

基于 Matlab 平台求解水资源多目标规划问题 ——以瓜州县为例

龙训建, 钱 鞠, 张春敏

(兰州大学资源环境学院, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 水资源的短缺问题已日益受到关注, 如何在有限水资源的前提下满足日益增长的用水需求成为一个热点问题。对区域水资源进行优化配置, 无疑为解决此类问题提供了参考。以甘肃省酒泉市瓜州县为例, 基于水资源多用户问题, 采用工业、农业、生活多目标规划法, 以实现区域水资源效益最大化为目标函数, 按照约束条件的客观性与主观性, 给出相应的非劣解; 通过调用 Matlab 优化工具箱的优化函数, 得到瓜州县的合理配置有限水资源方案, 最后得到的配置方案中, 2010 规划年各行业用水总效益达 15 712.4 万元, 2015 年各行业用水总效益达 48 451.7 万元。

关键词: 水资源; 承载力; 多目标优化规划; Matlab

中图分类号: TV213.4 **文献标识码:** A

随着社会经济不断发展, 21 世纪人类将面临日益严重的各种资源危机, 而水资源是人类社会生存与发展的基础及生态环境系统的基本要素。同时, 水资源所面临的危机日益严重, 加上生态环境失调, 已严重阻碍了我国经济发展。因此, 对区域水资源进行合理规划与利用势在必行, 尤其在水资源供需紧张的西北内陆河干旱区, 水资源系统作为一个多目标、多层次的复杂系统, 建立合理的水资源优化配置模型, 具有十分重要的实践意义。

国内外许多学者从不同研究角度对水资源优化配置进行了研究, 其优化配置模型也不断完善。探讨研究各种可能的计算方法, 比较常规的计算方法有系统工程法^[1]、逐步法^[2-3]以及单纯形法^[4]等。1982 年, 美国召开“水资源多目标分析”会议, 推动了水资源多目标决策技术的研究和应用^[5]。20 世纪 90 年代以来, 国外许多学者也从不同研究角度对水资源优化配置进行了研究。Minsker 等^[6]应用遗传算法 (Genetic Algorithms) 建立了不确定性条件下的水资源配置多目标分析模型。在国内, 阮本青等^[7]以黄河下游沿黄地区为研究对象, 以区域经济可持续发展、水资源可持续利用为准则, 建立适合区域水资源适度承载能力的多目标计算模型; 付湘等^[8]采用常规趋势预测法对武汉市各水平年各方案下的水资源承载力进行研究; 王好芳等^[9]则在同时考虑水量与水质的前提下, 采用多目标规划方法研究区域水资源优化配置问题; 赵成等^[10]则采用 Lagrange 乘子与目标规划结合的交互式决策方法求解水资源优化配置问题。基于地域区别和区域水资源实际情况, 本文以甘肃省瓜州县为例, 尝试在 Matlab 操作平台求解水资源多

目标规划问题, 对瓜州县水资源可持续开发利用具有重要的现实意义。

1 瓜州县概况

瓜州县位于河西走廊西端, 地处东经 $94^{\circ}45' \sim 97^{\circ}00'$, 北纬 $39^{\circ}42' \sim 41^{\circ}53'$ 。东与甘肃省玉门市接壤, 西与敦煌市为邻, 南北两边与肃北蒙古族自治县毗连, 西北部与新疆维吾尔自治区哈密市相接, 东西长约 250 km, 南北宽约 400 km, 土地总面积 24 130 km²。

瓜州县降水量在区域上分布很不均匀, 降水量大于 60 mm 区域主要分布在南北山区, 50~60 mm 降水量分布在南盆地及双塔水库以上广大区域, 40~50 mm 降水量分布在北盆地平原区, 小于 40 mm 降水量主要分布在西湖乡一带。降水量年内分配表现为汛期降水量相对较多而集中, 春季雨水少而不稳定, 冬季雨雪甚少。瓜州县降水不产生地表径流, 所有水资源均为入境水量; 其生产、生活用水主要来源于疏勒河流域的疏勒河和榆林河来水; 地下水补给来源主要为双塔水库库区渗漏、引水灌溉入渗、南北两侧地表洪流入渗、降水入渗、北截山地下径流侧向补给。全县地下水补给量(平原区)7.319 9 亿 m³, 地下水总排泄量 6.875 5 亿 m³, 地下水资源量 7.443 亿 m³, 其中不重复地下水资源量 4.307 9 亿 m³。

