

南水北调中线调水后汉江中下游水资源配置的 稳健博弈研究

韩 琦^{1,2}, 付 湘^{1,2}, 张 翔^{1,2}, 赵小丹^{1,2}

(1. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 湖北 武汉 430072;
2. 武汉大学海绵城市建设水系统科学湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 针对南水北调中线工程运行以来汉江中下游径流量大幅减少, 水资源供需矛盾突出的问题, 基于水资源配置空间均衡准则, 以生活、工业、农业 3 个用水部门水量分配满意度最大为目标函数, 建立了水资源配置稳健博弈模型, 分析了中线工程调水前后各主体水量分配满意度变化, 并将稳健博弈模型与多目标优化模型的结果进行了对比。结果表明: 在不确定性条件下, 稳健博弈模型通过降低目标值来提高可靠性, 得到的稳健均衡解劣于纳什均衡解; 南水北调中线工程调水后, 用水部门整体水量分配满意度下降幅度为 9.4%, 生活、工业、农业用水部门满意度分别下降 4.9%、10.4%、12.9%; 需水量最大的农业用水部门水量分配满意度目标值对稳健参数的变化最为敏感。

关键词: 水资源配置; 稳健博弈优化; 南水北调中线工程; 汉江中下游

中图分类号: TV213.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2025)02-0193-07

Robust game study on water resources allocation in middle and lower reaches of the Hanjiang River after operation of the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project//HAN Qi^{1,2}, FU Xiang^{1,2}, ZHANG Xiang^{1,2}, ZHAO Xiaodan^{1,2} (1. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Hubei Provincial Key Lab of Water System Science for Sponge City Construction, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In response to the significant reduction in runoff in the middle and lower reaches of the Hanjiang River and the prominent issue of water supply-demand imbalance since the operation of the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project, a robust game model for water resources allocation was established based on the spatial equilibrium criterion of water resources distribution, with maximization of the satisfaction degree of water allocation in three water consumption sectors, including domestic, industrial, and agricultural water consumption sectors, used as objective functions. The model was applied to analyze the changes in the satisfaction degree of water allocation among different sectors before and after the operation of the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project, and the results were compared with those of the multi-objective optimization model. The results indicate that under uncertain condition, the robust game model enhances reliability by decreasing objective values, and the obtained robust equilibrium solutions are inferior to the Nash equilibrium solutions. After the operation of the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project, the overall water allocation satisfaction degree among different water consumption sectors decreased by 9.4%, with the domestic, industrial, and agricultural sectors experiencing decreases of 4.9%, 10.4%, and 12.9%, respectively. The agricultural water consumption sector that has the highest water demand shows the greatest sensitivity to changes in the robust parameter in terms of the water allocation satisfaction degree.

Key words: water resources allocation; robust game optimization; the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project; middle and lower reaches of the Hanjiang River

自 2014 年底南水北调中线一期工程建成通水以来, 丹江口水库下泄流量减少, 汉江中下游径流量大幅减小^[1]。随着经济社会的发展, 汉江中下游对水资源需求日益增大, 导致流域水资源供需矛盾突

出。未来不断变化的气候条件和日益复杂的多主体用水需求使得水资源在时空分配格局上发生了动态变化。2023 年联合国教科文组织发布的《国际水文计划战略计划: 在不断变化的环境中建立水安全世界

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U21A2002); 国家重点研发计划重点专项 (2022YFC3202300)

作者简介: 韩琦 (2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: hanqi0901@163.com

通信作者: 付湘 (1971—), 女, 教授, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: xfu@whu.edu.cn

的科学(第九阶段 2022—2029)》中提出,“对气候情景、水文预测和水资源使用方面的不确定性进行研究,以制定适应性水管理战略”。因此,研究变化环境下不确定的水资源配置是面向国际科学前沿和地方经济建设需求的重要发展方向,在创新水资源综合管理方法和应用等方面具有重大理论和实践意义。

