

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.06.008

基于 IFMOP 的玉环市区域水资源配置

向 龙, 龚泓博

(河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要:引入无概率分布的区间数表示不确定性影响范围,选取经济效益、供需水效率和 COD 排放量分别构建经济目标、社会目标和环境目标优化函数,构建了玉环市不确定性模糊多目标规划(IFMOP)水资源配置模型,并计算了不确定性解集。结果表明:IFMOP 配置计算成果可实现玉环市区域水量水质协调高效利用和社会-经济-生态系统均衡发展;在 75% 来水保证率下各行业配置总水量不确定性范围为 14 375 万~15 154 万 m^3 。IFMOP 水资源配置模型在信息不充分的条件下能够全面使用各类数据信息进行水资源配置,更好地满足水资源在各行业配置过程中的动态管理需求。

关键词:水资源配置;多目标线性规划;IFMOP;不确定性;玉环市

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)06-0049-05

Regional water resources allocation in Yuhuan based on IFMOP// XIANG Long, GONG Hongbo(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: With interval numbers without probability distribution introduced to represent the magnitude of uncertainty influence, the economic benefit, water supply and demand efficiency and COD emission are selected to form the economic, social and environmental objective optimization functions respectively. Thus, the inexact fuzzy multi-objective programming (IFMOP) allocation model of Yuhuan City is established and its uncertainty solution sets are calculated. The results indicate that the calculation results of IFMOP allocation model can realize the coordinated and efficient utilization of regional water in both terms of quantity and quality and the balanced development of society, economy and ecosystem in Yuhuan City. With 75% inflow rate guaranteed, the uncertainty range of total water allocation for each industry is 143.75—151.54 million m^3 . IFMOP water resources allocation model can fully utilize all kinds of data information for water resources allocation under the condition of insufficient information, so as to better meet the dynamic management demands when allocating water resources for various industries.

Key words: water resources allocation; multi-objective linear programming; IFMOP; uncertainty; Yuhuan City

区域水资源合理配置是维持社会可持续发展的关键,是落实“生态优先、绿色发展”理念的基础资源管理措施。基于“三条红线”^[1]、节水优先^[2]等视角下的区域水资源配置问题已有较多研究成果,而水资源的供用耗排体系是极为复杂的多用户多需求系统,供需双方有许多不确定性影响因素。因此,区域水资源配置问题既是复杂系统的多目标规划问题,也是不确定性动态管理的问题。目前,水资源优化配置研究主要使用一些启发式算法作为寻优手段,例如蚁群算法^[3]、萤火虫算法^[4]、遗传算法^[5]、粒子群算法^[6]以及基于这些算法的改进或融合算

法^[7-9]等,在特定保证率下仅有一组确定的水量配置结果,不能够反映配置结果的区间波动特性或不确定性范围,不利于决策者的动态管理与调控;部分学者使用系统动力学^[10]对区域水资源配置问题进行研究,但受限于获取信息的完整性、现实系统的复杂性以及变量参数的不确定性使得仿真建模手段难以准确全面地描述真实系统。针对多目标不确定性规划问题,常用模糊多目标规划(fuzzy multi-objective programming, FMOP)和随机多目标规划(stochastic multi-objective programming, SMOP)两类方法。Huang 等^[11]提出了灰色不确定性概念的多

目标规划 (inexact multi-objective programming, IMOP), 相对于 SMOP, IMOP 使用无分布的区间数作为模型变量和参数, 在输入数据要求、计算可操作性、结果解译上具有优势。还有一些学者将几种方法综合应用于灌区水资源优化配置^[12-13]、工业区环境经济系统优化^[14]、产业结构优化^[15]等水资源优化问题, 取得了较好的优化效果。不确定性模糊多目标规划 (inexact fuzzy multi-objective programming, IFMOP) 是一种基于 IMOP 的拓展方法, 它将模糊理论引入 IMOP 中^[16-17], 采用分解模糊算子的处理方法改善单个模糊算子 λ^+ 与不同目标函数约束结构不对应的问题, 提高了结果区间的准确程度。本文采用 IFMOP, 构建了玉环市不确定性模糊多目标水资源配置模型 (以下简称 IFMOP 模型), 确定了水资源在多用户多目标全局最优条件下的动态模糊管理范围。