2 水资源多目标规划模型概述

水资源系统是指以水为主体所构成的特定系统。流域或地区的水资源开发与管理及其水资源工程的规划设计, 需要根

据管理或设计的多种效能及其经济效果的多种目标来反映,即水资源开发与系统工程中的多目标规划问题。水资源系统中的区域水资源规划多目标模型,目的是在有限水资源前提下,描述水资源系统结构关系,确定相关参数,来满足多方面利益。瓜州县水资源主要包括疏勒河和榆林河河水、泉水和地下水等方面。对该地区水资源系统的实际模拟,需要从瓜州县全局出发,在有限水资源前提下,实现各部门、各行业之间的水资源最优组合,得出最佳组合方案。本文对瓜州县进行水资源多目标优化配置的总体思路如图 1 所示。

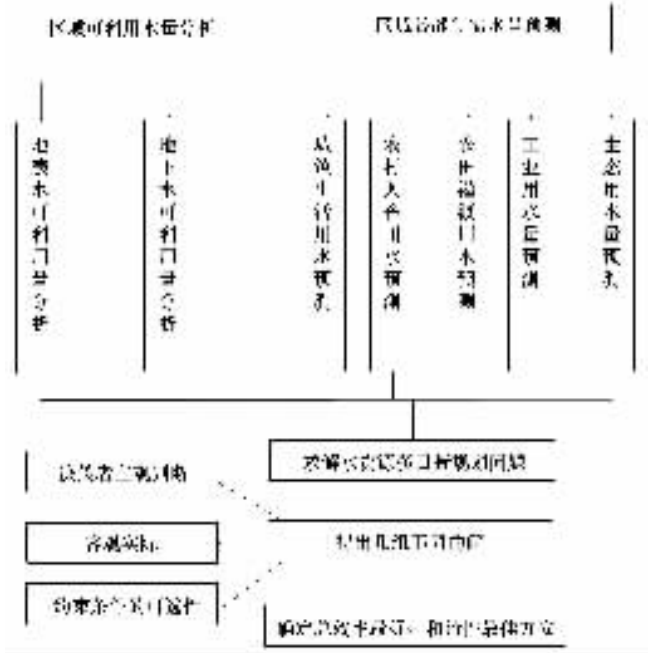


图 1 多目标规划问题求解一般思路

2.1 目标函数

目前可用于水资源系统方面求解多目标规划问题的方法比较多,如模糊评判法^[1]、权重法、约束法、目标规划法、逐步法、代用权衡法、理想点法、多层序列法、评价函数法、交互规划法、混合优选法等。本次瓜州县水资源多目标规划问题主要考虑人口增长、经济社会发展以及城镇生活、农村人畜用水、农田灌溉用水、工业用水及生态用水几个方面,结合各类节水措施的实施、农业种植结构调整、用水结构调整等因素,以实现水资源利用综合效益最大化为目标函数,构建数学模型如下:

$$\max Z(x) = \max [f_1(x), f_2(x), f_3(x), f_4(x)]$$

$$x \geq 0$$

$$G_i(x) \leq 0, i = 1, 2, 3, 4$$

式中: Z 为研究区规划年水资源综合效益; $f_i(x)$ 为研究区规划年第 i 行业的用水效益; x 为决策变量; $G_i(x)$ 为第 i 行业的约束条件;结合研究区实际情况, $i = 5$ 。

2.2 用水效益目标函数

2.2.1 工业用水

工业用水效益函数采用净产值分摊法确定,其计算公式为:

$$f_1(x) = B_g = \beta(Q_g / W_1)$$

式中: B_g 为工业用水净效益,万元/ m^3 ; β 为工业供水效益分摊

系数,参照水利经济研究会的研究成果,本文取 11%; Q_g 为工业用水量, m^3 ; W_1 为工业万元产值耗水量, m^3 /万元。据此可得单方工业用水效益 $B_0 = \beta / W_1$ 。

