

改进的风险决策及 NSGA - II 方法在马莲河流域水资源综合管理中的应用

高雅玉, 田晋华, 李志鹏

(甘肃省水土保持科学研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 将马莲河流域系统概化为5个水资源分区,采用指标分析法进行2020和2030年供需水量预测和平衡分析。利用改进的决策树法进行风险分析,将专家咨询概率法引入到决策树敏感性分析中,最终得到2020、2030年的推荐水资源供需分配方案。然后,利用系统分析理论和优化技术建立了流域的大系统、多目标水资源优化配置模型,并采用优化的NSGA-II方法进行求解,得到流域2030年推荐水资源配置方案下的最佳分配方案。最后,根据最佳分配方案和预测的流域需水量,进行了流域的水资源平衡分析,通过平衡分析的结果进行流域的综合管理研究。最佳配置方案实现了流域内水资源的最优分配,使宝贵、有限的水资源产生最大的社会、经济及环境效益,为流域经济、能源产业的快速发展提供水资源保障。

关键词: 水资源综合管理; 优化的NSGA-II方法; 风险决策; 改进的决策树法; 马莲河流域

中图分类号:TV213.4

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2015)06-0109-08

Application of improving risk decision-making and NSGA - II method in integrated management of water resources in Malian basin

GAO Yayu, TIAN Jinhua, LI Zhipeng

(Gansu Institute of Soil & Water Conservation Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The paper generalized Malian river basin into five water resources partitions and used index analysis method to predict water supply and demand and carry out balance analysis in 2020 and 2030. Then it utilized improved decision tree method to conducted risk analysis, and introduced expert consulting probabilities into the sensitivity analysis of decision tree, finally it recommended the allocation scheme of water supply and demand 2020 and 2030. The paper used the theory of system analysis and optimization technology to build the large system of the basin and multi-objective water resources optimal allocation model, and used the optimized NSGA-II method to solve problem and obtained the optimal allocation scheme under the recommended plan of water allocation in 2030. Finally according to the optimal allocation scheme and forecasted water demand to conduct balance analysis, which obtained that under the condition of optimal water allocation scheme and the forecasted water requirement. The optimal allocation scheme achieved the most optimal water distribution and made the precious and limited water resources produce the maximum social, economic and environmental benefits and provide water resources support for the rapid growth of economic and energy industry in Malian river basin.

Key words: integrated management of water resources; optimized NSGA-II method; risk decision-making; improved decision tree method; Malian River basin

1 研究背景

地处干旱、半干旱地区的马莲河流域是传统的

农业地区,油、煤、气等资源丰富,发展潜力巨大。马莲河流域多年平均水资源量4.49亿 m^3 ,人均占有量为352 m^3 ,是甘肃省人均占有量的25.7%,7、8两

收稿日期:2015-06-16; 修回日期:2015-11-18

基金项目:陇原青年创新人才扶持计划(甘组通字[2014]93号);甘肃省科技厅重大专项课题(1203FKDA035);甘肃省水利科研技术推广项目(甘水科外发[2013]293号、[2014]223号);甘肃省科技支撑计划(1204NKCA087);甘肃省水利厅水资源费项目(甘财农[2010]162号)

作者简介:高雅玉(1985-),女,天津人,工程师,长期从事水资源与水土保持方面的研究。

月的洪水量占总径流量的 50% 以上,非汛期径流量仅占 40% 左右。流域水资源存在着总量贫乏、年际年内分配不均、常规水资源量低、水污染日趋严重等问题。要为高速发展的经济提供强有力的水资源保障,就必须对水资源进行合理地分配和利用,以水资源可持续利用支撑流域经济的可持续发展。

在马莲河流域的水资源分配过程中,紧缺的水资源不能同时满足各个用水户的水资源需求,为使有限的水资源产生最大的效益,同时将缺水的风险降到最低,达到水资源最合理分配,往往引入经济学中的风险决策分析理论。国内外对于水资源系统的风险决策分析主要集中在防洪系统^[1]和水库调度的风险决策方面,对于水资源分配的风险决策鲜见报道。在防洪系统的风险决策方面,Molostvov 进行了多判据优化概念及充分条件研究,完成了多值向量函数的极值点、鞍点和均衡点及其充分条件的理论研究。Goicoechea 等将折衷法应用到 5 个目标函数和 5 组决策变量问题中。在水库调度风险决策方面,张勇传等首先将模糊集理论引入到水库群的联合优化调度决策领域,为水库群联合调度多目标决策问题开辟了新的研究途径。陈守煜等^[2]结合非线性优化技术、随机动态规划理论以及模糊优选理论,提出多目标模糊优选随机动态规划(MOFOSDP)模型并进行了实例验证。Cheng Chuntian 等^[3]结合水库防洪优化调度问题,提出多目标计算的框架和方法论。Esogbue 等^[4]提出了风险决策过程新方法,并验证了方法的灵活性^[5-6]。

