doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.029

基于区间两阶段鲁棒优化模型的灌区水资源优化配置

陈红光[1]　王琼雅[2]　李晓宁[2]　王中君[2]　李晨阳[1]

(1.东北农业大学水利与建筑学院,哈尔滨 150030;2.东北农业大学工程学院,哈尔滨 150030)

摘要:为避免由灌区水资源配置系统存在的诸多不确定因素导致的配水过程风险性,在区间两阶段随机规划方法的基础上加入了鲁棒优化方法,构建区间两阶段鲁棒优化模型,引入鲁棒系数表示系统风险,将系统风险体现在模型中,克服了系统风险不可控的不足。以三江平原牡丹江灌区为例,对灌区水资源进行优化配置,得到灌区多水源、多作物、不同鲁棒系数下的配水目标。结果表明:随着鲁棒系数增大,导致缺水量增加,系统稳定性增强,但成本也随之增加,系统经济性降低;当鲁棒系数为 3 时,缺水量不再增加,系统达到稳定的状态,此时系统的成本在[$1.903\,27\times10^9$,$2.634\,75\times10^9$]元之间变化。优化结果可为决策者提供决策空间,为农业水资源的合理配置提供技术支持。

关键词:水资源;不确定性;区间两阶段随机规划;鲁棒优化;配置

中图分类号:TV21　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2019)03-0271-10

Optimal Water Resources Planning Based on Interval-parameter Two-stage Robust Stochastic Programming Model

CHEN Hongguang[1]　WANG Qiongya[2]　LI Xiaoning[2]　WANG Zhongjun[2]　LI Chenyang[1]

(1. *School of Water Conservancy and Civil Engineering*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*
2. *College of Engineering*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*)

Abstract: The interval-parameter two-stage robust stochastic programming model (ITRM) was put forward for supporting optimization and management of water resources in Mudanjiang Irrigation District, Sanjiang Plain, which was in such a situation, with multi-water source, multi-crop and multi-robustness coefficient. The ITRM incorporated interval-parameter programming (IPP) and two-stage stochastic programming (TSP) with a robust optimization framework to deal with uncertainties. Compared with the traditional TSP, ITRM can overcome the deficiency of uncontrollable risk in system. The robustness coefficient was introduced to represent the system risk, which was effectively reflected in the model. Let the robust coefficient be 0, 0.4, 1, 2,3 and 5, respectively. With the increase of robust coefficient, the feasibility of the model and the stability of the system were enhanced. It was a sufficient and effective balance between system cost and risk when the robustness coefficient was 3. A more stable allocation of water resources was generated and the system cost was between $1.903\,27\times10^9$ RMB and $2.634\,75\times10^9$ RMB. Based on this model, a series of scenarios under different levels of pre-allocation water was done and different degrees of water surplus and shortage were obtained correspondingly. All these results were valuable for water-saving irrigation agriculture and improving water use efficiency and economic value, and thus it provided a technical support for decision maker in reasonable allocation of agricultural water resources.

Key words: water resource; uncertainty; interval-parameter two-stage stochastic programming; robust optimization; allocation

0　引言

随着社会经济和人口的快速增长,水资源短缺问题日益突出。随着粮食需求不断增加,农业作为用水大户,水资源供需问题不断加重[1-2]。合理配置农业用水、提高农业用水效率对缓解水资源供需

收稿日期:2018-10-15　修回日期:2018-11-13

基金项目:黑龙江省自然科学基金项目(LC2015015)和哈尔滨市应用技术研究与开发(青年后备人才)项目(2014RFQXJ122)

作者简介:陈红光(1976—),女,副教授,博士,主要从事水资源优化利用与系统分析研究,E-mail:chg218@126.com

通信作者:李晨阳(1978—),女,副教授,博士,主要从事管理科学与工程、环境工程研究,E-mail:cli703@yahoo.com.cn

矛盾和用水压力具有十分重要的意义[3-5]。灌区作为农业用水主体,其水资源的合理优化配置对提高水资源利用率、促进农业水资源的可持续开发利用、权衡灌区水资源经济和风险之间的关系具有重要作用。

近年来,水资源优化配置得到了广泛发展,出现了多种优化配置方法。娄帅等[6]基于免疫遗传算法构建多阶段群决策优化模型,解决漳河流域水资源优化配置问题。孙冬营等[7]运用模糊联盟合作博弈方法将水资源进行两次分配,得到流域水资源的合理配置方案。陈述等[8]将粒子群人工蜂群算法运用到灌区渠-塘-田的水资源优化配置中。上述研究基于确定的水资源系统进行配置,但在实际中,灌区灌溉系统受到气象条件、作物需水量以及政策变化等因素影响,是一个复杂的动态配水系统[9]。传统方法在处理系统中的不确定因素时,存在一定的局限性。因此,为了解决这些包含不确定因素的问题,提出了不确定优化方法,其中两阶段随机规划模型得到了广泛应用[10]。HUANG 等[11]将不确定性优化和两阶段随机规划方法应用到水资源系统管理中;LI 等[12]将区间两阶段机会约束模型运用到水资源规划中;ZHANG 等[13-14]运用改进后的区间两阶段随机规划算法,对三江平原水资源进行优化配置。区间两阶段优化算法在大量学者[15-17]的努力下,逐渐得到完善,用以处理水资源配置过程中的不确定性问题。区间两阶段随机效用模型处理不确定因素十分有效,但却忽略了系统风险问题,模型结果不具有绝对可行性。而鲁棒优化方法则能够在规划过程中对风险进行有效规避,并权衡系统中可变随机值和追索成本的关系[18-20]。

本文针对灌区水资源配置模型中存在风险的特点,构建多水源、多作物配水模型,以两阶段线性规划为基础,建立区间两阶段鲁棒优化模型(Interval-parameter two-stage robust stochastic programming model,ITRM),采用概率密度函数、离散区间表示系统的不确定性,用鲁棒系数表示系统的风险。在不同来水情况下,对各个灌区的不同作物进行水资源的优化配置,以期为灌区管理者提供风险可控、成本最优的配水方案。

1 模型建立与求解

1.1 模型建立

灌区多水源优化配置是一个复杂的系统过程,供水情况受来水量等因素影响,存在一定的随机特点[21]。且多水源联合优化调度目的是使水资源得到合理的分配,满足灌区用水需求,同时尽量减少用水成本。因此,本文以灌区农作物需水量为决策变量,引入用水成本、缺水惩罚系数,并分两个阶段确定灌区水资源的最优配置。在保证灌区水资源承载力的前提下,以正常水平年作物需水量为依据,确定作物预先配水目标,并将其作为第 1 阶段的决策变量;由于受灌区初始储水量、天然来水量、水源蒸发量等因素的影响,供水量可能小于供水目标,这就需要决策者进行调整,减少灌区供水量或者外调水源进行补水,而减少供水量会影响作物产量,外调水源则会增加用水成本,都会产生经济惩罚,为降低用水成本,需要对第 1 阶段的配水量进行调整,将缺水量作为第 2 阶段的决策因素。故两阶段随机规划模型为

$$\min f = \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J} C_{ij}W_{ij} + E\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J} D_{ij}S_{ij} \quad (1)$$