2.2.2 生活用水效益

以工业用水的单方用水效益为基准,根据生活用水分配水量占需水量的不同比例,通过层次分析法或德尔菲法确定其比例系数 γ, β ,再乘以工业用水单方用水效益得到生活用水效益函数。表达式如下:

$$f_2(x) = \begin{cases} \gamma_2 B_g Q_2 & 0 \leq Q_2 \leq Q_{2\max} \\ \gamma_2 B_g Q_{2\min} + \beta_2 B_g (Q_2 - Q_{2\min}) & Q_{2\min} \leq Q_2 \leq Q_{2\max} \\ \gamma_2 B_g Q_{2\min} + \beta_2 B_g (Q_{2\max} - Q_{2\min}) & Q_2 \geq Q_{2\max} \end{cases}$$

式中: Q_2 为生活用水实际分配水量; $Q_{2\max}$ 和 $Q_{2\min}$ 分别为生活用水最大需水量和最小需水量; γ_2 和 β_2 为折算系数,且 $\gamma_2 > 1, \beta_2 < 1$,本文中 γ_2 取 1.8, β_2 取 0.4。

2.2.3 生态环境用水及农业用水效益

同样以工业用水单方用水效益为基准,根据生态环境用水及农业用水各自分配水量占需水量的比例,用层次分析法和德尔菲法确定其比例系数,再乘以工业用水单方用水效益得到各自用水效益函数。表达式如下:

$$f_i(x) = \begin{cases} \gamma_i B_g Q_i & 0 \leq Q_i \leq Q_{i\max} \\ \gamma_i B_g Q_{i\min} + \beta_i B_g (Q_i - Q_{i\min}) & Q_{i\min} \leq Q_i \leq Q_{i\max} \\ \gamma_i B_g Q_{i\min} + \beta_i B_g (Q_{i\max} - Q_{i\min}) - \lambda_i (Q_i - Q_{i\max}) & Q_i \geq Q_{i\max} \end{cases}$$

式中: Q_i 为生态环境用水及农业用水实际分配水量 ($i = 3, 4$); $Q_{i\max}$ 和 $Q_{i\min}$ 分别为生态环境用水及农业用水的最大需水量和最小需水量;其余符号意义同前。其中,生态环境用水折算系数 γ_3 取 1.5, β_3 取 0.3;农业用水折算系数 γ_2 取 1.1, β_4 取 0.2。

2.3 约束条件

(1) 水资源供需动态平衡约束:研究区总可供水量与总需水量之差不超过 δ ,即:

$$\left| \sum_{j=1}^m W_{j\text{供}} - \sum_{i=1}^n W_{i\text{需}} \right| \leq \delta$$

式中: $W_{j\text{供}}$ 为第 j 类水源的可供水量; $W_{i\text{需}}$ 为第 i 行业的需水量; m, n 分别表示供水水源个数和用水行业数; δ 为允许精度,一般取 $\delta = 0.001$ 。

(2) 供水能力约束:规划年第 j 类水源的可供水量应不大于其自身供水能力,即:

$$W_{j\text{供}} \leq W_{j\text{供}\max}$$

式中: $W_{j\text{供}\max}$ 为规划年第 j 类水源的最大供水能力。

(3) 行业取用水量约束:各行业的取用水量应在一个允许范围内,即:

$$W_{i\text{需}\min} \leq W_{i\text{需}} \leq W_{i\text{需}\max}$$

式中: $W_{i\text{需}\min}, W_{i\text{需}\max}$ 分别为规划年第 i 行业需水量的上下限。根据瓜州县规划发展目标确定各行业最大、最小需水量,见表 1。