笔者以经济学风险决策理论为基础,在风险决策中采用决策树法,并将专家咨询结果引入决策树敏感性分析中,得到风险决策推荐方案。与此同时,利用

系统分析理论和优化技术建立了流域的大系统、多目标水资源优化配置模型,并采用优化的 NSGA-II 方法进行求解,得到流域 2020、2030 年推荐水资源配置方案下的最佳分配方案。最佳分配方案可有效规避发展速度预测不准确所带来的误差,合理进行流域内各水资源分区、不同用水户的水资源供需平衡配置,为流域水资源规划、管理政策的制定提供参考。

2 马莲河流域供需水量预测

2.1 流域水资源系统概化及分区

马莲河流域总面积 19 086 km²,地处中纬度地带,深居内陆,地形复杂,温带大陆性气候明显。流域涉及庆阳市环县、华池县、庆城县、合水县、宁县、正宁县、西峰区 7 县(区),总人口 202.10 万人,其中农业人口 136.17 万人,非农业人口 65.93 万人。流域内农业结构以种植业和养殖业为主,冬小麦为主要作物,分布于各县(区),种植面积比例为 60%~70%。流域内煤炭、石油和天然气资源储量非常丰富。马莲河流域水资源系统具有复杂多样性,水资源决策需根据其目的与需要,对与水资源优化配置相关的各种重要特性和规律在模拟模型中加以反映,对系统的其他方面进行概化,对流域水资源系统所涉及的各类实体进行分析,确定系统概化的基本元素。流域的水资源系统主要由水源、调蓄工程、输配水系统、用水户和排水系统组成。按照流域的自然地理特点和社会经济发展状况,结合区域的水量 and 水质特点,将流域划分为牧区能源产业区、农牧兼作工业发展区、生态农业保护区、石油、煤炭产业循环发展保护区、生态农业、煤炭工业可持续发展保护区 5 个水资源分区(图 1)。对不同分区的供水工程进行统计、分析,便于进行后续水资源决策分析。

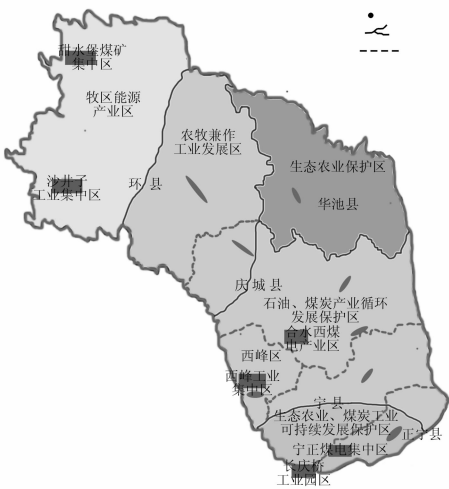


图1 马莲河流域分区图

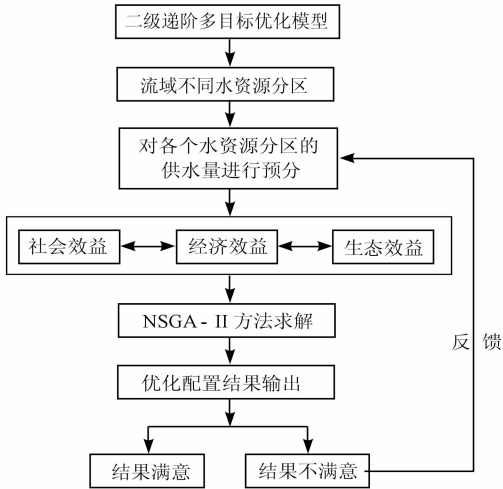


图2 大系统、多目标模型求解过程图

2.2 流域供、需水量预测及平衡分析

马莲河流域需水量的预测采用模型模拟预测法中的指标分析法进行,该方法能够充分考虑影响未来用水量的因素,根据用水量的主要影响因素变化趋势,确定相应的用水指标及用水定额,然后根据用水户规模和用水定额计算出规划水平年的需水量。

用水户规模主要根据不同规划水平年、不同社会经济发展速度进行预测确定,而用水定额则根据社会经济发展状况、节水水平等进行预测。根据马

莲河流域水资源分区情况,对每个水资源分区分为工业、农业、生活、生态及新能源产业的需水量进行计算。基于时间序列,以 2010 年为现状水平年,2020 年为中期规划水平年,2030 年为中长期规划水平年进行预测。确定用水定额、同时将社会经济水平分为高速发展和低速发展,将所有发展情况排列组合(见表 1、表 2),进行流域不同规划水平年不同用水户的需水量预测。

