

多目标系统模糊优选理论在城市 饮用水源地选址中的应用*

黎 坤, 陈晓宏, 江 涛, 涂新军

(中山大学水资源与环境研究中心 广州 510275)

摘 要: 以佛山市新饮用水源地选址为例, 通过综合分析, 提出了城市饮用水源地选址的9个特征指标, 包括水量、水质、输水距离、投资等4个定量指标和河道地形、水源保护的难易度、对经济发展的影响程度、水源污染风险、对航运的影响程度等5个定性指标。采用专家评估法将定性指标量化, 并将量化后的定性指标和定量指标耦合, 应用多目标系统模糊优选模型, 优选出了佛山市的新饮用水源地, 取得了良好的应用效果。

关键词: 城市饮用水; 水源地; 模糊优选理论; 佛山市

中图分类号: F503 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2005) 04-0120-04

城市新饮用水源地的选址, 是一个复杂的问题, 除了要考虑水量、水质、经济投资等因素^[1]外, 还要考虑水源污染风险问题、水源地的保护问题及水源保护区的设置对经济发展的影响问题等。由于城市新水源地的选址所涉及的因素, 如水源污染风险、水源地保护及对经济发展的影响等因素具有模糊性, 不确定性, 这些模糊性不仅客观存在, 并且与人类的认识有很大关系^[2], 因此适合用多目标模糊优选理论对城市新水源地进行选址。

1 多目标系统模糊优选理论

设在优选与决策过程中, 取决策集 D 中的目标 i 最大特征值 $\max(x_{ij})$ 与最小特征值 $\min(x_{ij})$ 作为上、下确界的相对值, 由此构成参考连续统的两极, 根据相对隶属度的定义计算的目标对优的隶属度是目标相对优属度。

对越大越优目标相对优属度公式为:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (1)$$

对越小越优目标相对优属度公式为:

$$r_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (2)$$

还有几种形式的目标相对优属度公式, 如对越大越优目标相对优属度公式为:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (3)$$

对越小越优目标相对优属度公式为:

$$r_{ij} = 1 - \frac{x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (4)$$

式中, r_{ij} 为决策 j 对目标 i 的相对优属度; $\max(x_{ij})$ 、 $\min(x_{ij})$ 分别为决策集 $j = 1, 2, \dots, n$, 对目标 i 的特征取最大或最小值。

目标特征值差异明显时适用 (1)、(2) 式, 目标特征值差异不明显时适用 (3)、(4) 式。

设系统有 m 个目标组成对决策集 D 的评价目标集: $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 。

m 个目标对 n 个决策的评价可用目标特征矩阵表示为:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} = (x_{ij}) \quad (5)$$

式 (5) 中, $i = 1, 2, \dots, m$; $j = 1, 2, \dots, n$ 。

用目标对于优的相对隶属度公式, 将目标特征矩阵变换为目标相对隶属度矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} = (R_{ij}) \quad (6)$$

* 收稿日期: 2004-04-12

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目 (04009805)

作者简介: 黎坤 (1969年生), 男, 工程师; E-mail: eeslk@zsu.edu.cn

根据相对隶属度和相对隶属度函数的定义，由参考连续统中介过渡的两极具有最大相对优属度 $g_i = 1$ 或 $g = (g_1, g_2, \dots, g_m)^T = (1, 1, \dots, 1)^T$ ，具有最小相对优属度 $b_i = 0$ 或 $b = (b_1, b_2, \dots, b_m)^T = (0, 0, \dots, 0)^T$ 。

为了求解决策 j 相对隶属度 u_j 的最优值，建立如下的优化准则：决策 j 的加权距优距离与加权距劣距离平方和最小。根据优化准则求解得多目标系统模糊优选理论模型^[3]：

$$u_j = \left[1 + \frac{\sum_{i=1}^m [w_i (g_i - r_{ij})]^p}{\sum_{i=1}^m [w_i (r_{ij} - b_i)]^p} \right]^{-1}$$

$j = 1, 2, \dots, n$ (7)