式中 C_{ij}——水源 i 向作物 j 的输水成本,元/m^3

W_{ij}——水源 i 向作物 j 的预先目标配水量,m^3

E——随机变量的期望值

D_{ij}——水源 i 未满足作物 j 预先目标配水量时的缺水惩罚系数,元/m^3

S_{ij}——水源 i 未满足作物 j 预先目标配水量时的缺水量,m^3

i——水源,i 为 1、2 分别表示地表水和地下水

j——作物,j 为 1、2、3 分别表示水稻、玉米、大豆

f——系统总成本,元

由于 S_{ij} 受当年来水量的影响变化,且受来水量影响显著,为随机变量。因此将不同来水水平下的缺水量按照离散函数处理,并假设不同水平的来水量 q 的概率为 P_h,$0 < P_h < 1$,其中 $h = 1,2,3$,表示不同年份水源的来水量水平,$h = 1$ 表示预测年份来水量为最少,为低流量水平,缺水量最大;$h = 2$ 表示预测年份来水量较多,为中流量水平,缺水量较少;$h = 3$ 表示来水量最高,为高流量水平,缺水量最小;$\sum_{h=1}^{3} P_h = 1$。则两阶段随机规划模型可以表示为

$$\min f = \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J} C_{ij}W_{ij} + \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J} D_{ij}\sum_{h=1}^{3} P_h S_{ijh} \quad (2)$$

式中 S_{ijh}——来水量水平为 h 时,i 水源向 j 作物供水,未满足预先目标配水量的缺水量,m^3

已有的研究较少考虑系统风险问题,无法保证模型最优解的绝对可行性。鲁棒优化方法将风险体现在函数当中,对风险进行有效测评,并在规划过程中规避风险,平衡系统的成本和风险的关系,可以有效增加模型求解的可行性和系统的稳定性[22]。因此,本文在两阶段随机规划模型的基础上引入鲁棒优化方法,建立两阶段随机鲁棒优化模型。模型表述为

$$\min f=\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}C_{ij}W_{ij}+\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}D_{ij}\sum_{h=1}^{3}P_hS_{ijh}+\rho\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{h=1}^{3}P_h\left|D_{ij}S_{ijh}-P_h\sum_{h=1}^{3}D_{ij}S_{ijh}\right| \tag{3}$$

式中　ρ——鲁棒系数

其中，第 2 项 $\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}D_{ij}\sum_{h=1}^{3}P_hS_{ijh}$ 表示第 2 阶段的惩罚成本期望值，$\left|D_{ij}S_{ijh}-P_h\sum_{h=1}^{3}D_{ij}S_{ijh}\right|$ 表示不同情境下第 2 阶段的约束控制惩罚成本，表示第 2 阶段的惩罚成本具有可变性。ρ 体现决策者对系统经济性和稳健性的态度。当 $\rho=0$ 时，该模型为普通区间两阶段随机规划模型，此时目标函数只有第 1 阶段和第 2 阶段成本最小值，表示决策者更多考虑系统经济性而忽略系统风险；当 $\rho>0$ 时，表明决策者关注成本的风险性，开始考虑成本的可变性，在系统安全性的基础上追求系统的经济性。为了使式(3)中的 $\left|D_{ij}S_{ijh}-P_h\sum_{h=1}^{3}D_{ij}S_{ijh}\right|$ 线性化，YU 等[23]在模型中引入目标线性规划，则模型表述为

$$\min f=\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}C_{ij}W_{ij}+\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}D_{ij}\sum_{h=1}^{3}P_hS_{ijh}+\rho\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{h=1}^{3}P_h\left(D_{ij}S_{ijh}-P_h\sum_{h=1}^{3}D_{ij}S_{ijh}+\theta_{ih}\right) \tag{4}$$

式中　θ_{ih}——松弛变量

θ_{ih} 主要作用是保证模型的稳定性和非负性。作物预先目标配水量(需水量) W_{ij} 具有不确定性，且作物的价格和产量变动导致惩罚系数 D_{ij} 也不确定。为表示不确定性，引入区间参数来表示不确定性参数。“+”表示参数的上限，“-”表示参数的下限，建立区间两阶段鲁棒优化模型(ITRM)

$$\min f^{\pm}=\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}C_{ij}^{\pm}W_{ij}^{\pm}+\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}D_{ij}^{\pm}\sum_{h=1}^{3}P_hS_{ijh}^{\pm}+\rho\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{h=1}^{3}P_h\left(D_{ij}^{\pm}S_{ijh}^{\pm}-P_h\sum_{h=1}^{3}D_{ij}^{\pm}S_{ijh}^{\pm}+\theta_{ih}^{\pm}\right) \tag{5}$$

约束条件分别为

(1)需水量约束

$$W_{ij\max}\geqslant\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}W_{ij}^{\pm}\geqslant W_{ij\min}\quad(\forall i,j) \tag{6}$$

式中　$W_{ij\max}$——作物 j 正常生长的最大需水量

$W_{ij\min}$——作物 j 正常生长的最小需水量

(2)水源可用水量约束

地表水约束为

$$Q_{ij}^{\pm}+q_{ih}^{\pm}-Q_{si}^{\pm}-\sum_{j=1}^{J}(W_{ij}^{\pm}-S_{ijh}^{\pm})=Q_{im}^{\pm}\geqslant Q_{i\min}\quad(i=1,2,\cdots,n) \tag{7}$$

地下水约束为

$$Q_{ij}^{\pm}+q_{ih}^{\pm}-Q_{si}^{\pm}-\sum_{j=1}^{J}(W_{ij}^{\pm}-S_{ijh}^{\pm})=Q_{im}^{\pm}\geqslant Q_{i\min}\quad(i=n+1,n+2,\cdots,m) \tag{8}$$

式中　Q_{ij}——灌区初期水源 i 的储水量，m^3

Q_{im}——灌区末期水源 i 的蓄水量，m^3

q_{ih}——水源 i 的来水量，m^3

Q_{si}——灌区水源 i 的蒸发量，m^3

$Q_{i\min}$——水源 i 最低蓄水量，m^3

其中 q_{ih} 有明显的概率特征，故来水量为 q_{ih} 时的概率为 P_h。地下水蒸发损失量 $Q_{si}^{\pm}$ 取 0。

(3)追索变量约束

追索变量约束为

$$D_{ij}^{\pm}S_{ijh}^{\pm}-P_h\sum_{h=1}^{3}D_{ij}^{\pm}S_{ijh}^{\pm}+\theta_{ih}^{\pm}\geqslant 0\quad(\forall i,j,h) \tag{9}$$

(4)水源最大供水量约束

水源最大供水量约束为

$$\sum_{j=1}^{J}W_{ij}^{\pm}\leqslant W_{i\max}\quad(\forall i,j) \tag{10}$$

式中　$W_{i\max}$——水源 i 最大可供水量，m^3

(5)非负约束

非负约束为

$$W_{ij}^{\pm}\geqslant S_{ij}^{\pm}\geqslant 0\quad(\forall i,j) \tag{11}$$

1.2　模型求解

根据模型本身特点，$W_{ij}^{\pm}$ 具有不确定性，且以区间的方式表示参数，很难判断取何值时系统成本最小，因此引入决策变量 z_{ij}，$z_{ij}\in[0,1]$，令 $W_{ij}^{\pm}=W_{ij}^{-}+\Delta W_{ij}z_{ij}$。其中 $\Delta W_{ij}=W_{ij}^{+}-W_{ij}^{-}$ 是确定值，当 $z_{ij}=0$ 时，W_{ij} 取下限值，作物配水成本最小，但如果配水量小于作物需水量，会增加惩罚成本；当 $z_{ij}=1$ 时，W_{ij} 取上限值，作物惩罚成本减少，但为满足作物的需水量，会使配水成本增加。因此本文运用线性规划的方式求得决策变量最优值 z_{ijopt}，得到系统的最优配水量 $W_{ijopt}^{\pm}=W_{ij}^{-}+\Delta W_{ij}z_{ijopt}$，并运用 Matlab 软件求得 $f_{opt}^{\pm}$、$S_{ijopt}^{\pm}$，最终确定水资源优化配置方案。

