

基于NSGA-III算法的水资源优化配置研究

王文川, 陈思展

华北水利水电大学水资源学院, 河南 郑州

收稿日期: 2022年1月20日; 录用日期: 2022年3月16日; 发布日期: 2022年4月21日

摘要

为科学利用和配置有限水资源, 提高区域水资源利用率, 水资源优化配置成为当下研究重点之一。本文以经济、社会、生态为目标, 建立了区域水资源多目标优化配置模型, 以栾川县水资源配置为例, 引入NSGA-III算法对其进行求解, 并与NSGA-II算法进行比较。对比分析了应用NSGA-III和NSGA-II算法求解经济效益目标函数解集的分布图以及三个目标函数的计算结果, 结果表明求解栾川县水资源配置方案时, NSGA-III算法的种群分布比NSGA-II更加均匀集中, 且目标效益值优于NSGA-II。说明利用NSGA-III算法在求解区域水资源配置方案时对目标的选择能力更强, 更适用于解决水资源优化配置问题, 可以在其它区域推广应用。

关键词

多目标, 优化配置, 水资源, NSGA-III算法, 栾川县

Study on Optimal Allocation of Water Resources Based on NSGA-III Algorithm

Wenchuan Wang, Sizhan Chen

College of Water Resources, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: Jan. 20th, 2022; accepted: Mar. 16th, 2022; published: Apr. 21st, 2022

Abstract

In order to scientifically utilize and allocate limited water resources and improve the utilization rate of regional water resources, optimal allocation of water resources has become one of the current research focuses. A multi-objective optimal regional water resources allocation model with economic, social and ecological goals was established. Taking Luanchuan County water resources allocation as an example, NSGA-III algorithm was introduced to solve it and compared with NSGA-II algorithm. The distribution diagram of the solution set of the economic benefit objective function and the calculation

作者简介: 王文川(1976-), 男, 河南鹿邑人, 博士, 教授, 博导, 主要从事工程水文与水资源利用等方面的研究, Email: wangwen1621@163.com

文章引用: 王文川, 陈思展. 基于 NSGA-III 算法的水资源优化配置研究[J]. 水资源研究, 2022, 11(2): 159-168.

DOI: 10.12677/jwrr.2022.112017

results of the three objective functions solved by NSGA-III and NSGA-II algorithm were compared and analyzed. The results show that when solving the water resource allocation scheme of Luanchuan County, the population distribution of NSGA-III algorithm is more uniform and concentration than that of NSGA-II, and the target benefit value is better than NSGA-II. It indicates that NSGA-III algorithm has a stronger ability to select targets when solving regional water resource allocation schemes, and is more suitable for solving optimal water resource allocation problems, which can be popularized and applied in other region.

Keywords

Multi-Objective, Optimal Allocation, Water Resources, NSGA-III Algorithm, Luanchuan County

Copyright © 2022 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

通过对水资源优化配置的研究,不但可以实现水资源的高效利用,而且对水环境保护、水生态修复,促进地区社会经济快速发展具有重要意义。近些年,一些学者在水资源优化配置方面做了很多有意义的研究工作。如刘成良等[1]综合分析经济、社会、环境三个目标,利用遗传算法对邯郸市进行水资源优化配置,降低了结果的不确定性。史银军等[2]以石羊河流域为例,运用 BP 神经网络和遗传算法对该地区水资源优化配置模型进行求解。Parsinejad M.等[3]针对灌区水资源问题,结合神经网络模型,对其进行优化。刘姣等[4]以红兴隆分局为例,采用混合遗传算法,对该研究区域的水资源配置模型进行优化求解,该方法在运行速度上有较大突破。侯景伟[5]以银北灌区为例,耦合 Pareto 蚁群算法与 3S 技术,对灌区进行水资源优化配置,该方法加快了寻优速度,提高了结果精度。李琳等[6]采用改进的 NSGA-II 算法,以河北省某市为实例,进行水资源优化配置,证明了该算法的高效性和较好的适用性。何国华等[7]以咸阳市为例,利用模拟退火遗传算法进行水资源优化配置,结果表明该算法收敛能力与寻优能力较好,但是存在步长搜索不合理等问题。李丹等[8]以汉江中下游的水资源优化配置问题为例,利用三步法简化其求解过程,使得计算更加简便。沙金霞[9]将改进的 NSGA-II 算法,求解邢台市的水资源配置模型,该方法提高了计算精度。曾萌等[10]以广东省作为实例,选择鱼群算法对其进行水资源优化配置,相比于传统算法,该算法的模型简单且收敛速度较快。王慧等[11]利用 NSGA-II 算法应用于灌区进行水资源优化配置,提高了该地区的整体效益。但传统的 NSGA-II 算法在处理复杂多目标问题时,存在种群个体分布较为发散、不集中,容易陷入局部最优,且收敛速度较慢等问题。NSGA-III 算法较模拟退火等算法相比所需参数较少,无需考虑步长影响;在处理高维目标问题时,NSGA-II 主要靠拥挤度进行排序,其高维目标空间作用不太明显,而 NSGA-III 引入广泛分布参考点来维持种群的多样性,防止算法早熟,防止提前收敛到局部最优解;同时 NSGA-III 算法在交叉变异过程中可以提高重组操作的效率,使得收敛速度大大提升。