表 1 2020 年不同供需方案专家咨询概率结果表

方 案	方案一		方案二		方案三		方案四	
不同概率情况	发展情况	概率打分	发展情况	概率打分	发展情况	概率打分	发展情况	概率打分
社会经济发展速度	低速	0.400	低速	0.400	高速	0.600	高速	0.600
水利工程建设速度	高速	0.344	低速	0.656	高速	0.344	低速	0.656
概率可能性	0.138		0.262		0.206		0.394	

表 2 2030 年不同供需方案专家咨询概率结果表

方 案	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五	方案六	方案七	方案八
发展速度	2020 年低速		2020 年高速		2020 年低速		2020 年高速	
	2030 低速	2030 高速	2030 低速	2030 高速	2030 低速	2030 高速	2030 低速	2030 高速
	0.240	0.160	0.360	0.240	0.240	0.160	0.360	0.240
水利工程建设速度	低速	低速	低速	低速	高速	高速	高速	高速
概率可能性	0.088	0.059	0.132	0.088	0.152	0.101	0.228	0.152

根据社会经济发展速度和水利工程的建设速度,排列组合出 2020 年方案 4 个、2030 年方案 8 个,共计 12 个方案,分别对这 12 个方案分为不同水资源分区、不同用水户进行预测,得到 12 个不同的需水量预测表,限于篇幅只列出 2030 年方案七的需水量预测情况(见表 3)。

根据庆阳市的各项水利规划,在原有水利工程的基础上,分析预测新增水利工程的数量及在规划水平年的新增供水能力。根据新增水利工程的发展速度,分为高速、低速对中期和远期规划水平年的可供水量进行预测,得到 2020 年和 2030 年不同水利工程建设速度情况下各个分区的可供水量。根据流域 12 个方案的供、需水量预测结果,按照供水工程可供的区域,确定不同水资源分区的可供水量,进行水资源供需平衡分析(见表 3)。

3 风险决策分析及改进的决策树法

在流域水资源分配过程中采用决策树方法,是先将不同分配方案的各个分配要素绘入决策树图

中,然后排除风险大的不利方案。但在排除方案之后,剩余的方案往往多于 2 个,因此很难选出最优方案,需要进一步做敏感性分析。改进的决策树方法就是将专家概率打分的结果融入到决策树敏感性分析当中,以综合概率的可能性大小和期望方案的情况来判断最优方案的可行性,可有效避免发展速度预测不准确带来的误差,大大增强最优方案的可行性,排除了社会经济发展速度低概率情况下的水资源方案,为不同分区和用水户提供更合理的水资源配置方案。

风险决策是指存在一些不可控制的因素,出现几种不同结果的可能性在不确定性状态环境下做出的决策。专家咨询概率法是指通过匿名方式征询有关专家的意见,对专家意见进行统计、处理、分析和归纳,客观地综合多数专家经验与主观判断,对大量难以采用技术方法进行定量分析的因素做出合理估算,经过多轮意见征询、反馈和调整,形成最终的分析结论。根据流域的供需水量预测情况,制成 12 个专家咨询概率调查方案,选择水资源领域专家 8

人、地方水行政部门专家 8 人、流域内熟悉水资源情况的人员 8 人、课题组成员 3 人以及社会经济规划专家 3 人共 30 人对专家咨询概率调查方案进行打分,并对各个专家的打分结果进行统计(见表 1、表

2)。根据专家对 12 个方案的打分情况、供需水量预测以及供需平衡分析结果,使用加权平均计算出流域的期望需水量、期望供水量和期望缺水率结果,作为决策树方法的基础参数。

