

基于 NSGA- II + ARSBX 算法的太原市水资源优化配置

刘欣,赵雪花,武雯昱,姚柳杉,郭秋岑

(太原理工大学水利科学与工程学院,山西太原 030024)

摘要:为优化太原市水资源配置,设置考虑节水意识和非常规水的供需预测情景,采用 NSGA- II + ARSBX 算法求解水资源优化配置模型,并构建多系统耦合协调度评价模型评价该算法的求解能力。基于供需预测结果,根据不同保证率下的可供水量选择合适的节水意识情景,配置结果中非常规水量平均占比 26.08%,供水比例仅低于外调水(35.77%);不同水平年不同保证率下 NSGA- II + ARSBX 算法的协调度均大于 0.8,优于 NSGA- II 算法。结果表明:保证率 75%、95%时需要中节水意识甚至高节水意识才能改善缺水情况,且非常规水占总供水量比例超过 1/4,将其纳入供水系统对缓解太原市水资源紧张起到了重要作用;与 NSGA- II 算法相比,NSGA- II + ARSBX 算法在水资源优化配置中具有更好的可行性,能够为水资源优化配置模型求解提供新途径。

关键词:水资源配置;NSGA- II + ARSBX 算法;耦合协调度评价;节水意识;非常规水;太原市

中图分类号:TV213.4

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2025)01-0079-08

Optimal allocation of water resources based in Taiyuan City on NSGA- II + ARSBX algorithm//LIU Xin, ZHAO Xuehua, WU Wenyu, YAO Liushan, GUO Qiucen(College of Water Resources Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to optimize the water resources allocation in Taiyuan City, water supply and demand scenarios considering water-saving awareness and unconventional water resources were created, the NSGA- II + ARSBX algorithm was used to solve the optimal allocation model of water resources, and an evaluation model of multi-system coupling coordination degree was constructed to evaluate the solving ability of this algorithm. Based on the results of water supply and demand prediction, appropriate water-saving awareness scenarios were selected according to the available water supply under different guarantee rates. In the allocation results, the average proportion of water supplied by unconventional water accounts for 26.08%, which is only lower than the proportion of water supplied by external transferred water (35.77%). The coordination degree of the NSGA- II + ARSBX algorithm in different level years under different guarantee rates are more than 0.8, which is better than that of the NSGA- II algorithm. Studies show that medium or even high water-saving awareness is needed to improve water resources shortage under the guarantee rate of 75% and 95%. Furthermore, unconventional water resources account for more than a quarter of the total water supply, and incorporating unconventional water resources into the water supply system can play a significant role in alleviating water resources scarcity. Compared with the NSGA- II algorithm, the NSGA- II + ARSBX algorithm has better feasibility in optimal allocation of water resources and can provide a new approach for solving the optimal allocation model of water resources.

Key words: water resources allocation; NSGA- II + ARSBX algorithm; evaluation of coupling coordination degree; water-saving awareness; unconventional water resource; Taiyuan City

我国已进入高质量发展阶段,需水要求与水资源供应能力之间的矛盾愈发尖锐^[1-5],以水资源为纽带促进经济社会与生态环境协调发展,对水资源进行合理的规划与配置,已成为破解困境的重要选择。供需预测是水资源配置的前提,需水侧可通过提高

用水效率来减少水资源的过度消耗,供水侧可以增加水源储备以应对日益增长的需水要求。增强节水意识是提高用水效率的途径之一,而开发利用非常规水可以增加水源储备,为提升水安全保障能力提供有力支撑,因此,将二者相结合来实现水资源优化

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFC0408601);国家自然科学基金项目(52279020);山西省科技创新人才团队专项(202204051002027)

作者简介:刘欣(2000—),女,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:694671793@qq.com

通信作者:赵雪花(1974—),女,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:zhaoxuehua@tyut.edu.cn

配置能有效缓解水资源供需紧张带来的压力。

水资源配置从“就水论水”演变为“量质一体化”^[6],理论方法逐渐发展成熟,因此许多学者把研究目光转向模型求解方法的改进和创新。水资源优化配置一般涉及多重目标函数的权衡^[7],求解多目标优化问题的常用方法主要有两种:一种是将多目标问题转化为单目标问题,例如萤火虫算法^[8]、灰狼算法^[9]、粒子群算法^[10]等,该类方法虽然简便易行,但无法了解各目标间的限制关系,且存在解集质量和多样性受限、参数选择不当导致精度不理想以及早熟收敛等各类问题;另一种是应用多目标智能优化算法直接求解,一次运行即可获得多个非支配性解,为决策者提供丰富的方案,其中 NSGA-II 算法^[11-14]及 NSGA-III 算法^[15-17]具有善于全局优化、适用于数学表达式复杂的现实问题等特点,广泛应用于水资源配置领域。NSGA-III 算法主要用于解决超多目标优化问题(通常目标在 4 个及以上),且其计算效率较 NSGA-II 算法低,因此 NSGA-II 算法更适合解决目标为 3 个的多目标优化问题^[18]。结合水资源优化配置的特点,配水量之间存在相互依存与制约的关系,而当所求解多目标优化问题涉及的变量内部存在联系时,传统的 NSGA-II 算法无法得到一组良好的帕累托最优解,产生了非支配解集与决策变量不平行的旋转问题。为此, Pan 等^[19]通过改进模拟二进制交叉算子,并使用自适应算子选择策略来优化子代种群的分布,提出了基于自适应旋转的模拟二进制交叉的第二代非支配排序遗传(NSGA-II + ARSBX)算法。该算法在解决旋转问题时寻优能力更强,并能得到一组收敛性较好的解,有效提高了多目标优化算法处理旋转问题的性能。目前, NSGA-II + ARSBX 算法较少应用于水资源配置领域,本文尝试使用该算法进行城市水资源配置,以期模型求解提供新途径。