将 ITRM 分为两个子模型进行求解，对应的目标函数下限子模型为

$$\min f^{-}=\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}C_{ij}^{-}(W_{ij}^{-}+\Delta Wz_{ij})+\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}D_{ij}^{-}\sum_{h=1}^{3}P_hS_{ijh}^{-}+\rho\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{h=1}^{3}P_h\left(D_{ij}^{-}S_{ijh}^{-}-P_h\sum_{h=1}^{3}D_{ij}^{-}S_{ijh}^{-}+\theta_{ih}^{-}\right) \tag{12}$$

约束条件为

$$\begin{cases} W_{ij\max} \geqslant \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}(W_{ij}^{-} + \Delta Wz_{ij}) \geqslant W_{ij\min} & (\forall i,j) \\ Q_{ij}^{+} + q_{ih}^{+} - Q_{si}^{-} - \sum_{j=1}^{J}(W_{ij}^{-} + \Delta Wz_{ij} - S_{ijh}^{-}) = Q_{im}^{-} \geqslant Q_{i\min} & (i = 1,2,\cdots,n) \\ Q_{ij}^{+} + q_{ih}^{+} - Q_{si}^{-} - \sum_{j=1}^{J}(W_{ij}^{-} + \Delta Wz_{ij} - S_{ijh}^{-}) = Q_{im}^{-} \geqslant Q_{i\min} & (i = n+1,n+2,\cdots,m) \\ D_{ij}^{-}S_{ijh}^{-} - P_h\sum_{h=1}^{3}D_{ij}^{-}S_{ijh}^{-} + \theta_{ih}^{-} \geqslant 0 & (\forall i,j,h) \\ \sum_{j=1}^{J}(W_{ij}^{-} + \Delta Wz_{ij}) \leqslant W_{i\max} & (\forall i,j) \\ W_{ij}^{-} + \Delta Wz_{ij} \geqslant S_{ij}^{-} \geqslant 0 & (\forall i,j) \end{cases} \tag{13}$$

其中,S_{ij}^{-}、z_{ij}是决策变量,S_{ijopt}^{-}、z_{ijopt}、f_{opt}^{-}为该模型的解。同理,得到目标函数上限子模型为

$$\min f^{+} = \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}C_{ij}^{+}(W_{ij}^{-} + \Delta Wz_{ij}) + \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}D_{ij}^{+}\sum_{h=1}^{3}P_hS_{ijh}^{+} + \rho\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{h=1}^{3}P_h\left(D_{ij}^{+}S_{ijh}^{+} - P_h\sum_{h=1}^{3}D_{ij}^{+}S_{ijh}^{+} + \theta_{ih}^{+}\right) \tag{14}$$

约束条件为

$$\begin{cases} W_{ij\max} \geqslant \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}(W_{ij}^{-} + \Delta Wz_{ij}) \geqslant W_{ij\min} & (\forall i,j) \\ Q_{ij}^{-} + q_{ih}^{-} - Q_{si}^{+} - \sum_{j=1}^{J}(W_{ij}^{-} + \Delta Wz_{ij} - S_{ijh}^{+}) = Q_{im}^{+} \geqslant Q_{i\min} & (i = 1,2,\cdots,n) \\ Q_{ij}^{-} + q_{ih}^{-} - Q_{si}^{+} - \sum_{j=1}^{J}(W_{ij}^{-} + \Delta Wz_{ij} - S_{ijh}^{+}) = Q_{im}^{+} \geqslant Q_{i\min} & (i = n+1,n+2,\cdots,m) \\ D_{ij}^{+}S_{ijh}^{+} - P_h\sum_{h=1}^{3}D_{ij}^{+}S_{ijh}^{+} + \theta_{ih}^{+} \geqslant 0 & (\forall i,j,h) \\ \sum_{j=1}^{J}(W_{ij}^{-} + \Delta Wz_{ij}) \leqslant W_{i\max} & (\forall i,j) \\ W_{ij}^{-} + \Delta Wz_{ij} \geqslant S_{ij}^{+} \geqslant 0 & (\forall i,j) \end{cases} \tag{15}$$

其中,S_{ij}^{+}为模型决策变量,经过计算得到上限子模型的解 S_{ijopt}^{+}、f_{opt}^{+},将两个模型的解合并,得到模型最优解

$$f_{opt}^{\pm} = [f_{opt}^{-}, f_{opt}^{+}] \tag{16}$$

$$S_{ijhopt}^{\pm} = [S_{ijhopt}^{-}, S_{ijhopt}^{+}] \quad (\forall i,j) \tag{17}$$

$$z_{ij} = z_{ijopt} \quad (\forall i,j) \tag{18}$$

最优配水量为

$$A_{ij}^{\pm} = W_{ijopt}^{\pm} - S_{ijhopt}^{\pm} \quad (\forall i,j) \tag{19}$$

式中 A_{ij}——水源 i 向作物 j 的最优配水量

其算法流程如图 1 所示。

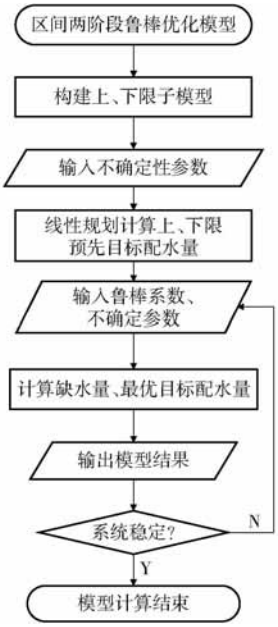

图 1 区间两阶段鲁棒优化方法算法流程图

Fig. 1 Algorithm flow chart of interval-parameter two-stage robust stochastic programming method

2 案例研究

2.1 区域概况

三江平原地区牡丹江灌区位于黑龙江省东南部(131°13′~133°37′E,44°57′~46°12′N),耕地面积为 3.07×10^{9} m^2,所辖 12 个现代化农场。灌区内土壤肥沃,水资源丰富,主要农作物为水稻、大豆、玉米,以井灌为主。然而,近些年随着作物种植面积的

不断增加，作物需水量增大，导致灌区用水量压力增大，水资源危机加重。实际配置水资源量如果小于农作物的需水量，供水不足将造成农作物减产，增大惩罚成本，若满足农作物需水量，则又增加用水成本和系统供水风险。因此，本文运用 ITRM 有效的平衡系统成本和风险，解决灌区水资源分配问题。

