

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221623

基于改进 NSGA-II 算法的汾河水库优化调度研究

董 领, 祝雪萍, 王洪冲, 赵雪花

(太原理工大学水利科学与工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 为进一步提高 NSGA-II 算法搜索效率, 引进全局搜索能力更强、收敛速度更快的算术交叉算子改进原始算法中采用的模拟二进制交叉算子(SBX)。据此提出一种改进 NSGA-II 算法, 同时采用 Generational Distance(G_D) 指标评价多目标 Pareto 解集的收敛状态, 并将该方法应用于汾河水库供水及生态协同优化调度研究中以验证其有效性。对比不同算法运行产生的 Pareto 解集及水库运行各项指标表明, 与传统算法相比, 算法改进后达到收敛状态的迭代次数降低了 100 代且收敛时间缩短 7.76%; 较不优化条件下的各部门缺水率均有所降低, 其中农业缺水率效果最为显著, 降低 13.20%~14.52%, 总供水量增加 $0.268 \times 10^8 \sim 0.303 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。验证了改进算法及优化调度的有效性, 为水库多目标优化调度提供了一种新思路。

关键词: NSGA-II; 模拟二进制交叉算子; 算术交叉算子; 多目标优化; G_D 评价指标

中图分类号: TV697.1⁺¹

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)07-0084-05

1 概况

汾河水库是一座以防洪、供水、灌溉为主, 兼顾生态修复、发电、养殖、旅游的大(II)型综合利用水利枢纽工程, 位于山西省太原市娄烦县, 水库控制流域面积为 $5\,268 \text{ km}^2$, 总库容 $7.33 \times 10^8 \text{ m}^3$, 兴利库容 $2.32 \times 10^8 \text{ m}^3$, 死水位 $1\,114.50 \text{ m}$, 正常蓄水位 $1\,128.00 \text{ m}$, 汛限水位 $1\,126.00 \text{ m}$, 设计洪水位 $1\,128.00 \text{ m}$, 校核洪水位 $1\,130.50 \text{ m}$ 。防洪标准为 100 年一遇洪水设计、2 000 年一遇洪水校核。探究高效、快捷的优化算法并应用于水库优化调度具有重要的意义^[1]。水库优化调度研究的关键在于算法的改进和基于算法的模型整体设计。智能优化算法中 NSGA-II 算法凭借其寻优时间短, 优化效果好^[2]被广泛使用。但 NSGA-II 算法所采用的模拟二进制交叉算子 SBX^[3] 的全局搜索能力与算术交叉算子相比较差, 因此本文针对 NSGA-II 算法进行改进, 采用搜索跨度相对较大的算术交叉算子进行寻优, 可以加快种群的收敛速度; 现有研究中对于多目标最优解集的收敛性讨论较少, 本文提出采用 G_D

评价指标评价解集收敛状态, 以验证算法改进的有效性^[4], 探讨算法改进方向; 将该方法应用于汾河水库供水与生态协同优化调度研究^[5]中, 以期作为水库决策及区域水资源管理提供依据。

2 研究方法

2.1 NSGA-II 算法改进

NSGA-II 算法采用选择、交叉、变异算子维持种群多样性, 实现劣质个体基因被淘汰, 优秀个体基因反复进行交叉并寻优, 使得整个种群的基因向着最优方向变化^[6]。传统 NSGA-II 算法采用 SBX 交叉算子, 该算子主要用于实码编码的多目标进化算法^[7]模拟二进制交叉过程。假设两个父代个体为 $X^1(x_1^1, \dots, x_n^1)$ 、 $X^2(x_1^2, \dots, x_n^2)$, 则使用 SBX 算子产生的两个后代个体 $c^1(c_1^1, \dots, c_n^1)$ 、 $c^2(c_1^2, \dots, c_n^2)$ 可通过下式计算得到:

$$c_i^1 = 0.5[(1 + \beta)x_i^1 + (1 - \beta)x_i^2] \quad (1)$$

$$c_i^2 = 0.5[(1 - \beta)x_i^1 + (1 + \beta)x_i^2] \quad (2)$$

$$\beta = \begin{cases} 2r^{1/(1+\eta)} & r \leq 0.5 \\ (1/2 - 2r)^{1/(1+\eta)} & r > 0.5 \end{cases} \quad (3)$$