随着水资源配置理论的发展,水资源配置不再是单一水源单一用户的简单分配问题,而是由多种水源、多种用户、多级工程组成的复杂水量调配问题^[2]。水资源空间不均衡问题成为制约区域发展的重要因素^[3],因此,需要从水资源配置系统整体出发,解决水量分配的空间均衡问题^[4]。水资源多目标优化配置常使用的方法为多目标优化方法^[5-6]。但由于多目标优化方法强调最优化整体利益而忽视了个体利益,会出现整体效率与个体公平困境^[7]。水资源配置的多目标博弈论方法能够突破多目标优化决策的效率和公平困境,得到多个主体利益冲突的均衡解决方案^[8]。水资源配置系统受自然条件与人类活动等多方面不确定性因素影响^[9],可能会使决策者做出次优决策^[10],考虑不确定性的稳健优化方法为此提供了一个有效的解决途径^[11]。稳健优化常用于处理不确定集合内所有不确定参数的优化问题,该方法能够充分考虑系统中的不确定性,并以集合的形式对变量进行描述,包括区间不确定集、椭球不确定集等。稳健优化的约束条件严格成立,即只要不确定参数属于不确定集,其解都能满足约束条件。稳健优化不需要场景、概率密度函数或隶属度函数来描述不确定性^[12],其目标在于实现不确定参数最劣情况下的最优决策,即所谓的最大最小决策问题^[13-14]。一些学者围绕稳健优化的不确定集合、求解算法等进行了研究,如 Nasiri-Gheidari 等^[8]针对伊朗的跨流域水资源配置问题,将不确定参数描述为区间不确定集,并构建了多目标稳健博弈模型;Shuai 等^[15]以沱江流域为例,通过椭球不确定集建立水资源配置稳健模型;Fu 等^[16]针对黑龙江佳木斯灌溉用水优化配置问题,引入区间数与随机变量建立了农业多水源分配稳健模型;姚黎明等^[17]以黑河流域为例,考虑供给与需求的不确定性,建立了水资源分配的稳健优化模型,用以解决干旱地区的水资源配置问题。

目前稳健优化方法在水资源配置中的运用研究较少,且侧重于通过多目标模型达到整体最优,忽略了各主体利益优化。而在各主体之间难以达成有约束力合作协议的情况下,通过各主体平等协商的方式实现各自目标是应对不确定性条件下多主体利益冲突的可行途径。本文针对汉江中下游供需不确定

性条件下生活、工业、农业用水部门的水资源配置问题,提出基于水资源配置空间均衡准则的稳健博弈模型,并对比分析南水北调中线工程调水前后各用水部门的水量分配满意度变化,为应对不确定性条件下的水资源优化配置研究提供新的思路和方法。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

汉江中下游是湖北省经济社会发展的核心区,自 2014 年底南水北调中线一期工程建成通水以来,汉江中下游河道内外用水矛盾日渐凸显^[18]。丹江口水库是南水北调中线工程的水源地,黄家港水文站地处丹江口水库下游,受调水影响程度最大。丹江口水库蓄水期(1968—2013 年)和中线工程运行后(2014—2022 年),黄家港水文站多年平均径流量分别为 342.7 亿、270.98 亿 m^3 ,来水量总体呈下降趋势,中线工程运行后径流量较 1968—2013 年降低幅度为 26.5%^[19]。2021 年鄂北水资源配置工程以丹江口水库为水源,平均年调水 7.7 亿 m^3 。引江济汉工程作为兴隆以下河段的补充水源,至 2023 年 4 月,累计输水 300 亿 m^3 ,平均年调入水量 27.5 亿 m^3 。综上,汉江中下游流域引调水量总体上呈输出态势。2000 年以来,汉江中下游河道内、外用水量大幅增加,导致水资源供需矛盾突出^[20]。本文选取汉江中下游 10 个城市作为研究区,分别为南阳、武汉、十堰、襄阳、荆门、孝感、仙桃、天门、潜江和神农架林区。研究区概况如图 1 所示。

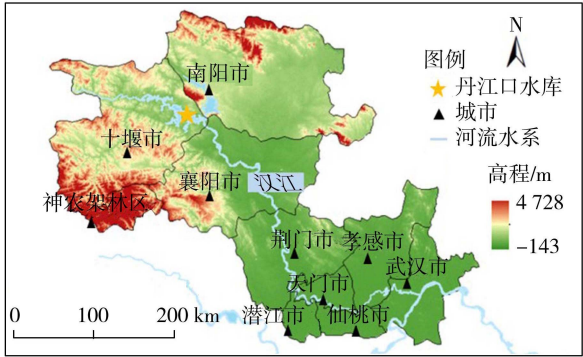


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

1.2 数据来源

稳健博弈模型求解的需水量数据由 2013—2022 年《湖北省水资源公报》《南阳市水资源公报》用水量数据收集整理得到,其中生活、工业、农业用水部门需水量占比分别为 21.56%、29.23%、49.21%。根据马斯洛需求层次理论,结合王煜等^[2,20]的研究结果,将研究区各城市不同用水部门需水量进行需水分层预测,进一步划分为刚性需水

数据及弹性需水数据。Huang 等^[21]研究表明,维持生态完整性的流量占当地径流量的 25%~46%,该比例在世界各地之间没有明显差异。本文可供水量数据基于该研究结果,并假设河流年径流量的 40% 用于维持生态环境完整性。根据《中国河流泥沙公报》1990—2014 年黄家港水文站年径流量数据,绘制 P-Ⅲ型分布的频率曲线,得到黄家港站枯水年年径流量,选取该值的 60%作为中线工程调水前汉江中下游可供水量,进一步整理得到研究区调水前可供水量。中线工程调水后的可供水量依据调水后年径流量降低 26.5%^[19]计算得到。