为确保水资源配置的科学合理,需要对配置方案进行综合评价。水资源优化配置方案评价方法包括层次分析法^[20]、模糊综合评价法^[21]、逼近理想解排序法^[22]等。层次分析法易于操作,但评价结果对专家主观判断的依赖程度较高,影响方案评价的客观性。模糊综合评价法中隶属函数的建立主观性比较强。逼近理想解排序法是一种逼近理想解的排序法,但其对多系统间协同作用的评估能力不足,难以全面反映水资源配置的综合效果。耦合协调度评价模型^[23]基于系统论和协同论的思想,不仅可以计算方案的综合得分,还可以评估多个系统之间的相互作用及影响程度,判断方案是否符合协调发展的要求,能够在一定程度上弥补上述方法的不足,为决策

者提供科学依据,有助于实现经济社会与生态环境协调发展的目标。

综上,本文以太原市为研究区域,设置考虑节水意识和非常规水的供需预测情景,以经济、社会和环境效益最大作为目标建立水资源优化配置模型,基于 NSGA-II + ARSBX 算法求解得到不同水平年不同保证率下水资源优化配置方案集,构建多系统耦合协调度评价模型评价该算法的求解能力,并与 NSGA-II 算法进行对比,以期城市水资源优化配置模型求解提供新途径。

1 水资源优化配置模型

1.1 目标函数

a. 经济效益。以供水净效益 f_1 最大作为经济效益目标:

$$\max f_1 = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (b_{ij} - c_{ij}) x_{kij} \alpha_{ij} \beta_{ij} \quad (1)$$

式中: K 为子区个数,本文 $K=10$; I 为子区水源个数,本文 $I=4$,包括地表水、地下水、外调水和非常规水; J 为子区用水户个数,本文 $J=5$,包括生活、第一产业、第二产业、第三产业以及生态用水户; b_{ij} 为水源 i 向用水户 j 的单位供水效益系数; c_{ij} 为水源 i 向用水户 j 的单位供水费用系数; x_{kij} 为 k 子区内水源 i 向用水户 j 的供水量; α_{ij} 为水源 i 向用水户 j 的供水次序系数; β_{ij} 为水源 i 对用水户 j 的配水优先系数^[24]。

b. 环境效益。以污染物排放量 f_2 最低作为环境效益目标:

$$\min f_2 = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J (0.01 h_j d_j \sum_{i=1}^I x_{kij}) \quad (2)$$

式中: h_j 为用水户 j 排放污染物的质量浓度; d_j 为用水户 j 的污染物排放系数。

c. 社会效益。以总缺水量 f_3 最小作为社会效益目标:

$$\min f_3 = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J (D_{kj} - \sum_{i=1}^I x_{kij}) \quad (3)$$

式中 D_{kj} 为 k 子区内用水户 j 的需水量。

1.2 约束条件

a. 供水能力约束。水源 i 的供水总量不能超过其可供水量:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J x_{kij} \leq W_i \quad (4)$$

式中 W_i 为水源 i 的可供水量。

b. 基本用水保证约束。用水户 j 的供水量与用水户 j 的需水量之比应大于用水户 j 的需水保证率:

$$\eta_j \leq \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I x_{kij} / \sum_{k=1}^K D_{kj} \leq 1 \quad (5)$$

式中 η_j 为用水户 j 的需水保证率。

c. 非负约束。 k 子区内水源 i 对用水户 j 的供水量应非负:

$$x_{kij} \geq 0 \quad (6)$$

2 模型求解及方案评价

2.1 NSGA-II+ARSBX 算法

NSGA-II算法相比NSGA算法,主要进行了以下3个方面的改进:引入精英策略,提出了快速非支配排序法,用拥挤度和拥挤度比较算子代替需要指定共享半径的适应度共享策略^[25]。为解决非支配解集与决策变量不平行的旋转问题,NSGA-II+ARSBX算法有2项创新操作:①提出基于旋转的模拟二进制交叉算子;②使用自适应算子选择策略。

2.1.1 基于旋转的模拟二进制交叉算子

当面临非支配解集与决策变量不平行的旋转问题时,使用模拟二进制交叉算子会导致生成的子代解远离父代解,而基于旋转的模拟二进制交叉算子通过引入旋转特性来解决这一问题:先将父代解旋转后获得子代解,再将获得的解集逆向旋转以恢复至原始方向,该过程使新算子得到的子代解相较于模拟二进制交叉算子的子代解更贴近其父代解,从而获得更优的帕累托最优解。

2.1.2 自适应算子选择策略

在解决旋转问题时使用模拟二进制交叉算子作为交叉算子无法获得理想的结果,而解决常规问题时使用基于旋转的模拟二进制交叉算子往往会降低算法的收敛速度,因此使算法能够自适应地选择交叉算子至关重要。在NSGA-II+ARSBX算法中引入概率参数 p_s ,将 p_s 作为使用模拟二进制交叉算子的概率, $1-p_s$ 则为使用基于旋转的模拟二进制交叉算子的概率,且 p_s 的值在每一代都会被更新。

2.1.3 算法流程

步骤1 初始化种群。根据约束条件随机产生规模为 N 的初始种群 $P_{(g)}$ (此时 $g=1$, g 为迭代次数),计算 $P_{(g)}$ 中每个个体的目标函数值,并依次进行非支配排序和拥挤度计算。

步骤2 生成父代种群。 $g=1$ 时,对 $P_{(g)}$ 每个个体的排序和拥挤度进行比较,选择最优个体生成新一代的父代种群; $g>1$ 时,将上一次生成的新种群作为新一代的父代种群。

