

济南泉域裂隙岩溶水管理策略探讨

房佩贤 卢文喜

奚德荫

(长春地质学院)

(山东地矿局八〇-水文工程地质队)

摘要 本文应用多目标决策理论对济南市区裂隙岩溶地下水的开采方案进行优化, 获得了多目标下的非劣解。对拟开发的供水水源工程, 在满足各种约束条件下, 本着最佳经济效益的原则, 同时考虑资金的时间价值因素, 建立了动态规划模型, 制定了最优开发策略。

关键词 多目标决策 非劣解 动态规划 最优策略

济南市以其泉水闻名于世。可是, 70年代中期以来, 由于工业、农业和生活用水量的急剧增加, 导致对裂隙岩溶水开采量不断增大。人工开采不仅袭夺了泉水的流出量, 而且还使市区地下水的贮存量受到了消耗, 水位呈现出持续下降的趋势, 尤其从1975年开始, 枯水季节出现了地下水动水位低于趵突泉及黑虎泉泉口标高的开采动态, 造成泉池干涸, 泉水由常年喷涌转化为季节性出流。此后, 该两泉群断流时间逐年加长, 至1989年初珍珠泉群和五龙潭泉群也相继干枯, 泉水喷涌之壮观景象已不复存在。

因此“保泉供水”是济南市亟待解决的矛盾。欲解决这个矛盾, 就要对有关水源、开采和环境等各方面有关因素, 做综合分析, 运筹最佳管理决策, 以期实现最佳管理效果。

济南裂隙岩溶地下水在其特定的空间范围内存在与运动, 形成裂隙岩溶地下水系统。多年来, 通过对该系统观测、分析和研究, 对其行为过程和状态特征已经有了充分的了解。目前面临的问题是如何对系统的可控因素进行优化, 找出最佳管理决策, 以实现“保泉供水”的目的。

实际上遇到的问题多目标的。济南裂隙岩溶地下水系统至少有两个相互矛盾的目标: 一个是保泉, 一个是供水。本文首先应用多目标决策 (Multiobjective Decision Making) 理论予以讨论。

多目标决策理论最早是在1896年由法国经济学家帕勒托从政治经济学的角度提出来的, 用以解决具有多个目标, 目标之间又相互矛盾的决策问题。近年来这种理论已得到广泛的应用。多目标决策的标准数学模型可写成如下形式:

$$(VP) \begin{cases} V = \min[f_1(X), f_2(X), \dots, f_n(X)] \\ X \in R \\ R = \{X | G_i(X) \leq 0, i = 1, 2, \dots, m\} \end{cases}$$

第一作者简介 房佩贤 男 58岁 教授 水文地质专业 已发表“中国北方岩溶水”等论文

收稿日期 1988-06-04

其中 $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$, 是由 n 个变量组成的 n 维列向量, x_i 表示 X 的第 i 个分量. $X \in E^n$, E^n 表示 n 维欧氏空间. $P \geq 2$, $f_i(X)$ ($i = 1, 2, \dots, P$) 表示 P 个目标函数. $G_i(X)$ ($i = 1, 2, \dots, m$) 表示 m 个约束. 符号 (VP) 表示多目标决策的数学模型, 整个模型 (VP) 表示在约束集合 R 内求多目标最优. 多目标问题的解与单目标问题的解有一个重要区别, 即对于单目标问题任何两个解都可以比较优劣, 可是对于多目标问题, 任何两个解不一定都能比较其优劣. 因此在多目标问题中, 定义了一种非劣解 (也叫有效解), 它的定义是: 考虑上述多目标决策问题 (VP), 对于 $X^* \in R$, 若不存在 $X \in R$, 使单目标问题均满足

$$f_i(X^*) \geq f_i(X) \quad i = 1, 2, \dots, P$$

则称 X^* 为多目标决策问题 (VP) 的非劣解.

