

基于多目标不确定性机会约束规划的 矿区水资源配置研究

张真¹, 张光明^{1,2}, 张盼月³

(1. 中国人民大学环境学院, 北京 100872; 2. 河北工业大学能源与环境工程学院, 天津 300401;
3. 北京林业大学环境科学与工程学院, 北京 100083)

摘要:以矿区水资源配置系统为研究对象,针对矿区生态恢复过程水资源配置的多目标、模糊、不确定性的特点,构建多目标不确定性机会约束规划模型对矿区水资源进行优化配置。基于生态优先的配水原则,以碳排放最小化目标代替传统的污染物排放量最小化目标,兼顾碳排放最小化、系统经济效益最大化以及缺水量最小化,建立矿区生态环境-经济社会-水资源协调发展的多目标模型,统筹分配地下水、地表水、矿井水以及再生水。对实际情况中的不确定性因素采用区间参数的方法表示,并通过遗传算法对模型进行求解,得到合理的水资源配置方案。将模型应用于宁夏回族自治区羊场湾矿区,结果表明:以碳排放为目标的不确定性机会约束规划多目标模型能够很好地统筹矿区经济发展目标与水资源节约目标,配置方案可保证各个用水部门的需水满足度达到100%,而以污染物排放量为目标的优化方案存在区域缺水的情况。系统可带来年碳净吸收量(CO_2)为533.7~702.4 t,预期年经济效益为 $162.3 \times 10^4 \sim 163.7 \times 10^4$ 元,区域年供水富余量为 $43.5 \times 10^4 \sim 49.7 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。研究结果一方面可为羊场湾矿区尽快实现绿色矿山提供理论支撑,另一方面也可可为其他干旱地区煤矿区的水资源配置和规划提供参考。

关键词:多目标不确定性机会约束规划;遗传算法;矿区水资源配置;碳排放;矿区生态恢复

中图分类号:TV213.4

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2022)05-0053-09

Water resources allocation in mining areas based on multi-objective uncertain chance-constrained programming

ZHANG Zhen¹, ZHANG Guangming^{1,2}, ZHANG Panyue³

(1. School of Environment & Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China; 2. School of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 3. College of Environmental Science & Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: The ecological restoration process of mining areas are facing the problem of multi-objective, fuzzy and uncertain water resources allocation. With the water resources allocation system of the mining area as the research object, a multi-objective uncertain chance-constrained programming (MUCC) model was constructed to optimize the allocation of water resources in mining areas. Based on the water allocation principle of ecological priority, the conventional goal of minimizing pollutant emissions is replaced by minimizing carbon emissions, with the consideration of minimizing carbon emissions, maximizing the economic benefits of the system and minimizing water shortage, a multi-objective model for the coordinated development of ecological eco-environment, social economy and water resources in mining areas is established for the integrated allocation of groundwater, surface water, mine water and reclaimed water. The uncertainties in the actual situation are represented by interval parameters, and the model is solved by genetic algorithm (GA), so as to obtain a reasonable water allocation scheme. The model was then applied to the study of Yangchangwan mining area, Ningxia. The results show that this model can well coordinate the targets of e-

收稿日期:2021-08-09; 修回日期:2022-02-22

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0504400)

作者简介:张真(1998-),女,河北邯郸人,硕士研究生,主要从事水资源研究。

通讯作者:张光明(1973-),女,湖南永州人,博士,教授,主要从事水资源与污染治理研究。

conomic development and water conservation of the mining area, and the allocation scheme can ensure that the water demand of each water-using sector is 100% satisfied, whereas the optimized scheme with pollutant emission as the target can only cause regional water shortage. The system can bring a net carbon (CO_2) absorption of $533.7 - 702.4 \text{ t}$, an expected economic benefit of $1623.0 \times 10^3 - 1637.4 \times 10^3 \text{ yuan}$, and a regional water supply surplus of $435 \times 10^3 - 497 \times 10^3 \text{ m}^3$. The research results can provide a theoretical support for the quick realization of green mines in Yangchangwan mining area, and also some guidance for the water resources allocation and programming in coal mining areas in other arid regions.

Key words: multi-objective uncertain chance-constrained programming (MUCC); genetic algorithm (GA); water resources allocation in mining area; carbon emission; ecological restoration of mining area

1 研究背景

我国西北干旱地区分布着丰富的矿产资源,“十二五”期间,我国建设的 14 个大型煤炭基地中有 11 个位于干旱地区^[1]。水资源匮乏和采煤带来的生态破坏双重制约着干旱地区“绿色矿山”理念的实践。如矿坑排水加剧了区域水资源的短缺^[2]、采煤塌陷区的生态恢复和景观重建增大了用水缺口^[3]等问题,矿区生态恢复与水资源补给之间的矛盾日益突出^[4]。矿区水资源不足严重影响着生态环境和经济社会的发展,科学分配及合理利用矿区有限的水资源,提高水资源综合利用效率,是减轻矿区缺水所造成的负面影响的方案之一,对保障矿区可持续发展以及生态健康具有重大意义。目前,已有研究提出了矿区水资源优化配置的多目标规划模型,并证明科学分配水资源可以缓解矿区水资源供需矛盾^[5-6]。