步骤3 生成子代种群。将父代种群进行选择、交叉、变异操作,进而产生新的子代种群。交叉选用自适应算子选择策略,即自适应地选择模拟二

进制交叉算子或基于旋转的模拟二进制交叉算子进行计算。

步骤4 种群合并。将父代种群与子代种群进行合并。

步骤5 生成新的种群。根据每个个体的排序和拥挤度选择优秀的个体加入种群 $P_{(g+1)}$ 。

步骤6 终止条件。令 $g=g+1$,判断 g 是否大于所设定的迭代次数最大值 g_{\max} ,若 g 大于 g_{\max} 则算法终止,并将 $P_{(g)}$ 中的非支配性解集作为最终结果;否则,返回步骤2。

2.2 多系统耦合协调度评价模型

水资源配置模型通过多目标算法进行求解时会产生多个非支配性解,分别对应多个配置方案。为促进经济社会与生态环境协调发展,本文依据权重和各目标函数值计算各方案的综合效益,将得到的综合效益进行排序并选择综合效益最大的方案作为最优方案,假定模型中各目标同等重要,故取经济、环境及社会效益的权重均为 $1/3$ 。综合效益计算公式如下:

$$\max Q = \omega_1 q_1 + \omega_2 q_2 + \omega_3 q_3 \quad (7)$$

$$\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1 \quad (8)$$

式中: Q 为综合效益; ω_1 、 ω_2 、 ω_3 分别为经济、环境、社会效益的权重; q_1 、 q_2 、 q_3 分别为经济、环境、社会效益归一化处理后的函数值。

为定量评价NSGA-II+ARSBX算法解决水资源多目标优化配置问题的能力,基于科学性、客观性、可比性、数据可获得性等原则,从经济、社会及环境角度出发,建立多系统耦合协调度评价模型,具体指标及对应权重见表1。指标属性为正,表明该指标越大对子系统越好;指标属性为负,表明该指标越小对子系统越好。按照同一系统下各二级评价指标权重之和为1的原则,利用序关系分析(G1)法^[26]和熵权法的算术平均值计算组合权重,并结合各指标的评价指数计算经济、社会及环境子系统的综合评价指数,最后通过计算系统间的耦合度与多系统的综合得分得到系统协调度,具体公式见式(9)~(12)。

$$X_u = \sum X_{u,r} \lambda_{u,r} \quad (9)$$

$$C_3 = \sqrt[3]{X_1 X_2 X_3 / [(X_1 + X_2 + X_3) / 3]^3} \quad (10)$$

$$T_3 = \lambda_1 X_1 + \lambda_2 X_2 + \lambda_3 X_3 \quad (11)$$

$$Z_3 = \sqrt{C_3 T_3} \quad (12)$$

式中: X_u 为系统 u 的综合评价指数($u=1,2,3$); $X_{u,r}$ 为系统 u 中二级指标 r 的评价指数; $\lambda_{u,r}$ 为系统 u 中二级指标 r 的权重; C_3 为系统间的耦合度(取值范围 $0\sim 1$,耦合度越接近1,说明系统之间相关性越高); T_3 为多系统的综合得分; λ_1 、 λ_2 、 λ_3 分别为经

表1 多系统耦合协调度评价模型指标及权重

一级指标	一级指标权重	二级指标	二级指标权重			属性
			G1法	熵权法	综合权重	
经济	1/3	万元GDP用水量	0.48	0.28	0.38	负
		第二产业比重	0.30	0.29	0.29	正
		第三产业比重	0.22	0.43	0.32	正
社会	1/3	人均供水水量	0.55	0.64	0.59	正
		缺水率	0.45	0.36	0.41	负
环境	1/3	地下水供水水量占比	0.50	0.29	0.39	负
		非常规水供水水量占比	0.50	0.71	0.61	正

济、社会及环境子系统的权重; Z_3 为系统协调度。

3 研究区概况与模型设置

3.1 研究区概况

太原市是中国重要的能源及重工业基地,地处华北平原西北部,市内主要河流有屯兰川、大川河、杨兴河、中社河、横河、小返河、凌井河、泥屯河等,分属黄河和海河两大流域。多年平均降水量为 388~485 mm,降水主要集中于夏、秋两季,年际气候变化较大,气象灾害频繁。市区各支流的大部分水体不满足水功能区水质目标,且水资源过度开发,地下水超采问题严重,超采总面积达 3 384 km²,泉水断流,河道径流量不断减少,亟须严格控制水污染,加快地下水超采治理,推进泉域保护和晋祠泉复流工作。根据《太原市国民经济和社会发展统计公报》《太原市水资源公报》,2018 年太原市总人口 442.15 万人,地区生产总值 3 498.70 亿元,水资源总量 61 539 万 m³,人均水资源量仅为 139.18 m³/人,是山西省人均水资源量的 42%,是我国人均水资源量的 32%,水资源短缺已成为太原市高质量发展的限制因素之一。

3.2 供需预测情景

本文将研究区域分为 10 个子区,分别为小店区、迎泽区、杏花岭区、尖草坪区、万柏林区、晋源区、清徐县、阳曲县、娄烦县和古交市。以 2018 年作为基准年,对各子区考虑无、低、中和高 4 个等级的节水意识,参考 DB14/T 1049.3—2015《山西省用水定额》,将不同的节水意识参数作为系数与用水定额相乘,并采用定额法预测 2025 年和 2030 年太原市 4 种节水意识情景下不同保证率(50%、75%、95%)的需水量。保证率 95%时为特枯水年,水资源严重短缺,由于同一水平年不同保证率下需水量的差异主要由灌溉需水造成,考虑到特殊干旱年份大幅增加灌溉需水量已不现实,因此各水平年保证率为 95%的灌溉需水量按保证率为 75%时的需水量计算。为简化计算过程并方便对比,同一水平年相同等级节水意识情景下各需水量采用相同的节水意识参数。参考已有研究^[27],对所假设的太原市 4 个等