式中, β 为参数; r 为 $0 \sim 1$ 内生成的随机数。

收稿日期: 2022-08-07, **修回日期:** 2022-09-29

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC0408601); 山西省水利厅水利技术研究推广项目(202125033, 2022GM023); 山西省自然科学基金资助项目(201901D111060)

作者简介: 董领(1995-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水文水资源, E-mail: 1819594278@qq.com

通讯作者: 祝雪萍(1985-), 女, 博士、副教授, 研究方向为水文水资源, E-mail: xpzhu01@163.com

针对 SBX 算子不容易跳出局部最优的问题,引入搜索跨度相对较大的算术交叉算子对 SBX 交叉算子替换并进行寻优^[8]。相比于 SBX 交叉算子,算术交叉算子的全局搜索能力更好,寻优的同时可以尽可能保证种群多样性。算术交叉操作中,设 X'_A, X'_B 分别为第 t 代两个待交叉的个体,则交叉后产生的 $t+1$ 代个体为:

$$X_A^{t+1} = \alpha X'_A + (1 - \alpha) X'_B \quad (4)$$

$$X_B^{t+1} = \alpha X'_B + (1 - \alpha) X'_A \quad (5)$$

式中, α 为区间 $[-1.5, 1.5]$ 内的一个随机数。

改进后的算法流程图见图 1。

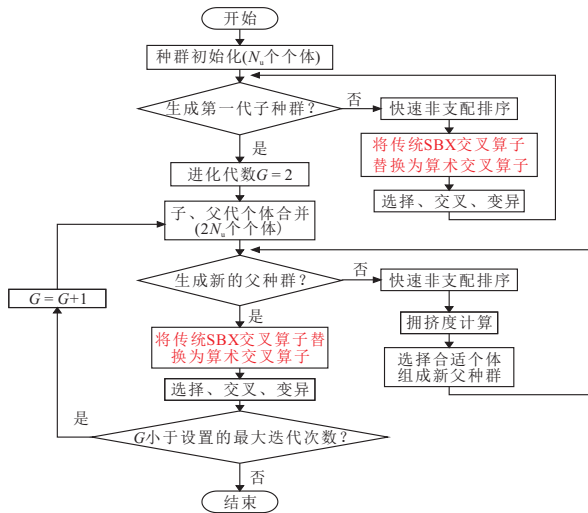


图 1 改进 NSGA-II 求解基本流程

Fig. 1 Improved NSGA algorithm to solve the basic process

2.2 收敛性评估指标 G_D

本文引入收敛性评估指标 G_D 评估种群的收敛性。 G_D 值越小,收敛性越好。其计算公式为:

$$G_D(P, P^*) = \frac{1}{|P^*|} \sqrt{\sum_{x \in P, x \in P^*} \min \text{dis}(x, y)^2} \quad (6)$$

式中, P 为非支配解集; P^* 为从前沿解集上取的参考点; $\text{dis}(x, y)$ 为解集 P 和参考集 P^* 的欧氏距离。

G_D 指标参考点示意图见图 2。

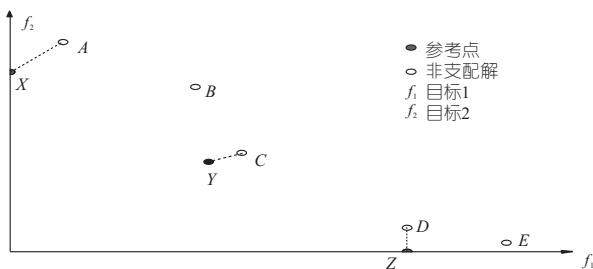


图 2 G_D 指标参考点示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the reference point of the G_D indicator