2.2　参数确定

选取水稻、大豆、玉米 3 种作物为研究对象，根据《牡丹江统计年鉴》[24]、《黑龙江垦区统计年鉴》[25]等相关资料可以得到 3 种作物的灌区种植面积、单位面积灌溉用水区间值，作物灌溉面积比例参照文献[27]，水稻、大豆、玉米分别为 100%、10%、10%，根据文献[24－25]和当地多年统计数据，得到作物单位面积最小灌溉量和最大灌溉量（表 1）。以灌区 2011 年 3 种作物种植面积数据为已知条件，将作物单位面积最小（最大）用水量乘以作物种植面积、作物灌溉面积比例，得到作物最小（最大）需水量，查阅文献[24－25]得到灌区水量分配的相关经济系数（表 2）。根据《黑龙江省农垦水利志》[26]（1987—2015 年）对灌区多年天然降水量的统计结果，可知 1992、2002、2008、2011 年灌区的降水量为 400 ~ 450 mm，1987、1990、2009、2013 年降水量为 600 mm 以上，其他年份降水量在 450 ~ 600 mm 之间。把来水量水平分为高、中、低 3 个水平，由统计结果可知，中流量年份比高降流量和低流量年份多，且高流量和低流量出现概率相近，故假设预测年份的降水量水平高、中、低出现的概率为 0.2、0.6、0.2。查阅文献[27]获得地下水和地表水的供水比例为 4∶1。其中地下水的主要补给来源为侧向径流补给[28]，2011 年全年牡丹江地区地表水过境水量为 2.482×10^{10} m^3，但其提水量 2.3×10^{7} m^3，仅占过境水量的 0.093%。根据《牡丹江统计年鉴》[24]、《黑龙江垦区统计年鉴》[25]以及多年数据统计分析，得到灌区在不同来水量水平下的可供水量区间值（表 3），灌区地表水最大可供水量为 6.2×10^{8} m^3，最小蓄水量为 1.1×10^{8} m^3，地下水最大可供水量为 9.7×10^{8} m^3，最小储蓄量为 2.55×10^{8} m^3。

表 1　灌区作物种植面积及单位面积灌溉用水量

Tab.1　Irrigation crops area and water per unit in irrigation district

作物种类	单位面积灌溉用水量/($m^3\cdot hm^{-2}$)	单位面积最小灌溉用水量/($m^3\cdot hm^{-2}$)	单位面积最大灌溉用水量/($m^3\cdot hm^{-2}$)	种植面积/hm^2
水稻	[5 526.00,6 956.00]	[4 788.0,4 924.0]	[6 931.0,7 351.0]	45 125
玉米	[92.04,151.76]	[87.5,106.9]	[145.9,194.5]	198 569
大豆	[88.20,164.40]	[80.0,106.7]	[142.3,231.2]	243 420

表 2　灌区作物最大最小需水量、预先配水量和经济系数

Tab.2　Irrigation corps maximum and minimum water distribution, target value of crops water distribution in advance and economic parameters

作物种类	水源	作物需水量/m^3		预先目标配水量/m^3	经济系数/(元·m^{-3})	
		最小值	最大值		输水成本	惩罚系数
水稻	地表水	$[4.321\times10^{7},4.444\times10^{7}]$	$[6.255\times10^{7},6.634\times10^{7}]$	$[4.987\,0\times10^{7},6.278\,0\times10^{7}]$	[1.07,1.52]	[1.32,1.82]
	地下水	$[1.729\times10^{8},1.778\times10^{8}]$	$[2.502\times10^{8},2.654\times10^{8}]$	$[1.994\,9\times10^{8},2.511\,0\times10^{8}]$	[1.77,2.12]	[1.96,2.35]
玉米	地表水	$[3.470\times10^{6},4.250\times10^{6}]$	$[5.790\times10^{6},7.720\times10^{6}]$	$[3.660\,0\times10^{6},6.030\,0\times10^{6}]$	[1.07,1.52]	[3.89,4.04]
	地下水	$[1.390\times10^{7},1.698\times10^{7}]$	$[2.318\times10^{7},3.090\times10^{7}]$	$[1.462\,0\times10^{7},2.411\,0\times10^{7}]$	[1.77,2.12]	[4.55,5.32]
大豆	地表水	$[3.890\times10^{6},5.190\times10^{6}]$	$[6.930\times10^{6},1.126\times10^{7}]$	$[4.290\,0\times10^{6},8.000\,0\times10^{6}]$	[1.07,1.52]	[2.57,3.28]
	地下水	$[1.558\times10^{7},2.078\times10^{7}]$	$[2.771\times10^{7},4.502\times10^{7}]$	$[1.718\,0\times10^{7},3.201\,0\times10^{7}]$	[1.77,2.12]	[3.05,4.42]

表 3　不同来水量水平下农作物灌溉水源可用水量

Tab.3　Water available for crops irrigation under different water inflow levels

来水量水平	概率	可用水量/m^3	
		地表水	地下水
低(L)	0.2	$[1.55\times10^{8},1.70\times10^{8}]$	$[2.58\times10^{8},2.76\times10^{8}]$
中(M)	0.6	$[2.25\times10^{8},2.42\times10^{8}]$	$[3.25\times10^{8},3.47\times10^{8}]$
高(H)	0.2	$[3.75\times10^{8},3.89\times10^{8}]$	$[4.32\times10^{8},4.58\times10^{8}]$

2.3　模型计算结果与分析

区间两阶段鲁棒优化规划方法结果如表 4 所示。最优配水目标可由公式 $W_{ij\text{opt}}^{\pm}=W_{ij}^{-}+\Delta W_{ij}z_{ij\text{opt}}$ 得到，即当 $z_{ij}=0$ 时，$W_{ij\text{opt}}=W_{ij}^{-}$，最优目标配水量取下限值，相反，当 $z_{ij}=1$ 时，$W_{ij\text{opt}}=W_{ij}^{+}$，最优目标配水量取上限值。对于水稻来说，$z_{11}=z_{21}=0$（表 5），最优目标配水量取下限值，为 4.987×10^{7}、$1.994\,9\times10^{8}$ m^3，对于玉米来说，$z_{12}=z_{22}=1$（表 5），最优目标

配水量取上限值,为 6.03×10^6、2.411×10^7 m^3,同理,$z_{23}=0.6$,对于大豆来说,地下水的最优目标配水量处于上下限之间,并接近上限值,最优目标配水量为 2.608×10^7 m^3。

图 2 为灌区用于水稻、玉米、大豆的最优目标配水量,其中地表水最优目标配水量为 6.39×10^7 m^3,地下水为 $2.696\,8\times10^8$ m^3,在中水平流量下灌区可用的地表水、地下水资源量依次为[2.25×10^8,2.42×10^8] m^3、[3.25×10^8,3.47×10^8] m^3,此时配水量充足,不存在缺水。而在低流量情况下,灌区的地下水可用水量为[2.58×10^8,2.76×10^8] m^3,此时可分配水量几乎达到上限,作物供水存在缺失。可能的原因是:①水资源不合理开发,过度利用地下水。②缺少合理的规划和利用。

最优目标配水量由模型第 1 阶段得到,最优分配水量则由式(19)确定。鲁棒优化方法旨在第 2 阶段中对成本期望进行追索,并对系统的风险进行评估。表 4 中给出了 ρ 取不同值时,对应的缺水量和最优配水量。当 $\rho=0$ 时,模型为普通区间两阶段随机规划模型,代表了决策者对风险持中立态度,不考虑成本可变性。由表 4 可知:①对于水稻,地表水的决策变量为 0,当 $\rho=0$ 时,在低、中、高 3 种来水水平下,其缺水量分别为[3.68×10^6,5.68×10^6] m^3、[1.53×10^6,3.53×10^6] m^3、[2.10×10^5,1.21×10^6] m^3,因此,最优配水量为[4.419×10^7,4.619×10^7] m^3、[4.634×10^7,4.834×10^7] m^3、[4.866×10^7,