济南市面临的问题是, 寻求一种最佳的开采方案, 在一定条件下使市区的开采量尽可能地大 (在一定限度之内), 同时还要使这种开采在四大名泉处产生的水位削减值尽可能地小. 这个问题可用多目标决策模型描述如下:

$$\text{目标函数} \begin{cases} \max C(X) = \max \sum_{j=1}^5 x_j \\ \min D(X) = \min \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^5 s_{ij} x_j \end{cases}$$

其中 $X = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]'$ 是表示五个水厂开采量的列向量, $x_1, x_2, \dots, x_5$, 分别表示五个水厂各自的开采量, 在该模型中, 就是要求的非劣解. 目标函数 $C(X)$ 表示市区五个水厂的总采量, $\max C(X)$ 就是求 $C(X)$ 极大. 目标函数 $D(X)$ 表示五个水厂的开采在四大名泉处各自产生的水位削减值相叠加的总和, $\min D(X)$ 就是求 $D(X)$ 极小.

限制条件:

$$\begin{aligned} (1) \quad C(X) &\leq \max Q \text{ 内采}; & (2) \quad \sum_{j=1}^5 s_{1j} x_j &\leq d_{11}; & (3) \quad \sum_{j=1}^5 s_{2j} x_j &\leq d_{21}; \\ (4) \quad \sum_{j=1}^5 s_{3j} x_j &\leq d_{31}; & (5) \quad \sum_{j=1}^5 s_{4j} x_j &\leq d_{41}; & (6) \quad x_j &\geq 0, \quad j = 1, 2, 3, 4, 5 \end{aligned}$$

其中 s_{ij} ($i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, 3, 4, 5$) 表示在第 j 个水厂每开采单位水量时, 在第 i 个泉处的水位削减值. 限制条件 (1) 要求市区五个水厂的总采量不超过根据资源计算得到的市区最大容许开采量. 限制条件 (2) ~ (5) 要求五个水厂的开采在每个泉处的水位削减值叠加之和不超过一定的数值 d_i ($i = 1, 2, 3, 4$), 这四个数值 d_i ($i = 1, 2, 3, 4$) 根据实际情况要保持一定的关系, 用来控制在不同泉处的水位削减值不要产生较大的差异, 以避免有的泉喷涌, 有的泉断流. 如趵突泉和黑虎泉泉口的地面较高, 容易断流, 因此需要把这两泉处的水位削减值限制在较小的数值范围之内. 约束条件 (6) 为非负条件.

上述多目标决策模型可写成如下标准形式:

$$(VP) \begin{cases} V = \min [f_1(X), f_2(X)] \\ X \in R \\ R = \{X | G_i(X) \leq 0, \quad i = 1, 2, 3, \dots, 10\} \end{cases}$$

$$\text{其中: } f_1(X) = \frac{5}{C(X)} = \frac{1}{\sum_{j=1}^5 x_j}, \quad f_2(X) = D(X) = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^5 S_{ij} x_j$$

$$G_i(X) = \sum_{j=1}^5 s_{ij} x_j - d_i \leq 0, \quad i = 1, 2, 3, 4; \quad G_5(X) = C(X) - \max Q_{\text{内采}} \leq 0;$$

$$G_i = -x_i \leq 0, \quad i = 6, 7, 8, 9, 10$$

为叙述方便, 五个水厂依次编号为 $j = 1, 2, 3, 4, 5$, 它们的开采量分别为 x_i ($i = 1, 2, 3, 4, 5$)。四大名泉: 趵突泉、黑虎泉、珍珠泉、五龙潭泉依次编号为 $i = 1, 2, 3, 4$, 它们各自容许的水位削减值分别为 d_i ($i = 1, 2, 3, 4$) (表1)。