2.3 水库供水与生态协同优化调度模型

在生态文明建设的大背景下,为维护生态系

统健康,水库需开展供水与生态协同优化调度,保证一定数量和质量的生态流量^[9]。由于农业需水量与降水、作物灌溉制度等相关,年内按需分配,因此以城市与生态供水缺水率最小为目标,农业通过供水规则中的供水顺序实现限制供水。

(1)目标函数。以用水户时段平均缺水率最小为供水目标,使得供水的缺水程度最小化。城市供水目标函数为:

$$\min E_{\text{pub}} = \min \left\{ \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \left[\max \left(0, \frac{Q_t^{\text{pub}} - R_t^{\text{pub}}}{Q_t^{\text{pub}}} \right) \right] \right\} \quad (7)$$

生态供水目标函数为:

$$\min E_{\text{eco}} = \min \left\{ \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \left[\max \left(0, \frac{Q_t^{\text{eco}} - R_t^{\text{eco}}}{Q_t^{\text{eco}}} \right) \right] \right\} \quad (8)$$

式中, E_{pub} 为城市供水的时段平均缺水率; N 为研究时段总数; Q_t^{pub} 为 t 时段城市用水户的需水流量, m^3/s ; R_t^{pub} 为 t 时段城市用水户的实际供水流量, m^3/s ; E_{eco} 为生态供水的时段平均缺水率; Q_t^{eco} 为 t 时段生态用水户的需水流量, m^3/s ; R_t^{eco} 为 t 时段生态用水户的实际供水流量, m^3/s 。

(2)决策变量及约束条件。研究区供水规则考虑 3 个用水户,每个用水户限制线由 12 个月的水位变量构成,则共有 36 个供水决策变量,供水调度图见图 3。约束条件主要包括水量平衡约束、库水位约束、库容约束、供水保证率约束、供水量非负约束。

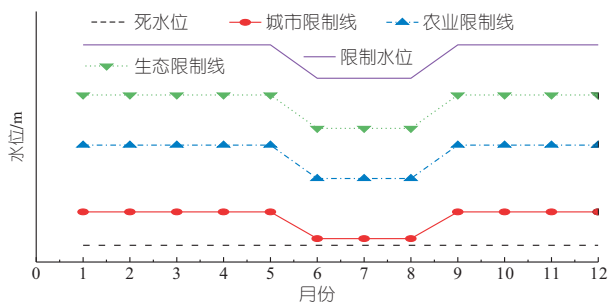


图 3 供水调度图

Fig. 3 Water supply scheduling diagram

3 基于改进 NSGA-II 算法的汾河水库优化调度

3.1 模型构建

利用改进的 NSGA-II 算法进行搜索寻优,并采用 G_D 指标评价算法的有效性,最终为汾河水库城市供水与生态协同优化提供决策支撑。模型输入数据主要为 2000~2018 年汾河水库来水、各

用户需水量系列、水库特征水位、库容、特征曲线等信息。汾河水库城市生活年供水量 $0.95 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、工业年供水量 $0.36 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，设计供水保证率为 95%。由于水库较原设计增加了生态供水，或将影响城市供水保证率，因此将 90% 作为城市供水的可接受保证率；生态需水量计算使用 Tennant 法^[10]，汛期(6~9 月)取多年月平均流量的 30%、非汛期(10 月~次年 5 月)取多年月平均流量的 10% 作为生态基流，总需水量为 $5\,026 \times 10^4 \text{ m}^3$ ；农业需水按照调度时段的要求，具体为早春浇(3 月 1 日~4 月 20 日)取 $1.35 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，晚春浇(6 月 1~20 日)取 $0.25 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，夏浇(9 月 10~30 日)取 $0.45 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，冬浇(11 月 5~25 日)取 $0.25 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

3.2 结果与分析

3.2.1 改进算法有效性分析

为对比基于两种交叉算子的 NSGA-II 算法最优解集的收敛情况，利用 G_D 指标对 NSGA-II 算法及改进 NSGA-II 算法评价解集，由此验证算法改进的有效性。