表 4 不同 ρ 取值的作物缺水量和最优配置水量

Tab. 4 Crops water shortage and water optimal allocation of different values of ρ

作物种类	水源	来水量水平	最优目标配水量/m^3	$\rho=0$		$\rho=0.4$		$\rho=1$	
				缺水量/m^3	最优配水量/m^3	缺水量/m^3	最优配水量/m^3	缺水量/m^3	最优配水量/m^3
水稻	地表水	L	4.987×10^7	[3.68×10^6, 5.68×10^6]	[4.419×10^7, 4.619×10^7]	[5.58×10^6, 6.92×10^6]	[4.295×10^7, 4.429×10^7]	[7.25×10^6, 8.46×10^6]	[4.141×10^7, 4.262×10^7]
		M	4.987×10^7	[1.53×10^6, 3.53×10^6]	[4.634×10^7, 4.834×10^7]	[3.32×10^6, 4.38×10^6]	[4.549×10^7, 4.655×10^7]	[5.52×10^6, 6.55×10^6]	[4.332×10^7, 4.435×10^7]
		H	4.987×10^7	[2.10×10^5, 1.21×10^6]	[4.866×10^7, 4.966×10^7]	[1.65×10^6, 1.97×10^6]	[4.79×10^7, 4.822×10^7]	[3.77×10^6, 3.86×10^6]	[4.601×10^7, 4.610×10^7]
	地下水	L	$1.994\,9\times10^8$	[1.352×10^7, 1.564×10^7]	[$1.838\,5\times10^8$, $1.858\,7\times10^8$]	[2.179×10^7, 2.788×10^7]	[$1.716\,1\times10^8$, $1.767\,0\times10^8$]	[3.305×10^7, 3.877×10^7]	[$1.607\,2\times10^8$, $1.664\,4\times10^8$]
		M	$1.994\,9\times10^8$	[1.125×10^7, 1.412×10^7]	[$1.853\,7\times10^8$, $1.882\,4\times10^8$]	[1.885×10^7, 2.397×10^7]	[$1.755\,2\times10^8$, $1.806\,4\times10^8$]	[2.601×10^7, 3.239×10^7]	[1.671×10^8, $1.734\,8\times10^8$]
		H	$1.994\,9\times10^8$	[6.89×10^6, 9.12×10^6]	[$1.903\,7\times10^8$, $1.926\,0\times10^8$]	[1.625×10^7, $1.923\,0\times10^7$]	[$1.802\,6\times10^8$, $1.832\,4\times10^8$]	[2.023×10^7, 2.574×10^7]	[$1.737\,5\times10^8$, $1.792\,6\times10^8$]
玉米	地表水	L	6.03×10^6	0	6.03×10^6	0	6.03×10^6	[8.3×10^5, 9.7×10^5]	[5.06×10^6, 5.20×10^6]
		M	6.03×10^6	0	6.03×10^6	0	6.03×10^6	[6.8×10^5, 7.8×10^5]	[5.25×10^6, 5.35×10^6]
		H	6.03×10^6	0	6.03×10^6	0	6.03×10^6	[4.7×10^5, 6.6×10^5]	[5.37×10^6, 5.56×10^6]
	地下水	L	2.411×10^7	0	2.411×10^7	[3.03×10^6, 4.26×10^6]	[1.985×10^7, 2.108×10^7]	[5.58×10^6, 5.95×10^6]	[1.816×10^7, 1.853×10^7]
		M	2.411×10^7	0	2.411×10^7	[2.77×10^6, 3.93×10^6]	[2.018×10^7, 2.134×10^7]	[5.21×10^6, 5.54×10^6]	[1.857×10^7, 1.890×10^7]
		H	2.411×10^7	0	2.411×10^7	[2.05×10^6, 2.66×10^6]	[2.145×10^7, 2.206×10^7]	[4.09×10^6, 5.03×10^6]	[1.908×10^7, 2.002×10^7]
大豆	地表水	L	8×10^6	0	8×10^6	0	8×10^6	0	8×10^6
		M	8×10^6	0	8×10^6	0	8×10^6	0	8×10^6
		H	8×10^6	0	8×10^6	0	8×10^6	0	8×10^6
	地下水	L	2.608×10^7	0	26.08	[4.87×10^6, 5.69×10^6]	[2.039×10^7, 2.121×10^7]	[5.88×10^6, 6.97×10^6]	[1.911×10^7, 2.020×10^7]
		M	2.608×10^7	0	26.08	[3.22×10^6, 4.25×10^6]	[2.183×10^7, 2.286×10^7]	[4.62×10^6, 5.21×10^6]	[2.087×10^7, 2.146×10^7]
		H	2.608×10^7	0	26.08	[1.06×10^6, 2.64×10^6]	[2.344×10^7, 2.502×10^7]	[3.25×10^6, 4.43×10^6]	[2.165×10^7, 2.283×10^7]