级的节水意识参数进行计算,计算公式见式(13),结果见表 2。太原市 4 种节水意识情景的需水量预测结果见表 3。

$$S = M / (M + e^{-\theta \Delta t}) \quad (13)$$

式中: S 为节水意识参数; M 为超参数,根据太原市的人均用水量取 $M=0.14$; θ 为节水意识增长率; Δt 为时间间隔。

表2 太原市不同情景下的节水意识参数 单位:%

年份	节水意识参数			
	无节水意识	低节水意识	中节水意识	高节水意识
2025	0.00	14.73	16.57	21.99
2030	0.00	16.71	20.32	31.73

为优化供水结构,将非常规水纳入供水系统。太原市非常规水以再生水为主,故本文提到的非常规水利用主要为再生水的利用。考虑太原市内城乡集中式供水工程 1 152 处,已建黄河水源呼延水厂 1 座,大型水库 2 座,小型水库 15 座,污水处理厂 14 座;目前还有御道川水库、万家寨引黄工程、滹沱河太原调水工程、东西山水网工程、中部引黄工程等在建工程,对太原市不同水平年不同保证率下的可供水量进行预测。为保护地表水,加快地下水超采治理,加大非常规水的开发利用,并充分利用外调水的分配指标,预计未来地表水及地下水可供水量将逐渐减少,而外调水及非常规水可供水量逐渐增加,具体结果见表 4。

在不同水平年不同保证率下,考虑不同等级节水意识的需水情景与纳入非常规水的供水情景,共得到 24 种供需组合情景。由于组合情景数量较多,为方便分析,需要进行情景的取舍。根据太原市供需平衡分析结果,当供水量大于需水量时,选择余水量较少的情景,否则选择缺水量较少的情景,最终情景选择如下:2025 年保证率 50%、75%、95%下需水情景分别为低、中、高节水意识情景;2030 年保证率 50%、75%、95%下需水情景分别为低、中、高节水意识情景;2025 年与 2030 年不同保证率下的供水情景均采用由地表水、地下水、外调水及非常规水组成的联合供水模式。

表3 太原市4种节水意识情景的需水量预测结果

单位:万 m³

年份	节水意识情景	生活需水量	第一产业需水量			第二产业需水量	第三产业需水量	生态需水量	总需水量		
			50%	75%	95%				50%	75%	95%
2025	无节水意识	23 459	22 291	26 567	27 121	44 287	9 325	4 233	103 595	107 871	108 425
	低节水意识	20 004	19 007	22 654	23 126	37 764	7 952	4 233	88 960	92 607	93 079
	中节水意识	19 572	18 596	22 164	22 626	36 949	7 780	4 233	87 130	90 698	91 160
	高节水意识	18 301	17 389	20 725	21 157	34 549	7 275	4 233	81 747	85 083	85 515
2030	无节水意识	27 408	20 206	24 375	24 957	54 163	13 564	6 703	122 044	126 213	126 795
	低节水意识	22 828	16 829	20 302	20 787	45 112	11 298	6 703	102 770	106 243	106 728
	中节水意识	21 839	16 100	19 421	19 885	43 158	10 808	6 703	98 608	101 929	102 393
	高节水意识	18 712	13 795	16 641	17 038	36 977	9 260	6 703	85 447	88 293	88 690

表4 太原市不同水平年的可供水量预测结果

单位:万 m³

年份	地表水			地下水	外调水	非常规水	总可供水量		
	50%	75%	95%				50%	75%	95%
2025	23 403	20 817	17 430	17 930	27 242	20 621	89 196	86 610	83 223
2030	20 239	18 002	15 073	15 534	40 217	30 645	106 635	104 398	101 469

3.3 模型参数

a. 水源 i 向用水户 j 的供水次序系数 α_{ij} 和水源 i 对用水户 j 的配水优先系数 β_{ij} 。供水次序系数针对不同的用水户,根据各水源的水质条件确定;配水优先系数针对不同的水源,根据各用水部门的重要程度确定^[28]。根据“优水优用,分质供水”原则,非常规水不作为生活用水和第三产业用水的水源,水质较好的地下水不作为生态用水的水源,在用水过程中,首先保证生活用水,其次是生产用水和生态用水。 α_{ij} 和 β_{ij} 具体计算公式为

$$\alpha_{ij} = \frac{1 + n_{\max} - n_{ij}}{\sum_{i=1}^I (1 + n_{\max} - n_{ij})} \quad (14)$$

$$\beta_{ij} = \frac{1 + m_{\max} - m_{ij}}{\sum_{j=1}^J (1 + m_{\max} - m_{ij})} \quad (15)$$

式中: n_{\max} 为供水次序序号的最大值; n_{ij} 为水源 i 向用水户 j 的供水次序序号; m_{\max} 为配水优先次序序号的最大值; m_{ij} 为用水户 j 使用水源 i 的配水优先次序序号。

b. 水源 i 向用水户 j 的单位供水效益系数 b_{ij} 和费用系数 c_{ij} 。第一、第二和第三产业的效益系数可采取各产业万元增加值用水量的倒数;结合太原市的产业结构特点,生活用水效益系数根据用水的重要程度并参考第二产业的效益系数确定;生态环境与居民生活息息相关,出于对生态环境的保护考虑,生态用水效益系数按照稍低于生活用水的原则确定。各用水户费用系数根据水价标准确定,具体结果见表5。

c. 用水户 j 排放污染物的质量浓度 h_j 和污染物排放系数 d_j 。由于太原市污染物以 COD 为主,故本文污染物排放质量浓度用 COD 排放质量浓度来表示。依据 GB 50318—2000《城市排水工程规划规