水资源优化配置属于多目标优化问题,采用遗传算法分析较多。NSGA-II 算法已普遍应用于水资源配置问题,但在处理三个及其以上的高维目标还存在很多问题。而普遍应用于电力系统[12][13]和作业车间调度[14][15]等的 NSGA-III 算法则可以更好处理复杂多目标问题,且在水资源配置中的应用还较为少见。因此,本文以经济效益、社会效益、生态效益为目标建立栾川县水资源优化配置模型,采用 NSGA-III 算法求解其配置方案,以期达到水资源有效合理的利用,促进栾川县社会经济协调发展。

2. NSGA-III 算法

2.1. 算法简介

NSGA-III 算法以 NSGA-II 算法的框架为基础,以参考点为基础的一种非支配排序遗传算法。二者虽基本框架相似,但选择的体系却发生了重大变化。与 NSGA-II 不同的是,NSGA-III 维持种群个体间多样性的方式,是依靠小生境数提供并更新的参考点[16],NSGA-III 适应性良好,收敛性较高。该算法基于遗传算子,生成子代种群,采用参考点选择的精英保留策略,使得非支配层中多样精英解的计算效率大大提高[17]。

2.2. 基本流程

在进化过程中,NSGA-III 首先生成一个随机的初始种群 P_t ,种群大小为 N ,再随机生成一组均匀的参考点。接下来将 P_t 通过重组和突变得种群规模为 N 的后代种群 Q_t 。将初始种群 P_t 和后代种群 Q_t 结合,得到一个新种群 R_t ,该种群规模为 $2N$ 。NSGA-III 算法采用非支配排序的方法,把 R_t 分为不同的非支配等级(F_1, F_2, \dots, F_l)。然后从 F_1 层中选择个体,再从 F_2 层选择个体, ..., 直到第一次 S_t 的值 \geq 或者 $> N$ 。在选择之后,构造一个新的种群大小为 N 的种群 S_t ,并将其作为下一次迭代的父代种群 P_{t+1} 。通常情况下, S_t 只在从 F_1, F_2, \dots, F_{l-1} 中存储个体后,才接受临界层(即 F_l 层)中的某些个体。最后,算法从 F_1 层中选择 $K = N - |P_{t+1}|$ 个体[18]。选择 K 个体的步骤如下:

- 1) 第一步是对 S_t 中个体的客观价值进行归一化处理。
- 2) 定义了参考线,这些参考线是连接超平面上参考点原点。
- 3) 计算出 S_t 中的个体和参考线之间的垂直距离。
- 4) 找出上一步计算的最小垂直距离,根据其将每个种群中的个体与超平面上的一个参考点相关联。
- 5) 计算每个参考点的小生境数(即与每个参考点相关联的 S_t 中个体的数量)。
- 6) 根据计算出的小生境数选择 K 个个体[18]。

算法流程如图 1 所示。

3. 实例应用

3.1. 研究区域概况

栾川县位于河南省洛阳市,总面积 2477 km²。县内有伊河、小河、明白河以及涪河。栾川县水资源量主要由降雨补给,由于当地降雨量相对较少,且时空分布不均,而当地的社会经济正呈现较快的发展势头,水资源需求较大,同时水质和水生态情况也不容乐观,这些原因加剧了该地区的供需水矛盾。急需开展栾川县水资源优化配置研究,以合理分配有限的水资源量,缓解用水矛盾。

