

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221224

改进蝴蝶优化算法在邯郸市水资源优化配置中的应用

常一帆^a, 沙金霞^b, 刘彬^{a,c}, 徐志恒^a, 孙博伦^a

(河北工程大学 a. 水利水电学院; b. 地球科学与工程学院; c. 河北省智慧水利重点实验室, 河北 邯郸 056038)

摘要: 水资源优化配置是有效缓解区域水资源供需矛盾的重要方法和手段。针对传统蝴蝶优化算法(BOA)在高效快速地求解多目标水资源优化配置问题时存在的搜索精度低、收敛速度慢、易陷入局部最优及不能直接用于多目标问题求解等缺陷,通过引入快速非支配排序、拥挤度及精英策略方法对其进行了改进,利用ZTD函数验证了改进蝴蝶优化算法(ABOA)的优越性,最后将ABOA应用于邯郸市水资源优化配置模型求解中,并从帕累托前沿中选择了缺水量最少为最终方案。结果表明,邯郸市2035年($p=50%$)总需水量为 $27.40 \times 10^8 \text{ m}^3$,总分配水量为 $24.42 \times 10^8 \text{ m}^3$,缺水量为 $2.98 \times 10^8 \text{ m}^3$,缺水率为10.9%。其中生活和生态需水均能得到完全满足,第一、二、三产业在不同区域仍面临缺水问题,需大力开展节约用水来缓解。研究结果可为多目标水资源优化配置的求解提供参考。

关键词: 水资源; 多目标; 优化配置; 改进蝴蝶优化算法; 邯郸市

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)04-0056-05

配置问题提供了一种新途径。

1 引言

随着用水需求的持续增加,水资源短缺成为制约社会经济发展的关键因素,开展水资源优化配置、缓解水资源短缺状况迫在眉睫^[1]。水资源优化配置是一个多目标优化问题,多个目标彼此之间通常难以同时达到最优。针对多目标、多变量和高维数的优化配置模型,元启发式优化算法因其概念简单、易于实现及可绕过局部优化的特点,在优化问题中应用广泛^[2,3]。元启发式算法主要包括基于进化机制、基于物理原理、基于群体智能三大类。其中,基于群体的元启发式算法因其算子更少,且易于实现,具有更强的竞争力,已被成功应用于水资源的优化配置中^[4-6]。ARORA S等^[7]提出了模拟蝴蝶群体外出觅食这一生物习性的群体智能优化算法——蝴蝶优化算法(BOA),但传统BOA存在搜索精度低、收敛速度慢、易陷入局部最优及不能直接用于多目标问题求解等缺陷。为此,本文对传统BOA进行改进,并将改进蝴蝶优化算法(ABOA)应用到邯郸市水资源优化配置中,为解决多目标水资源优化

2 改进的蝴蝶优化算法

2.1 传统蝴蝶优化算法

BOA算法灵感源于蝴蝶通过感知香味浓度来确定食物来源这一行为。香味浓度 f 受到感知形态 c 、刺激强度 I 和吸收香味强度 a 的影响,即 $f=cI^a$ 。当感知到香味的蝴蝶从一个位置向食物方向移动时,其适应度会相应改变,即蝴蝶会产生与其适应度相关的 I 。蝴蝶感知香味移动的方式分为两类:①全局搜索。感知到香味并随之移动;②局部搜索。未感知香味且随机移动。公式分别为:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + (r^2 g^* - x_i^t) f_i \quad (1)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + (r^2 x_j^t - x_k^t) f_i \quad (2)$$

式中, x_i^t 、 x_j^t 、 x_k^t 分别为不同蝴蝶个体 i 、 j 、 k 在 t 次迭代中的位置; r 为 $0 \sim 1$ 之间随机数; t 、 g^* 分别为当前的迭代次数、最优蝴蝶位置; f_i 为蝴蝶 i 的香味浓度。