设置优化算法迭代次数 100~900 代分别进行计算，种群大小为 100 个，变异系数为 0.2，交叉系数为 0.8。①得到 100~900 代 NSGA-II 算法计算下的城市及生态二者缺水率目标的 Pareto 前沿解集见图 4(a)，由于一组解所使用的参考点相同并不影响解集之间的 G_D 指标进行比较，为便于计算，就近设置 3 个参考点为(0.65, 5.5)、(0.5, 6.5)、(0.575, 6)；②得到 100~900 代改进 NSGA-II 算法计算下的城市及生态二者缺水率目标的 Pareto 前沿解集见图 4(b)，同理设置 3 个参考点为(0.45, 4.5)、(0.5, 3.5)、(0.475, 4)；③利用相关公式计算导出文件，得到各方案下水库运行特征指标，主要包括各用水户保证率(保证率 = $(1 - \text{限制供水的月份} / \text{优化调度的总月份}) \times 100\%$)、缺水率(缺水率 = $(\text{缺水量} / \text{需水量}) \times 100\%$)及供水量等。

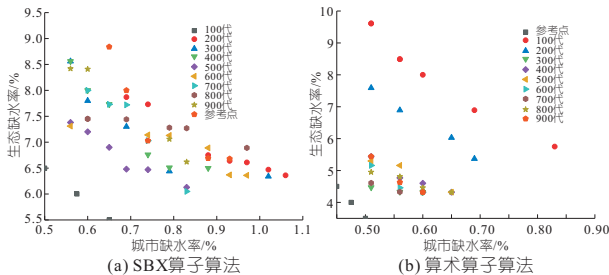


图 4 SBX、算术算子算法计算下缺水率目标的 Pareto 前沿解集
Fig. 4 Pareto frontier solution set of water scarcity target under SBX operator and arithmetic operator

由生成的 100~900 代的 Pareto 前沿解集可知，随着迭代次数的增加，所生成的解集逐渐偏向于二者最优的左下角，但是达到特定代数后，其趋势不会再向左下角变化，说明解集达到收敛状态，将达到收敛状态时此特定代数所对应的时间称为收敛时间。通过计算 G_D 指标评价种群的收敛性，迭代 100~900 代的 G_D 指标计算值见表 1。由表 1 可知，使用基于 SBX 交叉算子 NSGA-II 算法获取的解集 G_D 指标在迭代 400 代时基本达到收敛状态，收敛时间为 35.45 s，而使用基于算术交叉算子的改进 NSGA-II 算法在运行 300 代时基本达到收敛状态，收敛时间为 32.70 s，迭代次数减少了 100 代且收敛时间缩短 7.76%。据此可知使用算术交叉算子后能够更快达到收敛。分析其原因主要在于由于算术交叉算子扩大了全局搜索范围，能够更快跳出全局最优，因此所用的迭代次数有所减少，达到收敛状态的时间有所缩短。

表 1 G_D 指标计算结果

Tab. 1 G_D index calculation results

代数 / 代	SBX 交叉算子算法		算术交叉算子算法	
	G_D	收敛时间/s	G_D	收敛时间/s
100	0.510	10.43	3.173	12.72
200	0.375	16.73	2.504	22.18
300	0.477	26.84	0.896	32.70
400	0.183	35.45	0.928	38.90
500	0.433	40.17	1.213	50.08
600	0.238	48.52	0.925	63.83
700	1.119	53.62	0.924	72.79
800	0.620	62.87	0.949	83.90
900	0.740	70.24	0.929	90.44

3.2.2 优化调度有效性分析

为分析进行优化调度及两种优化算法的有效性，对比两种算法计算获取的城市及生态缺水率目标收敛点的 Pareto 前沿解集与不优化条件下的水库运行状态，两种交叉算子收敛点 Pareto 前沿解集及不优化条件下的缺水率值见图 5。