3.2. 规划水平年供需水量预测

以 2019 年为现状基准年,分别对规划年 2025 年、2030 年以及 2035 年在保证率 $P = 75\%$ 时进行供需水量预测。栾川县供水水源主要分为地表水资源、地下水资源和再生水资源。主要用水部门分为生活用水、第二产业用水(包含工业和建筑业)、第三产业用水、农业用水以及环境用水。预测规划年的可供水量主要采用趋势线法,预测规划年的需水量主要采用定额法。具体预测结果如表 1 和表 2 所列。

3.3. 水资源优化配置模型

本文以经济、社会、生态三大效益为目标,建立水资源配置模型,其中约束条件包括:供水约束、需水约束、污染物排放约束以及非负约束。

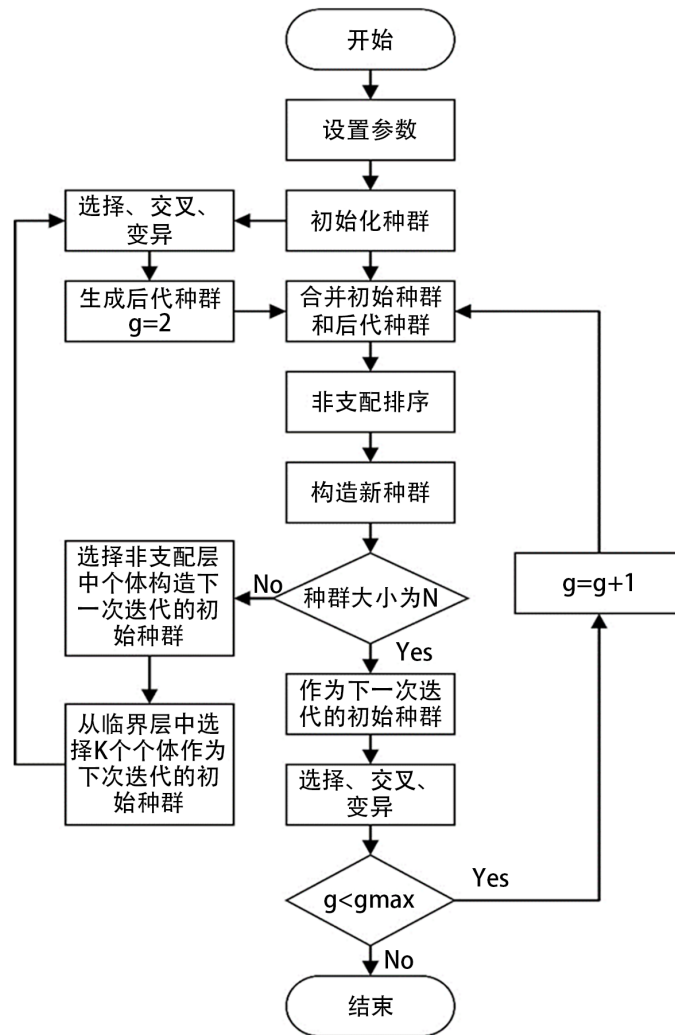


Figure 1. NSGA-III algorithm flow chart
图 1. NSGA-III 算法流程图

Table 1. Prediction results of water supply in different planning years
表 1. 不同规划年的可供水量预测结果

规划年	2025	2030	2035
地表水供水量(万 m ³)	6985	7071	7157
地下水供水量(万 m ³)	997	1014	1032
再生水供水量(万 m ³)	450	757.5	1065
总供水量(万 m ³)	8432	8843	9254

Table 2. Prediction results of water demand in different planning years
表 2. 不同规划年的需水量预测结果

规划年	2025	2030	2035
生活需水量(万 m ³)	1151	1229	1309
第二产业需水量(万 m ³)	3024	3229	3455

Continued

第三产业需水量(万 m ³)	383	509	636
农业需水量(万 m ³)	3402	3144	2900
环境需水量(万 m ³)	632	712	791
总需水量(万 m ³)	8592	8822	9091

3.3.1. 目标函数

1) 经济目标：区域用水经济效益最大。

$$\max f_1(x) = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^5 e_j R_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