表 3 2030 年方案七的水资源供需平衡分析成果表

水资源分区	分项	工业	能源基地	农业	生活	生态	合计
牧区能源产业区	需水量/亿 m ³	0.12	0.08	0.50	0.10	0.01	0.82
	供水量/亿 m ³	0.12	0.08	0.50	0.10	0.01	0.82
	缺水率/%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
农牧兼作工业发展区	需水量/亿 m ³	1.94	0.00	0.59	0.17	0.02	2.73
	供水量/亿 m ³	1.86	0.00	0.25	0.17	0.01	2.30
	缺水率/%	4.12	0.00	57.54	0.00	37.49	15.67
生态农业示范保护区	需水量/亿 m ³	0.14	0.00	0.33	0.09	0.02	0.58
	供水量/亿 m ³	0.14	0.00	0.33	0.09	0.02	0.58
	缺水率/%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
石油、煤炭工业可持续发展保护区	需水量/亿 m ³	3.64	0.09	0.63	0.46	0.07	4.89
	供水量/亿 m ³	2.85	0.09	0.29	0.46	0.02	3.72
	缺水率/%	21.64	0.00	54.38	0.00	64.50	24.04
生态农业、煤炭工业可持续发展示范保护区	需水量/亿 m ³	0.43	0.18	0.28	0.32	0.10	1.31
	供水量/亿 m ³	0.43	0.18	0.27	0.32	0.10	1.30
	缺水率/%	0.00	0.00	3.32	0.00	0.03	0.72
马莲河流域	需水量/亿 m ³	6.27	0.35	2.33	1.14	0.22	10.33
	供水量/亿 m ³	5.40	0.35	1.64	1.16	0.16	8.72
	缺水率/%	13.84	0.00	29.70	0.00	22.74	15.62

3.1 决策树法风险决策分析

在水资源分配研究中,关于风险决策分析常见的方法主要有蒙特卡洛模拟、改进一次二阶矩法、JC 法、决策树法、最大熵分析法、贝叶斯方法等^[7-8]。其中,决策树法是一种组织和代表决策者面对的决策点和不确定性的系统性方法^[9],具有表达直观、计算方便等优点^[10]。决策树的建立采用自上而下递归的方式,节点表示对一个属性的测试,每一个分支代表一个测试的输出;每一个树叶(节点)代表一个类别或类别分布^[11]。将 2020、2030 年 12 个方案中的社会经济发展状况及水利工程建设状况绘制到决策树中进行风险决策分析(见图 3、图 4)。

2020 年社会经济发展和水利工程建设的所有组合为 4 个方案,根据供需平衡分析结果,得到 2020 年的期望缺水率为 14.37%。由决策树将缺水率高于期望缺水率的方案二和方案四去除,得到方案一和方案三作为最优决策方案的备选方案。2030 年社会经济发展和水利工程建设的所有组合为 8 个

方案,2030 年的期望缺水率为 21.68%。由决策树将缺水率高于期望缺水率的方案一、方案四和方案八去除,得到方案五、方案七作为最优决策方案的备选方案。

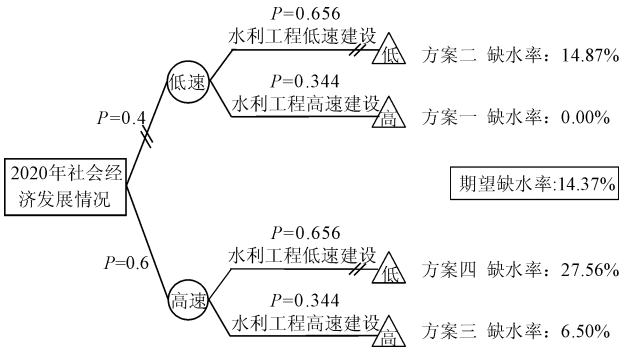


图 3 2020 年社会经济发展、水利工程建设决策树

3.2 决策树法进行风险决策的改进

在用决策树进行了风险分析之后,各规划水平年的最优方案仍有 2~3 个。为选出最佳的方案,将

专家咨询概率法引入到决策树敏感性分析中来,根据专家概率咨询的结果对最优方案的备选方案进行再次筛选,最终得到不同规划水平年的推荐方案。根据专家咨询概率结果和决策树图,2020 年方案一中,社会经济低速发展的概率为 0.4,小于方案三中的社会经济高速发展的概率 0.6,即方案三的可能性要大于方案一,经敏感性分析后,最终决策出 2020 年的方案三(社会经济高速发展、水利工程高

速建设)为最优决策方案。在 2030 年方案五和方案六中,2020 年的社会经济水平发展为低速情况,概率为 0.4;方案七中 2020 年的社会经济发展水平为高速发展,概率为 0.6。方案七的专家咨询的概率大于方案五和方案六的,因此确定最优的决策方案为方案七(2020 年社会经济高速发展、2030 年社会经济低速发展、水利工程高速建设),供需平衡分析结果见表 3。