1 研究区概况

玉环市位于浙江省东南部, 水资源缺乏, 多年平均水资源量为 2.66 亿 m^3 , 全市多年平均地下水资源量为 0.32 亿 m^3 , 地下水可开采量为 0.21 亿 m^3 。2019 年常住人口为 63.1 万人, 人均水资源量约为 422 m^3 , 仅相当于全国平均水平的 1/5, 处于国际公认的用水紧张警戒线 (人均 1700 m^3) 以下, 接近极度缺水地区, 水资源供需矛盾大, 供水系统动态调度要求高。因此, 玉环市积极寻求多种水源, 如外调水、中水以及玉环湖亚海水等来缓解供水压力。同时, 玉环市工业发达, 用户需水量大, 变幅广, 对水资源系统保证的要求高。在社会发展、政策影响、产业结构调整、工程措施等多因素的共同影响下, 玉环市供需水量的波动幅度增大, 不确定性因素在水资源配置管理过程中越来越重要。本文考虑不确定性和模糊性双重影响, 采用解决系统多目标优化问题的 IFMOP 方法, 在概化当前供需水现状、社会经济、政策导向基础上构建 IFMOP 模型来分析玉环市水资源配置的不确定性优化管理问题。

2 模型构建与求解

2.1 模型原理与求解

IFMOP 以不确定性概念的 IMOP 为基础, 使用无概率分布的区间数作为模型变量和参数, 融合 SMOP 模块, 采用分解模糊算子的处理方法解决了单个模糊算子 λ^+ 与不同目标函数约束结构不对应的问题, 提高了计算的可靠性。设 x 为封闭有界实数集, x^+ 为已知上下界的区间数, $x^+ = [x^-, x^+] = \{t \in x \mid x^- \leq t \leq x^+\}$ 。IFMOP 水资源配置模型理论

方程可表示为

$$\begin{cases} \min f_k^+ = C_k^+ X^+ & (k=1, 2, \dots, u) \\ \max f_l^+ = C_l^+ X^+ & (l=u+1, u+2, \dots, q) \\ \text{s. t. } A_i^+ X^+ \leq b_i^+ & (i=1, 2, \dots, m) \\ A_j^+ X^+ \geq b_j^+ & (j=m+1, m+2, \dots, n) \\ X^+ \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: f_k^+ 、 f_l^+ 分别为最小化和最大化目标函数; u 、 q 分别为最小化目标的维数和全部目标的维数; C_k^+ 、 C_l^+ 为效益系数; A_i^+ 、 A_j^+ 为费用系数; X^+ 为决策变量; b_i^+ 、 b_j^+ 为约束条件限制值; m 、 n 分别为最大目标约束维数和总约束维数。

该方程组通过采用模糊算子表征系统目标的达成与协调情况来确定模糊目标, 之后结合模糊线性规划 (FLP) 转换、模糊目标构建、不确定性线性规划 (ILP) 转换、模糊目标分解、IFMOP 子模型构建等方法求解模型方程组^[18]。模型求解步骤: ①根据实际情况使用 IFMOP 模型进行初始标准化; ②求解单目标子模型生成偿付表, 得到个体最优解及模糊目标; ③分解目标函数并构造子模型依次求解; ④根据现实条件调整目标函数、限制条件及模型参数进行交互式求解, 直到达到满意水平为止, 解译得到最终解集。

2.2 模型构建

区域大系统是社会-经济-自然环境复合结构的开放系统, 水资源在三大系统中循环, 参与各子系统的运作, 也在各子系统之间交换。合理配置水资源对三大系统的高效运行、保障用水公平性以及满足代际间的水资源可持续性有着积极作用。IFMOP 模型以区域总体缺水量最小作为社会目标, 以供水带来的效益和费用之差最大为经济目标, 以产生的 COD 排放最少作为生态环境目标, 构建了三大系统多目标群。根据水源供水能力约束各水源的配置总量, 以用水户的需水预测上下限约束各用水户的配置水量。玉环市水资源优化配置 IFMOP 模型如下:

$$\begin{cases} \min f_1^+ = Q_r - \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^6 Q_{ij}^+ \\ \max f_2^+ = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^6 (b_{ij}^+ - c_{ij}^+) Q_{ij}^+ \\ \min f_3^+ = 0.001 \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^6 (\rho_j^+ d_j^+ Q_{ij}^+) \\ \text{s. t. } \sum_{j=1}^6 Q_{ij}^+ \leq Q_i^+ \\ Q_j^- \leq \sum_{i=1}^5 Q_{ij}^+ \leq Q_j^+ \\ Q_{ij}^+ \geq 0 \quad (i=1, 2, \dots, 5; j=1, 2, \dots, 6) \end{cases} \quad (2)$$