关于多目标决策模型的求解, 目前有两类解法: 一类是把多目标问题转化为单目标问题求解, 另一类是直接求非劣解。根据上述具体模型的特点, 把它转化为一系列单目标问题求解。为此把原模型改写成如下形式:

$$\begin{aligned} \min f_2(X) &= \min \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^5 s_{ij} x_j \\ \text{约束} \quad &\begin{cases} G_i(X) = \sum_{j=1}^5 s_{ij} x_j - d_i \leq 0, \quad i = 1, 2, 3, 4 \\ G_5(X) = C(X) - Q_\delta \leq 0, \quad \delta = 1, 2, \dots \\ G_i(X) = -x_i \leq 0, \quad i = 6, 7, 8, 9, 10 \end{cases} \end{aligned}$$

这里 Q_δ ($\delta = 1, 2, \dots$) 表示小于 $\max Q_{\text{内采}}$ 的一系列市内总采量的数值, 将 Q_δ 依次代入不同的数值见表1, 进行求解, 就可以得到对应的一系列 $f_2(X)$ 和 X 的值, $X = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)'$ 的值即为原多目标决策问题的非劣解。

表1 多目标决策模型的非劣解

Tab.1 Noninferior solutions of multiobjective decision-making model

目 标 值	水 位 制 约 数	Q_δ	非劣解 (m^3/d)				
$C(X)$ ($10^4 \text{m}^3/\text{d}$)	$f_2(X)$ (m)	d_1 d_2 d_3 d_4	($10^4 \text{m}^3/\text{d}$)	x_1	x_2	x_3	x_4 x_5
8	1.198		8	38 287	41 713	0	0 0
9	1.355	0.65 0.75 0.85 0.85	9	0	85 701	4 299	0 0
10	1.716		10	0	83 808	16 192	0 0
11	2.077		11	0	81 915	28 085	0 0
10	1.464		10	0	47 507	2 493	0 0
11	1.825	0.8 0.85 0.85 0.95	11	0	95 614	14 836	0 0
12	2.186		12	0	93 721	26 279	0 0
13	2.547		13	0	91 827	38 173	0 0
12	1.933		12	0	107 419	12 581	0 0
13	2.294	0.85 0.95 1.05 1.05	13	0	105 526	24 474	0 0
14	2.655		14	0	103 633	36 367	0 0
15	3.436		15	60 714	25 786	63 500	0 0

根据钻孔资料, 济南市区裂隙岩溶含水层厚度约为75 m。另据开采资料, 水位围绕着开采井呈“圆盘”状下降, 基本上可按各向同性处理。引用抽水试验的结果, 渗透系数 $K = 210 \text{ m/d}$ 。由于有约束条件 $G_s(X) \leq 0$ 的存在, 所以在规划下的开采是处于稳定的条件。用公式 $H_0 - H = \frac{0.366Q}{km} \cdot \lg \frac{R}{r}$ 计算 S_{ij} , 其中 $R = 1600 \text{ m}$ 是根据等水位线图确定的影响半径。

对一系列单目标问题求解, 结果见表1。求得的是系列分析解, 为决策人员提出了供选择的多种方案。

为了保证泉水的正常出流, 即使采取了最佳开采方案, 能从济南裂隙岩溶地下水系统中开采的水量也必定受到一定的限制, 即不能超过该系统的补给量。而济南市对水的需求量却在逐渐增加。为解决这一日益激化的矛盾, 还需要开发新的供水水源工程, 即在保泉和不损害环境的前提下, 本着既满足供水需求, 又使经济效益最佳的原则, 寻找最佳的开发方案。

根据济南市自来水公司提供的资料, 将来有下列新的供水水源工程可供开发, 具体条件见表2。

表2 拟开发的供水水源工程条件

Tab.2 Conditions of the supplying water projects to be draum up for developing

拟建工程代号	基建费 (万元)	单位运行费 (元/m ³)	寿命 (a)	最大供水能力 max Q (10 ⁴ m ³ /d)	备 注
$j = 1$	18 000	0.14	50	40	
$j = 2$	3 500	0.10	50	10	
$j = 3$	2 500	0.11	50	10	
$j = 4$	5 500	0.12	45	15	
$j = 5$	500	0.06	50	10	视泉水恢复情况