式中： i 为供水水源； j 为用水部门； e_j 为用水部门 j 的用水净效益系数(元/m³)； x_{ij} 为供水水源 i 向用水部门 j 的供水量(万 m³)； R_{ij} 为供水水源 i 向用水部门 j 的配水关系。

2) 社会目标：区域缺水最小。

$$\min f_2(x) = \sum_{j=1}^5 \left(D_j - \sum_{i=1}^3 R_{ij} x_{ij} \right) \quad (2)$$

式中： D_j 为各用水部门 j 的需水量(万 m³)。

3) 生态目标：区域重要污染物排放量最小。

$$\min f_3(x) = \sum_{j=1}^5 0.01 d_j w_j \sum_{i=1}^3 R_{ij} x_{ij} \quad (3)$$

式中： d_j 为用水部门 j 单位废水排放中重要污染物的含量(mg/L)； w_j 为用水部门 j 的污水排放系数(%)。

3.3.2. 约束条件

1) 供水约束：保证供水量总和不超过可供水量。

$$\sum_{j=1}^5 R_{ij} x_{ij} \leq S_i, \forall i \quad (4)$$

式中： S_i 为供水水源 i 的可供水量(万 m³)。

2) 需水约束：保证总供水量不超过用水部门的需水量。

$$D_{j\min} \leq \sum_{i=1}^3 R_{ij} x_{ij} \leq D_{j\max}, \forall j \quad (5)$$

式中： D_j 为各用水部门 j 的需水量(万 m³)； $D_{j\min}$ 为最低需水量； $D_{j\max}$ 为额定需水量。

3) 污染物排放约束：保证区域重要污染物排放量不超过污染物规定排放量。

$$\sum_{i=1}^3 0.01 d_j w_j R_{ij} x_{ij} \leq DQ_j, \forall j \quad (6)$$

式中： DQ_j 为用水部门 j 的污染物规定排放量(t)。

4) 非负约束：

$$x_{ij} \geq 0, \forall i, j \quad (7)$$

3.3.3. 模型参数的确定

1) 配水关系

因栾川县降水充足,地表水资源相对丰富,所以地表水供水量占总供水的大部分,地下水不供给环境用水;再生水因是废水处理后可以一定范围内使用的非饮用水,故不供给生活和农业用水。具体如表 3 所列,其中 1 表示配水,0 表示不配水。

Table 3. Water distribution relationship between water sources and water consuming departments

表 3. 各水源向用水部门配水关系

配水关系	生活	第二产业	第三产业	农业	环境
地表水	1	1	1	1	1
地下水	1	1	1	1	0
再生水	0	1	1	0	1

2) 用水净效益系数

生活用水净效益系数很难进行量化。应优先保障民用水,同时综合分析当地发展状况和周边区域的情况,确定生活用水净效益系数;第二、三产业与农业的供水效益系数的取值,应根据实际水价与产业增加值综合分析确定;环境用水与生活用水紧密相关,环境用水效益系数应与生活用水净效益系数取值相同。

3) 有关污染物的排放

栾川县污染源主要包括工业污染源、农业污染源以及生活污染源。因农业污染在近些年已得到有效改善和控制,对比于工业污染与生活污染占比较小,所以不予考虑,故本文只考虑生活污染和第二产业污染。通过调查可知栾川县的主要污染物为 COD 和氨氮,污染物排放浓度取 COD 和氨氮二者之和。具体取值主要根据当地和周边地区的实际发展状况分析得到。

用水净效益系数、污水排放系数以及污染物排放浓度取值如表 4 所列。

Table 4. The value of each parameter

表 4. 各项参数取值

	规划年	2025	2030	2035
生活部门	用水净效益系数(元/m ³)	400	450	500
	污水排放系数	0.75	0.78	0.8
	污染物排放浓度(mg/L)	26.7	25.1	23.5
第二产业部门	用水净效益系数(元/m ³)	172	230	269
	污水排放系数	0.45	0.42	0.4
	污染物排放浓度(mg/L)	20.3	18.7	17.1
第三产业部门	用水净效益系数(元/m ³)	1350	1000	987
农业部门	用水净效益系数(元/m ³)	26	45	60
环境部门	用水净效益系数(元/m ³)	400	450	500