2 水资源配置的稳健博弈模型

2.1 确定性博弈模型

水资源配置过程中各用水部门存在矛盾冲突,本文基于水资源配置空间均衡准则,假定生活、工业、农业用水部门在满足刚性需水后,各用水部门在弹性需水方面为处于平等地位的博弈主体,用剩余可供水量对 3 个用水部门进行水量均衡分配。本文构建了 3 个用水部门以水量分配满意度最大为目标函数的确定性博弈模型:

$$\begin{aligned} \max f_1(x) &= \sum_{j=1}^n x_{1j} / \sum_{j=1}^n D_{1j} \\ f_2(x) &\geq F_2 \\ f_3(x) &\geq F_3 \\ \text{s. t.} \quad &\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^n x_{ij} \leq W \\ &\alpha_1 D_{1j} \leq x_{1j} \leq D_{1j} \\ &x_{1j} \geq 0, \quad D_{1j} \geq 0, \quad W \geq 0 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \max f_2(x) &= \sum_{j=1}^n x_{2j} / \sum_{j=1}^n D_{2j} \\ f_1(x) &\geq F_1 \\ f_3(x) &\geq F_3 \\ \text{s. t.} \quad &\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^n x_{ij} \leq W \\ &\alpha_2 D_{2j} \leq x_{2j} \leq D_{2j} \\ &x_{2j} \geq 0, \quad D_{2j} \geq 0, \quad W \geq 0 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \max f_3(x) &= \sum_{j=1}^n x_{3j} / \sum_{j=1}^n D_{3j} \\ f_1(x) &\geq F_1 \\ f_2(x) &\geq F_2 \\ \text{s. t.} \quad &\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^n x_{ij} \leq W \\ &\alpha_3 D_{3j} \leq x_{3j} \leq D_{3j} \\ &x_{3j} \geq 0, \quad D_{3j} \geq 0, \quad W \geq 0 \end{aligned} \tag{3}$$

式中: $f_1(x)$ $f_2(x)$ $f_3(x)$ 分别为生活、工业和农业用水部门的水量分配满意度; x_{ij} 为决策变量,表示城市 j 用水部门 i 所分配水量; D_{ij} 为城市 j 用水部门 i 的需水量; α_i 为用水部门 i 的刚性需水系数; W 为研究区可供水量; F_1 、 F_2 、 F_3 分别为生活、工业和农业用水部门水量分配满意度目标值; n 为城市数量。

2.2 稳健博弈模型

受气候变化、经济发展和城镇化进程加快等影响,水资源优化配置中的可供水量与需水量参数具有不确定性。假定需水量和可供水量为有界且对称分布的随机变量,并构建区间不确定集合来刻画不确定参数的波动集合,需水量与可供水量的区间不确定集合表示如下:

$$\begin{aligned} D'_{ij} &\in [D_{0ij} - \varepsilon_D D_{0ij}, D_{0ij} + \varepsilon_D D_{0ij}] \\ \eta_{D_{ij}} &= (D'_{ij} - D_{0ij}) / (\varepsilon_D D_{0ij}) \\ -1 &\leq \eta_{D_{ij}} \leq 1 \\ \sum_{i=1}^3 \sum_j^n \eta_{D_{ij}} &\leq \Gamma_D \\ W' &\in [W_0 - \varepsilon_W W_0, W_0 + \varepsilon_W W_0] \\ \eta_W &= (W' - W_0) / (\varepsilon_W W_0) \\ -1 &\leq \eta_W \leq 1 \\ \eta_W &\leq \Gamma_W \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} W' &\in [W_0 - \varepsilon_W W_0, W_0 + \varepsilon_W W_0] \\ \eta_W &= (W' - W_0) / (\varepsilon_W W_0) \\ -1 &\leq \eta_W \leq 1 \\ \eta_W &\leq \Gamma_W \end{aligned} \tag{5}$$

式中: D'_{ij} 为城市 j 用水部门 i 的随机需水量; W' 为研究区的随机可供水量; D_{0ij} 、 W_0 分别为需水量基值和可供水量基值; ε_D 、 ε_W 分别为需水量和可供水量的不确定性水平,用来量化随机需水量和随机供水量的波动程度; $\eta_{D_{ij}}$ 、 η_W 分别为随机需水量和随机可供水量波动的标度偏差,表示随机参数偏离需水量基值和可供水量基值的程度; Γ_D 、 Γ_W 分别为需水量和可供水量的不确定预算,表示允许随机参数波动的阈值。

考虑需水量与可供水量区间不确定集合的模型为稳健博弈模型。由于不确定参数偏离预测基值的程度具有独立性,且单一不确定参数达到区间边界的可能性较低,故所有不确定参数同时达到区间边界的可能性极小。因此,在不确定集合中引入不确定预算 Γ 对预测总体偏差量进行限制^[22]。参数 Γ 能够控制不确定性的严重程度,反映决策者的风险偏好。当 $\Gamma=0$ 时,模型不考虑预测误差退化,为确定性博弈模型;随着 Γ 增大,决策者面临的不确定性增加,决策者对不确定性的变化范围持更加谨慎的态度,也将付出更多的成本以应对可能出现的风险。