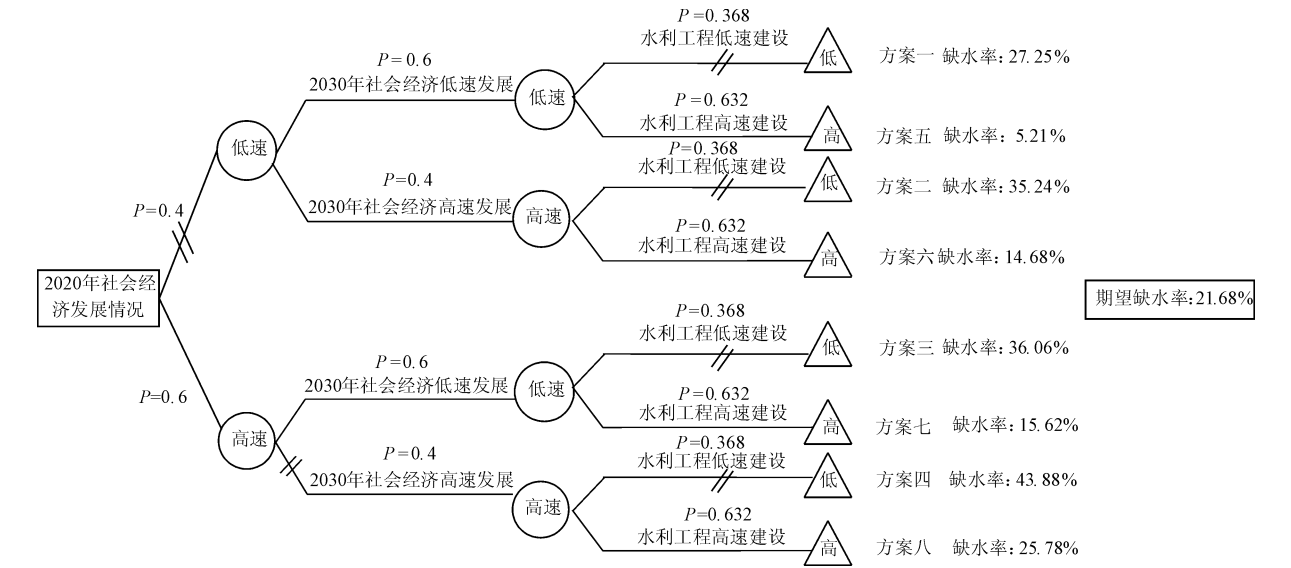


图 4 2030 年社会经济发展、水利工程建设决策树

4 流域水资源综合管理及优化配置研究

不同用水户水资源的最优分配是流域水资源综合管理的基础,通过建立多目标水资源优化配置模型并利用系统分析理论和优化技术来达到社会、经济、环境协调发展的综合效益最佳的目标。以现状水资源供需分析为基础,预测规划水平年的供、需水量;在此基础上运用大系统、多目标的方法构建水资源优化配置的模型,选择优化的 NSGA - II 方法对模型进行求解得到流域最佳水资源配置方案,通过进行供需平衡分析完成流域水资源的综合管理。

4.1 多目标水资源优化配置模型构建

流域大系统、多目标水资源优化配置模型是通过构建目标函数和约束条件来完成,同时达到目标函数的要求和约束条件的限制,探索有条件同时满足的最优情况。流域水资源大系统、多目标优化配置模型的最终目标是综合效益最佳,目标函数有 3 个,分别是社会效益、经济效益、环境效益同时达到最佳,目标函数和约束条件函数表达式限于篇幅不再列出。

4.2 模型的求解及优化

对构建好的水资源优化配置模型求解选用 NSGA - II (Nondominated Sorting Genetic Algorithm - II)改进的非支配排序多目标优化遗传算法进行。NSGA - II 是 2002 年 Deb 等人对算法 NSGA 的改进,具体过程为:

- (1) 随机产生初始种群 P_0 , 然后对种群进行非劣排序, 每个个体被赋予秩; 再对初始种群执行二元锦标赛选择、交叉、变异, 得到新的种群 Q_0 , 令 $t = 0$ 。
- (2) 形成新的群体 $R_t = P_t \cup Q_t$, 对种群 R_t 进行非劣排序, 得到非劣前端 $F_1, F_2, \dots$ 。
- (3) 对所有 F_i 拥挤距离比较操作 $<_n$ 进行排序, 并选择其中最好的 N 个个体形成种群 P_{t+1} 。
- (4) 对种群 P_{t+1} 执行复制、交叉和变异, 形成种群 Q_{t+1} 。
- (5) 如果终止条件成立, 则结束; 否则, $t = t + 1$, 转到(2) [10-11]。