4) 算法参数设置

种群数量 N = 200, 交叉率取 0.9, 变异率取 0.01, 进化代数取 150。

3.4. 优化配置结果

综合考虑经济目标、社会目标以及生态目标,使用水综合效益最佳。利用 NSGA-III 算法求解并与 NSGA-II 算法结算结果进行比较,以 2025、2030、2035 三个规划年的经济效益为例,比较 NSGA-III 和 NSGA-II 算法计

算出的解集分布情况如图 2 所示。从解集分布图可以看出, NSGA-III 计算出的结果分布更均匀集中, 而 NSGA-II 结果分布较为分散且不均匀; 且 NSGA-III 的值大多数分布于 NSGA-II 结果的上方, 这说明 NSGA-III 的经济效益函数值要优于 NSGA-II。

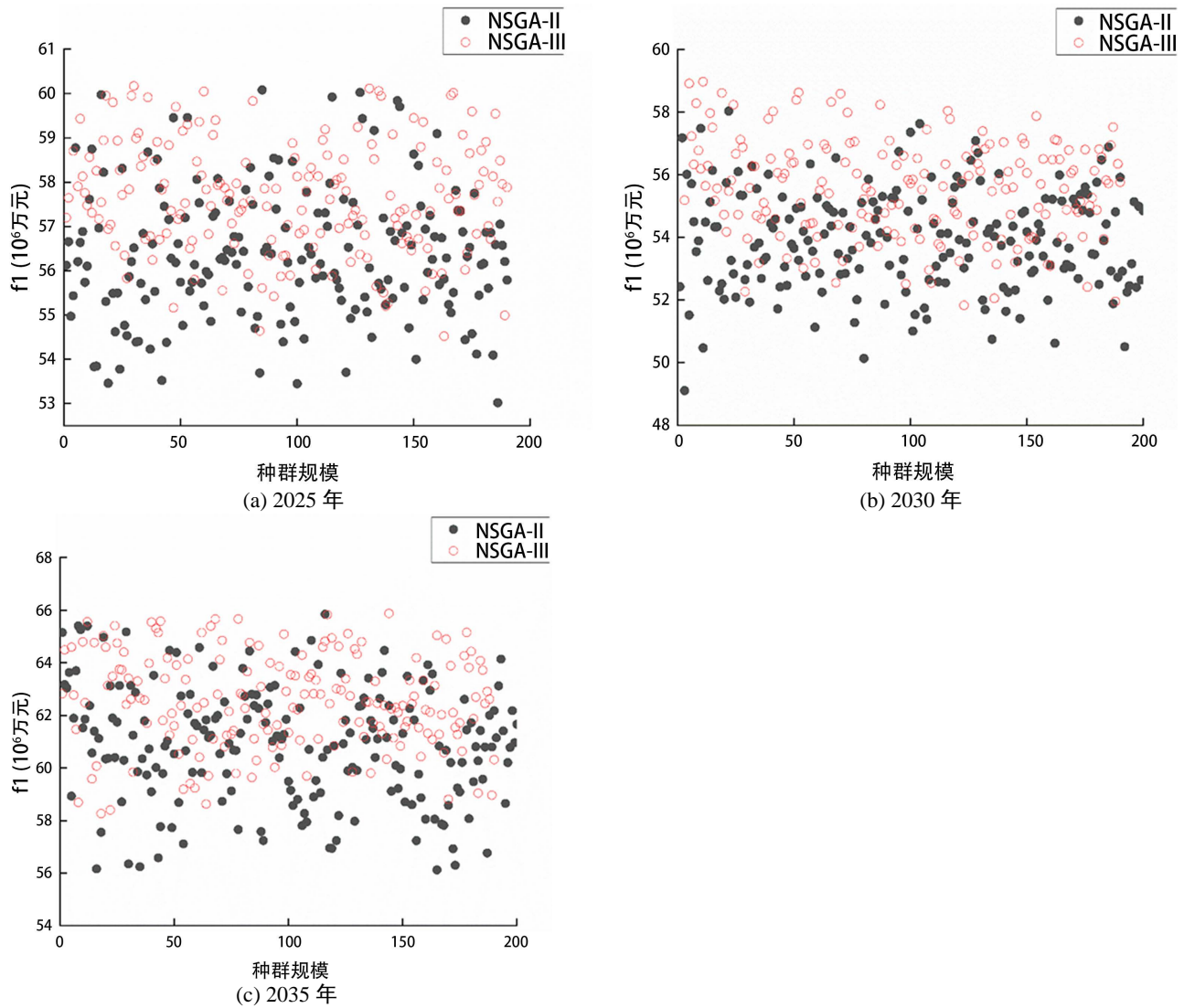


Figure 2. Comparison diagram of solution set distribution of economic benefit function in each planning year
图 2. 各规划年经济效益函数解集分布对比图