考虑外界环境因素和个体距离等因素,设置一个随机数 p ($0 < p < 1$)来决定蝴蝶觅食行为在

收稿日期: 2022-06-11, **修回日期:** 2022-07-18

基金项目: 全球环境基金水资源与水环境综合管理推广(主流化)项目(MWR-C-3-5-2)

作者简介: 常一帆(1997-),女,硕士研究生,研究方向为水文水资源,E-mail:13223022656@163.com

通讯作者: 沙金霞(1980-),女,博士、副教授、硕导,研究方向为水资源规划与管理,E-mail:shajinxia@163.com

全局搜索到局部搜索之间转换概率。当迭代数达到最大时,输出最佳适应度所对应的最优解。

2.2 改进蝴蝶优化算法

相较于单目标优化,在多目标问题中存在多标准比较问题,最优蝴蝶位置(g^*)很难在多目标空间中获得。针对 BOA 算法存在的搜索精度低、收敛速度慢、易陷入局部最优及不能直接用于多目标优化等问题,引入快速非支配排序、拥挤度及精英策略方法进行改进,使算法在运行过程中在 Pareto 前沿中选择出最优个体。

(1)快速非支配排序。首先,选择并判断蝴蝶 i 在种群(大小为 n)个体间的支配关系,将蝴蝶 i 支配的个体存入集合 S_i ,被支配个体数记为 n_i ;其次,若蝴蝶 i 被支配个数 $n_i = 0$,则将被支配的个体划分存入到第一等级集合 F_1 中;然后从第一等级 F_1 中选择蝴蝶个体 p ,将蝴蝶 p 支配的个体存入集合 S_p 中,再从集合 S_p 中选取个体 q ,若 $n_q = n_q - 1 = 0$,则个体 q 仅受上一级支配且等级下降一级,存入第二等级集合 H 中;最后依次循环分级,直至种群个体全部完成分级,达到选出种群中相对优秀个体的目的。

(2)拥挤度和拥挤度比较算子。拥挤度(i_d)是对具有相同等级 i_{rank} 的个体进行排序,因存在多个目标函数单位不一致的情况,对其进行统一处理,即 i_{rank} 等级个体拥挤度等于其与在该目标函数上最大值与最小值之差的比值。

(3)精英保留策略。将种群与原种群合并,对合并种群采取快速非支配排序,并按升序排列依次放入新种群中,直到新种群规模即将超出原种群的规模停止,此时非支配序等级为 i_r ;然后对等级 i_r 内个体进行拥挤度计算,按由大到小顺序排列再依次放入新种群中,直至新种群规模等于原种群规模;最后选取等级最小且拥挤度最大个体为最优蝴蝶位置 g^* ,并更新种群中所有个体位置。

2.3 仿真试验

针对多目标优化问题,Pareto 前沿常呈凸的、非凸的、非连续的及非均匀分布等特征。本文采用 ZDT1、ZDT2、ZDT3、ZDT6 测试函数^[8]来验证 ABOA 算法求解的准确性,结果见图 1。由图 1 可知,ABOA 算法计算得到的 Pareto 前沿接近理想值,且符合 Pareto 前沿自身特征。因此,ABOA 算法在应用于多目标问题时能获得帕累托前沿。

基于所选测试函数,采用收敛性、多样性和综合性三种性能指标评价解集的优劣。其中,收敛

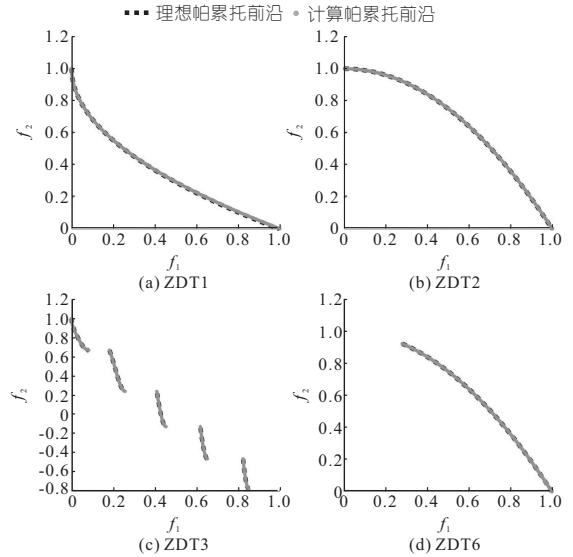


图 1 ZDT 测试函数理想和计算帕累托前沿对比
Fig. 1 Comparison of ZDT test function ideal and computational Pareto frontier