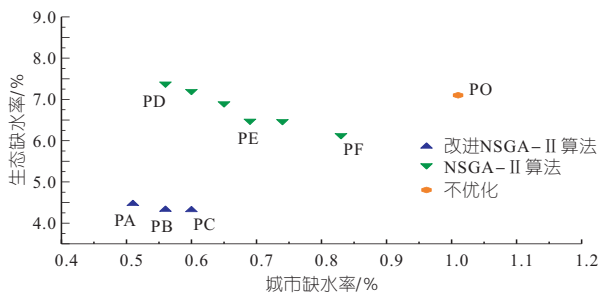


图 5 两种交叉算子收敛点 Pareto 前沿解集
Fig. 5 The Pareto frontier solution sets of two convergence points of crossover operators

图 5 中两种交叉算子算法得到的 Pareto 前沿解集，靠上部分的解城市供水目标表现较好；靠下部分的解生态供水目标表现较好；居中部分的

解则平衡二者。为进一步分析不同表现的调度规则及其影响,选取算术交叉算子算法解集中的三个解 PA、PB、PC 及 SBX 交叉算子算法解集中的典型解 PD、PE、PF 进一步分析,各方案相应的目标函数值见图 5。PA、PD 侧重于城市供水, PB、PE 为二者平衡, PC、PF 侧重于生态供水。各典型方案供水调度图见图 6。

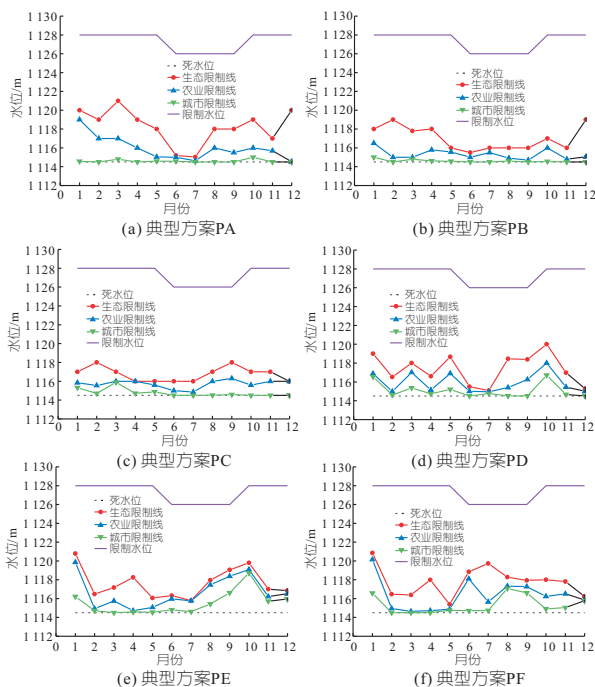


图 6 各典型方案供水调度图

Fig. 6 Water supply scheduling diagram of each typical scheme

不考虑优化的调度规则下,设定为方案 PO。不优化时调度规则为当水库水位高于限制水位时,产生弃水;当水库水位高于死水位低于限制水位时,充分供水;当水库水位低于死水位时,3 用户同时按比例减少供水量。不考虑优化调度的条件下,水库供水可能出现深度破坏的情况。

(1)各方案下水库运行特征指标。统计各方案下水库运行的各用水户的保证率、缺水率及供水量等相关统计指标见表 2。

表 2 运行 Pareto 解集中各方案下的特征指标统计

Tab. 2 Statistics of the characteristic indicators under each scheme in the Pareto frontier

方案	缺水率/%			保证率/%			多年平均水量/ $10^8 m^3$			总供水量 $/10^8 m^3$	弃水量 $10^8 m^3$
	城市	农业	生态	城市	农业	生态	城市	农业	生态		
PO	1.01	23.40	7.10	90.0	56.7	72.2	0.82	1.13	0.390	2.340	0.455 9
PA	0.51	8.88	4.47	94.9	93.3	92.1	0.827	1.34	0.476	2.643	0.152 9
PB	0.56	8.88	4.33	94.4	92.2	92.6	0.822	1.34	0.477	2.639	0.156 9
PC	0.60	8.88	4.32	94.0	92.2	92.6	0.822	1.34	0.477	2.639	0.156 9
PD	0.56	9.56	7.38	94.4	83.3	79.6	0.822	1.33	0.462	2.614	0.181 9
PE	0.69	9.56	6.48	93.0	82.2	84.7	0.821	1.33	0.466	2.617	0.178 9
PF	0.83	10.2	6.13	91.7	80.0	85.6	0.820	1.32	0.468	2.608	0.187 9