表 5 列出了两种算法的计算结果对比。由表 5 中结果可以看出, NSGA-III 计算的经济效益、社会效益值均比 NSGA-II 计算的值好。由此说明 NSGA-III 算法的解集分布更加均匀集中, 对目标选择能力更强, 并且在解决水资源优化配置问题时要比 NSGA-II 算法更适用。

根据研究区的实测数据, 利用 NSGA-III 算法算出栾川县的水资源优化配置方案如表 6 所列。

由表 6 配置结果可以看出, 栾川县的生活部门、第二产业部门、第三产业部门和环境部门的配水量基本呈上升趋势, 而农业部门配水呈稳定下降趋势, 且配水量排序与需水量预测的顺序是一致的, 配置结果符合需水预测的结果。2025 年第三产业配水所占比重为 4.63%, 2030 年为 6.17%, 2035 年为 7.4%, 生活和第二产业配水增长率分别为 0.45%、1.57%, 这说明随着栾川县人口数量的增加和社会与经济的不断发展, 第三产业所占比

Table 5. Comparison of calculation results of two algorithms
表 5. 两种算法计算结果对比

方法	规划年	$f_1(x)/10^6$ 万元	$f_2(x)/$ 万 m^3	$f_3(x)/t$
NSGA-II	2025	56.27	-10	6104.7
	2030	53.95	-10.72	6067
	2035	60.92	-11.51	6012.98
NSGA-III	2025	57.69	-10.27	6257.94
	2030	55.76	-11.11	6269.96
	2035	62.73	-11.88	6192.46

Table 6. Optimal allocation scheme of water resources in each planning year
表 6. 各规划年的水资源优化配置方案

规划年	供水源				
	用水部门	地表水/万 m^3	地下水/万 m^3	再生水/万 m^3	总配水量/万 m^3
2025	生活	1010	255	0	1265
	第二产业	2414	253	205	2872
	第三产业	168	159	60	387
	农业	2884	307	0	3190
	环境	500	0	142	642
2030	生活	936	299	0	1235
	第二产业	2475	321	254	3050
	第三产业	241	119	162	522
	农业	2792	153	0	2944
	环境	511	0	201	712
2035	生活	979	338	0	1317
	第二产业	2643	251	412	3305
	第三产业	271	219	158	649
	农业	2559	140	0	2699
	环境	448	0	344	792

重越来越高，生活及第二产业用水量也在持续增加。2030 年的环境配水比 2025 年增加了 70 万 m^3 ，2035 年比 2030 年增加 80 万 m^3 ，说明人们对城市生态环境的要求不断变高，环境用水也在不断增加。而伴随着农业节水的推进，使得农业用水逐渐降低，2025 年农业配水比重为 38.18%，2035 年为 30.8%，减少配水 491 万 m^3 。

2025 年、2030 年、2035 年的供需平衡关系如表 7 所列。根据结果可知，保证率为 75% 时，三个规划年的第二产业部门与农业部门均存在缺水情况，且这三年的总缺水率全部小于 5%。枯水年间首先要保证生活部门用水，其次应为第三产业的供水保障，最后为第二产业和农业的供水。在满足生活、第三产业、环境用水之后，是允许生产部门存在少量缺水情况的。与 2025 年相比，2035 年第二产业缺水量增长率为 -0.19%，农业为 -0.56%，这说明缺水情况得到有效的控制和改善。综合来看，在同时考虑经济效益、社会效益和生态效益时，该县缺水部门的缺水率均控制到小于 10%，基本可以符合未来的用水需求，说明此配置方案是科学合理的。

Table 7. The balance between supply and demand in each planning year
表 7. 各规划年的供需平衡关系