为研究稳健性对模型的影响,对模型不确定性水平 ε 与违反约束概率 p 两个稳健参数进行优化。

模型的目的是确保随机变量在不确定预算 Γ 允许范围内改变,不确定预算 Γ 越大,不确定参数的违反约束概率 p 越小。当违反约束概率 p 为 0.01、0.1、0.3、0.5、0.7、0.9、1 时,对应的不确定预算 Γ 分别为 2、2、1.82、1.11、0.4、0、0。违反概率约束 p 从 0.01 增加到 1,代表决策者对于风险的态度由最保守变化至最激进。当 $p=0.01$ 时,不确定参数在区间不确定集的任意取值均能满足模型的约束条件,结果具有高稳健性但较为保守;当 $p=1$ 时,模型完全允许不确定参数违反对应的不确定约束条件,转化为稳健性低的确性博弈模型。

2.3 模型求解

利用纳什博弈方法^[23]对确定性博弈模型进行求解。由 $f_1(x)$ 、 $f_2(x)$ 、 $f_3(x)$ 最大值与最小值组成的博弈区间被划分为相等的部分,以确定让步值。让步值测算表达式^[18]为

$$\begin{cases} u_1 = [\max f_1(x) - \min f_1(x)] / \lambda \\ u_2 = [\max f_2(x) - \min f_2(x)] / \lambda \\ u_3 = [\max f_3(x) - \min f_3(x)] / \lambda \end{cases} \quad (6)$$

式中: u_1 、 u_2 、 u_3 分别为生活、工业和农业用水部门目标值的让步值; λ 为合理让步系数,用以保证每轮协商过程中各参与方的目标值不会迅速下降。

纳什博弈方法假定 3 个用水部门为具有平等地位的博弈决策主体,通过博弈协商过程突破公平困境获得 3 个利益主体满意度最大化的多目标均衡解,以此反映水资源公平分配的动态交互过程^[5]。当 $f_1^*(x) \geq F_1$ 、 $f_2^*(x) \geq F_2$ 、 $f_3^*(x) \geq F_3$ 时,博弈结束,其中 $f_1^*(x)$ 、 $f_2^*(x)$ 、 $f_3^*(x)$ 分别为各主体水量分配满意度目标值的最优解。

基于区间不确定集的稳健博弈模型存在半无限优化问题,无法直接求解。本文引入不确定参数,利

用稳健对等转化法构建原模型的稳健对等形式。针对目标函数中的不确定参数,即需水量,得到目标函数的稳健对等形式:

$$\begin{cases} \max f_i(x) \\ \sum_{j=1}^n x_{ij} / \sum_{j=1}^n D_{ij} + \max \left(\sum_{j=1}^n x_{ij} / \sum_{j=1}^n \eta_{D_{ij}} \varepsilon_D D_{ij} \right) \geq f_i(x) \end{cases} \quad (7)$$

针对约束条件中两个不确定参数,即需水量与可供水量,得到约束条件的稳健对等形式:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^n x_{ij} + \max(\eta_w \varepsilon_w W_0) \leq W_0 \\ \alpha_i [D_{0j} + \max(\eta_{D_{ij}} \varepsilon_D D_{0j})] \leq x_{ij} \leq D_{0j} + \max(\eta_{D_{ij}} \varepsilon_D D_{0j}) \end{cases} \quad (8)$$

基于对偶理论求解上述非线性目标,通过引入对偶参数,得到水资源配置的稳健博弈对偶形式约束条件,如表 1 所示,进一步利用纳什博弈方法进行求解,得到水资源配置的稳健均衡解。

3 结果与分析

3.1 调水后稳健博弈模型结果分析

为比较纳什博弈方法与多目标优化方法在水资源配置中的结果,构建了以生活、工业、农业用水部门水量分配满意度最大为目标函数的多目标优化模型,并通过遗传算法 NSGA-III 进行求解,得到多目标非劣解。图 2 为中线工程调水后水资源配置的稳健博弈模型、确定性博弈模型和多目标优化模型计算结果。

多目标非劣解通过牺牲其他用户利益来提高目标用户的水量分配满意度。虽然该方法能够提供许多不同的多目标非劣解,但被选中的解是非劣解中集中权威决策者的偏好解。如生活用水部门最优解是