表5 单位供水效益系数和费用系数

单位:元/m³

用水类别	2025年		2030年	
	效益系数	费用系数	效益系数	费用系数
生活	399.63	2.8	476.29	3.0
第一产业	76.39	0.6	76.39	0.8
第二产业	349.63	4.8	426.29	5.0
第三产业	2 620.61	50.0	2 750.16	80.0
生态	364.63	2.8	441.29	3.0

范》并结合太原市实际发展状况确定 h_j 和 d_j ,暂不考虑生态用水排污。最终确定生活用水 COD 排放质量浓度为 300 mg/L,第一产业为 50 mg/L,第二产业为 230 mg/L,第三产业为 300 mg/L;生活污水排放系数取 0.8,第一产业取 0.1,第二产业取 0.6,第三产业取 0.8。

d. 用水户 j 的需水保证率 η_j 。 η_j 取值按照用水户的优先原则确定,生活、生态及第三产业取 0.9,第一产业取 0.8,第二产业取 0.85。

4 结果与分析

4.1 供需平衡分析

对太原市不同水平年不同保证率的水资源供需平衡情势进行分析,未考虑节水意识和非常规水时,2025年保证率为50%、75%、95%的情况下缺水率分别为33.80%、38.83%、42.26%;2030年各保证率下缺水率分别为37.74%、41.56%、44.14%。这表明,随着经济社会快速发展,若未采取任何开源节流措施,太原市未来将面临严重的缺水态势,且供需矛盾可能会进一步激化。在考虑不同节水意识、开发利用非常规水的情况下,根据不同保证率下的可供水量选择合适的节水意识情景,仅2025年保证率为95%时仍存在缺水问题。结果表明,考虑节水意识和非常规水有助于缓解水资源紧张的问题。

4.2 方案效果评价

基于供需水情景选择结果,在 PlatEMO 平台^[29]

上分别运行 NSGA-II + ARSBX 算法和 NSGA-II 算法,种群规模为 100,迭代次数为 100,最大评价次数为 10 000,模拟生成 Pareto 最优解集。

4.2.1 定性分析

为判断 NSGA-II + ARSBX 算法和 NSGA-II 算法对各目标的优选能力,分析经济效益目标、环境效益目标、社会效益目标这 3 个目标中任意 2 个目标间的关系以及 Pareto 解集的分布情况。以 2025 年保证率 75% 为例,结果见图 1。根据所建立的太原市水资源优化配置模型,可以得到经济效益目标函数值越大越好,而环境效益及社会效益目标函数值越小越好。从图 1 可以看出环境效益与经济效益目标函数值呈正相关关系,即经济的发展会导致用水量增加,用水量的增加会使污染物排放量增多,这表明经济的发展会带来一系列的环境污染问题;社会效益与经济效益目标函数值呈负相关关系,即经济发展需要水资源的支撑,配置水量越多则缺水量越少;环境效益与社会效益目标函数值呈负相关关系,说明供水量的增加会引起污染物排放量的增大。从 Pareto 解集的分布情况来看,大多数情况下 NSGA-II + ARSBX 算法的经济效益比 NSGA-II 算法的分布更靠右,例如在 2025 年 75% 保证率下,虽然 NSGA-II + ARSBX 算法得出的经济效益分布并未全面优于 NSGA-II 算法,但其经济效益的最大值依然高于 NSGA-II 算法;此外,二者的环境效益与社会效益分

布基本重合。因此,尽管在个别条件下 NSGA-II + ARSBX 算法经济效益的优势不显著,但总体上仍能得到更高的经济效益,而在环境效益和社会效益的优选能力上 NSGA-II + ARSBX 算法与 NSGA-II 算法基本相同。

4.2.2 定量分析

采用多系统耦合协调度评价模型对综合效益最大的方案进行评价,利用 G1 法和熵权法计算二级指标权重,各指标权重见表 1。按式(9)~(12)可得不同算法的耦合协调度,结果见表 6。由表 6 可知,总体上 NSGA-II + ARSBX 算法的综合得分、耦合度及协调度均优于 NSGA-II 算法,说明应用 NSGA-II + ARSBX 算法得到的水资源配置方案优于 NSGA-II 算法得到的水资源配置方案。此外,2025 年各保证率下综合得分、耦合度及协调度的数值波动较为显著,而 2030 年的各值表现较为平稳,说明随着人们节水意识的提升,水资源配置系统的耦合协调度会更加稳定。

4.3 水资源配置结果

基于以上分析,可以得到 NSGA-II + ARSBX 算法在水资源配置上具有更强的能力,因此选择 NSGA-II + ARSBX 算法对太原市不同水平年不同保证率下的水资源进行配置,得到综合效益最大方案的水量分配结果见表 7,该配置结果符合 DB14/1928—2019《山西省污水综合排放标准》。从表中