(2)优化调度有效性。①供水缺水率。优化调度条件下,三部门缺水率均有一定程度降低,其

中农业供水缺水率的改善情况尤为显著。主要原因在于农业供水主要分布于 3、4、6、9、12 月,需水量较为集中,优化条件下由于协调各部门用水量,可明显减少弃水量。不优化条件下,由于特定时期水库水位较低,农业供水出现深度破坏的情况,这将对农作物在敏感期的正常生长产生不可逆的严重影响,而优化调度条件下,可通过限制各部门用水使整个供水过程更加平稳,从而减少这种状况。表明优化调度可有效降低供水缺水率。②供水保证率。优化后部门的保证率明显提升。不优化时的农业、生态供水保证率仅为 56.67%、72.2%,而优化后 6 个方案下农业、生态保证率均超过 79.6%,典型方案 PB 的生态保证率最高,达到 92.6%。对比结果表明优化调度下生态及农业保证率有了一定盈余,为增加汾河河道生态流量,对河道生态修复留下了空间。表明优化调度可有效提高供水保证率。③多年平均供水量。优化后城市供水量相差不大,就 PB 方案而言,其城市供水量为 $0.822 \times 10^8 m^3$,而不优化的城市供水量为 $0.82 \times 10^8 m^3$,供水量增加 $0.02 \times 10^8 m^3$;优化后的生态、农业供水量分别为 0.477×10^8 、 $1.34 \times 10^8 m^3$,相较不优化条件下分别增加 0.087×10^8 、 $0.11 \times 10^8 m^3$ 。优化调度下整个供水过程更加稳定,总供水量增加 $0.303 \times 10^8 m^3$ 。避免了水库弃水过多和深度缺水的情况。表明优化调度可有效增加供水量、稳定供水过程。④弃水量。优化后的弃水量均明显减少,减少弃水量 $0.268 \times 10^8 \sim 0.303 \times 10^8 m^3$ 。表明优化调度可明显减少弃水量,并将这部分水量分配到各部门。

4 结论

a. 将传统 NSGA-II 算法的 SBX 交叉算子改进为全局搜索能力更强、收敛速度更快的算术交叉算子,并使用 G_D 评价指标对算法评估改进前后的收敛状态,研究表明算子改进后达到收敛时迭代次数减少 100 代且收敛时间降低了 7.76%。

b. 将改进后的 NSGA-II 算法运用于汾河水库供水及生态协同优化调度研究中,结果表明优化调度较不优化调度各用水部门的供水过程更加平稳、水库的水量调配更加科学有效。

参考文献:

[1] 纪昌明, 马皓宇, 彭杨. 面向梯级水库多目标优化调度的进化算法研究[J]. 水利学报, 2020, 51(12): 1441-1452.
 [2] DEB K, AGARAWAL S, PRATAP A, et al. A

fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization; NSGA-II [C]// International Conference on Parallel Problem Solving from Nature, 2000.

[3] KARMAKAR A, GHATAK R, MISHRA R K, et al. Sierpinski carpetfractal-based planar array optimization based on difficerential evolution algorithm [J]. Journal of electromagnetic waves & applications, 2015, 29(2): 247-260.

[4] 何江红, 李华军, 周日贵. 参考点自适应调整下评价指标驱动的高维多目标进化算法[J]. 自动化学报, 2021, 48(6): 1569-1589.

[5] 刘英华, 王敬, 王镜淋, 等. 基于协同进化粒子群算法的水库优化调度与应用[J]. 中国农村水利水电, 2022(7): 122-127, 139.

[6] 田旭杨, 陈泽军. 基于改进 NSGA-II 的列车运行多目标优化方法[J]. 计算机应用, 2021, 41(增刊 1): 153-161.

[7] 肖宝秋, 刘洋, 戴光明. 改进的 NSGA-II 算法及在星座优化设计中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(10): 47-53.