续表 4

作物种类	水源	来水量水平	最优目标配水量/m^3	$\rho=2$		$\rho=3$		$\rho=5$	
				缺水量/m^3	最优配水量/m^3	缺水量/m^3	最优配水量/m^3	缺水量/m^3	最优配水量/m^3
水稻	地表水	L	4.987×10^7	$[8.58\times10^6,9.67\times10^6]$	$[4.024\times10^7,4.129\times10^7]$	$[8.88\times10^6,9.81\times10^6]$	$[4.006\times10^7,4.099\times10^7]$	$[8.90\times10^6,8.89\times10^6]$	$[3.998\times10^7,4.097\times10^7]$
		M	4.987×10^7	$[6.22\times10^6,7.31\times10^6]$	$[4.256\times10^7,4.365\times10^7]$	$[6.97\times10^6,7.95\times10^6]$	$[4.192\times10^7,4.29\times10^7]$	$[7.07\times10^6,7.98\times10^6]$	$[4.189\times10^7,4.28\times10^7]$
		H	4.987×10^7	$[4.75\times10^6,5.55\times10^6]$	$[4.432\times10^7,4.512\times10^7]$	$[4.82\times10^6,5.49\times10^6]$	$[4.438\times10^7,4.505\times10^7]$	$[4.82\times10^6,5.49\times10^6]$	$[4.438\times10^7,4.505\times10^7]$
	地下水	L	$1.994\,9\times10^8$	$[3.628\times10^7,4.356\times10^7]$	$[1.559\,3\times10^8,1.632\,1\times10^8]$	$[3.722\times10^7,4.436\times10^7]$	$[1.551\,3\times10^8,1.622\,7\times10^8]$	$[3.722\times10^7,4.436\times10^7]$	$[1.551\,3\times10^8,1.622\,7\times10^8]$
		M	$1.994\,9\times10^8$	$[2.752\times10^7,3.877\times10^7]$	$[1.607\,2\times10^8,1.719\,7\times10^8]$	$[2.876\times10^7,4.025\times10^7]$	$[1.592\,4\times10^8,1.707\,3\times10^8]$	$[2.876\times10^7,4.025\times10^7]$	$[1.592\,4\times10^8,1.707\,3\times10^8]$
		H	$1.994\,9\times10^8$	$[2.177\times10^7,2.631\times10^7]$	$[1.731\,8\times10^8,1.777\,2\times10^8]$	$[2.235\times10^7,2.867\times10^7]$	$[1.709\,3\times10^8,1.771\,4\times10^8]$	$[2.235\times10^7,2.867\times10^7]$	$[1.709\,3\times10^8,1.771\,4\times10^8]$
玉米	地表水	L	6.03×10^6	$[1.02\times10^6,1.34\times10^6]$	$[4.69\times10^6,5.01\times10^6]$	$[2.25\times10^6,3.45\times10^6]$	$[2.58\times10^6,3.78\times10^6]$	$[2.25\times10^6,3.45\times10^6]$	$[2.58\times10^6,3.78\times10^6]$
		M	6.03×10^6	$[8.30\times10^5,1.15\times10^6]$	$[4.88\times10^6,5.20\times10^6]$	$[1.06\times10^6,2.23\times10^6]$	$[3.80\times10^6,4.97\times10^6]$	$[1.06\times10^6,2.23\times10^6]$	$[3.80\times10^6,4.97\times10^6]$
		H	6.03×10^6	$[5.6\times10^5,8.8\times10^5]$	$[5.15\times10^6,5.47\times10^6]$	$[8.6\times10^6,1.02\times10^6]$	$[5.01\times10^6,5.17\times10^6]$	$[8.60\times10^6,1.02\times10^6]$	$[5.01\times10^6,5.17\times10^6]$
	地下水	L	2.411×10^7	$[5.97\times10^6,7.05\times10^6]$	$[1.706\times10^7,1.814\times10^7]$	$[8.56\times10^6,9.53\times10^6]$	$[1.458\times10^7,1.555\times10^7]$	$[8.56\times10^6,9.53\times10^6]$	$[1.458\times10^7,1.555\times10^7]$
		M	2.411×10^7	$[6.23\times10^6,6.88\times10^6]$	$[1.723\times10^7,1.788\times10^7]$	$[7.22\times10^6,8.67\times10^6]$	$[1.544\times10^7,1.689\times10^7]$	$[7.22\times10^6,8.67\times10^6]$	$[1.544\times10^7,1.689\times10^7]$
		H	2.411×10^7	$[5.03\times10^6,6.32\times10^6]$	$[1.779\times10^7,1.908\times10^7]$	$[5.74\times10^6,7.29\times10^6]$	$[1.682\times10^7,1.837\times10^7]$	$[5.74\times10^6,7.29\times10^6]$	$[1.682\times10^7,1.837\times10^7]$
大豆	地表水	L	8×10^6	$[1.23\times10^6,1.66\times10^6]$	$[6.34\times10^6,6.77\times10^6]$	$[2.58\times10^6,3.25\times10^6]$	$[4.75\times10^6,5.42\times10^6]$	$[2.58\times10^6,3.25\times10^6]$	$[4.75\times10^6,5.42\times10^6]$
		M	8×10^6	$[8.80\times10^6,1.19\times10^6]$	$[6.81\times10^6,7.12\times10^6]$	$[1.32\times10^6,2.58\times10^6]$	$[5.42\times10^6,6.68\times10^6]$	$[1.36\times10^6,2.60\times10^6]$	$[5.46\times10^6,6.64\times10^6]$
		H	8×10^6	$[6.20\times10^6,9.40\times10^6]$	$[7.06\times10^6,7.38\times10^6]$	$[9.2\times10^6,1.46\times10^6]$	$[6.54\times10^6,7.08\times10^6]$	$[9.20\times10^6,1.46\times10^6]$	$[6.54\times10^6,7.08\times10^6]$
	地下水	L	2.608×10^7	$[6.22\times10^6,7.66\times10^6]$	$[1.842\times10^7,1.986\times10^7]$	$[6.69\times10^6,7.94\times10^6]$	$[1.814\times10^7,1.939\times10^7]$	$[6.69\times10^6,7.94\times10^6]$	$[1.814\times10^7,1.939\times10^7]$
		M	2.608×10^7	$[5.97\times10^6,6.95\times10^6]$	$[1.913\times10^7,2.011\times10^7]$	$[6.32\times10^6,7.54\times10^6]$	$[1.854\times10^7,1.976\times10^7]$	$[6.32\times10^6,7.54\times10^6]$	$[1.854\times10^7,1.976\times10^7]$
		H	2.608×10^7	$[4.86\times10^6,5.75\times10^6]$	$[2.033\times10^7,2.122\times10^7]$	$[5.42\times10^6,5.95\times10^6]$	$[2.013\times10^7,2.066\times10^7]$	$[5.42\times10^6,5.95\times10^6]$	$[2.013\times10^7,2.066\times10^7]$

表 5　决策变量值

Tab. 5　Value of decision variable

作物种类	地表水	地下水
水稻	0	0
玉米	1	1.0
大豆	1	0.6

$4.966\times10^7]$ m^3。由表 3 可知，水稻的地表水最小需水量为$[4.321\times10^7,4.444\times10^7]$ m^3，可满足水稻的供水需求。对于玉米，地表水的决策变量为 1，当 $\rho=0$ 时不产生缺水量，最优配水量为 6.03×10^6 m^3。在供水量充足的情况下，系统更偏好避免惩罚风险，所以将目标配水量上限作为最优目标配水量。②随着 ρ 的增大，缺水量不断增加。例如，在

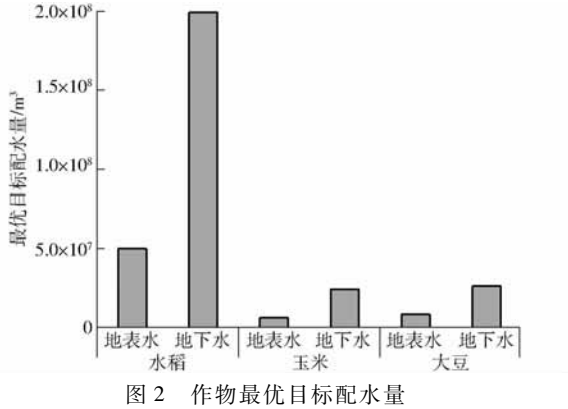

图 2　作物最优目标配水量

Fig. 2　Optimized allocation targets for different crops

低水平流量下,当 $\rho=0.4,1,2$ 时,水稻的地下水缺水量为[2.179×10^7,2.788×10^7] m^3、[3.305×10^7,3.877×10^7] m^3、[3.628×10^7,4.356×10^7] m^3,最优配水量为[$1.716\ 1\times10^8$,$1.767\ 0\times10^8$] m^3、[$1.607\ 2\times10^8$,$1.664\ 4\times10^8$] m^3、[$1.559\ 3\times10^8$,$1.632\ 1\times10^8$] m^3,玉米的地表水缺水量为 0 m^3、[8.3×10^5,9.7×10^5] m^3、[1.02×10^6,1.34×10^6] m^3,最优配水量为 6.03×10^6 m^3、[5.06×10^6,5.20×10^6] m^3、[4.69×10^6,5.01×10^6] m^3。低水平时系统来水量较少,通过减少配水量来调节系统的最优配水量,即,鲁棒系数越大,系统的稳定性越强。模型增加了作物缺水量,降低了作物的配水量,从而使系统的稳定性增加。③当 ρ 逐渐增大时,作物的缺水量随之增大,但当 $\rho\geqslant3$ 之后,缺水量几乎不再变化。例如,当 $\rho=2,3,5$ 时,在中水平流量下,大豆的地表水缺水量为[8.80×10^5,1.19×10^6] m^3、[1.32×10^6,2.58×10^6] m^3、[1.36×10^6,2.60×10^6] m^3,最优配水量为[6.81×10^6,7.12×10^6] m^3、[5.42×10^6,6.68×10^6] m^3、[5.46×10^6,6.64×10^6] m^3,玉米的地下水缺水量为[6.23×10^6,6.88×10^6] m^3、[7.22×10^6,8.67×10^6] m^3、[7.22×10^6,8.67×10^6] m^3,最优配水量为[1.723×10^7,1.788×10^7] m^3、[1.544×10^7,1.689×10^7] m^3、[1.544×10^7,1.689×10^7] m^3,缺水量的增加会使系统稳定性增加,但为了保证作物正常生长的最小需水量,缺水量不再增大,此时系统趋于稳定。