表 1 水资源配置的稳健博弈对偶形式的约束条件

Table 1 Constraints of robust game duality form for water resources allocation

生活用水部门约束条件	工业用水部门约束条件	农业用水部门约束条件
$\begin{cases} \sum_{j=1}^n x_{1j} / \sum_{j=1}^n D_{1j} + z_{11} \Gamma_{11} + \sum_{j=1}^n p_{11j} \geq f_1(x) \\ z_{11} + p_{11j} \geq \varepsilon_D (x_{1j} / D_{1j}) \\ \begin{cases} x_{1j} + z_{12} \Gamma_{12} + p_{12j} \leq D_{1j} \\ z_{12} + p_{12j} \geq \varepsilon_D D_{1j} \end{cases} \\ \begin{cases} \alpha_1 D_{1j} + z_{13} \Gamma_{13} + p_{13j} \leq x_{1j} \\ z_{13} + p_{13j} \geq \varepsilon_D \alpha_1 D_{1j} \end{cases} \\ \begin{cases} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^n x_{ij} + z_{14} \Gamma_{14} + p'_1 \leq W \\ z_{14} + p'_1 \geq \varepsilon_w W \\ f_2(x) \geq F_2 \\ f_2(x) \geq F_2 \end{cases} \end{cases}$	$\begin{cases} \sum_{j=1}^n x_{2j} / \sum_{j=1}^n D_{2j} + z_{21} \Gamma_{21} + \sum_{j=1}^n p_{21j} \geq f_2(x) \\ z_{21} + p_{21j} \geq \varepsilon_D (x_{2j} / D_{2j}) \\ \begin{cases} x_{2j} + z_{22} \Gamma_{22} + p_{22j} \leq D_{2j} \\ z_{22} + p_{22j} \geq \varepsilon_D D_{2j} \end{cases} \\ \begin{cases} \alpha_2 D_{2j} + z_{23} \Gamma_{23} + p_{23j} \leq x_{2j} \\ z_{23} + p_{23j} \geq \varepsilon_D \alpha_2 D_{2j} \end{cases} \\ \begin{cases} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^n x_{ij} + z_{24} \Gamma_{24} + p'_2 \leq W \\ z_{24} + p'_2 \geq \varepsilon_w W \\ f_1(x) \geq F_1 \\ f_3(x) \geq F_3 \end{cases} \end{cases}$	$\begin{cases} \sum_{j=1}^n x_{3j} / \sum_{j=1}^n D_{3j} + z_{31} \Gamma_{31} + \sum_{j=1}^n p_{31j} \geq f_3(x) \\ z_{31} + p_{31j} \geq \varepsilon_D (x_{3j} / D_{3j}) \\ \begin{cases} x_{3j} + z_{32} \Gamma_{32} + p_{32j} \leq D_{3j} \\ z_{32} + p_{32j} \geq \varepsilon_D D_{3j} \end{cases} \\ \begin{cases} \alpha_3 D_{3j} + z_{33} \Gamma_{33} + p_{33j} \leq x_{3j} \\ z_{33} + p_{33j} \geq \varepsilon_D \alpha_3 D_{3j} \end{cases} \\ \begin{cases} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^n x_{ij} + z_{34} \Gamma_{34} + p'_3 \leq W \\ z_{34} + p'_3 \geq \varepsilon_w W \\ f_1(x) \geq F_1 \\ f_3(x) \geq F_3 \end{cases} \end{cases}$

注: $z_{ik}(i=1,2,3;k=1,2,3,4)$ 、 $p_{ijk}(i=1,2,3;k=1,2,3)$ 、 $p'_i(i=1,2,3)$ 为对偶变换引入的辅助参数; $\Gamma_{ik}(i=1,2,3;k=1,2,3,4)$ 为允许不确定变量波动范围的不确定预算值。

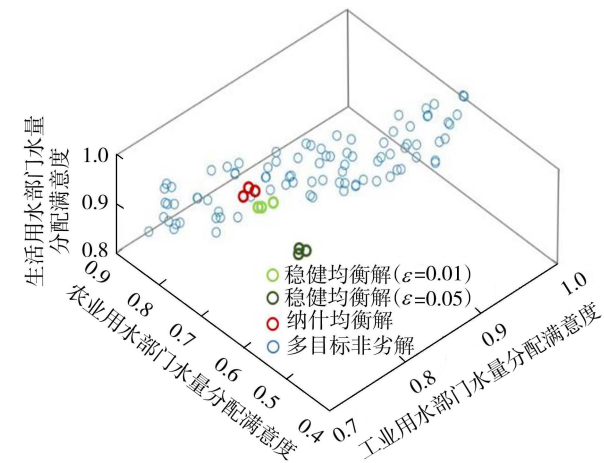


图2 稳健博弈模型、确定性博弈模型、多目标优化模型计算结果

Fig.2 Results of robust game model, deterministic game model, multi-objective optimization model

通过降低农业用水部门水量分配满意度所得。求解确定性博弈模型得到的生活、工业、农业用水部门满意度纳什均衡解分别为 0.8794~0.8966、0.8190~0.8309、0.7732~0.7832。纳什均衡解通过对各主体进行协商博弈,最终达到3个用水部门均可接受的决策方案,其满意度范围更为均衡。相比而言,纳什均衡解极大地缩小了多目标非劣解的策略空间,能够帮助决策者在相对窄的选择范围内更好地进行决策,突破了多目标优化方法的公平困境。