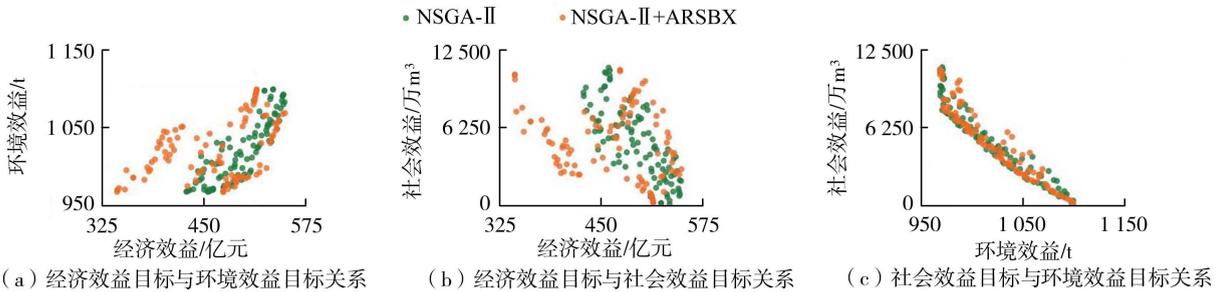


图 1 2025 年保证率 75% 下 3 个目标间相关关系

表 6 太原市多系统耦合协调度计算结果

年份	保证率/%	算法	经济得分	社会得分	环境得分	综合得分	耦合度	协调度
2025	50	NSGA-II	0.68	0.87	0.72	0.76	0.99	0.87
	50	NSGA-II + ARSBX	0.96	0.78	0.99	0.91	0.99	0.95
	75	NSGA-II	0.62	0.80	0.65	0.69	0.99	0.83
	75	NSGA-II + ARSBX	0.92	0.72	0.77	0.80	0.99	0.89
	95	NSGA-II	0.47	0.77	0.12	0.45	0.78	0.59
	95	NSGA-II + ARSBX	0.59	0.56	0.87	0.67	0.98	0.81
2030	50	NSGA-II	0.74	0.83	0.63	0.73	0.99	0.85
	50	NSGA-II + ARSBX	0.91	0.77	0.99	0.89	0.99	0.94
	75	NSGA-II	0.67	0.80	0.61	0.69	0.99	0.83
	75	NSGA-II + ARSBX	0.72	0.90	0.93	0.85	0.99	0.92
	95	NSGA-II	0.62	0.81	0.72	0.72	0.99	0.84
	95	NSGA-II + ARSBX	0.74	0.92	0.92	0.86	0.99	0.92

可以看出,同一水平年不同保证率下的缺水率并未呈现明确的规律性;不同水平年同一保证率下的缺水率具有一定的规律,具体表现为 2030 年 3 种保证率下的缺水率较 2025 年均有所降低。

表 7 NSGA-II+ARSBX 算法求得综合效益最大方案
水量分配结果

年份	保证率/%	预测需水量/万 m ³	优化配水量/万 m ³	缺水率/%
2025	50	88960	86056	3.26
	75	85083	78502	7.73
	95	85515	78986	7.63
2030	50	102770	100111	2.59
	75	101929	101127	0.79
	95	88690	86951	1.96

从供水结构来看,外调水配置平均占比为 35.77%,是 4 种水源中供水比例最大的,非常规水和地表水二者位居其次,平均占比分别为 26.08% 和 20.47%,地下水供水量平均占比 16.70%,是 4 种水源中供水比例最小的,这表明将非常规水纳入供水系统不仅可以有效缓解太原市水资源的紧张局面,还能减少地下水的开采以涵养地下水资源。从用水户一侧来看,绝大部分水量供给第二产业,其配置水量平均占比为 41.60%;其次是第一产业,平均占比为 21.61%;生活用水平均占比为 20.86%;第三产业平均占比为 9.94%;生态用水最少,其平均占比为 5.99%。这与太原市是中国重要的能源及重工业基地有关,为支撑第二产业的发展,第二产业的用水量最多。

5 结 论

a. 优化配置太原市水资源,以太原市为研究区域,设置考虑节水意识和非常规水的供需预测情景,并根据不同保证率下的可供水量选择合适的节水意识情景。研究表明,保证率 75%、95%时需要中节水意识甚至高节水意识才能改善缺水情况。此外,配置结果中非常规水供水量平均占比为 26.08%,占总可供水量比例超过 1/4,这表明将非常规水纳入供水系统对缓解太原市水资源紧张起到了重要作用。

b. 采用 NSGA-II+ARSBX 算法求解水资源优化配置模型,并建立多系统耦合协调度评价模型评价其求解能力。通过定性分析可知,相比 NSGA-II 算法,NSGA-II+ARSBX 算法能得到更高的经济效益,而两算法在环境效益和经济效益上的优选能力基本相当。通过定量分析可知,总体上 NSGA-II+ARSBX 算法的综合得分、耦合度及协调度均优于 NSGA-II 算法。因此,相较于 NSGA-II 算法,NSGA-

II+ARSBX 算法在水资源优化配置中具有更好的可行性,能够为水资源优化配置模型求解提供新途径。

c. 基于 NSGA-II+ARSBX 算法的太原市水资源优化配置结果如下:2025 年保证率为 50%时优化配置水量为 86056 万 m³,缺水率为 3.26%,保证率 75%时优化配置水量为 78502 万 m³,缺水率为 7.73%,保证率 95%时优化配置水量为 78986 万 m³,缺水率为 7.63%;2030 年保证率为 50%时优化配置水量为 100111 万 m³,缺水率为 2.59%,保证率 75%时优化配置水量为 101127 万 m³,缺水率为 0.79%,保证率 95%时优化配置水量为 86951 万 m³,缺水率为 1.96%;且 2030 年各保证率下缺水率较 2025 年有不同程度的降低。

参考文献:

[1] 栾清华,高昊悦,刘红亮,等.基于 GWAS 模型的武安市水资源优化配置[J].水资源保护,2023,39(3):32-42. (LUAN Qinghua, GAO Haoyue, LIU Hongliang, et al. Optimal allocation of water resources in Wu'an City based on GWAS model[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3):32-42. (in Chinese))