式中: f_1^+ 、 f_2^+ 、 f_3^+ 分别为区域缺水量社会效益目标、供水经济效益目标和以 COD 作为主要计算因子的环境效益目标; i 为供水水源类别, $i=1,2,\cdots,5$ 分别为地表水、地下水、外调水、中水回用水和海水淡化水; j 为用水户(行业), $j=1,2,\cdots,6$ 分别为第一产业、第二产业、第三产业和城镇生活、农村生活、生态环境用水户; Q_i 为区域需水总量; Q_{ij}^+ 为从水源 i 向用水户(行业) j 的供水量; b_{ij}^+ 、 c_{ij}^+ 分别为从水源 i 向用水户(行业) j 供水的效益系数和费用系数; ρ_j^+ 、 d_j^+ 分别为用水户(行业) j 的 COD 排放质量浓度和污水排放系数; Q_i^+ 为水源 i 预测可供水量; Q_j^+ 为用水户(行业) j 预测需水量。

2.3 模型的供需不确定性区间数

玉环市水资源可利用量来自地表水、地下水、外调水、再生水(中水回用)以及海水淡化。受到地理条件限制,玉环市区域内没有建设大型水库,由于水质状况较差,河网水资源不能作为集中式生活饮用水水源,地下水中氯离子含量高,达不到饮用标准;地表水没有跨境河流补给,水资源补充主要依靠自然降水,可供水资源不确定性显著。同时,玉环市连续多年荣膺全国百强县(市),经济增速较快,用水需求变化大,部分用水户(行业)受不确定性影响显著。从供水工程体系的调配来看,水资源调度管理也是动态性调节,供水管网等设施也具有一定的不确定性风险。

结合玉环市水资源供需水预测分析得到的不同来水频率(50%、75%和95%)和用水保证率的可供水量预测成果和需水预测成果,采用75%来水频率来水量代表正常偏枯年份实际水量配置,其他两个频率下的预测结果相对极端,作为水资源来水不确定性区间数的选择边界参考约束值。选用75%来水频率下的供需水成果作为计算配置基准值的中位数。

在确定的来水频率和用水保证率的条件下,可供水预测和需水预测仍然存在不确定性波动范围。可供水量预测主要受到来水量波动、水利工程运行情况以及输水管网系统等不确定性因素影响;需水量预测主要受到人口和经济增长、行业工艺、节水技

术等因素影响。通过计算得到基于区间数的供需水量预测值(表1),将其作为不确定性模糊多目标水资源配置初值。参考《玉环县域总体规划(2006—2020)》以及相关资料,75%来水保证率下玉环市2020年供水量能够满足需求,供需比为103%~125%,水资源供需总量基本平衡,可以优先保证生活、环境等政策保护用水优先配置。

表1 玉环市2020年75%来水保证率下供需水量预测值
Table 1 The prediction of water supply and demand with 75% inflow rate guaranteed in Yuhuan City in 2020

供需水类别	用水户(行业)与水源	水量/万 m ³
需水量	第一产业	[2 702,2 986]
	第二产业	[5 694,6 294]
	第三产业	[958,1 058]
	城镇生活	[3 018,3 336]
	农村生活	[610,674]
	生态环境	[789,872]
	合计	[13 770,15 220]
可供水量	地表水	[5 654,6 250]
	地下水	[257,284]
	外调水	[5 406,5 975]
	中水回用水	[2 081,2 300]
	海水淡化水	[2 210,2 442]
	合计	[15 607,17 249]