水资源优化配置 (water resources optimal allocation, WROA) 的研究始于 20 世纪 50 年代,一系列数学方法^[7]已被应用于研究之中,例如线性规划、动态规划、目标规划和多目标规划^[8]等。随着矿区生态恢复需求的上升,基于生态优先的多目标配置模型逐渐被重视^[9],这类模型中所讨论的生态效益目标关注点为重点污染物 COD 或氨氮的排放量^[10-11]。然而,矿产资源开发损毁了土壤结构,导致矿区碳固存能力下降甚至丧失^[12]。通过加大矿区生态恢复用水,可以从植被光合作用及土壤碳汇两方面促进碳减排^[13],从而带来不容忽视的生态效益。因此,本文构建基于碳排放量的生态效益目标,并与传统的以污染物排放量为目标的模型进行对比。

在水资源配置过程中,由于矿井水产量存在波动,因而供水效益、成本效益和用户需水量等参数具有不确定性,难以精确获取。为解决上述问题,不确定性优化技术已逐渐应用于水资源优化配置中^[14]。

已有学者提出了不确定性模糊机会约束规划 (inexact fuzzy chance-constrained programming, IFCCP) 的理论框架^[15],当多参数不确定性和随机干扰同时存在时,建立了带有区间数和模糊数的扩展 MSP (multistage stochastic programming) 模型^[16]。目前,不确定性模型已在城市水系统分配、灌区农业水系统管理^[17]等方面得到了很好的应用。因煤矿开采和矿井排水严重影响煤矿区的水资源供给,所以煤矿区水资源利用及管理与其他场景相比进一步增加了资源配置过程的不确定性。考虑到矿区水资源配置过程中不确定性因素的影响,为获取最优方案,结果可能不满足约束条件。而机会约束规划通过建立约束的可能性不小于某些置信水平,可应用于矿区水资源配置方案的决策中。

在水资源配置模型的求解中,其求解方法按照原理的不同分为传统数学算法和智能优化算法两大类。常见的传统算法有加权法、约束法和线性规划法^[18-19]等,此类算法本质上是多目标函数通过数学运算转化为单目标函数,再对单目标函数进行优化求解获取多目标函数的最优方案。传统算法受到初始值和主观因素的双重影响^[20],容易出现局部最优而忽视全局最优的情况。智能优化算法包括遗传算法、粒子群算法等。以遗传算法为代表的智能优化算法具有可生成多个点并进行多方向搜索的特征,非常适合求解搜索空间非常复杂的多目标优化问题^[21]。因此,本文构建了适用于矿区水资源配置的不确定性机会约束规划多目标模型 (multi-objective uncertain chance-constrained programming - genetic algorithm, MUCC - GA),利用第二代非支配排序遗传算法 (elitist non-dominated sorting genetic algorithm, NSGA - II) 求解该模型。

2 不确定模型的一般形式

不确定性机会约束规划 (uncertain chance-con-

strained programming, UCC) 是一种将不确定理论和机会约束规划相结合的优化方法。该规划方法通过使用区间数的方式有效地解决了实际情况中的不确定环境,另外在模型中还通过设定置信度的方式放宽了约束条件的限制,即根据实际情况和决策者对风险的承受能力,遵守约束的可能性高于预定的置信度即可。UCC 的一般形式如下:

$$\begin{cases} \max_x \bar{f} \\ \text{s. t.} \\ M\{f(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}) \geq \bar{f}\} \geq \beta \\ M\{g(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}) \geq 0\} \geq \alpha \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{x}$ 为决策向量; $\boldsymbol{\xi}$ 为不确定向量; $f(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi})$ 为不确定的目标函数; $\bar{f}$ 为 $f(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi})$ 在 β 置信度下的最优值; $g(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi})$ 为不确定的约束条件, $M\{\cdot\}$ 为事件 $\{\cdot\}$ 发生的可能性。参数 α 和 β 分别为约束条件和目标函数的置信度。

作为单目标的扩展,多目标形式机会约束规划(MUCC)的构造如下:

$$\begin{cases} \max_x [\bar{f}_1, \bar{f}_2, \dots, \bar{f}_n] \\ \text{s. t.} \\ M\{f_i(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}) \geq \bar{f}_i\} \geq \beta_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \\ M\{g_j(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}) \geq 0\} \geq \alpha_j \quad (j = 1, 2, \dots, m) \end{cases} \quad (2)$$

式中: α_j 和 β_i 分别为第 j 个约束条件和第 i 个目标函数的置信水平。 $\bar{f}_i$ 为 $f_i(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi})$ 在 β_i 置信度下的最优值。

3 基于遗传算法的多目标不确定性机会约束规划模型(MUCC-GA)

矿区的供水系统包括地表水、地下水、矿井水和再生水,用水系统包括工业用水、生活用水和生态用水。从多水源到多用户的供水系统简化结构如图1所示。供水系统优化的目的是通过机会约束规划模型选择最佳配水方案,即水源 i 向用户 j 的供水量 x_{ij} 值($i = 1, 2, \dots, I; j = 1, 2, \dots, J$), MUCC-GA 模型的多目标决策变量如表1所示。

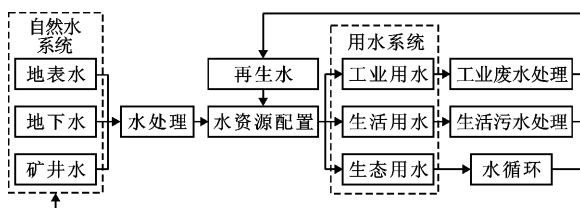


图1 矿区多水源到多用户的供水系统结构简图

3.1 目标函数

不确定性多目标模型将矿区内生活、生产、生态需水部门的配水量作为决策变量,兼顾经济发展和生态恢复目标,建立矿区水资源不确定性模糊机会多目标优化模型。其中,除有确定性参数的碳净排放目标外,其他目标均因含有不确定性因素而写为机会约束规划形式。