[8] 耿志强, 毕帅, 王尊, 等. 基于改进 NSGA-II 算法的乙烯裂解炉操作优化[J]. 化学学报, 2020, 71(3): 1088-1094.

[9] 吴梦烟, 杨侃, 吴云, 等. 基于改进烟花算法的汾河水库优化调度模型研究[J]. 水电能源科学, 2020, 38(5): 71-75.

[10] TENNANT D L. Instream flow regimes for fish, wildlife, recreation and related environmental resources[J]. Fisheries, 1976, 1(4): 6-10.

Optimization of Fenhe Reservoir Operation Rules Based on an Improved NSGA-II Algorithm

DONG Ling, ZHU Xue-ping, WANG Hong-chong, ZHAO Xue-hua

(College of Hydro Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to improve the search efficiency of the NSGA-II algorithm, this paper introduced an arithmetic crossover operator with stronger global search ability and faster convergence speed to replace the simulated binary crossover operator used in the original NSGA-II algorithm. Based on this, an improved NSGA-II algorithm was proposed, the G_D index was used to evaluate the convergence capability of the multi-objective Pareto solution set. The method was applied to the research of Fenhe Reservoir water supply and ecological collaborative optimal scheduling to verify its effectiveness. By comparing the Pareto solution sets generated by different algorithms and various indicators of reservoir operation, and compared with the traditional algorithm, the number of iterations to reach the convergence state after the improved algorithm was reduced by 100 generations and the convergence time is shortened by 7.76%. The water shortage rate of each department under the condition of non-optimization was decreased, of which the effect of agricultural water shortage rate is the most significant, decreasing by 13.20% to 14.52%, and the total water supply increased by 0.268 to 0.303 million cubic meters. This paper verified the effectiveness of the improved algorithm and optimized scheduling, and provides an optional new idea for multi-objective optimal scheduling of reservoirs.

Key words: NSGA-II; simulated binary crossover; arithmetic crossover operator; multi-objective optimization; G_D evaluation index

(上接第 105 页)

[3] 游海林, 吴永明, 杜冰雪, 等. 1950~2016 年赣江径流量变化特征及其影响因素分析[J]. 水利水电技术, 2019, 50(7): 48-54.

[4] 刘庆. 赣江下游河道水文情势变化分析[J]. 中国水运(下半月), 2020, 20(10): 103-104, 137.

[5] 唐立模, 叶志恒, 杨家启, 等. 赣江南昌河段水位降低现状及影响因素[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(6): 13-18, 85.

[6] 唐立模, 黄朋, 屈一晗. 赣江南昌河段近 20 年槽槽形态变化规律研究[J]. 水利水电技术, 2020, 51(10): 104-110.

Changes of High Water Level in the Flood Season in the Ganjiang River Trail Channel in the Past 30 Years

YOU Li-jun¹, HONG Yun¹, QU Yi-han², TANG Li-mo²

(1. Nanchang Water Investment Project Management Group Co., Ltd., Nanchang 330008, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Ganjiang river trail channel is affected by both upstream water and the backwater effect of Poyang Lake during the flood season. The study of the water level changes has guiding significance for river flood control and shipping. Based on the measured data from 1990 to 2019 at the hydrological station in the Ganjiang river trail channel, this paper adopted the Mann-Kendall trend test and the Pettitt test to analyze the trend of the characteristic water level during the flood season(flood season and backwater of Poyang Lake season). The results show that the water level of the Ganjiang river trail channel had a significant downward trend. The interannual variation of the water level during the flood season was relatively uniform, while it showed a fluctuating shape during the backwater of Poyang Lake season. The mutation years were all around 2002. The main reason for the decline of the water level during the flood period is the erosion of the riverbed. The downward trend of the riverbed has slowed down significantly after 2013, so water level during the flood period stabilized after 2016. The water level during the backwater of Poyang Lake season is mainly affected by the erosion of the riverbed, and the change of the downstream water level will also have a certain impact.

Key words: Ganjiang river trail channel; high-water level; flood; backwater of Poyang Lake; Mann-Kendall trend test