受气候变化、经济发展以及城镇化进程加快等影响,可供水量与需水量具有不确定性。假定模型违反约束概率 $p = 0.5$,在两种不确定性水平 ($\varepsilon = 0.01$ 、 $\varepsilon = 0.05$) 情况下求解稳健博弈模型,并将稳健均衡解与纳什均衡解进行比较。不确定性水平代表未来不确定参数偏离假设不确定参数的程度,不确定性水平越高,表示偏离假设条件的程度越高。如图2所示, $\varepsilon = 0.01$ 时,生活、工业、农业用水部门水量分配满意度稳健均衡解分别下降为 0.8677~0.8849、0.7965~0.8118、0.7396~0.7468; $\varepsilon = 0.05$ 时,分别下降为 0.8540~0.8676、0.7806~0.7959、0.6235~0.6289。与纳什均衡解相比, $\varepsilon = 0.01$ 时,生活、工业、农业用水部门满意度分别下降了 1.2%、2.2%、4.0%; $\varepsilon = 0.05$ 时,分别下降 2.5%、4.0%、13.4%。水量分配满意度下降幅度即为各部门缺水增大程度。上述结果表明,随着不确定性水平的增加,各部门均呈现出更严重的缺水状态,且农业用水部门缺水最为明显。将需水量与可供水量的不确定性纳入确定性模型后,形成的稳健博弈模型使各用水部门的水量分配满意度均有不同程度的下降,并通过降低农业用水部门的目标值提高了模型的可靠性,且不确定性水平越高,满意度下降程度越

大,但得到了能够抵御更大风险的解决方案。即在不确定性水平较高的情况下,得到的解决方案更加稳健,能够应对更大的风险。水量分配方案的决策者可以通过提高不确定性水平来提升方案抵御风险的能力。

3.2 调水前后确定性博弈模型结果分析

南水北调中线工程运行后,由于供水量减少,3个用水部门整体水量分配满意度由 92.6% 下降到 83.2%,下降幅度为 9.4%。生活、工业、农业用水部门水量分配满意度分别由 0.9350~0.9381、0.9210~0.9272、0.9038~0.9121 降低为 0.8794~0.8966、0.8109~0.8309、0.7732~0.7832。其中需水量占比最大的农业用水部门满意度受调水影响最大,下降幅度为 12.9%,工业、生活用水部门下降幅度分别约为 10.4%、4.9%。表明在总分配水量减少后,为再次达到均衡配水方案,需水量最大的农业部门做出的让步更大,导致其目标值变化幅度最大。

3.3 敏感性分析

水资源配置稳健博弈模型中各主体水量分配满意度目标值对稳健参数,即不确定性水平与违反约束概率的敏感性分析结果如图3所示。在给定的两种不确定性水平 ($\varepsilon = 0.01$ 、 $\varepsilon = 0.05$) 情况下,采用不

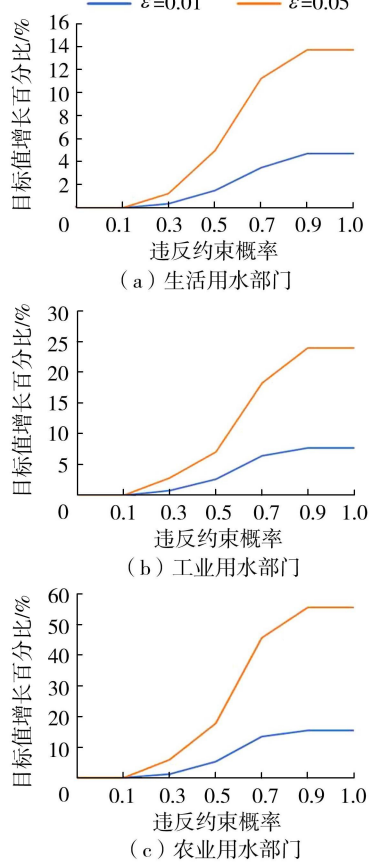


图3 水资源配置稳健博弈模型敏感性分析结果

Fig.3 Sensitivity analysis results of robust game model for water resources allocation

同约束违反概率对敏感性进行分析。

由图 3 可知,水量分配满意度目标值变化取决于违反约束概率与不确定性水平。不确定性水平越高,目标值变化越大。在同一不确定性水平下,约束违反概率越小,模型保守程度越好,能够抵御风险的能力越强;随着约束违反概率的增大,模型抵御风险的能力减弱,总分配水量增加,各用水部门需水量减少,水量分配满意度目标值上升。