表1 MUCC-GA 模型的多目标决策变量

水源	生活用水	生态用水	工业用水	合计
地表水		x_{12}	x_{13}	x_{1j}
地下水	x_{21}	x_{22}		x_{2j}
矿井水		x_{32}	x_{33}	x_{3j}
再生水		x_{42}	x_{43}	x_{4j}
合计	x_{i1}	x_{i2}	x_{i3}	x

(1) 生态效益目标。在识别碳“源”与碳“汇”的基础上,建立碳净排放目标函数,其中包括生活用水产生的碳排放量、工业供水过程产生的碳排放量、再生水回用减少的碳排放量和生态系统用水带来的碳吸收量,其表达式如下:

$$\min f_1(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J T_{ij} x_{ij} \quad (3)$$

式中: x_{ij} 为从 i 水源向 j 用水部门的供水量, m^3 ; T_{ij} 为碳排放系数, kg/m^3 , 碳排放过程其值为正, 碳吸收过程其值为负。

用于对比的传统生态效益目标是通过减少主要污染物(一般选用 COD 指标)的排放总量,实现生态目标的最大化,其目标函数表达式如下:

$$\min f'_1(\mathbf{x}) = \tilde{d}_j p_j \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I x_{ij} \quad (4)$$

式中: $\tilde{d}_j$ 为单位污水中主要污染物的排放浓度, mg/L , 其特征是具有 $\phi_{\tilde{d}_j}$ 分布函数的独立不确定变量; p_j 为 j 用户的污水排放系数。

为了最大限度地最小化污染物排放总量,寻找目标函数 f_1 在 β_1 置信度下的最小值,将目标函数转换为机会约束规划形式:

$$\min \{f'_1 \mid M\{\sum_{j=1}^J \tilde{d}_j p_j \sum_{i=1}^I x_{ij} \leq \bar{f}'_1\} \geq \beta_1\} \quad (5)$$

(2) 经济效益。经济效益为供水的净利润总额,即供水的收益和成本之间的总差额。净利润函数可以表示为:

$$\max f_2(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I (\tilde{b}_{ij} - \tilde{c}_{ij}) x_{ij} a_i w_j \quad (6)$$

式中: $\tilde{b}_{ij}$ 为 i 水源向 j 用水部门单位供水量的效益系

数,元/m³,其特征是具有 $\phi_{\tilde{b}_{ij}}$ 分布函数的独立不确定变量; $\tilde{c}_{ij}$ 为 i 水源向 j 用户单位供水量的费用系数,元/m³,其特征是具有 $\phi_{\tilde{c}_{ij}}$ 分布函数的独立不确定变量; a_i 为水源 i 的供水优先次序系数; w_j 为用户 j 的用水公平系数。

为最大限度地提高供水带来的经济效益,寻找目标函数 f_2 在 β_2 置信度下的最大值:

$$\min \{f_2 \mid M\{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I (\tilde{b}_{ij} - \tilde{c}_{ij})x_{ij}a_iw_j \geq \bar{f}_2\} \geq \beta_2\} \quad (7)$$

为了简化计算,目标函数应统一为求最小值的形式:

$$\min f_2'(x) = -f_2(x) \quad (8)$$

(3) 社会效益。社会效益体现在提高矿区各个用水部门的需水满足度,降低水资源短缺带来的生活质量下降、生态恢复进度减缓等负面影响。因此,社会效益目标通过总缺水量最小化实现:

$$\min f_3(x) = \sum_{j=1}^J (\tilde{D}_j - \sum_{i=1}^I x_{ij}) \quad (9)$$

式中: $\tilde{D}_j$ 为 j 用户的需水量, m³, 其特征是具有 $\phi_{\tilde{D}_j}$ 分布函数的独立不确定变量。

为了使总缺水量最小化,寻找目标函数 f_3 在 β_3 置信度下的最大值:

$$\max \{f_3 \mid M\{\sum_{j=1}^J (\tilde{D}_j - \sum_{i=1}^I x_{ij}) \leq \bar{f}_3\} \geq \beta_3\} \quad (10)$$

3.2 机会约束条件

约束条件是矿区水资源配置过程不能忽视的一部分,机会约束条件可以获得不同严格程度下的配水方案和最优目标。

(1) 可供水量约束。水源供水量不得超过供应能力,即:

$$M\{\sum_{j=1}^J x_{ij} \leq \tilde{Q}_i\} \geq \alpha_i \quad (\forall i,j) \quad (11)$$

式中: $\tilde{Q}_i$ 为 i 水源的可供水量, m³, 其特征是具有 $\phi_{\tilde{Q}_i}$ 分布函数的独立不确定变量; α_i 为给定的置信水平; $M\{\cdot\}$ 为事件 $\{\cdot\}$ 发生的可能性。

(2) 需水量约束。水源供水量不得低于用户最低需水量,即:

$$M\{\tilde{D}_{j\min} \leq \sum_{i=1}^I x_{ij}\} \geq \gamma_i \quad (\forall i,j) \quad (12)$$

$$M\{\sum_{i=1}^I x_{ij} \leq \tilde{D}_{j\max}\} \geq \gamma_i \quad (\forall i,j) \quad (13)$$

式中: $\tilde{D}_{j\min}$ 和 $\tilde{D}_{j\max}$ 为 j 用户最小和最大需水量, m³,

其特征分别是具有 $\phi_{\tilde{D}_{j\min}}$ 和 $\phi_{\tilde{D}_{j\max}}$ 分布函数的独立不确定变量; γ_i 为给定的置信水平。