性指标采用 C-metric (C) 和 Generational Distance(G_D);多样性指标采用 Spacing Metric (S)和 Diversity Metric(Δ);综合性指标采用 Inverted Generational Distance(I_{GD})。当 C 、 G_D 、 S 、 Δ 、 I_{GD} 值越小,解集的收敛性和多样性越好。计算公式分别为:

$$C(B, P) =$$

$$\frac{|\{u \in P \mid \exists v \in B: v \text{ dominates } u\}|}{|P|} \quad (3)$$

$$G_D(P, A) = \frac{1}{|P|} \sqrt{\sum_{u \in P} d(u, A)^2} \quad (4)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{|P| - 1} \sum_{i=1}^{|P|} (\bar{d} - d_i)^2} \quad (5)$$

$$\Delta = \frac{d_s + \sum_{i=1}^{N-1} |d_i - \bar{d}|}{d_s + (N - 1) \bar{d}} \quad (6)$$

$$I_{GD}(P, A) = \frac{1}{|A|} \sum_{u \in A} d(u, P) \quad (7)$$

式中, B 为计算近似解; P 为不同于 B 的计算近似解; A 为理想帕累托前沿解集; d 为欧氏距离; \bar{d} 、 d_s 分别为 d 的均值、最大值。

表 1 为 ABOA 算法性能指标结果。由表 1 可知,改进前后 BOA 算法多样性(Δ)指标值相差不大,但 ABOA 算法的收敛性(C 、 G_D)、多样性(S)和综合性(I_{GD})指标值明显较低。除 ZDT6 上 S 值提高了 83%,其余测试函数上的性能指标提升幅度均在 90% 以上。通过对比分析,发现 ABOA 算法的解集优越性显著,在收敛速度和收敛精度上均有较大幅度提升,能更好地应用在多目标优化问题上。

表 1 ABOA 算法性能指标结果

Tab. 1 Performance index results of ABOA

算法	性能指标	名称	ZDT1	ZDT2	ZDT3	ZDT6
改进 BOA 算法	收敛性	C	0.098	0.054	0.026	0.002
		G_D	0.001	0.001	0.005	0.001
	多样性	S	0.065	0.065	0.067	0.054
		Δ	0.606	0.575	0.613	0.580
	综合性	I_{GD}	0.001	0.001	0.002	0.002
	BOA 算法	收敛性	C	1.000	1.000	1.000
G_D			2.981	4.511	3.041	7.556
多样性		S	0.904	0.930	0.913	0.332
		Δ	0.568	0.421	0.528	0.539
综合性	I_{GD}	2.074	3.609	1.747	7.716	

3 实例应用

3.1 区域概况

邯郸市地处河北省最南部,总面积为 $1.20 \times 10^8 \text{ km}^2$,属温带大陆性季风气候,主要河流有滏阳河、漳河和卫河等。邯郸市水资源条件薄弱,人均水资源占有量少,水资源开发利用存在不合理情况,因此需开展水资源优化配置,保证邯郸市用水安全和可持续发展。

根据邯郸市行政区划和水资源系统特点,将其概化为 16 个子区、5 类用水户及 2 类 5 种水源,子区分布见图 2。其中,用水户包括生活、一产、二产、三产和生态环境 5 类;2 类水源为独立和公共水源,包括自产地表水、地下水、再生水、水库水和外调水(引黄河水、引卫河水 and 南水北调水)5 种。