规划年	项目	用水部门				
		生活	第二产业	第三产业	农业	环境
2025	配水量(万 m ³)	1265	2872	387	3190	642
	需水量(万 m ³)	1151	3024	383	3402	632
	配水率(%)	15.14	34.37	4.63	38.18	7.69
	缺水量(万 m ³)	0	152	0	212	0
	缺水率 (%)	0	5.03	0	6.22	0
2030	配水量(万 m ³)	1235	3050	522	2944	712
	需水量(万 m ³)	1229	3229	509	3144	712
	配水率(%)	14.59	36.04	6.17	34.79	8.41
	缺水量(万 m ³)	0	179	0	200	0
	缺水率 (%)	0	5.55	0	6.36	0
2035	配水量(万 m ³)	1317	3305	640	2699	792
	需水量(万 m ³)	1309	3455	636	2900	791
	配水率(%)	15.03	37.72	7.40	30.80	9.04
	缺水量(万 m ³)	0	150	0	201	0
	缺水率 (%)	0	4.33	0	6.94	0

4. 结论

1) 相较于 NSGA-II 算法, NSGA-III 算法的种群个体分布更加均匀集中, 不易陷入局部最优, 对目标的选择能力更强, 在处理高维多目标优化问题时更适用。

2) 利用 NSGA-III 算法求解栾川县进行水资源优化配置模型时, 其目标效益值基本优于 NSGA-II 算法, 各个部门也基本可以达到用水需求。说明 NSGA-III 算法比 NSGA-II 算法更适合解决水资源多目标优化配置问题。

3) 根据对栾川县供需水的分析, 规划年配水量与需水量排序均为: 第二产业部门 > 农业部门 > 生活部门 > 环境部门 > 第三产业部门。其中第二产业部门与农业部门存在少量缺水问题, 二者缺水量均呈下降趋势, 且缺水率都在 10% 以内, 可以满足未来的用水需求。可为栾川县水资源的规划配置提供决策支持。

基金项目

河南省高校科技创新团队(14IRTSTHN028); 河南省重点研发与推广专项(202102310588, 202102310259)。

参考文献

- [1] 刘成良, 任传栋, 高佳. 多目标规划在邯郸水资源优化配置中的应用[J]. 水资源研究, 2008(3): 14-16.
LIU Chengliang, REN Chuandong and GAO Jia. Application of multi-objective programming in optimal allocation of water resources in Handan. Journal of Water Resources Research, 2008(3): 14-16. (in Chinese)
- [2] 史银军, 粟晓玲. 干旱区内陆河流域水资源使用权多目标优化分配——以甘肃省石羊河流域为例[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(2): 136-140+149.
SHI Yinjun, SU Xiaoling. Multi-objective optimization allocation of water resources use right in arid inland River Basin: A case study of Shiyang River Basin in Gansu Province. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(2): 136-140+149. (in Chinese)
- [3] PARSINEJAD, M., YAZDI, A. B. and ARAGHINEJAD, S. Optimal water allocation in irrigation networks based on real time