式中， w_i 为目标 i 的权重。

决策 j 隶属于优的相对隶属度 $u_j > 0.5$ ，隶属于劣的相对隶属度 $u_j < 0.5$ 。

在满足约束的决策集 D 中，决策相对优属度以 u_j 最大的决策称为满意决策， u_j 从大到小的排序次序称为满意排序。

2 佛山市饮用水源地优选

2.1 佛山市水源地选址背景

随着佛山市的城市化进程及中心组团区内社会经济的高速发展，对水资源的需求量迅速增加。而原有主要依赖北江水系的水源，可增加的水量有限，且水源单一，供水安全性和稳定性有隐患，为了保障佛山市及其中心组团区社会经济发展对水资源的需求，有关部门开始在西江水系寻找新的饮用水源地，首期计划日取水量 50 万 m^3 ，远期（2020 年）计划日取水量 300 万 m^3 。

经过实地调查，根据河道及其周围的地理情况是否适宜建泵站，并考虑现场的水质水量等条件，在西江干流上初步选取了 5 个水源点作为拟选方案（见图 1），按上游到下游的次序依次为：罗隐、思贤滘西滘口、河洲岗、坡子嘴、太平。

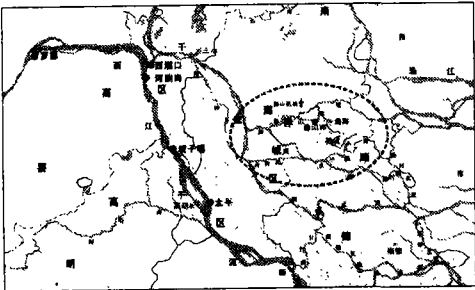


图 1 佛山市拟选的新饮用水源点位置示意图
Fig.1 The sketch map of selected new table-water resources points in Foshan City

2.2 评价指标和约束条件

由于佛山市经济发展快，经济开发区多，水源地的选取，牵涉的范围很广，影响因素比较复杂。通过综合分析，并结合当地实际情况，选取如下 9 个特征指标作为第二饮用水源地选取的评价指标：①河道地形；②水质条件；③水量条件；④水源保护的难易度；⑤水源保护区的设置对经济发展的影响程度；⑥水源污染风险；⑦输水距离；⑧经济投资，⑨对航运的影响程度。

约束条件：①水量充足，取水有保证；②水质优良，符合饮用水标准。③取水口附近的河道稳定，不易淤积，水深足够，进水管距离短，易取主流水；④水源保护相对容易；⑤水源地的潜在污染风险较小；⑥水源保护区的设置对经济发展的影响较小；⑦输水距离短；⑧投资省，效益高；⑨对航运影响小。

根据上述约束条件，对 5 个水源点拟选方案的 9 个主要评价指标进行模糊优选，选出佛山市最优新水源地。5 个拟选水源点的基本情况见表 1。

2.3 计算步骤与结果

2.3.1 定性指标的相对优属度计算 本次研究的定性指标包括河道地形条件、水源保护难易程度、对经济发展的影响程度、污染风险和对航运的影响程度共 5 项指标。采用专家评估法将定性指标进行量化，对所有的定性指标均采用相同的评分等级，提供相应资料，邀请专家对定性指标进行评估。

根据专家对 5 个方案的评语及对应的分数，可得到专家对每个定性指标的相应的目标矩阵，通过（1）或（3）式，将各定量指标的目标特征矩阵转化为目标相对优属矩阵，不分专家优劣，即专家们对单一指标的评价权重相等，取 $p = 2$ 欧氏距离，系统两极取 $g_i = 1, b_i = 0$ ，将各定性指标的相对优属矩阵代入式（7），由计算程序逐个计算，可得各定性指标的相对优属度：

$$\begin{aligned} u_{1j} &= [0.21, 0, 0.98, 1, 0.04], \\ u_{2j} &= [0.01, 0.03, 1, 0.75, 0.73], \\ u_{3j} &= [0.36, 0.04, 0.96, 0.87, 0.66] \\ u_{4j} &= [0.54, 0.50, 0.56, 0.41, 0.43], \\ u_{5j} &= [0.54, 0.45, 0.50, 0.53, 0.50] \end{aligned}$$

由各定性指标的相对优属度，可以得到定性指标的优属度矩阵：

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.21 & 0 & 0.98 & 1 & 0.04 \\ 0.01 & 0.03 & 1 & 0.75 & 0.73 \\ 0.36 & 0.04 & 0.96 & 0.87 & 0.66 \\ 0.54 & 0.5 & 0.56 & 0.41 & 0.43 \\ 0.54 & 0.45 & 0.50 & 0.53 & 0.50 \end{bmatrix}$$