2.4 模型参数估计

2.4.1 供水效益系数与费用系数

供水效益系数和费用系数是经济效益目标函数中关键的参数,根据各用水户(行业)用水量数据、水费和经济效益等资料计算得到。目前广泛采用分摊系数法进行用水效益计算,其核心是计算效益分摊系数,该系数反映了用水产生的效益占总效益的比例,一般与行业节水水平和其他增加效益的技术有关^[19]。

参考《玉环县域总体规划(2006—2020)》以及费用效益系数相关文献^[20],供水效益系数使用各用水户(行业)万元产值用水量的倒数乘以各自的供水效益分摊系数得到;费用系数参考历史水费标准、同源邻近地区或相似用水情景确定。海水淡化水源主要为玉环湖亚海水,其含盐量高于淡水低于海水,淡化成本相对较低。供水效益系数和费用系数确定结果如表2所示。

表2 玉环市2020年供水效益系数和费用系数

Table 2 Water supply benefit coefficient and cost coefficient in Yuhuan City in 2020

用水户 (行业)	效益系数					费用系数				
	地表水	地下水	外调水	中水回用水	海水淡化水	地表水	地下水	外调水	中水回用水	海水淡化水
第一产业	[13,18]	[13,18]	[13,18]	[13,18]	[13,18]	[1,1.5]	[1.5,2]	[3,4]	[1.2,1.5]	[1.2,1.4]
第二产业	[22,33]	[22,33]	[22,33]	[22,33]	[22,33]	[2,3]	[1.5,2]	[4,5]	[1.2,1.5]	[1.2,1.4]
第三产业	[35,54]	[35,54]	[35,54]	[35,54]	[35,54]	[2,3]	[1.5,2]	[4,5]	[1.2,1.5]	[1.2,1.4]
城镇生活	[52,60]	[52,60]	[90,100]	0	[52,60]	[1.5,2]	[1.5,2]	[3.5,4.5]	0	[1.2,1.4]
农村生活	[50,58]	[50,58]	[80,90]	0	[50,58]	[1.5,2]	[1.5,2]	[3.5,4.5]	0	[1.2,1.4]
生态环境	[40,50]	[40,50]	[40,50]	[60,70]	[40,50]	[1,1.5]	[1.5,2]	[3,4]	[1.2,1.5]	[1.2,1.4]

2.4.2 排污质量浓度与污水排放系数

生态环境目标选用污水 COD 排放总量作为指标进行约束,该指标能够较好地反映人类活动造成的水体环境污染程度。IFMOP 模型的环境效益目标涉及排污质量浓度与污水排放系数,生态环境用水不计污水排放,不纳入污染物计算。COD 质量浓度根据监测资料波动范围确定;污水排放系数参照水资源公报数据,以预测值的 1.2 倍作为上限,以预测值作为下限。排污质量浓度与污水排放系数参数确定结果见表 3。

表 3 玉环市 2020 年排污质量浓度与污水排放系数

Table 3 Sewage discharge concentration and sewage discharge coefficient in Yuhuan City in 2020

用水户(行业)	$\rho(\text{COD})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	污水排放系数
第一产业	[55,60]	[0.1,0.12]
第二产业	[33,38]	[0.3,0.36]
第三产业	[37,42]	[0.2,0.24]
城镇生活	[180,185]	[0.1,0.12]
农村生活	[94,99]	[0.5,0.6]

2.5 模型求解

2.5.1 模糊单目标求解

将代表缺水量最小的目标函数 $\min f_1$ 转换为社会供水量最大,即 $\max f_1^+ = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^6 Q_{ij}^+$,将该目标函数系数均转换为正数。按照单目标的不确定性线性规划方法对 3 个目标函数分别进行求解,得到 3 个单目标的模糊目标: f_1^+ 模糊目标为 [13817,15220], f_2^+ 模糊目标为 [431287,738668], f_3^+ 模糊目标为 [161,232]。

2.5.2 多目标求解

模糊算子 λ_1^+ 与 λ_2^+ 分别为最小化目标函数和最大化目标函数的隶属函数。由于 3 个目标函数系数均为正数,分解模糊算子后,根据求解方法可以省去目标函数的分解步骤,构造得到 IFMOP 子模型,在 3 个目标中有两个为最大化目标,一个为最小化目标,因此先求解关于 λ_2^+ 的子模型较好,将计算结果代入另一个子模型完成 IFMOP 模型求解。