[2] 王煜,彭少明,武见,等.黄河流域水资源均衡调控理论与模型研究[J].水利学报,2020,51(1):44-55. (WANG Yu, PENG Shaoming, WU Jian, et al. Research on the theory and model of water resources equilibrium regulation in the Yellow River basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(1):44-55. (in Chinese))

[3] 姜秋香,曹璐,王子龙,等.基于 CVaR-TSP 的黑龙江市水资源配置及风险管理[J].水利水电科技进展,2022,42(1):40-46. (JIANG Qiuxiang, CAO Lu, WANG Zilong, et al. Urban water resources allocation and risk management in Heilongjiang Province based on CVaR-TSP [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(1):40-46. (in Chinese))

[4] 姜秋香,何晓龙,王子龙,等.基于区间多阶段随机规划的水资源优化配置模型及应用[J].水利水电科技进展,2022,42(6):1-7. (JIANG Qiuxiang, HE Xiaolong, WANG Zilong, et al. A model for optimal allocation of water resources based on interval multistage stochastic programming and its application [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(6):1-7. (in Chinese))

[5] 邱曦,马军霞,左其亭,等.基于区域水平衡理论和 SWAT 模型的沁河流域水收支平衡演变分析[J].水利水电科技进展,2024,44(1):9-15. (QIU Xi, MA Junxia, ZUO Qiting, et al. Evolution analysis of water budget balance in Qinhe River Basin based on regional water balance theory and SWAT model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(1):9-15.

(in Chinese))

- [6] 王浩,游进军. 中国水资源配置 30 年[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 265-271. (WANG Hao, YOU Jinjun. Progress of water resources allocation during the past 30 years in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 265-271. (in Chinese))
- [7] 吴丹,向筱茜,冀晨辉. 京津冀水资源与产业结构优化适配模型[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(2): 20-26. (WU Dan, XIANG Xiaolian, JI Chenhui. Adaptation model between water resources and industrial structure optimization in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(2): 20-26. (in Chinese))
- [8] 赵燕,武鹏林,祝雪萍. 基于改进萤火虫算法的水资源优化配置[J]. 人民黄河, 2019, 41(5): 62-66. (ZHAO Yan, WU Penglin, ZHU Xueping. Optimal allocation of water resources based on modified firefly algorithm[J]. Yellow River, 2019, 41(5): 62-66. (in Chinese))
- [9] 何灏川,宋松柏,王小军,等. 基于改进灰狼算法的庆阳市水资源优化配置[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(12): 136-146. (HE Haochuan, SONG Songbai, WANG Xiaojun, et al. An improved GWO for optimal allocation of water resources in Qingyang[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2020, 48(12): 136-146. (in Chinese))
- [10] 方国华,王雪,方应学,等. 基于改进粒子群优化算法的区域水量水质联合配置模型[J]. 水资源保护, 2022, 38(3): 58-64. (FANG Guohua, WANG Xue, FANG Yingxue, et al. Regional water quantity and water quality joint allocation model based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3): 58-64. (in Chinese))
- [11] 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))
- [12] LI Jun, SONG Songbai, AYANTOBO O O, et al. Coordinated allocation of conventional and unconventional water resources considering uncertainty and different stakeholders [J]. Journal of Hydrology, 2022, 605: 127293.
- [13] 朱思峰,李子胥. 基于改进型 NSGA-II 算法的晋中市水资源优化配置[J]. 中国农村水利水电, 2023(5): 91-97. (ZHU Sifeng, LI Zixu. Research on the optimal allocation of water resources based on improved NSGA-II algorithm in Jinzhong city[J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(5): 91-97. (in Chinese))
- [14] 郭世浩,殷淑华,姜彤,等. 城市多水源联合供水优化配置研究[J]. 中国农村水利水电, 2023(6): 57-65. (GUO Shihao, YIN Shuhua, JIANG Tong, et al. Research on the optimal allocation of urban multi-water source combined water supply [J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(6): 57-65. (in Chinese))
- [15] 王一杰,王发信,王振龙,等. 基于 NSGA-III 的水资源多目标优化配置研究:以安徽省泗县为例[J]. 人民长江, 2021, 52(5): 73-77. (WANG Yijie, WANG Faxin, WANG Zhenlong, et al. Multi-objective optimal allocation of water resources based on NSGA-III algorithm in Sixian County, Anhui Province[J]. Yangtze River, 2021, 52(5): 73-77. (in Chinese))
- [16] 李建美,田军仓. NSGA-III 算法在水资源多目标优化配置中的应用[J]. 水电能源科学, 2021, 39(2): 22-26. (LI Jianmei, TIAN Juncang. Application of NSGA-III algorithm in multi-objective optimization allocation of water resources[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(2): 22-26. (in Chinese))
- [17] 赵钦,白清俊,聂坤堃,等. 基于 NSGA-III 算法与 TOPSIS 决策下的区域水资源多目标优化配置[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(12): 1233-1240. (ZHAO Qin, BAI Qingjun, NIE Kunkun, et al. Multi-objective optimization allocation of regional water resources based on NSGA-III algorithm and TOPSIS decision[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022, 40(12): 1233-1240. (in Chinese))
- [18] 高培超,王昊煜,宋长青,等. 多目标优化 NSGA 系列算法与地理决策:原理、现状与展望[J]. 地球信息科学学报, 2023, 25(1): 25-39. (GAO Peichao, WANG Haoyu, SONG Changqing, et al. NSGA multi-objective optimization algorithms and geographic decision-making: principles, state of the art, and the future [J]. Journal of Geo-Information Science, 2023, 25(1): 25-39. (in Chinese))
- [19] PAN Linqiang, XU Wenting, LI Lianghao, et al. Adaptive simulated binary crossover for rotated multi-objective optimization [J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2021, 60: 100759.
- [20] 李承红,姜卉芳,何英,等. 基于 WRMM 模型的水资源配置及方案优选研究[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(3): 32-38. (LI Chenghong, JIANG Huifang, HE Ying, et al. Allocation of water resources and scheme optimization based on WRMM model [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2016, 27(3): 32-38. (in Chinese))
- [21] 何国华,汪妮,解建仓,等. 基于熵权的水资源配置和谐性模糊综合评价模型的建立及应用[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(2): 214-220. (HE Guohua, WANG Ni, XIE Jiancang, et al. Establishment and application of fuzzy comprehensive assessment model for harmony of water allocation based on entropy weight [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2016, 44(2): 214-220. (in Chinese))