(3) 非负约束

$$x_{ij} \geq 0 \quad (\forall i,j) \quad (14)$$

3.3 模型化简及求解

本文分别采用等价转换和加权最小偏差法的方法来求解不确定性机会约束多目标模型。

(1) 机会约束规划的等价转化

对于不确定模型,其求解应遵守以下定理^[22]:

设 $g(x, \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ 为约束函数, 其中 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ 是独立的, 且具有不确定性分布 $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$ 。若 $g(x, \xi)$ 随着 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_i$ 的增加而增加, 随着 $\xi_{i+1}, \xi_{i+2}, \dots, \xi_n$ 的增加而减小, 则:

$$M\{g(x, \xi) \leq 0\} \geq \alpha \quad (15)$$

等价于:

$$g(x, \phi_1^{-1}(\alpha), \dots, \phi_i^{-1}(\alpha), \phi_{i+1}^{-1}(1-\alpha), \dots, \phi_n^{-1}(1-\alpha)) \leq 0 \quad (16)$$

因此,用于矿区水资源配置的 MUCC-GA 模型可等价转化为以下形式:

$$\begin{cases} \min f_1 \\ \min \bar{f}_2 \\ \min \bar{f}_3 \\ \text{s. t.} \\ f_1(x) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J T_{ij}x_{ij} \\ \bar{f}_2(x) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \{[\phi_{\tilde{b}_{ij}}^{-1}(1-\beta_2) - \phi_{\tilde{c}_{ij}}^{-1}(\beta_2)]x_{ij}a_iw_j\} \\ \bar{f}_3(x) = \sum_{j=1}^J [\phi_{\tilde{D}_j}^{-1}(\beta_3) - \sum_{i=1}^I x_{ij}] \\ \sum_{j=1}^J x_{ij} \leq \phi_{\tilde{Q}_i}^{-1}(1-\alpha_i) \\ \sum_{i=1}^I x_{ij} \geq \phi_{\tilde{D}_{j\min}}^{-1}(\gamma_i) \\ \sum_{i=1}^I x_{ij} \leq \phi_{\tilde{D}_{j\max}}^{-1}(1-\gamma_i) \\ x_{ij} \geq 0 \\ i = 1, 2, \dots, I \\ j = 1, 2, \dots, J \end{cases} \quad (17)$$

(2) 基于遗传算法的模型求解方法。本文使用遗传算法 (genetic algorithm, GA) 对该多目标优化模型进行求解。遗传算法属于进化算法的一种, 独立于最优化问题的经典算法之外。

在遗传算法中,对一定数量的候选解(个体)进行编码得到染色体,通过构建适应度函数对个体进行选择,筛选较弱的解,并对染色体进行突变产生下一代个体。重复若干代选择、突变后得到最优个体,这种算法的特点包括并行性高、鲁棒性强、容易达到全局最优等。标准遗传算法的流程如图2所示。在多目标优化中使用遗传算法,可以得到一组 Pareto 最优解,再根据实际情况及决策者偏好,从备选方案中选择。

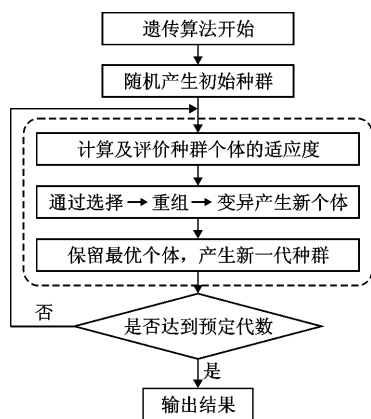


图2 标准遗传算法求解流程图

4 实例研究

羊场湾煤矿位于宁夏回族自治区灵武市宁东能源化工基地灵武矿区,是神华宁夏煤业集团有限责任公司所属的大型骨干企业之一。该煤矿隶属于被国务院确定为全国13个大型煤炭基地之一的宁东煤田。根据《羊场湾煤矿及选矿厂工程水资源论证报告》,宁东煤田基地处于温带干旱气候区,具有干燥、雨量少而集中、蒸发量大、日照时间长、冬春季风沙多、无霜期短等特点。矿区生态环境系统抗干扰能力弱,资源型缺水 and 水质型缺水问题并存。目前,羊场湾矿区企业正大力推进由资源消耗型向环境友好型发展,矿区整体供水结构和理念须进行改变,主要包括两个方面:(1)羊场湾煤矿目前所需的地下水资源由大泉水源地供给。然而,随着地下水被长期开采以及水资源的衰减,应大力节约地下水资源才能保障矿区的可持续发展;(2)矿井水作为非常规水资源,需要开辟其新的使用途径,从而解决矿区生态用水问题。基于生态理念的水资源多目标优化配置,应坚持“优先保障生活需水和生态环境用水、满足工业基本用水需求”的配置原则,实现可持续发展。

4.1 羊场湾矿区水量供需平衡分析

经过对矿区自然地理概况的调查研究表明,井

田范围内可利用的地表水资源仅有西天河,该河流从井田东北角流过,径流空间分布具有总量少、年内分配不均、年际变化大的特点。矿区可供给水源包括当地地下水、外调地下水、外调地表水、矿井水和再生水。在资源供给方面,矿井水作为具有矿区特色的水资源,将其合理循环利用尤为重要。