水量分配满意度目标值在 $p=0.5$ 时存在拐点。 $p<0.5$ 时,不确定参数受稳健参数变化的影响小,水量分配满意度目标值上升缓慢; $p>0.5$ 时,总分配水量明显增加,各部门对水量需求减少的同时获得的分配水量增加,进而,各用水部门水量分配满意度目标值发生明显变化。 $p=1$ 时,稳健博弈模型变为确定性模型,水量分配满意度目标值最高,却无法抵御任何风险。由图 3 分析可知,需水量最大的农业用水部门,其水量分配满意度目标值对稳健参数的变化最敏感;需水量最小的生活用水部门,其水量分配满意度目标值对稳健参数的变化最不敏感。原因是在违反约束概率较小的保守情况下,总分配水量少,各部门水量需求大,刚性需水量占比最小的农业用水部门水量分配满意度目标值最低;随着违反约束概率增加,模型保守程度降低,各用水部门对需水量要求降低,总分配水量增加,需水量最大的农业部门也能获得更多水量分配,水量分配满意度目标值变化最大,即对稳健参数的变化更为敏感。

4 结 论

a. 基于水资源配置空间均衡准则,建立了主体平等协商的水资源配置稳健博弈模型,对比分析了两种不确定性水平下稳健博弈模型的稳健均衡解、确定性博弈模型的纳什均衡解以及多目标优化模型的非劣解。纳什均衡解极大地缩小了多目标非劣解的策略空间,能够帮助决策者提高决策效率。稳健均衡解劣于纳什均衡解,且随着不确定性水平增加,水量分配满意度下降程度也增加,说明稳健博弈模型为保障模型可靠性而损失目标值,以应对不确定性。

b. 分析南水北调中线工程调水前后各用水部门水量分配满意度变化。调水后用水部门整体水量分配满意度下降幅度为 9.4%,生活、工业、农业用水部门水量分配满意度下降幅度分别为 4.9%、10.4%、12.9%。表明总分配水量减少时,需水量占比最大的农业用水部门做出的让步最大。

c. 敏感性分析结果表明,生活、工业、农业用水部门的水量分配满意度目标值取决于不确定性水平

与约束违反概率的值。不确定性水平越高,目标值变化越大;随着约束违反概率增大,各部门水量分配满意度目标值均上升,且需水量占比最大的农业用水部门,其水量分配满意度目标值上升幅度最为显著,即农业用水部门水量分配满意度目标值对稳健参数的变化最为敏感。

参考文献:

[1] 张怡雅,袁飞,张利敏,等. 中线调水对汉江中下游区水文情势影响研究[J]. 水文, 2022, 42(3): 89-94. (ZHANG Yiya, YUAN Fei, ZHANG Limin, et al. Impacts of water diversion of middle-route project on hydrological regimes of middle and lower reaches of Hanjiang River [J]. Journal of China Hydrology, 2022, 42(3): 89-94. (in Chinese))

[2] 王煜,彭少明,周翔南,等. 基于增量动态均衡配置的黄河分水方案优化方法研究[J]. 水资源保护, 2022, 38(4): 48-55. (WANG Yu, PENG Shaoming, ZHOU Xiannan, et al. Water allocation scheme optimization in the Yellow River based on incremental dynamic equilibrium configuration[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 48-55. (in Chinese))

[3] 左其亭,韩春辉,马军霞,等. 水资源空间均衡理论方法及应用研究框架[J]. 人民黄河, 2019, 41(10): 113-118. (ZUO Qiting, HAN Chunhui, MA Junxia, et al. Theoretical method and applied research framework of water resources spatial equilibrium[J]. Yellow River, 2019, 41(10): 113-118. (in Chinese))

[4] 李家乐,林鹏飞,李彦彬,等. 基于水资源配置的空间均衡度评价方法[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(2): 215-227. (LI Jiale, LIN Pengfei, LI Yanbin, et al. Evaluation method for spatial balance based on water resource allocation[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(2): 215-227. (in Chinese))

[5] 罗利民,谢能刚,仲跃,等. 区域水资源合理配置的多目标博弈决策研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2007, 35(1): 72-76. (LUO Limin, XIE Nenggang, ZHONG Yue, et al. Multi-objective game decision-making for rational allocation of regional water resources[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2007, 35(1): 72-76. (in Chinese))

[6] 陶洁,王沛霖,王辉,等. 基于 A-NSGA-III 的引江济淮工程河南段水资源优化配置研究[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(6): 111-119. (TAO Jie, WANG Peilin, WANG Hui, et al. Research on water resources optimal allocation in Henan Section of Yangtze River to Huaihe River Water Diversion Project based on A-NSGA-III algorithm[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(6): 111-119. (in Chinese))