表 1 五个拟选水源点的概况

Tab.1 Survey of five selected water supply resources points in Foshan City

评价 指标	方案一 罗隐	方案二 思贤滘西滘口	方案三 河洲岗	方案四 坡子嘴	方案五 太平
定性 指标	河道地形 条件	稍不稳定，河道 顺直。	三叉河口，相对 稳定，河段微弯， 水流复杂。	相对稳定，河段 顺直。	相对稳定，河段 顺直。
	水源保护 难易程度	不受佛山市管 辖，水事纠纷难 处理，管理难度 大。	水源的保护牵涉 到西、北两江， 保护的河段较多， 范围广。	已设有金本开发 区饮用水源保护 区，水源保护基 础较好。	两岸工业蓬勃发展，水源 保护有一定难度。
	对经济发 展的影响 程度	附近工业落后， 目前水源保护区 的设置对其经济 发展有影响。	上游西南、河口、 青岐等镇工业发 达，水源保护区 的设置对其经济 发展影响很大。	附近已设有饮用 水源区，新水源 保护区的设置对 金本镇经济开发 区的发展影响不 大。	富湾、白泥的经济开发区 蓬勃发展，水源保护区的 设置对其发展有一定的影 响。水源保护区的设置对 高明市区和太平镇经济发 展有一定影响。
	对航运的 影响	河道较宽，水深 足够，对航运影 响不大。	河道较宽，水深 足够，对航运影 响不大。	河道较宽，水深 足够，对航运影 响不大。	河道较宽，对航 运影响不大。
	污染风险	上游有 11 个污 水排放口。	附近有油库，水 上活动相对频繁。	下游不远有油库 和两个小码头。	沿江规划建设工业园。 沿江有工业园， 下游有排污口。
	97%保证率 流量 ¹⁾	1180	1289	1273	1324
定量 指标	污染指数 ²⁾	0.31	0.336	0.336	0.321
	输水距离 ³⁾	42	30	29	24
	投资/亿元	4.25	3.04	2.84	2.10

1) 单位为 m³/s, 2) 为 WQI, 3) 为 km

2.3.2 定量指标相对优属度计算 对于定量指标，如水量、水质、输水距离、经济投资等，均有定量数据，见表 1。根据表 1，可得到定量指标的目标特征矩阵：

$$X = \begin{bmatrix} 1880 & 1289 & 1273 & 1324 & 699 \\ 0.31 & 0.336 & 0.336 & 0.321 & 0.579 \\ 42 & 30 & 28 & 24 & 12 \\ 4.25 & 3.04 & 2.84 & 2.10 & 1.20 \end{bmatrix}$$

通过 (2) 或 (3) 式，将定量指标的目标特征矩阵转化为目标相对优属矩阵：

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.59 & 0.65 & 0.64 & 0.67 & 0.53 \\ 1.00 & 0.90 & 0.90 & 0.96 & 0.00 \\ 0.00 & 0.40 & 0.47 & 0.60 & 1.00 \\ 0.00 & 0.40 & 0.46 & 0.70 & 1.00 \end{bmatrix}$$

2.3.3 确定系统评价指标权重 随着生活水平的提高，人们对水质的要求越来越高，所以认为水质条件和水源保护难易度两个指标在评价指标中应占较重要位置，设其权重分别为 0.123 和 0.122；由于西江水量非常丰富，远大于取水点未来的取水流

量，而且在候选取水点的选择时均考虑了水量、地形条件等要素，所以认为水量和河道地形条件两个指标处于较次要位置，设这两指标的权重为 0.1；对于其他指标，认为其重要程度一般，故取平均权重 0.111，得到系统评价指标的权向量为： $W = (0.1, 0.122, 0.111, 0.111, 0.111, 0.1, 0.123, 0.111, 0.111)^T$