矿井水可回用资源量可通过富水系数及煤炭产量估算得出^[23];生活污水量根据羊场湾矿区统计数据得出;羊场湾矿区生态需水量以植被生态恢复过程耗水量为主,植被生态需水量的计算是根据羊场湾地区1968–2018年的气象数据,采用FAO-56 P-M公式计算逐月参考作物需水量^[24],再用系数法得到各阶段的实际需水量,最后累加得到植被总生态需水量。由此得出羊场湾矿区水资源优化配置供需平衡表,如表2所示。

表2 羊场湾矿区水资源优化配置供需平衡分析表

10 ⁴ m ³		
需水量	生态需水	[60.31, 72.37]
	工业用水	[300, 360]
	生活用水	[31.16, 37.39]
	需水量小计	[391.47, 469.76]
供水量	矿井水	[514, 594]
	再生水	[25, 46]
	地表水	[70, 80]
	地下水	[50, 60]
	供水量小计	[695, 780]

4.2 参数获取

(1)确定性参数。供水系数 a_i 反映了水源 i 相对于其他水源供水的优先程度;用水公平系数 w_j 反映了用户 j 优先得到供水的次序。矿区水资源配置应优先最大限度利用再生水和矿井疏干水,其次利用地表水,减缓利用地下水,由此确定供水次序为再生水→矿井水→地表水→地下水。矿区遵循优先保证生活和生态需水的配置原则,确定用水次序为生活用水→生态用水→工业用水。利用以下公式计算,确定供水系数 a_i 和用水公平系数 w_j 。

$$a_i = \frac{1 + n_{i \max} - n_i}{\sum_{i=1}^I (1 + n_{i \max} - n_i)} \quad (18)$$

$$w_j = \frac{1 + m_{j \max} - m_j}{\sum_{j=1}^J (1 + m_{j \max} - m_j)} \quad (19)$$

式中: n_i 、 $n_{i \max}$ 分别为供水水源 i 的供水次序和供水

水源总数; m_j 、 $m_{j\max}$ 分别为用户 j 的用水次序和用户总数。

通过计算得出再生水、矿井水、地表水、地下水的供水系数 a_i 依次为 0.4、0.3、0.2、0.1; 生活、生态、工业的用水公平系数 w_j 依次为 0.50、0.33、0.17。另外, 生活、生态、工业用水的排污系数依次为 0.8、0.1、0.7。

根据《省级温室气体清单编制指南》, 宁夏回族自治区单位耗电量的碳排放量 (CO_2) 为 $0.977 \text{ kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, 按照羊场湾矿区单位供水年的耗电量和单位矿井水处理的年耗电量计算, 工业水供水过程产生的碳排放量 (CO_2) 为 $0.24 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、矿井水处理过程产生的碳排放量 (CO_2) 为 $0.032 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。生活用水产生的碳排放量 (CO_2) 取 $7.7 \text{ kg}/\text{m}^3$, 再生水回用的碳排放量 (CO_2) 取 $-0.1931 \text{ kg}/\text{m}^3$, 生态系统用水产生的碳排放量 (CO_2) 取 $-2.2 \text{ kg}/\text{m}^3$ [25]。MUCC-GA 模型中碳排放 (CO_2) 系数的取值如表 3 所示。

表 3 MUCC-GA 模型碳排放 (CO_2) 系数取值 kg/m^3

水源	生活用水	生态用水	工业用水
地表水		-2.2	0.24
地下水	7.7	-2.2	
矿井水		-2.168	0.032
再生水		-2.3931	-0.1931

(2) 不确定性参数。有关效益参数和费用参数的文献资料 [26-28] 表明, 选取临近地区的供水效益系数 [29] 可以使模型更具典型性和代表性。结合不确定性基础理论, 确定羊场湾矿区水资源优化配置模型在供用水过程中的不确定性参数效益系数和费用系数取值范围如表 4 所示。另外, 生活用水、生态用水和工业用水过程的污染物排放量取值范围分别为 $[215, 230]$ 、 $[25, 30]$ 和 $[90, 100]$ (mg/L)。

(3) 需水量上下限。需水量上限定义为用水部门的最大需水量, 下限则应综合考虑研究区的实际情况, 以保障生活和生态用水为核心理念进行分类讨论。为满足居民生活的正常需求, 保障居民用水供应量, 生活需水保证率取 100%; 为推动矿区生态环境建设, 改善植被重建环境, 优先保证生态需水供应量, 因此取其保证率为 100%; 为最大限度地满足生活和生态用水, 取工业需水保证率为 90%。最大的供水量不应大于需水量的 110%, 以节约用水并降低供水成本。

(4) 遗传算法相关参数。本文实例研究采用第二代非支配排序遗传算法 NSGA-II, 即在每一代进化过程中, 对候选解进行非支配排序分层, 并引入拥挤度计算和精英策略筛选个体。具体计算中设定初始个体数为 50, 进化代数数为 1×10^5 。

表 4 MUCC-GA 模型不确定性参数取值 $\text{元}/\text{m}^3$

水源	不确定性参数	生活用水	生态用水	工业用水
地表水	效益系数	[10.0, 12.0]	[8.0, 10.0]	[6.0, 8.0]
	费用系数	[4.0, 5.0]	[4.0, 5.0]	[4.0, 5.0]
地下水	效益系数	[10.0, 12.0]	[8.0, 10.0]	[6.0, 8.0]
	费用系数	[5.0, 6.0]	[5.0, 6.0]	[5.0, 6.0]
矿井水	效益系数	[10.0, 12.0]	[8.0, 10.0]	[6.0, 8.0]
	费用系数	[0.8, 1.0]	[0.8, 1.0]	[0.8, 1.0]
再生水	效益系数	[10.0, 12.0]	[8.0, 10.0]	[6.0, 8.0]
	费用系数	[0.8, 1.0]	[0.8, 1.0]	[0.8, 1.0]