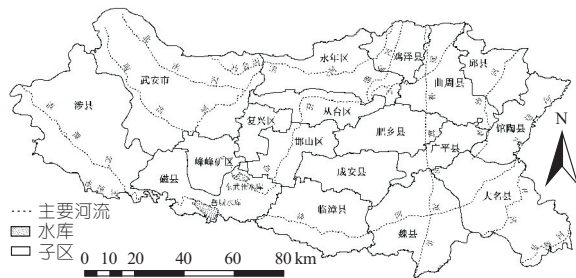


图 2 邯郸市子区分布

Fig. 2 Distribution map of sub districts in Handan City

3.2 水资源优化配置模型

3.2.1 目标函数

社会效益通常以区域缺水最小构造目标函数,经济效益指标以区域经济效益最大构造目标函数,公式分别为:

$$\max f_1(x) = -\min \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J(k)} \left[d_j^k - \left(\sum_{i=1}^{I(k)} x_{ij}^k + \sum_{c=1}^M x_{cj}^k \right) \right] \right\} \quad (8)$$

$$\max f_2(x) = \max \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J(k)} \left[\sum_{i=1}^{I(k)} (b_{ij}^k - c_{ij}^k) x_{ij}^k a_i^k + \sum_{c=1}^M (b_{cj}^k - c_{cj}^k) x_{cj}^k a_c^k \right] \lambda_j^k \right\} \quad (9)$$

式中, k, j 分别为子区、用水户; i, c 分别为独立、公共水源; D_j^k 为 k 内 j 的需水量; $x_{ij}^k, b_{ij}^k, c_{ij}^k$ 分别为 i 在 k 内 j 的供水量、供水效益、费用系数; $x_{cj}^k, b_{cj}^k, c_{cj}^k$ 分别为 c 在 k 内 j 的供水量、供水效益、费用系数; a_i^k, a_c^k 分别为 k 内 i, c 的供水次序系数; λ_j^k 为 k 内 j 的供水公平系数。

3.2.2 约束条件

根据邯郸市水源类型,从供水量、供水能力、非负变量及输水能力方面建立约束条件。

(1)独立水源约束。计算公式为:

$$\sum_{j=1}^{J(k)} x_{ij}^k \leq W_i^k \quad (10)$$

$$x_{ij}^k \leq Q_i^k \quad (11)$$

$$x_{ij}^k \geq 0 \quad (12)$$

式中, W_i^k, Q_i^k 分别为 i 在 k 内的供水量、最大供水能力。

(2)公共水源约束。计算公式为:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{J(k)} x_{cj}^k \leq W_c^k \\ \sum_{k=1}^K W_c^k \leq W_c \end{cases} \quad (13)$$

$$W_c^k \leq Q_c^k \quad (14)$$

$$x_{cj}^k \geq 0 \quad (15)$$

式中, W_c^k, Q_c^k 分别为 c 在 k 内的供水量、最大供水能力。

(3)共同约束。计算公式为:

$$D_{j\min}^k \leq \sum_{i=1}^{I(k)} x_{ij}^k + \sum_{c=1}^M x_{cj}^k \leq D_{j\max}^k \quad (16)$$

式中, $D_{j\min}^k, D_{j\max}^k$ 分别为 k 内 j 的最小、最大需水量。

3.3 供需预测

根据邯郸市长期发展规划和水资源状况,预测 2035 年 50% 保证率下供需水量。需水量以 2020 年为基准年,采用定额法预测,结果见表 2。可供水量分水源进行预测,其中独立水源的可供水量预测采用邯郸市第三次水资源评价和邯郸市再生水开发利用研究报告成果;公共水源的可供水量预测采用邯郸市地表水分配与利用和河北省南水北调工程(中线)邯郸市配套工程规划的结果,因此邯郸市 2035 年($p = 50\%$)总供水量为 $27.34 \times 10^8 \text{ m}^3$,见表 2。

表 2 邯郸市 2035 年需水量和可供水量
预测结果 ($p=50\%$)