最优系统成本区间如图 3、4 所示,系统成本随着鲁棒系数的变化而变化,呈递增趋势。如图 3 所示,当 $\rho=0$ 时,最优系统总成本为[$1.104\ 32\times10^9$,$2.049\ 95\times10^9$]元,当 $\rho=1$ 时,模型最优系统总成本为[$1.331\ 55\times10^9$,$2.235\ 76\times10^9$]元。当 $\rho=5$ 时,最优系统总成本为[$1.943\ 77\times10^9$,$2.657\ 69\times10^9$]元。在低流量水平下(图 4a),最优系统成本在[$6.835\ 5\times10^8$,$9.286\ 7\times10^8$]元($\rho=5$)和[$3.693\ 9\times10^8$,$6.962\ 5\times10^8$]元($\rho=0$)之间变化。在中流量水平下(图 4b),最优系统成本在[$6.496\ 7\times10^8$,$9.130\ 5\times10^8$]元($\rho=5$)和[$3.683\ 3\times10^8$,$6.864\ 5\times10^8$]元($\rho=0$)之间变化。在高流量水平下(图 4c),系统成本在[$6.105\ 5\times10^8$,$8.160\ 2\times10^8$]元($\rho=5$)和[$3.666\ 1\times10^8$,$6.672\ 5\times10^8$]元($\rho=0$)之间变化。对比图 3、4,随着水资源最优分配量的变化,系统成本呈现一定的变化规律:①鲁棒系数增加,引起系统成本增大,当 $\rho\geqslant3$ 之后,成本几乎不变,说明系统已经趋于稳定。②随着鲁棒系数增加,成本的上下限差值变小,系统的稳定性增加,经济性和稳定性得到了较好的平衡。③较高的成本对应较高的缺水水平。当可用水量较高时,决策者可利用的水资源量也会较多,如果实际分配量较少,则会产生较高的系统风险和较多的惩罚成本;相反,如果可用水量较少,则决策者需要减少实际供水量,采取保守决策,降低系统风险增加稳定性。决策者可以根据系统分析结果,针对灌区实际情况,制定风险和经济相协调的水资源配置策略。

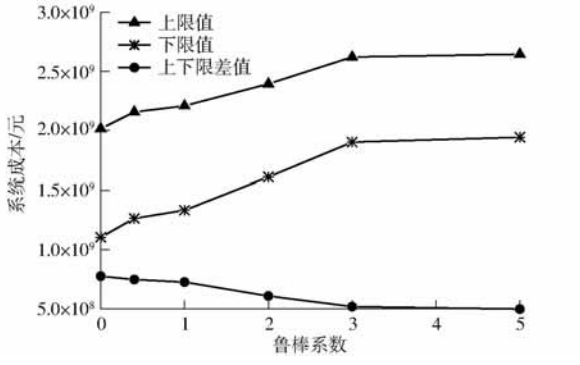

图 3 最优系统总成本

Fig. 3 Optimized net system cost

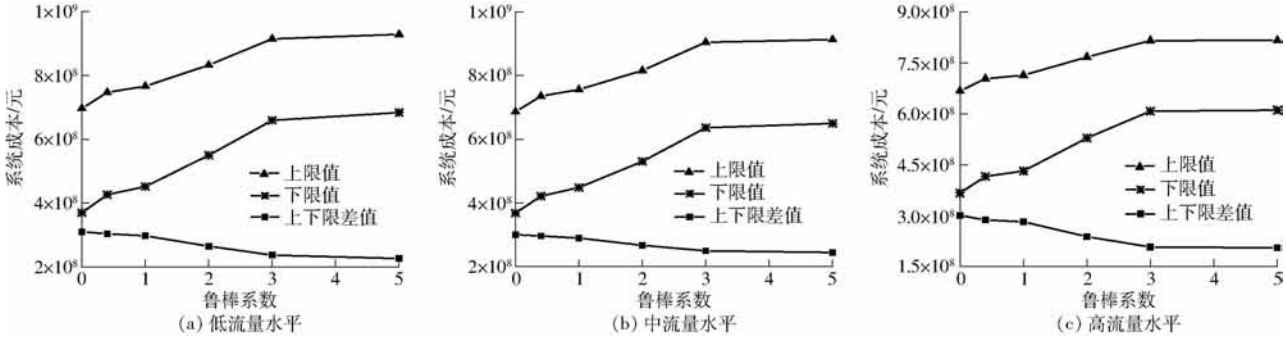

图 4 不同流量水平下最优系统成本

Fig. 4 Optimized net system cost under different water inflow levels

3 结论

(1)针对水资源分配过程中存在风险的问题,将鲁棒优化方法与两阶段规划方法耦合,建立了区间两阶段鲁棒优化模型,以三江平原牡丹江灌区农业水资源配置为例进行了研究。模型结果表明,系

统总成本随着鲁棒系数的变化有一定的规律。当模型不考虑系统风险时，即 $\rho = 0$ 时，系统成本在 $[1.104\,32 \times 10^9, 2.049\,95 \times 10^9]$ 元之间变化，随着鲁棒系数的增大，模型的缺水量增加，使得系统的稳定性增强、成本增加，当 $\rho = 0.4$、1、2 时，系统成本分别在 $[1.263\,25 \times 10^9, 2.185\,67 \times 10^9]$ 元、$[1.331\,55 \times 10^9, 2.235\,76 \times 10^9]$ 元、$[1.608\,79 \times 10^9, 2.415\,52 \times 10^9]$ 元之间变化，但当 $\rho = 3$、5 时，系统缺水量不再增大，此时系统达到稳定状态，成本在 $[1.903\,27 \times 10^9, 2.634\,75 \times 10^9]$ 元、$[1.943\,77 \times 10^9, 2.657\,69 \times 10^9]$ 元之间变化。由此可知，在不同来水量水平下，通过增加鲁棒系数增加模型结果的可行性，对灌区的用水成本、系统的稳定性和系统的风险三者之间进行了充分的权衡，使配置方案更具有实际操作性和灵活性。

(2)与传统区间两阶段随机规划模型相比，区间两阶段鲁棒优化方法不但可以有效地解决不确定条件下的随机问题和区间问题，鲁棒优化方法的加入可以捕获规划过程中产生的风险问题，避免优化结果出现高风险状态，弥补了模型存在风险的缺陷，增强了系统的稳定性。将区间两阶段鲁棒优化方法应用到灌区水资源优化配置中，验证了模型的应用性和有效性。模型结果表明，通过鲁棒系数的变化，生成一系列对应的不同风险水平、不同情境的可行性方案，显示了系统经济性和系统稳定性之间的权衡。