根据大系统理论的分解协调技术, 建立了二级递阶多目标优化模型。采用分解 - 协调技术中的模型协调法, 将关联约束变量区域公用水资源 D_c 进行

预分,产生预分方案 D_c^k ,是系统分解成 k 个独立子系统。然后反复协调分配量,最终实现系统综合效益最佳。求解流程见图 2。

(1) 第一级子系统优化。第一级子系统依据区域概况和行政划分将区域分为 k 个子区。各子区是第二级(协调级)给定的公共资源预分值 $\sum_{k=1}^k D_c^k \leq W_c$ 的前提下进行各子区优化,采用非支配排序多目标优化遗传算法(NSGA-Ⅱ)求解。第 K 个子区的优化模型为:

$$F_k(X^k) = \{f_1^k(X^k), f_2^k(X^k), f_3^k(X^k)\} \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^{J(k)} X_{cj}^k \leq D_c^k, X_{ij}^k \leq Q^c \quad (2)$$

$$(c = 1, 2, \dots, M), (j = 1, 2, \dots, J(k))$$

$$\sum_{j=1}^{J(k)} X_{ij}^k \leq W_i^k, X_{ij}^k \leq Q_i^k \quad (3)$$

$$(i = 1, 2, \dots, I(k)), (j = 1, 2, \dots, J(k))$$

$$\sum_{i=1}^{I(k)} X_{ij}^k + \sum_{c=1}^M X_{cj}^k \leq D_{j,\max}^k \quad (4)$$

$$(j = 1, 2, \dots, J(k))$$

$$\sum_{i=1}^{I(k)} X_{ij}^k + \sum_{c=1}^M X_{cj}^k \geq D_{j,\min}^k, X_{ij}^k, X_{cj}^k \geq 0 \quad (5)$$

$$(j = 1, 2, \dots, J(k))$$

用 NSGA-Ⅱ 可以求得系统局部最优解 $X^k(D_c^k)$ 和最优值 $F_k(X^k, D_c^k)$,它们均是公共资源预分值 D_c^k 的函数,这虽然是可行解,但未必是区域的最佳均衡解。因此需将第一级各子区求得的解 $X^k(D_c^k)$ 和目标值 $F_k(X^k, D_c^k)$ 反馈到第二级,进行第二级系统协调。

(2) 第二级系统协调。第二级协调的任务是求得公共资源在各子区的最优分配,即求解如下的优化问题:

$$F(X) = \max \sum_{k=1}^k W_k F_k(X^k), \sum_{k=1}^k D_c^k \leq D_c \quad (6)$$

$$(c = 1, 2, \dots, M)$$

$$\mu = \sqrt{\mu_{B_1}(\sigma_1)\mu_{B_2}(\sigma_2)} \geq \mu^*, D_c^k \geq 0 \quad (7)$$

$$(c = 1, 2, \dots, M; k = 1, 2, \dots, K)$$

(3) 规划决策,得到最优配水决策方案

依据第二级系统协调结果对第一级进行再次协调,最终达到最优解^[9-12]。

4.3 模型参数的确定

4.3.1 子区权重系数 子区权重系数 w_k 是 k 子区对整个经济区而言的重要性程度,采用二元对比法计算出各水资源分区的子区权重系数,权重系数为:

牧区能源产业区:0.16;农牧兼作工业发展区:0.16;生态农业示范保护区:0.17;石油、煤炭工业可持续发展保护区:0.26;生态农业、煤炭工业可持续发展示范保护区:0.25。

4.3.2 供水次序系数和用水公平系数

(1) 供水次序系数。供水次序系数 α_i^k 可反映 k 子区 i 水源相对于其它水源供水的优先程度,它将各个水源的优先程度转化为 $[0, 1]$ 区间上的系数。

水源供水次序系数由: $\alpha_i^k = \frac{1 + n_{\max}^k - n_i^k}{\sum_{j=1}^J [1 + n_{\max}^k - n_j^k]}$ 确

定,蓄水:0.28,提水:0.24,引水:0.19,浅层水:0.14,深层水:0.10,其他水源:0.05。

(2) 用户用水公平系数。用户公平系数 β_j^k ,是指 K 子区内的用户相对其它用户优先得到供给的重要性程度。其值的具体计算方法参考 α_i^k 的计算公式,用水户的公平系数为:工业:0.20;能源基地:0.27;农业:0.13;生活:0.33;生态:0.07。

4.3.3 用水效益系数和费用系数

(1) 用水效益系数。用水效益系数表征用户在得到供水量后,单位水量能够产生的经济效益,结合流域统计年鉴及规划得到供水效益系数为:工业:333,能源基地:400,农业:250,生活:420,生态:200。

(2) 供水费用系数。不同水资源分区的用水费用系数为:牧区能源产业区:4.70,农牧兼作工业发展区:2.00,生态农业示范保护区:2.35,石油、煤炭工业可持续发展保护区:1.50,生态农业、煤炭工业可持续发展示范保护区:0.50。