(下转第 103 页)

- waste cemented paste backfill under the combined action of dry-wet cycles and sulphate erosion [J]. *Materials*, 2022, 15(4):1484.
- [16] HE Jun, SHI Xiaokang, LI Zhixiang, et al. Strength properties of dredged soil at high water content treated with soda residue, carbide slag, and ground granulated blast furnace slag [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 242:118126.
- [17] YU Yuzhen, PU Jialiu, UGAI K. A damage model for soil-cement mixture [J]. *Soils and Foundations*, 1998, 38(3):1-12.
- [18] CHEN Huie, CHEN Zongfang, ZHENG Chuangfen, et al. Damage evolution process of cement-stabilized soil based on deformation and microstructure analysis [J]. *Marine Georesources and Geotechnology*, 2018, 36(1):64-71.
- [19] GENG Kaiqiang, CHAI Junrui, QIN Yuan, et al. Damage evolution, brittleness and solidification mechanism of cement soil and alkali-activated slag soil [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 25:6039-6060.
- [20] 李新平, 路亚妮, 王仰君. 冻融荷载耦合作用下单裂隙岩体损伤模型研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(11): 2307-2315. (LI Xiping, LU Yani, WANG Yangjun. Research on damage model of single jointed rock masses under coupling action of freeze-thaw and loading [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(11):2307-2315. (in Chinese))
- [21] LUO Zhengdong, ZHANG Benben, ZOU Jian, et al. Sulfate erosion resistance of slag-fly ash based geopolymer stabilized soft soil under semi-immersion condition [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, 17:e01506.
- [22] 万志辉, 戴国亮, 龚维明, 等. 海水侵蚀环境对钙质砂水泥石强度影响及微观结构研究 [J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(增刊1):65-69. (WAN Zhihui, DAI Guoliang, GONG Weiming, et al. Strength and microstructure of calcareous sand-cemented soil under seawater erosion environment [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(Sup1):65-69. (in Chinese))
- [23] HE Rui, ZHENG Suining, GAN V J L, et al. Damage mechanism and interfacial transition zone characteristics of concrete under sulfate erosion and dry-wet cycles [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 255:119340. (收稿日期:2024-01-12 编辑:熊水斌)

.....

(上接第 86 页)

- [22] 龚艳冰. 基于正态云组合赋权的水资源配置方案综合评价方法 [J]. *水资源保护*, 2022, 38(2):56-61. (GONG Yanbing. Comprehensive evaluation method of water resource allocation schemes based on normal cloud combination weighting [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(2):56-61. (in Chinese))
- [23] 王富强, 应卓晖, 吕素冰, 等. 京津冀地区水-经济-生态耦合协调发展特征评价 [J]. *水资源保护*, 2022, 38(5):80-86. (WANG Fuqiang, YING Zhuohui, LYU Subing, et al. Evaluation of coupling coordinated development characteristics of water-economy-ecology system in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(5):80-86. (in Chinese))
- [24] 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))
- [25] 黄显峰, 王宁, 刘志佳, 等. 基于改进 NSGA-II 算法的梯级水库多目标优化调度 [J]. *水利水电科技进展*, 2024, 44(4):51-58. (HUANG Xianfeng, WANG Ning, LIU Zhijia, et al. Multi-objective optimal operation of cascade reservoirs based on improved NSGA-II algorithm [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2024, 44(4):51-58. (in Chinese))
- [26] 官诚举, 李伟伟, 郭亚军. 群体评价中的序关系分析法 [J]. *运筹与管理*, 2020, 29(11):152-156. (GONG Chengju, LI Weiwei, GUO Yajun. Rank correlation analysis method in group evaluation [J]. *Operations Research and Management Science*, 2020, 29(11):152-156. (in Chinese))
- [27] 刘晶, 许月萍, 郭玉雪, 等. 考虑再生水的多种组合情景需水预测及供需平衡分析 [J]. *中国农村水利水电*, 2022(3):39-47. (LIU Jing, XU Yueping, GUO Yuxue, et al. Water demand prediction and supply and demand balance analysis of multiple combination scenarios considering the use of reclaimed water [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2022(3):39-47. (in Chinese))
- [28] 方国华, 赵文萃, 李鑫, 等. 南水北调东线工程江苏段水资源调配研究 [J]. *水资源保护*, 2023, 39(4):1-8. (FANG Guohua, ZHAO Wencui, LI Xin, et al. Study on water resources dispatching and allocation in Jiangsu Section of Eastern Route Project of South-to-North Water Diversion Project [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(4):1-8. (in Chinese))
- [29] TIAN Ye, CHENG Ran, ZHANG Xingyi, et al. PlatEMO: a MATLAB platform for evolutionary multi-objective optimization [J]. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 2017, 12(4):73-87. (收稿日期:2023-10-24 编辑:骆超)