(4) 耕地面积约束:

$$A_{\text{耕}} \leq A$$

式中: A 为规划年耕地总面积; $A_{\text{耕}}$ 为可耕地面积。

表 1 规划年不同用户需水量 亿 m³

规划年	行业	规划目标	最大需水量	最小需水量
2010	工业	4.10 亿元	0.099 2	0.076 7
	城镇生活	4.2 万人	0.028 8	0.020 5
	农村生活	9.2 万人	0.049 4	0.035 2
	生态环境	—	0.992 0	0.707 9
	农业灌溉	—	6.336 6	3.419 0
2015	工业	7.83 亿元	0.120 6	0.093 2
	城镇生活	5.01 万人	0.034 3	0.024 4
	农村生活	10.85 万人	0.069 6	0.049 7
	生态环境	—	1.311 6	0.936 0
	农业灌溉	—	5.971 4	3.222 0

(5)非负约束:要求所有决策变量均为非负值。

2.4 参数确定

受研究区水源水质和水量影响,对应于不同用水户用水要求确定出不同的水源,结合瓜州县生活用水来源基本仅限于地下水,确定其决策变量如表 2 所示。同时,根据求解过程中所设定原则,选取主要参数列于表 3。

表 2 决策变量的确定

水资源种类	工业用水量	城镇生活用水量	农村人畜用水量	生态环境用水量	农业灌溉用水量
地表水	x_1	—	—	x_6	x_9
地下水	x_2	x_4	x_5	x_7	x_{10}
回用水	x_3	—	—	x_8	x_{11}

表 3 模型相关参数统计

参数	年份		
	2005	2010	2015
地表水资源量/万 m ³	66 111	71 784	71 942
地下水资源量/万 m ³	43 079	43 079	43 079
中水回用量/万 m ³	0	208	329
净灌溉定额/(m ³ ·hm ⁻²)	594	440	430
城镇人均用水量/(L·d ⁻¹)	140	150	150
农村人均用水量/(L·d ⁻¹)	40	45	45
万元工业产值用水量/万 m ³	400	220	140
实际需水量/万 m ³	—	55 049	55 379
地表水可供水量/万 m ³	42 598	48 271	48 429
地下水可供水量/万 m ³	9 760	9 760	9 760
生态用水量/万 m ³	1 225	2 599	2 706

3 模型求解

3.1 最大效益函数

根据《安西县水资源报告工程项目“十一五规划”》、《安西县水资源调查评价报告》、《甘肃省节约用水发展规划》、《甘肃省行业用水定额》等研究成果,采用层次分析法,确定出各行业

用水价格^[12],结合瓜州县各行业用水情况,分别得到实现各行业最大效益函数,具体见表 4。

表 4 规划年各行业效益函数

规划年	行业	效益函数
2010	工业用水	$\max f_1(x) = B_g W_1 = B_g(x_1 + x_2 + x_3) = 0.275 \times 10^5(x_1 + x_2 + x_3)$
	城镇生活用水	$\max f_2(x) = 0.007 9 \times 10^5 + 0.11 \times 10^5 x_4$
	农村生活用水	$\max f_2(x) = 0.135 7 \times 10^5 + 0.11 \times 10^5 x_5$
	生态环境用水	$\max f_3(x) = 0.233 6 \times 10^5 + 0.082 5 \times 10^5(x_6 + x_7 + x_8)$
	农业灌溉用水	$\max f_4(x) = 0.846 2 \times 10^5 + 0.055 \times 10^5(x_9 + x_{10} + x_{11})$
2015	工业用水	$\max f_1(x) = B_g W_1 = B_g(x_1 + x_2 + x_3) = 0.785 7 \times 10^5(x_1 + x_2 + x_3)$
	城镇生活用水	$\max f_2(x) = 0.102 5 \times 10^5 + 0.314 3 \times 10^5 x_4$
	农村生活用水	$\max f_2(x) = 0.546 5 \times 10^5 + 0.314 3 \times 10^5 x_5$
	生态环境用水	$\max f_3(x) = 0.882 5 \times 10^5 + 0.235 7 \times 10^5(x_6 + x_7 + x_8)$
	农业灌溉用水	$\max f_4(x) = 2.278 4 \times 10^5 + 0.157 1 \times 10^5(x_9 + x_{10} + x_{11})$