4.3 MUCC-GA 模型水资源配置结果与讨论

通过对模型进行函数分析, 根据 4.2 节所述的参数选取, 设置置信水平 $\alpha_i = 0.85$ ($i = 1, 2, 3, 4$)、 $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0.8$ 、 $\gamma_i = 0.85$ ($i = 1, 2, 3, 4$)。通过遗传算法进行求解得到 Pareto 解集, 以碳净排放量为目标与以污染物排放量为目标的 Pareto 解集对比见图 3。

由图 3 可以看出, 以碳净排放量为生态效益目标得出的年经济效益范围在 $162.3 \times 10^4 \sim 163.7 \times 10^4$ 元之间, 以污染物排放量为生态效益目标得出的年经济效益范围在 $153.2 \times 10^4 \sim 180.4 \times 10^4$ 元之间, 两者差值较小。而差异较大的为年缺水量, 以碳净排放量为生态效益目标的年缺水量在 $-49.7 \times 10^4 \sim -43.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 之间, 代表在满足需水量的前提下还有富余的供水量, 而以污染物排放量为生态效益目标的年缺水量在 $-49.6 \times 10^4 \sim 35.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 之间, 其波动范围较大, 且存在不满足需水要求的可能性。由此可得, 将碳净排放量作为生态效益目标具有很强的实用性, 且具有获得更优水资源配置方案的潜力。

在 Pareto 解集中, 选取经济效益最高的为最优方案, 从而得到该矿区水资源优化配置结果, 如表 5 所示。该配置方案可同时带来以下效益: 年经济效益为 163.7×10^4 元; 年碳净吸收量 (CO_2) 为 534.5 t ; 年供水富余量为 $49.7 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

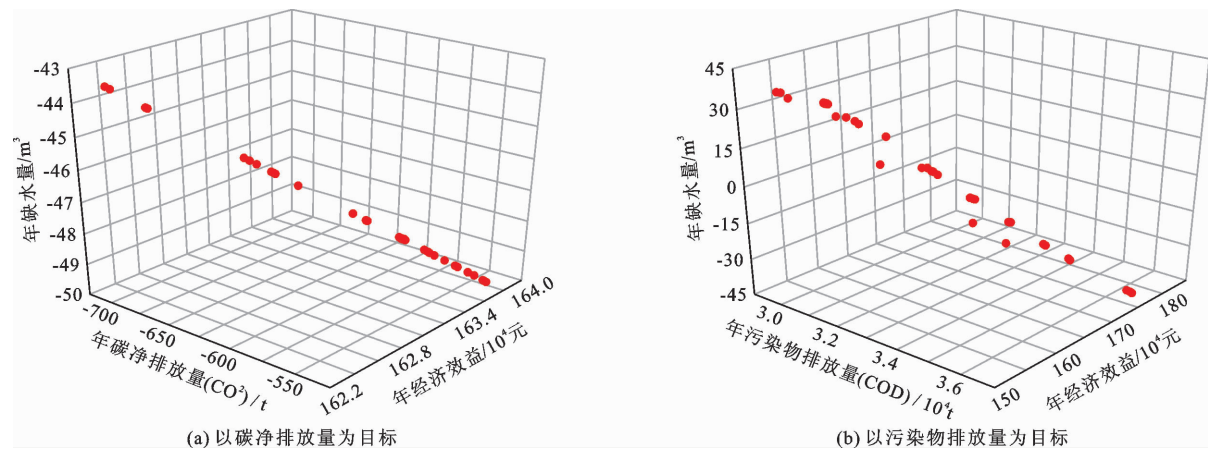


图 3 不同生态目标函数的 Pareto 解集对比

表 5 基于 MUCC - GA 模型的羊场湾矿区

水资源优化配置结果				10 ⁴ m ³ /a
供水水源	生活用水	生态用水	工业用水	
地表水	0	8.31	0.07	
地下水	32.53	7.68	0	
矿井水	0	30.76	313.04	
再生水	0	16.22	0.09	

对羊场湾矿区水资源优化配置结果的分析讨论如下:

(1)工业用水是需水量最大的部门(表 5),工业部门的需水量占到了所有用水部门总需水量的约 80%,着重控制工业用水量,推行节水政策,是减少总需水量最有效的途径。因此优化矿区工业产业结构,提高矿区工业用水效率,降低单位产量工业用水量是提高水资源利用效率的重中之重。

(2)生态用水以处理后的矿井水为主,可以避免占用地表水和地下水资源。充足的矿井水量可以填补干旱地区矿区修复面水资源的缺口,因此提高矿井水处理技术,解决矿井水回用的技术难题,是保证矿区生态恢复的基础。

(3)从工业用水的来源来看,增加矿井水的回用水量可以间接节约地表水资源,这不仅可以满足大量的工业用水需求,也符合水资源循环及再生利用的理念。对矿井水以及再生水的处理虽不能直接得到优质的水资源,但可以作为其他部门(如煤炭的洗选、灌溉用水等)的替代用水,从而间接地达到节水目的。

4.4 不同水资源规划模型的优化结果对比与分析

为了对比不同水资源规划模型的优缺点,分别从生态、经济、社会效益 3 个维度建立 3 个单目标优

化配置模型,即以 CO₂ 净排放量最小化为主要目标的水资源优化配置模型(single objective - carbon emission, SO - CE)、以经济效益最大化为主要目标的水资源优化配置模型(single objective - economic benefit, SO - EB)和以缺水量最小化为主要目标的水资源优化配置模型(single objective - water shortage, SO - WS)。将 3 个传统的单目标模型与遗传算法求解的多目标不确定性模型(MUCC - GA)的优化结果进行对比,结果如表 6 所示。