4.3.4 污染物排放系数 参考《中国环境统计年鉴(2013)》、《庆阳市统计年鉴(2013)》、《庆阳市环境质量报告书(2013)》等相关资料中关于全国城市污水排放的统计情况各,确定马莲河流域不同规划水平年、不同用水户的污染物排放系数。2020 年工业、能源基地、农业、生活、生态的排污系数分别为:1.19、1.22、0.94、10.76、0.05。

5 模型优化结果分析

马莲河流域水资源优化配置模型为大系统多目标优化模型。根据大系统理论的分解协调技术,建立二级递阶多目标优化模型。采用分解-协调技术中的模型协调法,将关联约束变量区域公用水资源进行预分,产生 5 个水资源分区的预分方案,使系统分解成 5 个独立子系统。然后反复协调分配量,最终实现系统综合效益最佳。采用优化的 NSGA-Ⅱ

对模型进行求解。通过 Matlab 来实现模型的求解过程,以 2030 年的风险决策分析的推荐方案为例进行优化,最终得到马莲河流域 2030 年的水资源优化配置结果(表 4)。马莲河流域总供水量 8.70 亿 m^3 ,缺水率 15.90%。其中,牧区能源产业区供水量 0.82 亿 m^3 ,缺水率 0.74%;农牧兼作工业发展区供

水量 2.28 亿 m^3 ,缺水率 16.31%;生态农业保护区供水量 0.58 亿 m^3 ,缺水率 0.81%;石油、煤炭产业循环发展保护区供水量 3.72 亿 m^3 ,缺水率 24.05%;生态农业、煤炭工业可持续发展保护区供水量 1.30 亿 m^3 ,缺水率 0.78%。

表 4 2030 年风险决策推荐方案优化配置水资源供需平衡分析成果表

水资源分区	分项	工业	能源基地	农业	生活	生态	合计
牧区能源产业区	供水量/ 亿 m^3	0.12	0.08	0.50	0.10	0.01	0.82
	缺水率/%	0.89	0.00	0.96	0.06	0.68	0.74
农牧兼作工业发展区	供水量/ 亿 m^3	1.62	0.00	0.47	0.17	0.02	2.28
	缺水率/%	16.40	0.00	21.18	0.01	1.25	16.31
生态农业示范保护区	供水量/ 亿 m^3	0.14	0.00	0.33	0.09	0.02	0.58
	缺水率/%	0.90	0.00	0.97	0.07	0.96	0.81
石油、煤炭工业可	供水量/ 亿 m^3	2.74	0.09	0.37	0.44	0.07	3.72
持续发展保护区	缺水率/%	24.61	0.08	41.17	4.37	0.97	24.05
生态农业、煤炭工业可	供水量/ 亿 m^3	0.42	0.18	0.28	0.32	0.10	1.30
持续发展示范保护区	缺水率/%	1.04	0.01	1.63	0.03	1.01	0.78
马莲河流域	供水量/ 亿 m^3	5.04	0.35	1.95	1.12	0.22	8.70
	缺水率/%	19.48	0.02	17.05	1.77	0.99	15.90

其中,工业供水量 5.04 亿 m^3 ,缺水率 19.48%;能源基地供水量 0.35 亿 m^3 ,缺水率 0.02%;农业供水量 1.95 亿 m^3 ,缺水率 17.05%;生活供水量 1.12 亿 m^3 ,缺水率 1.77%;生态供水量 0.22 亿 m^3 ,缺水率 0.99%。

6 结 语

(1)将马莲河流域系统概化为牧区能源产业区、农牧兼作工业发展区、生态农业示范保护区、石油、煤炭工业可持续发展保护区和生态农业、煤炭工业可持续发展示范保护区 5 个水资源分区,并采用指标分析法进行了供需水量预测和平衡分析。

(2)利用决策树法进行风险分析,并对决策树法进行改进,将专家咨询概率法引入到决策树敏感性分析中,得到 2020、2030 年的推荐水资源供需分配方案 12 个,最终决策出 2020 年的方案三(社会经济高速发展、水利工程高速建设)为最优决策方案。2030 年方案七(2020 年社会经济高速发展、2030 年社会经济低速发展、水利工程高速建设)为最优决策方案。

(3)利用系统分析理论和优化技术建立了流域的大系统、多目标水资源优化配置模型,并采用优化

的 NSGA-Ⅱ 方法进行求解,得到流域 2030 年推荐水资源配置方案下的最佳分配方案为:流域总供水量 $86\ 865\text{ 万 m}^3$,缺水率 15.90%。

(4)经优化得到的最佳配置方案,可有效规避发展速度预测不准确所带来的误差,合理进行流域内各水资源分区、不同用水户的水资源供需平衡配置,为流域水资源规划、管理政策的制定提供参考,真正实现了流域内水资源的最优分配,使宝贵、有限的水资源产生最大的社会、经济及环境效益,为流域经济、能源产业的快速发展提供强有力的水资源保障。

参考文献:

[1] 韩宇平,阮本清,汪党献. 区域水资源短缺的多目标风险决策模型研究[J]. 水利学报,2008,39(6):667-673.