3.2 优化模型

从表 4 的各行业最大效益函数出发,根据生活用水优先满足,其次考虑生态、工业用水,最后为农业用水的原则,给各个变量赋予不同的初始值,应用 Matlab 优化函数^[13]linprog 函数求解该多目标规划问题,可得到不同初始值的优化配置方案。经过各参数对比、优选,最终计算确定的配置方案结果见表 5。

表 5 不同规划年优化配置方案表 万 m³

年份	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
2010	647	209.90	44.73	230	395	238 9.7
2015	703	321.65	71.60	274	577	599 5.6

年份	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	$f(x)$ /万元
2010	5 492	54.1	44 840	692.5	54.80	157 12.4
2015	4 404	93.8	41 400	146 5.3	94.47	484 51.7

4 结果分析

瓜州县水资源多目标规划问题实际上就是通过供需水状况研究,对该区水资源的合理配置提出可行性方案。在优先满足生活用水前提下,调用 Matlab 优化函数,探讨符合研究区经济效益最优的供水方案。随着经济社会的发展,节水型社会建设的大力推进,瓜州县经济将逐步提高,农业用水总量逐步减少,工业用水和废水回用量逐渐增加。

各规划年配置方案的总体效益函数均基于首先满足生活用水前提。最终配置方案表明:在 2010 年用水配置方案中,工业用水量为 0.090 1 亿 m³,生活用水量为 0.062 5 亿 m³,生态用水量为 0.793 6 亿 m³,农业灌溉用水量为 4.558 7 亿 m³;其中,工业用水量 and 生态用水量有所增加,其增加水量来自于农业灌溉用水量调整;各行业用水总效益达 157 12.4 万元。2015 年用水配置方案中,工业用水量为 0.109 6 (下转第 71 页)

“关于贯彻落实《国家发展改革委、水利部关于加强农业末级渠系水价管理的通知》的通知”(川价发〔2006〕43号)精神,“在各大、中、小型灌区的现行农业终端水价或最高限价之内,各县(市、区)在农业水价中,应包含一定比例作为农业末级渠系水价;对以前农业水价中未包含末级渠系水价的灌区,今后在调整农业水价时,应优先考虑末级渠系水价”;“农业末级渠系水费收入应全部用于末级渠系的运行管理、维修养护和更新改造,在县(市、区)水利、财政部门的监督下,由农民用水合作组织或有关乡镇及村安排使用”。文件明确规定从收取的水费中提取一定比例,用于维持协会的运转及末级渠系的维修养护,因此,确定合理的比例十分必要,应在实践中不断摸索总结。

3.6 用水户协会与其他改制方式的区别

近年来,各地对小型水利工程管理体制进行了大胆的尝试和有益的探索。通过承包、拍卖、租赁、股份合作经营等形式对小型农村水利工程进行改制,在一定程度上盘活了水利资产,调动了社会参与办水利的积极性,强化了工程管理,提高了灌溉效益。但这几种经营形式都存在着一个关键性问题,就是灌溉工程运行管理仅是运营者的商业行为。经营者由于受个人利益的驱动,大多存在短期行为,使灌溉工程效益不能得到充分发挥和保证可持续发展,忽视了广大用水户在灌溉管理中的知情权、参与权和决策权,没有从根本上解决产权不清、主体不明、责任不实、效益不高的问题。有些人把组建农民用水户协会放在承包、租赁经营、拍卖等经营机制改革中,作为其中的一种方式。这种认识是不全面的,这里有必要澄清概念,区分管理体制与运行机制改革的联系与区别。组建农民用水户协会属于管理体制上的变革,它解决的是“业主”缺位所带来

的权责不清等一系列问题。而承包、租赁经营、拍卖等是在原有模糊的农村集体经济组织作为建设管理主体不变的前提下,在经营管理方式上引入利益激励等机制,目的是解决经营管理责任不落实,缺乏经营活力等问题,属经营管理方式层面的改革。经营机制方面的改革是不完整的改革,必须配套解决管理体制不顺这一更深层次的问题。因此,大力推行用水户参与灌溉管理势在必行。应对承包、租赁等现有改制形式进行调研和清理,待合同期满后,积极稳妥地将其转型为农民用水户协会或重新组建,大力推行参与式管理。