表 6 4 种水资源规划模型优化结果对比

模型类型	年碳净排放量/t	年经济效益/10 ⁴ 元	年缺水量/10 ⁴ m ³
SO - CE	-749.97	128.35	28.88
SO - EB	-534.85	168.60	-45.55
SO - WS	-396.88	156.23	-48.27
MUCC - GA	-534.48	163.73	-49.69

由表 6 可以看出,SO - CE 模型主要从碳净排放量最小的角度出发,所以其优化结果的碳净排放量为最少,但其年经济效益是 4 种配置模型中最低的,且存在区域供水不足的情况;SO - EB 模型以经济效益为目标,其优化结果得到了最高的经济效益,但其区域供水富余量小于 SO - WS 和 MUCC - GA 模型;SO - WS 模型主要从最大限度满足各区域需求量的角度出发,所得出的年缺水量与 SO - CE 和 SO - EB 模型相比为最少,但其碳净排放量是 4 种模型中最高的;MUCC - GA 模型综合考虑了环境、经济与供水等因素,所得结果在保证较高水平经济效益的同时,区域供水富余量最高,还保有较低的碳净排放量。总体而言,SO - CE 模型的优化方案体现了集中助力碳减排,加强碳吸收的要求;SO - EB

模型的优化方案适用于对经济发展具有高需求的情景;SO-WS 模型的优化方案适用于首要保证区域充足供水的情景,而当同时兼顾经济效益、碳排放与供水稳定因素时,MUCC-GA 模型的优化结果是一种更为切实的方案。

5 结 论

利用遗传算法求解的多目标机会约束规划(MUCC-GA)模型能够反映复杂环境下的多目标性。本文将其应用于急需生态恢复的矿区水资源优化配置领域,在模型构造和求解中,客观反映了现实问题,较其他简单模型具有显著优势。本文所得结果满足了各用水单位的需求及供水约束,确保了经济效益和生态效益的综合最优,同时也探索了碳减排效益目标在矿区水资源配置中的适用性,可以作为制定羊场湾矿区水资源配置规划的科学决策依据,也可以为矿井水处理回用及矿区循环节水工作提供参考。

(1)通过羊场湾矿区水资源优化配置的案例研究表明,MUCC-GA 模型在矿区水资源优化配置问题上有良好的适用性,利用遗传算法求解,可获取多个最佳配置结果,具有很强的灵活性。

(2)MUCC-GA 模型得出的羊场湾矿区水资源优化配置方案中,工业用水量满足率达到 100%,且存有富余供水量,因此该方案还可满足随着工业产值增加而带来的工业需水量的增长。对矿井水的处理和利用是保证充足工业用水的基础。

(3)碳排放目标体现了矿区碳减排的巨大潜力和生态意义,MUCC-GA 模型相比于以污染物排放量为目标的模型,在保证经济效益不受损失的前提下,获得了更高的供水满足率,充分显示了将碳排放目标加入水资源优化配置的可行性。

(4)所得出的水资源优化配置方案充分体现出优先保障生活需水和生态环境用水、满足矿区工业平稳发展基本用水需求的配置原则,既可以改善矿区生态环境,又能够保证经济稳定发展,可为羊场湾矿区及其他相似地区的水资源管理提供借鉴。

参考文献:

[1] 毛豪林,付新峰,谷晓伟,等.区域矿井水可利用量估算方法及应用实例[J].水资源研究,2019,8(2):146-153.

[2] BANKS S B, BANKS D. Abandoned mines drainage: Impact assessment and mitigation of discharges from coal mines in the UK[J]. Engineering Geology, 2001, 60(1-4): 31-37.

[3] QIU Han, JIN Xin, HU Xi. The land ecological restoration of subsidence area in Panji coal mine[J]. Advanced Materials Research, 2011, 414: 126-131.

[4] 牛莎莎.煤矿开采对环境的影响及煤矿废水资源化研究[J].能源与节能,2020(1):82-83+89.

[5] DONG Shuning, XU Bin, YIN Shangxian, et al. Water resources utilization and protection in the coal mining area of northern China[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 1214.

[6] 黄 优,桂祥友.贵州响水矿水资源优化配置模型研究[J].环境科学与技术,2008, 31(12):40-43.

[7] HEYDARI M, OTHMAN F, QADERI K. Developing optimal reservoir operation for multiple and multipurpose reservoirs using mathematical programming[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015, 2015(4): 435752.

[8] MUSA A A. Goal programming model for optimal water allocation of limited resources under increasing demands[J]. Environment, Development and Sustainability, 2021, 23(4): 5956-5984.

[9] LI Jinyan, CUI Lanbo, DOU Miao, et al. Water resources allocation model based on ecological priority in the arid region[J]. Environmental Research, 2021, 199: 111201.

[10] 颜鹏东,陈义忠,张佳峰,等.基于多层规划的武汉城市圈水量-水质耦合配置研究[J].水资源与水工程学报,2021,32(1):72-81.

[11] 饶汉霖,石亚东,徐 慧,等.基于双层模型的常熟市水资源配置研究[J].水资源与水工程学报,2018,29(4):110-114.

[12] AHIRWAL J, MAITI S K. Assessment of soil properties of different land uses generated due to surface coal mining activities in tropical Sal (*Shorea robusta*) forest, India[J]. Catena, 2016, 140: 155-163.