注: 根据1984年收集的资料计算

表3 1989~1993年缺水量

Tab.3 Lacking water quantity from 1989 to 1993

年 份	1989	1990	1991	1992	1993
I	0	1	2	3	4
缺水量 D_i (10 ⁴ m ³ /d)	31.2	34.5	39.2	43.9	48.7

上述问题实际上是一个多阶段决策问题, 可用动态规划的方法加以解决。这种方法是针对这样的一类活动过程, 根据过程的特点可将过程分为若干个互相联系的阶段, 在它的每一个阶段都需要作出决策, 并且一个阶段的决策确定以后, 常常影响下一个阶段的决策, 从而影响整个过程的活动路线。各个阶段所确定的决策就构成一个决策序列, 通常称为一个策略。由于每个阶段可供选择的决策不止一个, 因而就形成许多策略可供选取, 对应于一个策略就有确定的活动效果, 这个效果是可用数量来衡量的。这样, 不同的策略, 效果也不同。多阶段决策问题, 就是要在允许选择的那些策略中间, 选择一个最优策略, 使在预定的标准下, 达到最好的效果。

建立动态规划模型如下:

$$(I) \quad \min \sum_{t=0}^T (1+i)^{-t} \sum_{j=1}^N (a_j + \beta_j x_{jt}) y_{jt} \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^N x_{jt} y_{jt} \geq D_t, \quad t = 0, 1, 2, 3, 4 \quad (2)$$

$$\begin{cases} 0 \leq x_{jt} \leq \max Q_j, & t = 0, 1, 2, 3, 4, \\ & j = 1, 2, 3, 4, 5 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} y_{jt} \in \{0, 1\} & t = 0, 1, 2, 3, 4, \\ & j = 1, 2, 3, 4, 5 \end{cases} \quad (4)$$

其中 $N = 5$ 表示可用于开发的新供水水源工程的总数; D_t 为各个时期的供水需求量; $\max Q_j$ 为第 j 个供水水源工程的最大供水能力; t 表示时间, $t+1=5$ 为规划年限; x_{jt} 为第 j 个供水水源工程在第 t 年的供水量; y_{jt} 为 0—1 型决策变量, 如第 j 个供水工程在第 t 年或其前开始供水, 0—1 型决策变量取 1。 i 为资金的时间价值折算系数, 我国目前阶段可取 $i = 0.08$; β_j 为第 j 个供水工程的单位运行费, 也就是第 j 个供水工程每提供单位水量所需的费用。 α_j 为第 j 个供水工程的分年基建费, 它是根据工程总的基建费和工程寿命, 运用工程经济学公式:

$$\alpha = P[i(1+i)/((1+i)^n + 1)]$$

计算得到的。 P 表示工程总的基建费, α 表示工程的分年基建费, n 为工程寿命。计算结果见表 4。

表 4 各工程的分年基建费

Tab.4 Capital construction charge by years of each project

工程序号 (j)	1	2	3	4	5
分年基建费 (万元)	1470.6	285.9	204.25	413	122.5

根据工程经济学中关于资金的时间价值因素分析, 资金的经济效应不仅与其多少有关而且还与时间有关。为使不同时间上的资金能够直接进行比较, 只有把它们转化为同一时间上的资金。式(1)中因子 $(1+i)^{-t}$ 的作用就是把不同时间的资金都折算成现值, 以便于比较。

式(2)的意义是要求供水量要满足各个时期的供水需求 D_t ($t = 0, 1, 2, 3, 4$)。式(3)的意义是要求任一个供水水源工程在各个时期的供水量不大于该供水水源工程的最大供水能力。式(1)的意义是, 对规划的全过程 ($t = 0, 1, 2, 3, 4$) 而言, 选择 x_{jt} 和 y_{jt} ($t = 0, 1, 2, 3, 4$; $j = 1, 2, 3, 4, 5$), 在满足(2)、(3)和(4)的限制条件下, 使整个过程的经济费用最小。