- climatic data. *Agricultural Water Management*, 2013, 117(C): 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.10.025>
- [4] 刘姣, 刘东. 基于混合遗传算法的红兴隆分局水资源优化配置[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(6): 177-181.
LIU Jiao, LIU Dong. Optimal allocation of water resources in Hongxinglong Branch based on hybrid genetic algorithm. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(6): 177-181. (in Chinese)
- [5] 侯景伟. 基于 Pareto 蚁群算法和 3S 技术的灌区水资源空间优化配置[J]. *中国农村水利水电*, 2014(3): 166-168+171.
HOU Jingwei. Spatial optimal allocation of water resources in irrigated area based on Pareto ant Colony Algorithm and 3S technology. *China Rural Water Resources and Hydropower*, 2014(3): 166-168+171. (in Chinese)
- [6] 李琳, 吴鑫淼, 郗志红. 基于改进 NSGA-II 算法的水资源优化配置研究[J]. *水电能源科学*, 2015, 33(4): 34-37.
LI Lin, WU Xinmiao and QIE Zhihong. Research on optimal allocation of water resources based on improved NSGA-II algorithm. *Water and Power Energy Science*, 2015, 33(4): 34-37. (in Chinese)
- [7] 何国华, 解建仓, 汪妮, 等. 基于模拟退火遗传算法的水资源优化配置研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(6): 196-202.
HE Guohua, XIE Jiancang, WANG Ni, et al. Research on optimal allocation of water resources based on simulated annealing Genetic Algorithm. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2016, 44(6): 196-202. (in Chinese)
- [8] 李丹, 郭生练, 田晶, 等. 基于三步优化的多目标水资源配置研究及应用[J]. *水资源研究*, 2018(5): 433-444.
LI Dan, GUO Shenglian, TIAN Jing, et al. Research and application of multi-objective water resources allocation based on three-step optimization. *Journal of Water Resources Research*, 2018(5): 433-444. (in Chinese)
- [9] 沙金霞. 改进的 NSGA-II 法在邢台市水资源优化配置中的应用[J]. *水电能源科学*, 2018, 36(5): 21-25.
SHA Jinxia. Application of improved NSGA-II method in optimal allocation of water resources in Xingtai City. *Water and Power Energy Science*, 2018, 36(5): 21-25. (in Chinese)
- [10] 曾萌, 王丰, 张永鹏, 等. 基于鱼群算法的广东省水资源优化配置研究[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2020, 50(5): 733-741.
ZENG Meng, WANG Feng, ZHANG Yongpeng, et al. Research on optimal allocation of water resources in Guangdong Province based on fish swarm algorithm. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2020, 50(5): 733-741. (in Chinese)
- [11] 王慧, 高泽海, 孙超, 等. 基于 NSGA-II 的灌区水资源优化配置模型及应用[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(9): 118-124.
WANG Hui, GAO Zehai, SUN Chao, et al. Model and application of optimal allocation of water resources in irrigated area based on NSGA-II. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(9): 118-124. (in Chinese)
- [12] 艾永乐, 杜明珠, 潘智航, 等. 基于 NSGA-III 算法的含光伏发电的配电网无功优化[J/OL]. *控制工程*, 1-7.
<https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20210185>, 2021-11-22.
AI Yongle, DU Mingzhu, PAN Zhihang, et al. Reactive power optimization of distribution network with photovoltaic power generation based on NSGA-III algorithm. *Control Engineering*, 1-7.
<https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20210185>, 2021-11-22. (in Chinese)
- [13] 黄少雄, 王璨, 孔庆竹, 等. 含短期预测的光伏配电网智能调压策略[J]. *热力发电*, 2020, 49(7): 21-27.
HUANG Shaoxiong, WANG Can, KONG Qingzhu, et al. Intelligent voltage regulation strategy of pv distribution network including short-term forecast. *Thermal Power Generation*, 2020, 49(7): 21-27. (in Chinese)
- [14] 安友军, 陈晓慧. 近似支配的 NSGA-III 算法求解柔性作业车间调度问题[J]. *系统工程学报*, 2021, 36(3): 416-432.
AN Youjun, CHEN Xiaohui. Approximate dominated NSGA-III algorithm for flexible Job-shop scheduling problem. *Journal of Systems Engineering*, 2021, 36(3): 416-432. (in Chinese)
- [15] 何小妹, 董绍华. 多目标多约束混合流水车间插单重调度问题研究[J]. *工程科学学报*, 2019, 41(11): 1450-1457.
HE Xiaomei, DONG Shaohua. Research on the rescheduling problem of multi-objective and multi-constraint hybrid flow shop. *Journal of Engineering Science*, 2019, 41(11): 1450-1457. (in Chinese)
- [16] DEB, K., JAIN, H. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, Part I: Solving Problems with Box Constraints. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2014, 18(4): 577-601.
<https://doi.org/10.1109/TEVC.2013.2281535>
- [17] 王一杰. 基于多目标规划的泗县水资源优化配置研究[D]: [硕士学位论文]. 邯郸: 河北工程大学, 2020.
WANG Yijie. Research on optimal allocation of water resources in Sixian County based on multi-objective programming. Master's Thesis, Handan: Hebei University of Engineering, 2020. (in Chinese)
- [18] GU, Q., WANG, R. and XIE, H. Modified non-dominated sorting genetic algorithm III with fine final level selection. *Applied Intelligence*, 2021, 51(7): 4236-4269.