Tab. 2 Prediction results of water demand and supply of

Handan City in 2035 ($p=50\%$) $10^8 m^3$

子区	需水量					合计	可供水量							
	生 活	一 产	二 产	三 产	生态 环境		自产 地表水	地下 水	水库 水	引黄 河水	引卫 河水	南水 北调水	再生 水	
主城区	1.05	1.23	0.42	0.80	0.16	3.66	0.02	1.20	✓				1.94	0.86
涉县	0.21	0.19	0.13	0.15	0.18	0.86	1.08	0.62					0.00	0.16
武安	0.37	0.95	0.46	0.39	0.22	2.38	0.60	0.77					0.00	0.40
峰峰	0.33	0.26	0.22	0.13	0.04	0.98	1.09	0.67					0.00	0.29
肥乡	0.20	1.21	0.08	0.09	0.06	1.64	0.03	0.19	✓	✓			0.10	0.15
永年	0.42	1.38	0.21	0.17	0.09	2.27	0.22	0.80	✓				0.36	0.30
广平	0.14	0.66	0.06	0.07	0.04	0.97	0.00	0.15	✓	✓			0.07	0.10
成安	0.19	0.92	0.15	0.11	0.06	1.42	0.01	0.52	✓				0.07	0.15
馆陶	0.16	0.88	0.04	0.10	0.05	1.22	0.01	0.50	✓	✓			0.07	0.11
大名	0.37	1.78	0.07	0.15	0.13	2.49	0.01	1.08	✓	✓	✓		0.08	0.24
磁县	0.23	0.51	0.05	0.09	0.08	0.96	0.29	0.67	✓				0.31	0.16
魏县	0.42	1.64	0.17	0.15	0.10	2.47	0.02	0.73	✓	✓	✓		0.21	0.29
临漳	0.29	1.45	0.11	0.13	0.09	2.07	0.00	0.91	✓				0.07	0.19
邱县	0.11	0.89	0.06	0.08	0.05	1.18	0.02	0.20	✓	✓			0.13	0.08
曲周	0.11	1.29	0.10	0.02	0.08	1.60	0.05	0.06	✓	✓			0.06	0.18
鸡泽	0.15	0.88	0.07	0.08	0.04	1.22	0.01	0.24	✓	✓			0.06	0.11
合计	4.74	16.10	2.39	2.70	1.47	27.40	3.46	9.30	5.61	1.39	0.30	3.52	3.77	

注:“✓”表示该子区可由某种水源供水。

3.4 结果与分析

基于 Matlab,采用 ABOA 算法求解邯郸市水资源优化配置模型。图 3 为 ABOA 算法个体平均值的迭代过程。由图 3 可知,当迭代次数达

表 3 邯郸市 2035 年各用水户水量、各水源配置结果 ($p=50\%$)

Tab. 3 Water allocation results of water users and allocation results of various water sources in Handan City at 2035 ($p=50\%$)