[2] 陈守煜,邱林. 水资源系统多目标模糊优选随机动态规划及实例[J]. 水利学报,1993,24(8):43-48.

[3] Cheng Chuntian, Chau K W. Fuzzy iteration methodology for reservoir flood control operation[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2001,37(5):1381-1388.

[4] Esogbue A O, Liu Baoding. Reservoir operations optimization via fuzzy criterion decision processes[J]. Fuzzy Optimization and Decision Making, 2006,5(3):289-305.

[5] 覃 晖. 流域梯级电站群多目标联合优化调度与多属性风险决策[D]. 武汉:华中科技大学,2011.

[6] 李克飞. 水库调度多目标决策与风险分析方法研究 [D]. 北京:华北电力大学,2013.

[7] Deb, K,Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA – II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation . 2002, 6(2) : 182 – 197.

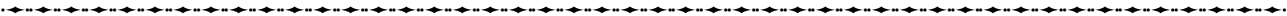
[8] Bekele, EG and Nicklow JW. Multi – Objective Optimal Control Model for Watershed Management Using SWAT and NSGA – II[J]. World Environmental and Water Resources Congress, 2014:1 – 10.

[9] Baltar AM, Fontane DG. Use of multiobjective particle swarm optimization in water resources management [J]. Journal of water resources planning and management. 2014, 134(3) : 257 – 265.

[10] Li Chen, McPhee J, William W – G Yeh. A diversified multiobjective GA for optimizing reservoir rule curves[J]. Advances in Water Resources . 2007, 30(5) : 1082 – 1093.

[11] Liong Shie – Yui, Yu Xinying. Alternative decision making in water distribution network with NSGA – II [J]. Journal of water resources planning and management. 2006,132(2) : 122 – 126.

[12] 丁胜祥, 董增川, 王德智, 等. 基于 Pareto 强度进化算法的供水库群多目标优化调度 [J]. 水科学进展, 2008, 19(5) : 679 – 684.



(上接第 108 页)

参考文献:

[1] 阎伍玖, 陈飞星. 长江安徽马鞍山段水质评价研究[J]. 水土保持学报,2000, 14(4):104 – 107 + 116.

[2] 赵 凯. 基于 GIS 的马鞍山长江段突发性水污染预警系统研究[D]. 安徽工业大学, 2010.

[3] 赵前信. 四种水环境质量评价方法在六安市水库中的应用[J]. 环境工程, 2014, 3(3):113 – 116 + 120.

[4] 张小君,徐中民,宋晓谕,等. 几种水环境质量评价方法在青海湖入湖河流中的应用 [J]. 环境工程, 2013, 32(1):117 – 121.

[5] 国家环保总局,国家质量监督检验检疫总局. GB3838 – 2002 地表水环境质量标准 [S]. 北京:中国环境科学出版社, 2002.

[6] 段德宏,王根霞,王 萍. 一维稳态河流水质的计算机模拟 [J]. 水资源与水工程学报, 2005,16(3):54 – 56 + 61.

[7] 丁艳华,杨 俊,杨莉,等. 模糊数学在水环境评价中的应用 [J]. 能源与环境, 2008(1):7 – 8.

[8] Li – Chang Hsu. Applying the grey prediction model to the global integrated circuit industry [J]. Technological Forecasting and Social Change, 2003,70(6):563 – 574.

[9] 王守坤, 张传珂. 沭河水质模糊综合评价评价模型建立与应用 [J] 环境科学与管理, 2013,38(2):63 – 66.

[10] 李如忠. 水质评价理论模式研究进展及趋势分析 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2005,28(4):369 – 373.

[11] 王丹宁,赵 明,赵洪宾. 灰色关联属性识别模型在给水管网水质分析中的应用 [J]. 环境与健康杂志, 2007, 24(8):580 – 582.

[12] 门宝辉,梁 川. 水质量评价的物元分析法 [J]. 哈尔滨工业大学学报. 2003,35(3):358 – 361.

[13] 孙培德,楼菊青. 环境系统数学模型及数值模拟 [M]. 北京:中国环境科学出版社,2005.

[14] 王纪东. 内河危化品码头安全风险评估与应急管理研究 [D]. 重庆交通大学,2013.