参 考 文 献

[1] 付强，肖圆圆，崔嵩，等. 基于多目标模糊规划的灌区多水源优化配置[J/OL]. 农业机械学报，2017，48(7)：222－227.
FU Qiang, XIAO Yuanyuan, CUI Song, et al. Multi-water resources optimal allocation of irrigation district based on fuzzy muli-objective programming [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 222－227. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20170728&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.028. (in Chinese)

[2] 宫兴龙，付强，邢贞相，等. 土地利用方式对平原-丘陵-湿地交融区水资源的影响[J/OL]. 农业机械学报，2018，49(6)：254－262.
GONG Xinglong, FU Qiang, XING Zhenxiang, et al. Influence of land use on water resources in plain－hill－wetland blend area [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 254－262. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20180630&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.030. (in Chinese)

[3] 付强，刘烨，李天霄，等. 水足迹视角下黑龙江省粮食生产用水分析[J/OL]. 农业机械学报，2017，48(6)：184－192.
FU Qiang, LIU Ye, LI Tianxiao, et al. Analysis of water utilization in grain production from water footprint perspective in Heilongjiang Province[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 184－192. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20170624&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.024. (in Chinese)

[4] 王录仓，高静. 基于灌区尺度的聚落与水土资源空间耦合关系研究：以张掖绿洲为例[J]. 自然资源学报，2014，29(11)：1888－1901.
WANG Lucang, GAO Jing. Spatial coupling relationship between settlement and land and water resources based on irrigation scale—a case study of Zhangye City [J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(11): 1888－1901. (in Chinese)

[5] 王玉宝，吴普特，孙世坤，等. 我国粮食虚拟水流动对水资源和区域经济的影响[J/OL]. 农业机械学报，2015，46(10)：208－215.
WANG Yubao, WU Pute, SUN Shikun, et al. Imapact of virtual water flows of grain on water resources and regional economy in China [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 208－215. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20151027&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.027. (in Chinese)

[6] 娄帅，王慧敏，牛文娟，等. 基于免疫遗传算法水资源配置多阶段群决策优化模型研究[J]. 资源科学，2013，35(3)：569－577.
LOU Shuai, WANG Huimin, NIU Wenjuan, et al. Optimization of multi-stage group decision making for water resource allocation[J]. Resource Science, 2013, 35(3): 569－577. (in Chinese)

[7] 孙冬营，王慧敏，于晶. 基于模糊联盟合作博弈的流域水资源优化配置研究[J]. 中国人口·资源与环境，2014，24(12)：153－158.
SUN Dongying, WANG Huimin, YU Jing. Study on optimal allocation of water resources in basin based on cooperative game under fuzzy coalition [J]. China Population, Resources and Environment, 2014, 24(12): 153－158. (in Chinese)

[8] 陈述，邵东国，李浩鑫，等. 基于粒子群人工蜂群算法的灌区渠-塘-田优化调配耦合模型[J]. 农业工程学报，2014，30(20)：90－97.
CHEN Shu, SHAO Dongguo, LI Haoxin, et al. Coupled allocation model for optimizing water in canal－pond－field based on artificial bee colony and particle swarm algorithm [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(20): 90－97. (in Chinese)

[9] DAVIJANI M H, BANIHABIB M E, ANVAR A N, et al. Multi-objective optimization model for the allocation of water

resources in arid regions based on the maximization of socioeconomic efficiency[J]. Water Resources Management, 2016, 30(3):1 - 20.

[10] 李晨洋, 于伟铭, 陈正锐,等. 考虑生态的灌区水资源区间两阶段随机规划模型建立与应用[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21):105 - 114.
LI Chenyang, YU Weiming, CHEN Zhengrui, et al. Two-stage interval parameters water resources model considering ecology and application in irrigation district [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(21): 105 - 114. (in Chinese)

[11] HUANG G H, LOUCKS D P. An inexact two-stage stochastic programming model for water resources management under uncertainty [J]. Civil Engineering and Environmental Systems, 2000, 17: 95 - 118.

[12] LI Y P, HUANG G H, NIE S L. An interval-parameter multi-stage stochastic programming model for water resources management under uncertainty [J]. Advances in Water Resources, 2006, 29(5): 776 - 789.

[13] ZHANG Lei, LI Chenyang. An inexact two-stage water resources allocation model for sustainable development and management [J]. Water Resources Management, 2014, 28(10): 3161 - 3178.

[14] LI Chenyang, ZHANG Lei. An inexact two-stage allocation model for water resources management under uncertainty [J]. Water Resources Management, 2015, 29(3): 1823 - 1841.

[15] 李晨洋,张志鑫. 基于区间两阶段模糊随机模型的灌区多水源优化配置[J]. 农业工程学报,2016,32(12):107 - 114.
LI Chenyang, ZHANG Zhixin. Multi-water conjunctive optimal allocation based on interval-parameter two-stage fuzzy-stochastic programming [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(12): 107 - 114. (in Chinese)

[16] FU Q, ZHAO K, LIU D, et al. The application of a water rights trading model based on two-stage interval-parameter stochastic programming [J]. Water Resources Management, 2016, 30(7):2227 - 2243.

[17] LI M, GUO P, ZHANG L D. An inexact fuzzy parameter two-stage stochastic programming model for irrigation water allocation under uncertainty [J]. Stochastic Environmental Research & Risk Assessment, 2013, 27(6):1441 - 1452.

[18] GUO Z S, LI Y P, HUANG G H, et al. An interval robust stochastic programming method for planning carbon sink trading to support regional ecosystem sustainability—a case study of Zhangjiakou, China [J]. Ecological Engineering, 2017, 104:99 - 115.

[19] LI Y P, HUANG G H, NIE S L. A robust interval-based minimax-regret analysis approach for the identification of optimal water-resources-allocation strategies under uncertainty[J]. Resources Conservation & Recycling, 2009, 54(2):86 - 96.

[20] 刘银凤. 灌区多水源复合系统水资源优化配置研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2016.
LIU Yinfeng. Study on the optimal allocation of multi-water source complex system in irrigation district [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016. (in Chinese)

[21] 付强,刘银凤,刘东,等. 基于区间多阶段随机规划模型的灌区多水源优化配置[J]. 农业工程学报,2016,32(1):132 - 139.
FU Qiang, LIU Yinfeng, LIU Dong, et al. Optimal allocation of multi-water resources in irrigation area based on interval-parameter multi-stage stochastic programming model [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(1): 132 - 139. (in Chinese)

[22] MULVEY J M, RUSZCAYNSKI A. A new scenario decomposition method for large-scale stochastic optimization [J]. Operations Research, 1995, 43(3): 477 - 490.

[23] YU C S, LI H L. A robust optimization model for stochastic logistic problems [J]. International Journal of Production Economics, 2000, 64(1):385 - 397.

[24] 牡丹江市统计局. 牡丹江统计年鉴[J]. 北京:中国统计出版社,1999 - 2017.

[25] 黑龙江省农垦总局统计局. 黑龙江垦区统计年鉴[J]. 北京:中国统计出版社,2002 - 2016.

[26] 黑龙江省农垦水利志编纂委员会. 黑龙江省农垦水利志[J]. 哈尔滨:黑龙江人民出版社,1987 - 2015.

[27] 刘东,付强,马永胜,等. 三江平原井灌区水资源系统分析与可持续利用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2008.

[28] 黑龙江水文地质志编纂委员会. 黑龙江水文地质志[M]. 哈尔滨:黑龙江人民出版社, 2000.