$10^8 m^3$

子区	各用水户水量										各水源										
	生活		第一产业		第二产业		第三产业		生态		合计		自产 地表水	地下 水	水库 水	引黄 河水	引卫 河水	南水 北调水	再生 水	合计	
	分配 量	缺水 量	分配 量	缺水 量	分配 量	缺水 量	分配 量	缺水 量	分配 量	缺水 量	分配 量	缺水 量									
主城区	1.05	0.00	1.23	0.00	0.42	0.00	0.80	0.00	0.16	0.00	3.66	0.00	0.02	1.20	0.01				1.94	0.50	3.66
涉县	0.21	0.00	0.19	0.00	0.13	0.00	0.15	0.00	0.18	0.00	0.86	0.00	0.30	0.40						0.16	0.86
武安	0.37	0.00	0.59	0.37	0.21	0.25	0.39	0.00	0.22	0.00	1.77	0.61	0.60	0.77						0.40	1.77
峰峰	0.33	0.00	0.26	0.00	0.22	0.00	0.13	0.00	0.04	0.00	0.98	0.00	0.26	0.49						0.24	0.98
肥乡	0.20	0.00	0.92	0.29	0.08	0.00	0.08	0.01	0.06	0.00	1.35	0.29	0.03	0.19	0.58	0.30			0.10	0.15	1.35
永年	0.42	0.00	1.27	0.10	0.21	0.00	0.17	0.00	0.09	0.00	2.17	0.10	0.22	0.80	0.48				0.36	0.30	2.17
广平	0.14	0.00	0.27	0.39	0.06	0.00	0.07	0.00	0.04	0.00	0.58	0.39	0.00	0.15	0.22	0.04			0.07	0.10	0.58
成安	0.19	0.00	0.54	0.38	0.15	0.00	0.11	0.00	0.06	0.00	1.04	0.38	0.01	0.52	0.30				0.07	0.15	1.04
馆陶	0.16	0.00	0.82	0.06	0.04	0.00	0.10	0.00	0.05	0.00	1.17	0.06	0.01	0.50	0.10	0.23	0.16		0.07	0.11	1.17
大名	0.37	0.00	1.72	0.06	0.07	0.00	0.15	0.00	0.13	0.00	2.43	0.06	0.01	1.08	0.85	0.10	0.07		0.08	0.24	2.43
磁县	0.23	0.00	0.51	0.00	0.05	0.00	0.09	0.00	0.08	0.00	0.96	0.00	0.16	0.36	0.01				0.31	0.12	0.96
魏县	0.42	0.00	1.53	0.11	0.17	0.00	0.15	0.00	0.10	0.00	2.37	0.11	0.02	0.73	0.84	0.21	0.07		0.21	0.29	2.37
临漳	0.29	0.00	0.92	0.53	0.11	0.00	0.13	0.00	0.09	0.00	1.54	0.53	0.00	0.91	0.35				0.07	0.19	1.54
邱县	0.11	0.00	0.84	0.05	0.06	0.00	0.08	0.00	0.05	0.00	1.13	0.05	0.02	0.20	0.46	0.27			0.11	0.08	1.13
曲周	0.11	0.00	1.16	0.13	0.10	0.00	0.00	0.02	0.08	0.00	1.46	0.14	0.05	0.06	0.92	0.19			0.06	0.18	1.46
鸡泽	0.15	0.00	0.62	0.26	0.07	0.00	0.08	0.00	0.04	0.00	0.96	0.26	0.01	0.24	0.48	0.06			0.06	0.11	0.96
合计	4.74	0.00	13.39	2.71	2.14	0.25	2.67	0.02	1.47	0.00	24.42	2.98	1.72	8.59	5.61	1.39	0.30		3.50	3.32	24.42

从供水角度看,邯郸市 2035 年 ($p=50\%$) 总分配水量为 $24.42 \times 10^8 m^3$,水库水、引黄河水和引卫河水完全分配,剩余 $2.92 \times 10^8 m^3$ 水量未分配,其中自产地表水 $1.74 \times 10^8 m^3$ 、地下水 $0.71 \times 10^8 m^3$ 、南水北调水 $0.02 \times 10^8 m^3$ 、再生水 $0.46 \times 10^8 m^3$,剩余水量主要集中在涉县、峰峰和磁县。

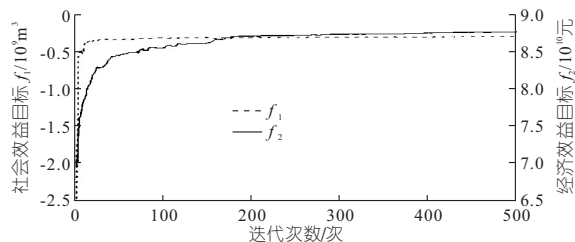


图 3 ABOA 算法个体平均值的迭代过程

Fig. 3 Iterative process of individual average value of ABOA

到 180 前后,社会和经济效益目标趋于收敛,表明该方法的收敛速度较快。

从 Pareto 最优前沿中选取社会效益目标最大的方案(即区域缺水率最小)为最优方案,即邯郸市 2035 年 ($p=50\%$) 总需水量、总分配水量、总缺水率分别为 27.40×10^8 、 24.42×10^8 、 $2.98 \times 10^8 m^3$,缺水率为 10.9%。在邯郸市的 16 个子区中,只有主城区、涉县、峰峰、磁县 4 个子区能实现水资源供需平衡,其他 12 个子区均存在不同程度的缺水,缺水率最高的是广平(40.2%)。从用水角度分析,生活和生态能完全满足其用水需求,但第一、第二、第三产业在不同子区面临缺水问题(表 3)。