求解上述模型应用了动态规划的最优化原理, 一个过程的最优策略具有这样的性质, 即无论初始状态及初始决策如何, 其以后诸决策对于先前决策所导致的状态作为初始状态的后部子程序而言, 必须构成最优策略。因此, 只要从过程的终点出发, 逆序地递推出从各个阶段每一个状态出发的最优子策略, 就可以最终地求出全过程的最优策略, 为此, 把模型(I)改写成如下形式:

$$(II) \begin{cases} \min \sum_{t=1}^T (1+i)^{-t} \sum_{j=1}^N (\alpha_j + \beta_j x_{jt}) y_{jt}, & K = T, T-1, \dots, 0 \\ \sum_{j=1}^N x_{jt} y_{jt} \geq D_t, & t = 0, 1, 2, 3, 4 \\ 0 \leq x_{jt} \leq \max Q_j, & t = 0, 1, 2, 3, 4, \\ & j = 1, 2, 3, 4, 5, \\ y_{jt} \in \{0, 1\}, & t = 0, 1, 2, 3, 4, j = 1, 2, 3, 4, 5. \end{cases}$$

求解模型(II),从规划过程的终点出发,先令 $K=T=4$,然后用枚举法求得 x_{j4} 和 y_{j4} ($j=1,2,3,4,5$),再令 $K=3$,用同样方法求得 x_{j3} 和 y_{j3} ($j=1,2,3,4,5$),仿此进行下去,直到计算完 $K=0$ 的情况。计算结果见表5和表6。

表5 各工程在各年的供水量

Tab.5 Supplying water quantity of each project in various years

j	年份 t				
	1989	1990	1991	1992	1993
x_{jt}	0	1	2	3	4
1	0	0	0	0	3.7
2	10	10	10	10	10
3	10	10	10	10	10
4	11.2	14.5	14.2	13.9	15
5	0	0	5	10	10

注: x_{jt} 的单位是 $10^4\text{m}^3/\text{d}$

表6 决策变量 y_{jt} 的计算结果Tab.6 Calculated results of decision-making variable y_{jt}

j	t				
	0	1	2	3	4
y_{jt}					
1	0	0	0	0	1
2	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1
5	0	0	1	1	1

从表6可知, $y_{20} = y_{30} = y_{40} = 1$, 表示在1989年2号、3号和4号供水水源工程开始供水; $y_{52} = 1$ 表示1991年5号供水工程建成并开始供水; $y_{14} = 1$ 表示到1993年1号供水工程建成并开始供水。五个工程各年的供水量见表5。

参 考 文 献

- 1 余俊, 廖道训. 最优化方法及其应用. 武汉: 华中工学院出版社, 1986
- 2 黄愉祥, 邢爱芳. 工程经济学. 上海: 同济大学出版社, 1986
- 3 V.Vemuri V. Multi-objective optimization in water resource systems. Water Resour Res., 1974, 10(1): 44~48

APPROACH ON MANAGEMENT OF FISSURE KARST WATER IN JINAN CITY

Fang Peixian Lu Wenxi

Xi Deyin

(Changchun University of
Earth Science)

(No.801 Hydrogeology Party,
Shandong Province)

Abstract

This paper, using the theory of multiobjective decision-making, deals with the optimization scheme for developing fissure karst ground water in Jinan City, and obtains noninferior solutions under multiobjective.

Under the conditions of various constrains and principle of optimum economic benefit as well as fund value factors, the dynamic programming model for the supplying water projects to be developed is established and optimum developing tactics is obtained.

Key words: multiobjective decision-making, noninferior solutions, dynamic programming model, optimum tactics