2.3.4 系统相对于优的隶属度向量 (U_j) 的计算 将定性和定量指标的目标相对优属矩阵 R_1 、 R_2 耦合，得系统目标相对优属矩阵：

$$R = \begin{bmatrix} 0.21 & 0 & 0.98 & 1 & 0.04 \\ 0.01 & 0.03 & 1 & 0.75 & 0.73 \\ 0.36 & 0.04 & 0.96 & 0.87 & 0.66 \\ 0.54 & 0.50 & 0.56 & 0.41 & 0.43 \\ 0.54 & 0.45 & 0.52 & 0.53 & 0.53 \\ 1 & 0.90 & 0.90 & 0.96 & 0 \\ 0 & 0.40 & 0.47 & 0.90 & 0 \\ 0 & 0.40 & 0.46 & 0.70 & 1 \end{bmatrix} = (R_{ij})$$

取 $p = 2$ 欧氏距离，系统两极取 $g_i = 1$, $b_i = 0$,

代入(7)式,通过计算程序计算得到系统目标的优属度:

$$U_j = (0.23, 0.12, 0.89, 0.80, 0.53)$$

2.4 最优选址方案的选取

从计算结果可以看出, $U_j > 0.5$ 的方案有三个,分别是方案三 ($U_3 = 0.89$)、方案四 ($U_4 = 0.80$)和方案五 ($U_5 = 0.53$),因此可以确定佛山新饮用水源地的最优选址为方案三(河洲岗),次优方案为方案四(坡子嘴),第三优方案为方案五(太平),其它方案均为劣方案。

3 小 结

城市饮用水源地的选址,是一个复杂的问题,牵涉范围很广,而目前又没有固定的评价指标,本文通过综合分析,根据当地的实际情况,选取了9个评价指标:①河道地形;②水质条件;③水量条件;④水源保护的难易度;⑤水源保护区的设置对经济发展的影响程度;⑥水源污染风险;⑦输水距离;⑧经济投资,⑨对航运的影响程度。这些指标基本上满足了当地对水源地选址的要求。

通过专家评估方法,解决了定性指标量化的问题。由于定性指标本身就有模糊性、不确定性^[4],定性指标的量化只能反映其大概的优劣趋势或次序。

评价指标的权重也是一种模糊概念,反映的也是一种模糊权重,而其权重对计算结果有一定的影响,确定评价指标的权重与人们对问题的认识有很大关系,不同的认识得到的权重会不同,从而会影响到计算结果,影响到目标的决策。佛山市新饮用水源地的选址结果是基于研究者对佛山市饮用水源选址的要求的认识基础上,通过模糊优选理论计算得到的结果,从结果来看,最优方案的选取比较符合目前佛山市对新饮用水源地的要求,计算结果是可靠的,它为主管部门的决策提供了参考依据。

多目标系统模糊优选理论是一个实用的优选决策理论,应用范围较广,本文尝试将该理论应用到城市新饮用水源地的选址上,在佛山市新水源地的选址问题上取得了较好的应用效果。

参考文献:

- [1] 汤卫文. 关于集中式供水水源的选址[J]. 人民珠江 2002(4):11-12
- [2] 陈俊合,江涛. 阳江市水资源模糊分析与评价[J]. 中山大学学报(自然科学版),1996, 35(s):94-99
- [3] 陈守煜. 多目标系统模糊关系优选决策理论与应用[J]. 水利学报,1994(8):62-71
- [4] 张灵莹. 定性指标评价的定量化研究[J]. 系统工程理论与实践,1998(7):98-101

Application of Multi-objective System Fuzzy Optimization Theory to Selecting Table-water Resources in Foshan City

LI Kun, CHEN Xiao-hong, JIANG Tao, TU Xin-jun

(Center of Water Resources and Environment Research, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Five qualitative and four quantitative indicators were put forward through system analysis for the selection of table-water resources. The four quantitative indicators are average water quality index, the lowest month average discharge in ten years, the distance of water transfer, and investment. The five qualitative indicators include river landform, easy degree of protect water resource, influencing degree for the development of economy, the risk of water resource pollution and influencing degree for shipping, which are quantified using expert-evaluation method. Combined with a multi-target system fuzzy optimization model, these nine indicators are applied to selecting a new table-water supply resource in Foshan City. The results suggest that the combination of the nine indicators and the model of multi-target system fuzzy optimization is an efficient method for the selection of table-water resources.

Key words: city table-water; water supply resources; fuzzy optimization theory; Foshan city