[13] 杨博宇,白中科.碳中和背景下煤矿区土地生态系统碳源/汇研究进展及其减排对策[J].中国矿业,2021,30(5):1-9.

[14] LI Mo, GUO Ping. A multi-objective optimal allocation model for irrigation water resources under multiple uncertainties[J]. Applied Mathematical Modelling, 2014, 38(19-20): 4897-4911.

[15] LI Jing, HUANG Guohe, MA Qiang. Total consumption controlled water allocation management for multiple sources and users with inexact fuzzy chance-constrained programming: A case study of Tianjin, China[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2018, 32(12): 3299-3315.

[16] KHOSROJERDI T, MOOSAVIRAD S H, ARIAFAR S, et al. Optimal allocation of water resources using a two-stage stochastic programming method with interval and fuzzy parameters[J]. Natural Resources Research, 2019, 28

- (1): 1107–1124.
- [17] 岳琼,郭萍,唐毅宽,等.灌区广义水资源不确定性多目标优化配置[J].干旱地区农业研究,2020,38(4): 168–174+183.
- [18] 武鹏飞.邯郸东部地区多水源优化配置研究[J].水利科技与经济,2017,23(2):58–63.
- [19] 于凤存,方国华,王文杰,等.基于多目标遗传算法的南水北调东线工程湖泊群优化调度研究[J].灌溉排水学报,2016,35(3):78–85.
- [20] 张桂林,马亮,唐晓宇,等.新疆白杨河流域水资源的优化配置[J].水土保持通报,2021,41(3):173–180.
- [21] 任高珊,李援农,吴冠宇,等.多目标遗传算法优化配置水资源研究[J].水资源与水工程学报,2009,20(4):58–61.
- [22] LI Xiaona, WANG Xiaosheng, GUO Haiying, et al. Multi-water resources optimal allocation based on multi-objective uncertain chance-constrained programming model[J]. Water Resources Management, 2020, 34(15): 4881–4899.
- [23] 王锋利.矿井不同生产时期涌水量计算方法优选研究[J].煤炭科学技术,2019,47(12):177–183.
- [24] ALLAN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements—FAO irrigation and drainage paper 56 [M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [25] 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.
- [26] 白晓,白峰青.基于生态理念的峰峰矿区水资源规划研究[D].邯郸:河北工程大学,2019.
- [27] 陈义忠,卢宏伟,李晶,等.基于不确定性的水资源配置双层模型及其实证研究[J].环境科学学报,2016,36(6):2252–2261.
- [28] LI Mo, FU Qiang, SINGH V P, et al. Managing agricultural water and land resources with tradeoff between economic, environmental, and social considerations: A multi-objective non-linear optimization model under uncertainty[J]. Agricultural Systems, 2020, 178: 102685.
- [29] 叶健,刘洪波,闫静静.不确定性模糊多目标模型在生态城市水资源配置中的应用[J].环境科学学报,2012,32(4):1001–1007.

(上接第52页)

- [70] CASAS – MULET R, ALFREDSEN K T, MCCLUSKEY A H, et al. Key hydraulic drivers and patterns of fine sediment accumulation in gravel streambeds: A conceptual framework illustrated with a case study from the Kiewa River, Australia [J]. Geomorphology, 2017, 299: 152–164.
- [71] 詹德昊,吴振斌,张晟,等.堵塞对复合垂直流湿地水力特征的影响[J].中国给水排水,2003,19(2):1–4.
- [72] LI H, DAVIS A P. Urban particle capture in bioretention media. I: Laboratory and field studies[J]. Journal of Environmental Engineering, 2008, 134(6): 409–418.
- [73] 张瑞斌,潘卓兮,奚道国,等.铝污泥填料改良生物滞留池对径流污染的削减效果[J].环境工程技术学报,2021,11(4):756–762.
- [74] 吴建.道路下沉式绿地截污功能层净化路面污染径流的性能与设计研究[D].南京:东南大学,2018.
- [75] 张彬鸿.生物滞留系统填料改良及对磷素的净化性能试验研究[D].西安:西安理工大学,2018.
- [76] 仇付国,童诗雨,吕华东.给水厂污泥对Cr(VI)的吸附特性研究[J].水处理技术,2022,48(5):59–64.
- [77] CHEN Jinquan, LI Xuan, JIA Wei, et al. Promotion of bioremediation performance in constructed wetland microcosms for acid mine drainage treatment by using organic substrates and supplementing domestic wastewater and plant litter broth [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 404(Part A): 124125.
- [78] 绍兴华.水稻土淹水过程铁氧化物转化对磷饱和度和磷、氮释放的影响[D].浙江:浙江大学,2005.
- [79] MANN R A. Phosphorus adsorption and desorption characteristics of constructed wetland gravels and steelworks by-products [J]. Australian Journal of Soil Research, 1997, 35(2): 375–384.
- [80] KADLEC R H, KNIGHT R L. Treatment Wetlands [M]. Chelsea, MI: Lewis Publishers, 1996.
- [81] 徐德福,李映雪,方华,等.4种湿地植物的生理性状对人工湿地床设计的影响[J].农业环境科学学报,2013,28(3):587–591.
- [82] 赵晓红,赵亚乾,王文科,等.人工湿地系统以铝污泥为基质的几个关键问题[J].中国给水排水,2015,35(11):131–136.
- [83] KADLEC R H, KNIGHT R L, VYMAZAL J, et al. IWA scientific and technical report [M]. London: IWA Publishing, 2000.