- [7] 付湘,谈广鸣,黄莎,等. 水资源利用与排污控制的非合作博弈方法[J]. 水利学报,2022,53(1): 78-85. (FU Xiang, TAN Guangming, HUANG Sha, et al. Non-cooperative game theory method for water resources utilization and pollution control[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2022,53(1): 78-85. (in Chinese))
- [8] NASIRI-GHEIDARI O, MAROFI S, ADABI F. A robust multi-objective bargaining methodology for inter-basin water resource allocation;a case study[J]. Environmental Science and Pollution Research,2018,25(3): 2726-2737.
- [9] 涂燕,石宏伟,秦晋栋,等. 混合不确定环境下双层多目标区域水资源优化配置研究[J]. 系统工程理论与实践,2023, 43(8): 2428-2446. (TU Yan, SHI Hongwei, QIN Jindong, et al. Bi-level multi-objective regional water resources optimal allocation under hybrid uncertainty[J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2023, 43(8): 2428-2446. (in Chinese))
- [10] REN Kang, HUANG Shengzhi, HUANG Qiang, et al. Defining the robust operating rule for multi-purpose water reservoirs under deep uncertainties [J]. Journal of Hydrology,2019,578: 124134.
- [11] SAADATPOUR M, AFSHAR A, KHOSHKAM H, et al. Equilibrium strategy based waste load allocation using simulated annealing optimization algorithm [J]. Environmental Monitoring and Assessment,2020,192(9): 612.
- [12] BEN-TAL A, SHAMAILOV S S, PATONJ F R. Evaluating the physiological significance of respiratory sinus arrhythmia;looking beyond ventilation-perfusion efficiency [J]. The Journal of Physiology, 2012, 590(8): 1989-2008.
- [13] 付银环,郭萍,方世奇,等. 基于两阶段随机规划方法的灌区水资源优化配置[J]. 农业工程学报,2014, 30(5): 73-81. (FU Yinhan, GUO Ping, FANG Shiqi, et al. Optimal water resources planning based on interval-parameter two-stage stochastic programming [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2014,30(5): 73-81. (in Chinese))
- [14] 王煜,周翔南,彭少明,等. 基于黄河流域水资源均衡调配的南水北调西线一期工程水量配置[J]. 水科学进展, 2023, 34(3): 336-348. (WANG Yu, ZHOU Xiangnan, PENG Shaoming, et al. Water allocation of the first phase of South-to-North Water Diversion Western Route Project based on balanced provisioning of water resources in the Yellow River Basin[J]. Advances in Water Science,2023,34(3): 336-348. (in Chinese))
- [15] SHUAI Yuhong, HE Xiaoping, YAO Liming. Robust optimization with equity and efficiency framework for basin-wide water resources planning [J]. Journal of Environmental Management,2022,321: 115834.
- [16] FU Qiang LI Tianxiao, CUI Song, et al. Agricultural multi-water source allocation model based on interval two-stage stochastic robust programming under uncertainty [J]. Water Resources Management,2018,32(4): 1261-1274.
- [17] 姚黎明,徐忠雯,卢浩钧,等. 基于二层鲁棒优化的流域水资源全局均衡配置:以黑河为例[J]. 中国管理科学, 2024, 32(8): 285-296. (YAO Liming, XU Zhongwen, LU Haojun, et al. Water allocation problem with bi-level robust nonconvex programming model: a case in Heihe River Basin[J]. Chinese Journal of Management Science, 2024, 32(8): 285-296. (in Chinese))
- [18] 陈峰,王文静,何涛,等. 汉江中下游水华发展新形势及治理对策分析[J]. 人民长江, 2023, 54(10): 7-17. (CHEN Feng, WANG Wenjing, HE Tao, et al. Analysis on status and countermeasures for bloom growth in middle and lower Hanjiang River [J]. Yangtze River, 2023, 54(10): 7-17. (in Chinese))
- [19] 曾凌,陈金凤,刘秀林. 南水北调中线工程运行以来汉江中下游水文情势演变分析[J]. 水文,2022, 42(6): 13-18. (ZENG Ling, CHEN Jinfeng, LIU Xiulin. Analysis on the evolution of hydrological situation in the Hanjiang Mid-Lower Reaches River since the application of the middle-route South-to-North Water Diversion Project[J]. Journal of China Hydrology, 2022, 42(6): 13-18. (in Chinese))
- [20] 赵勇,王丽珍,王浩,等. 城镇居民生活刚性、弹性、奢侈用水层次评价方法与应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(6): 1316-1325. (ZHAO Yong, WANG Lizhen, WANG Hao, et al. Evaluation method and application of urban residential water use on the level of rigidity, flexibility and luxury[J]. Journal of Basic Science and Engineering,2020,28(6): 1316-1325. (in Chinese))
- [21] HUANG Zhongwei, LIU Xingcai, SUN Siao, et al. Global assessment of future sectoral water scarcity under adaptive inner-basin water allocation measures[J]. Science of the total Environment,2021,783: 146973.
- [22] BERTSIMAS D, SIM M. The price of robustness [J]. Operations Research,2004,52(1): 35-53.
- [23] YU Yang, ZHAO Rui, ZHANG Jiahe, et al. Multi-objective game theory optimization for balancing economic, social and ecological benefits in the Three Gorges Reservoir operation[J]. Environmental Research Letters, 2021, 16(8): 085007.

(收稿日期:2024 - 05 - 30 编辑:施业)