3 结果与分析

IFMOP 模型优化计算结果见表 4,从水资源可供量的角度来看,地表水完全配置并主要供给农业,为 2840 万 m^3 ,工业和第三产业分别配置 574 万 m^3 和 908 万 m^3 ;地下水由于常年超采和水质问题总体供给较少,主要用于工业生产;外调水水质较好且供给相对充足,动态配置工业 1513 万 ~ 1886 万 m^3 ,城镇、农村生活用水属于优先配水用户,按需配置供水,分别配置 3297 万 m^3 和 586 万 m^3 ;中水回用水和海水淡化水可供量由产能决定,波动幅度较小,重点填补工业用水;“生态优先”是生态文明建设配置的重要前提,因此配置河道外需水时优先考虑,不考虑动态调节和不确定性影响。从用水户(行业)角度来说:农业用水 97% 来自地表水;工业需水量较大,其中 37% 来自海水淡化,28% 来自地表水,22% 来自中水回用水,地表水和地下水源作为补充;第三产业用水 86% 由地表水供应,其他水源适当补充;城镇、农村生活用水水质要求最高,主要使用水质较优的外调水,外调水分别占比 99% 和 96%;生态用水 89% 来源于中水回用水,但需要保证回归自然河道中水的水质指标不低于河道所在水功能区规定的水质标准。IFMOP 模型的分配成果能够兼顾社会效益目标、经济目标以及生态环境目标,计算结果的下限值为区域节水潜力评估提供了参考。

按照动态配置的范围,取各用水户(行业)水资源最优配置量的中位数进行分析。从用水户(行业)分配水量比例看,第一产业、第二产业以及城镇生活用水占比较大,三者占到总用水量的 83%。从配置可供量的来源看,第一产业和城镇生活用水来源结构较为单一,其中第一产业可供水源主要为本地的地表水,城镇生活可供水源主要为外调水;从不确定性变幅来看,第一产业比城镇生活用水配置结果变幅小;第二产业使用了多类的可供水源,可动态配置的空间较大,如外调水水源配置量为 1513 万 ~ 1886 万 m^3 ,波动幅度为 22%,中水回用水源配置量为 2168 万 ~ 2267 万 m^3 ,波动幅度为 9.2%。配

表 4 玉环市 75% 来水保证率下 IFMOP 水资源配置成果

单位:万 m^3

Table 4 Results of IFMOP water resources allocation with 75% inflow rate guaranteed in Yuhuan City unit: 10^4 m^3

水源	生产用水			生活用水		生态环境用水	合计
	第一产业	第二产业	第三产业	城镇生活	农村生活		
地表水	2840	574	908	[0,23]	6	36	[4364,4387]
地下水	[3,27]	[156,159]	31	[0,9]	12	17	[219,255]
外调水	[0,56]	[1513,1886]	40	3297	586	21	[5457,5886]
中水回用水	[0,32]	[1283,1407]	38	0	0	781	[2102,2258]
海水淡化水	[0,30]	[2168,2267]	41	[0,6]	6	18	[2233,2368]
合计	[2843,2985]	[5694,6293]	1058	[3297,3335]	610	872	[14375,15154]

置水源结构单一且来源固定的用水户(行业)受不确定性影响较小,计算得到的配置不确定性区间范围小;而对于水源结构多样的用水户(行业),如第二产业,各水源配置量的可调整空间较大,在实际配置过程中可以充分利用其调节空间,有利于形成水资源动态配置平衡方案。

4 结 语

IFMOP 模型结合不确定性线性规划及模糊线性规划等方法,采用模糊目标构建和分解处理多目标问题,将模型转化为多个单目标线性规划,从而提高计算效率和可操作性,能够适用于复杂的区域水资源动态配置研究。IFMOP 模型以社会效益、经济效益、生态环境效益为优化目标,水资源配置成果统筹了社会-经济-生态系统可持续发展的总体要求。与传统配置方法相比,IFMOP 配置方法充分考虑了各种不确定性条件下的水资源配置结果,以区间数概化在信息不充分情况下的不确定性影响范围,提供上下边界约束,使得实际水资源配置调节时更加灵活地管理上限风险,下限值也为节水工作提供了参考,比单个模糊算子的不确定性区间算法更合理和准确,较好地处理了多目标规划问题,能够用于玉环市区域水资源动态调控。