参考文献:

- [1] 史存生,刘印良,郭宗信. 紧密结合灌区实际 稳步推进用水户参与管理[J]. 中国水利,2003,(8B).
- [2] 国家农业综合开发办公室. 农民用水协会理论与实践[M]. 南京:河海大学出版社,2005.
- [3] 中国灌区协会. 参与式灌溉管理——灌区管理体制的创新与发展[M]. 北京:中国水利水电出版社,2001.
- [4] 丁平,李崇光,李谨. 我国灌溉用水管理体制改革发展及发展趋势[J]. 中国农村水利水电,2006,(4):18-20.
- [5] 全志辉. 农民用水户协会与农村发展[J]. 经济社会体制比较,2005,(4):74-80.
- [6] 理查德·瑞丁格. 中国的参与式灌溉管理改革——自主管理灌排区[J]. 中国农村水利水电,2002,(6):7-9.
- [7] 李代鑫. 中国灌溉管理和用水户参与灌溉管理[J]. 中国农村水利水电,2002,(5):1-3.
- [8] 冯保清. 加强用水管理 正确处理几个关系[J]. 中国农村水利水电,2006,(2).
- [9] 迟道才,赵红巍,张伟华,等. 盘锦市水资源承载力研究[J]. 沈阳农业大学学报,2001,(2):137-140.
- [10] 黄维东,牛最荣. 水资源系统分析方法在引大入秦工程水资源优化配置中的应用[J]. 水文水资源,2006,(1):26-31.
- [11] 成洁,王建国,杨德全. 深圳市水资源承载力分析及对策[J]. 中国农村水利水电,2006,(8):38-39.
- [12] 陈斌. 水资源利用中最优规划问题的探讨[J]. 水资源保护,2006,(1):34-36.
- [13] Haimesy Y Y, Alleedj D J. Multiobjective analysis in water resources[M]. New York: American Society of Civil Engineers, 1982.
- [14] Minsker, B S, Padera B, Smalley B. Efficient methods for including uncertainty and multiple objectives in water resources management models using Genetic Algorithms, 13 [M]. Alberta: International Conference on Computational Methods in Water Resources, Calgary, 2000.
- [15] 阮本青,沈晋. 区域水资源使得承载能力计算模型研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1998,(3):57-61.
- [16] 付湘,李娟,梅亚东. 武汉市水资源承载能力研究[J]. 水电能源科学,2006,(1):84-86.
- [17] 王好芳,董曾川. 基于量与质的多目标水资源配置模型[J]. 人民黄河,2004,(6):14-15.
- [18] 赵成,王文科. 玉门踏实盆地水资源优化配置的交互式决策方法[J]. 冰川冻土,2004,(5):639-644.
- [19] 马金珠,李相虎,贾新颜. 干旱区水资源承载力多目标层级评价[J]. 干旱区研究,2005,(1):11-16.
- [20] 温续余,周拓. 多目标供水工程的水价设计[J]. 中国农村水利水电,2005,(7):101-103.
- [21] 苏金明,王永利. MATLAB7.0 实用指南[M]. 北京:电子工业出版社,2004.
- [22] 陈鲁莉,胡铁松,尹正杰. 区域水资源承载力研究综述[J]. 中国农村水利水电,2006,(3)
- [23] 张明斌. 县城供水价格存在的问题及其改革建议[J]. 中国农村水利水电,2006,(5).

(上接第 67 页) 亿 m^3 ,生活用水量为 851 万 m^3 ,生态用水量为 1.049 3 亿 m^3 ,农业灌溉用水量为 4.296 亿 m^3 ;工业用水量和生态用水量仍持续增加,由于节水措施、种植结构的调整,农业灌溉用水持续降低,各行业用水总效益达 48 451.7 万元。

本文是对瓜州县水资源优化配置问题所作的一次尝试。由于社会经济条件的变化和其他一些不确定因素,水资源优化配置模型目标函数的效益系数和供水约束条件会发生相应的变化。因此,水资源优化配置模型需要进行及时修正,使各行业供用水方案满足社会经济发展的需要。

参考文献: