计算得:

$$W = (0.14 \quad 0.71 \quad 0.14)^T$$

$$w_1 = (0.43 \quad 0.26 \quad 0.05 \quad 0.08 \quad 0.05 \quad 0.13)^T$$

$$w_2 = (0.22 \quad 0.03 \quad 0.06 \quad 0.23 \quad 0.39)^T$$

$$w_3 = (0.39 \quad 0.18 \quad 0.35 \quad 0.08)^T$$

2 模型检验

岩溶地下水系统总体上可分为集中排泄系统(地下河和岩溶大泉)与分散排泄系统(蓄水构造)两大类,分别选择不同类型代表性系统,对所建模型的可行性进行检验。

2.1 地下河系统

上坝地下河系统发育于道真县南6 km 上坝乡南侧的垄岗地带,区内碳酸盐岩广布,地貌属垄岗槽谷和低缓溶丘洼地地貌,地形坡度 $20^\circ \sim 35^\circ$ ^[3]。地下水完全来源于大气降水补给,通过地表溶隙、岩溶竖井、漏斗、落水洞垂直补给地下,该区多年平均降水量 1122 mm/a 。

地下河流域内出露地层从奥陶系至侏罗系,石炭系、泥盆系地层缺失。地下河发育在栖霞、茅口组(P_2q+m)地层中。栖霞、茅口组下伏志留系上统韩家店组(S_2hj),岩性为泥岩、粉砂质粘土岩,上覆二叠系上统吴家坪至三叠系下统夜郎组砂堡湾段($P_2w-T_1y^1$),岩性为页岩钙质泥岩夹薄煤层,分别构成地下河地系统的隔水底板和顶板,从而使得地下河形成独立的补径排系统。地下河道全长 22.5 km ,河床高程从 1180 m 降至 680 m 。本世纪初利用上坝地下河建成了地下水库,

为一处完全调节型水库,总蓄水量 223 m³,调蓄能力强。据此,建立上坝地下河指标情况见表 5。

表 5 上坝地下河系统指标值

Table 5 Index value of Shangbahe groundwater system

二级指标	实际情况	等级
年平均降水量 X ₁	1 122 mm	良
地形地貌 X ₂	谷地	优
植被覆盖率 X ₃	>80%	良
含水层埋藏深度 X ₄	0~10 m	优
包气带土层类型 X ₅	亚粘土	优
包气带基岩类型 X ₆	不纯碳酸盐岩	良
含水层岩性 X ₇	厚层灰岩	优
含水介质类型 X ₈	溶隙-裂隙	优
岩溶发育程度 X ₉	管道、溶孔	良
含水层体积 X ₁₀	271×10 ⁴ m ³	良
含水层破碎程度 X ₁₁	褶皱、断裂发育	优
系统的边界条件 X ₁₂	全封闭	优
含水介质 X ₁₃	溶隙-裂隙	优
含水层体积 X ₁₄	271×10 ⁴ m ³	良
边界条件 X ₁₅	全封闭	优
水力梯度 X ₁₆	2.2%	差

根据表 5,二级指标的实际分值向量为:

$$R1 = (\text{良、优、良、优、优、良}) = (80, 90, 80, 90, 90, 80)$$

$$R2 = (\text{良、优、良、优、优、优}) = (90, 90, 80, 80, 90, 90)$$

$$R3 = (\text{优、优、优、优}) = (90, 80, 90, 60)$$

由公式 8 得:

$$C_1 = R_1 \times w_1 = 83.90, C_2 = R_2 \times w_2 = 87.90, C_3 = R_3 \times w_3 = 85.80$$

由公式 9 得 T:

$$T = W^T \times C = (0.14 \quad 0.72 \quad 0.14)$$

$$\begin{bmatrix} 83.90 \\ 87.90 \\ 85.80 \end{bmatrix} = 87.05$$

综合评价结果是 87.05 分,处于 85-100 分数段调蓄功能属于优级,与工程实际结果吻合一致。

2.2 蓄水构造系统

海龙坝水源地位于贵州省遵义市北郊。为一山间盆地,水源地南西和北西为自然分水岭,该分水岭与地下分水岭从本吻合^[4],区域平面上呈“长方形”状。由于上述边界的组合,使测区构成

一个独立的、完整的地下水蓄水构造系统。

区内植被覆盖较好,植被种类丰富,覆盖率达到 80% 以上;出露地层从老到新依次为寒武系、奥陶系系统和第四系,岩性主要以碳酸盐岩为主,第四系厚度 0~15 m,主要为亚砂土、砂、卵石。含水层为寒武系下统清虚洞组及中上统娄山关群的中厚层白云岩,受地质构造、地形和水文网控制构成了封闭状的阻水型蓄水构造,14 个勘探孔资料表明,该层岩石多破碎,岩心上溶孔、溶蚀裂隙发育,含水空间为溶孔、裂隙组合类型^[2]。地下水埋深 5~15 m,有效含水层厚度为 138 m,面积 10.66 cm,为潜水含水层。详查报告指出该水源地良好的调蓄能力,“以丰补枯”,在以 3 万 m³/d 的水量连续开采 30 年的条件下,水源地地下水位降深大于 30 m 且处于稳定状态。据此,建立海龙坝岩溶盆地地下水系统的指标情况见表 6。

表 6 海龙坝地下水系统指标值

Table 6 Index value of Hailongba groundwater system

二级指标	实际情况	等级
年平均降水量 X ₁	1 200 mm	良
地形地貌 X ₂	盆地	优
植被覆盖率 X ₃	80%	良
含水层埋藏深度 X ₄	5~15 m	优
包气带土层类型 X ₅	砂土	优
包气带基岩类型 X ₆	白云岩	良
含水层岩性 X ₇	厚层白云岩	良
含水介质类型 X ₈	溶隙-裂隙	优
岩溶发育程度 X ₉	溶孔、溶穴	良
含水层体积 X ₁₀	1 470×10 ⁹ m ³	优
含水层破碎程度 X ₁₁	有多条断裂带发育	优
系统的边界条件 X ₁₂	全封闭	优
含水介质 X ₁₃	溶隙-裂隙	优
含水层体积 X ₁₄	1 470×10 ⁴ m ³	优
边界条件 X ₁₅	全封闭	优
水力梯度 X ₁₆	2.7%	差

根据表 6,二级指标的实际分值向量为:

$$R1 = (\text{良、优、良、优、优、良}) = (80, 90, 80, 90, 90, 80)$$

$$R2 = (\text{良、优、良、优、优、优}) = (80, 90, 80, 90, 90, 90)$$

$$R3 = (\text{优、优、优、优}) = (90, 90, 90, 60)$$

由公式 8 得:

$$C_1 = R_1 \times w_1 = 83.89, C_2 = R_2 \times w_2 = 87.16, C_3 = R_3 \times w_3 = 87.56$$

由公式9得T:

$$T = W^T \times C = (0.14 \quad 0.72 \quad 0.14) \begin{bmatrix} 83.89 \\ 87.16 \\ 87.56 \end{bmatrix} = 86.76$$

综合评价结果是86.76分,处于85-100分数段调蓄功能属于优级,与详查结论吻合一致。

3 结果与讨论

3.1 结论

研究表明该模型适合岩溶地区地下水系统调蓄能力评价,通过对影响因子的概化,建立评价指标体系和等级标准,利用数学方法综合计算,对自然条件下尚处于规划阶段、缺乏资料的地下水系统调蓄能力评价较合适。

3.2 讨论

利用影响因子建立评价指标体系虽然能综合评价一个地下水系统,但仍存在问题,如某些因子无法概化且等级标准不够详细,这些问题都将导致评价结果偏离实际情况;其次该模型存在一定的主观性,使的评价结果也因人而异。必须在理论和技术方面有所突破才能解决目前所面临的难题。

[参考文献]

- [1] 郭琳,陈植华. 岩溶地区地下河系统水资源定量评价的问题与出路[J]. 中国岩溶,2006,25(1):1-4.
- [2] 王明章. 贵州寒武系白云岩山间盆地型水源地混合模拟模式探讨—以海龙坝水源地为例[J]. 中国岩溶,1993,12(1):33-43.
- [3] 杨光照. 岩溶山区高位地下河成库条件研究[D]. 贵州大学,2008.
- [4] 吴舒天. 白云岩山间盆地型水源地地下水资源评价方法研究[D]. 贵州大学,2009.

Discussion of Groundwater Reservoir Regulating Capacity System Evaluation Model

ZHANG Cun-wei

(Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China)

[Abstract] The reservoir regulating capacity of karst groundwater system decides the development of groundwater. In this paper, the factors which influence the reservoir regulating capacity are analysed, the target system and evaluation standard of groundwater reservoir regulating capacity are also built up. On the basis of AHP, a comprehensible evaluation model for groundwater reservoir regulating system of low exploration degree and less observation information is built up. This model is tested to be suitable for the karst groundwater system by experiments.

[Key words] Karst groundwater system; Reservoir regulating capacity; Standard system