根据玉环市 IFMOP 模型配置结果,分析得到各用水户(行业)的用水来源结构组成以及各水源配置量的波动区间信息,有助于决策者发现不确定性风险和识别能够承受配置水量调整的用水户(行业),进而提高水资源配置方案决策质量。

参考文献:

[1] 马平森,雷艳娇,卯昌书,等. 基于用水总量与效率控制的云南省水资源配置[J]. 水利水电科技进展,2015,35(1):49-53. (MA Pingsen, LEI Yanjiao, MAO Changshu, et al. Water resources rational allocation based on total water consumption and water efficiency control in Yunnan Province [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(1): 49-53. (in Chinese))

[2] 向龙,范云柱,刘蔚,等. 基于节水优先的水资源配置模式[J]. 水资源保护,2016,32(2):9-13. (XIANG Long, FAN Yunzhu, LIU Wei, et al. Model of water resources allocation based on idea of giving priority to water-saving [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(2): 9-13. (in Chinese))

[3] 刘玘玘,汪妮,解建仓,等. 基于蚁群算法的水资源补偿博弈模型[J]. 武汉大学学报(工学版),2014,47(4):452-456. (LIU Honghong, WANG Ni, XIE Jiancang, et al. Water resources compensation game model based on ant colony algorithm [J]. Engineering Journal of Wuhan

University, 2014, 47(4): 452-456. (in Chinese))

[4] 张凯,沈洁. 基于萤火虫算法和熵权法的水资源优化配置[J]. 水资源保护,2016,32(3):50-53. (ZHANG Kai, SHEN Jie. Optimal allocation of water resources based on firefly algorithm and entropy method [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(3): 50-53. (in Chinese))

[5] 黄显峰,石志康,金国裕,等. 基于碳足迹的区域水资源优化配置模型[J]. 水资源保护,2020,36(4):47-51. (HUANG Xianfeng, SHI Zhikang, JIN Guoyu, et al. Optimal regional water resources allocation model based on carbon footprint [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4): 47-51. (in Chinese))

[6] 张玲,徐宗学,张志果. 基于粒子群算法的水资源优化配置[J]. 水文,2009,29(3):41-45. (ZHANG Ling, XU Zongxue, ZHANG Zhiguo. Rational allocation of water resources based on particle swarm optimization [J]. Journal of China Hydrology, 2009, 29(3): 41-45. (in Chinese))

[7] 李朦,解建仓,杨柳,等. 基于蚁群-粒子群混合算法的水资源优化配置研究[J]. 西北农林大学学报(自然科学版),2015,43(1):229-234. (LI Meng, XIE Jiancang, YANG Liu, et al. Optimal allocation of water resources based on ant colony-particle swarm algorithm [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2015, 43(1): 229-234. (in Chinese))

[8] 吴云,曾超,杨侃,等. 基于改进 NSGA-II 算法的水资源多目标优化配置[J]. 人民黄河,2020,42(5):71-75. (WU Yun, ZENG Chao, YANG Kan, et al. Multi-objective optimal allocation of water resources based on improved NSGA-II algorithm [J]. Yellow River, 2020, 42(5): 71-75. (in Chinese))

[9] 方国华,郭玉雪,闻昕,等. 改进的多目标量子遗传算法在南水北调东线工程江苏段水资源优化调度中的应用[J]. 水资源保护,2018,34(2):34-41. (FANG Guohua, GUO Yuxue, WEN Xin, et al. Application of improved multi-objective quantum genetic algorithm on water resources optimal operation of Jiangsu Section of South-to-North Water Transfer East Route Project [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(2): 34-41. (in Chinese))

[10] 李维乾,解建仓,李建勋,等. 基于系统动力学的闭环反馈水资源优化配置研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2013,41(11):209-216. (LI Weiqian, XIE Jiancang, LI Jianxun, et al. Water resources optimal allocation based on closed-loop feedback in system dynamics [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2013, 41(11): 209-216. (in Chinese))

[11] HUANG G H, BAETZ B W, PATRY G G. A grey fuzzy linear programming approach for municipal solid waste management planning under uncertainty [J]. Civil Engineering Systems, 1993, 10: 123-146.