由于缺乏调水工程,该部分剩余水量不能用于其他地区(表 3)。

4 结论

a. 针对 BOA 算法存在的缺陷,引入快速非

支配排序、拥挤度及精英策略方法进行改进,改进后的算法(ABOA)的优越性显著。将 ABOA 算法应用到邯郸市水资源优化配置模型中,为各县缺水问题提供了较好的分配思路及建议。

b. ABOA 算法切换概率 p 设定为固定值,未考虑其变化对精度和速度的影响,有待进一步研究。

参考文献:

[1] 江津清. 中国水资源现状分析与可持续发展对策研究[J]. 智能城市, 2019, 5(1): 44-45.

[2] ARMAGHANI D J, PHAM B T. Meta-heuristic algorithms in civil engineering [J]. The open construction and building technology journal, 2020, 14 (Suppl-2, M1): 266-267.

[3] ELAZIZ M A, ELSHEIKH A H, OLIVA D, et al. Advanced metaheuristic techniques for mechanical design problems: review [J]. Archives of computational methods in engineering, 2022, 29 (1): 695-

716.

[4] 李琳, 吴鑫森, 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.

[5] 王钰娟, 罗健, 薛晴, 等. 基于混沌高斯扰动布谷鸟算法的水资源优化配置 [J]. 水电能源科学, 2021, 39 (9): 45-49.

[6] LI RUIHUAN, CHANG YINGLI, WANG ZHAOCAI. Study of optimal allocation of water resources in Dujiangyan irrigation district of China based on an improved genetic algorithm [J]. Water supply, 2021, 21(6): 2989-2999.

[7] ARORA S, SINGH S. Butterfly optimization algorithm: A novel approach for global optimization [J]. Soft computing, 2019, 23(3): 715-734.

[8] ZITZLER E, DEB K, THIELE L. Comparison of multi-objective evolutionary algorithms: Empirical results [J]. Evolutionary computation, 2000, 8(2): 173-195.

Application of Ameliorative Butterfly Optimization Algorithm in Multi-objective Optimal Allocation of Water Resources in Handan City

CHANG Yi-fan^a, SHA Jin-xia^b, LIU Bin^{a,c}, XU Zhi-heng^a, SUN Bo-lun^a

(a. School of Water Conservancy and Hydroelectric Power; b. School of Earth Science and Engineering; c. Hebei Key Laboratory of Intelligent Water Conservancy, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: Optimal allocation of water resources is an important method to effectively relieve the contradiction between the supply and demand of water resources in regions. The traditional butterfly optimization algorithm (BOA) has some defects, such as low search accuracy, slow convergence speed, easy to fall into local optimization and can not be directly used to solve multi-objective optimal allocation of water resources problems. It was improved by introducing the methods of fast non dominated sorting, congestion and elite strategy, and the superiority of the ameliorative butterfly optimization algorithm (ABOA) was verified by using ZTD function. Finally, the ABOA was applied to the optimal allocation model of water resources in Handan, and the scheme with the least water shortage was selected as the final scheme from the Pareto front. The Handan water resources optimal allocation in 2035 ($p=50\%$) yielded a total water demand of 2.74 billion cubic meters, a total water distribution of 2.44 billion cubic meters, and the water shortage was 298 million cubic meters, and the water shortage rate was 10.9%. Domestic and ecological water demand could be fully met. However, the primary, secondary and tertiary sectors were still facing water shortages in different regions, which need to be alleviated by water conservation. The research results can provide a new reference for the solution of multi-objective optimal allocation of water resources.

Key words: water resources; multi-objective; optimal allocation; ameliorative butterfly optimization algorithm; Handan City

(上接第 91 页)

Vulnerability Assessment of Heavy Rainfall and Waterlogging in Subway Stations Based on IOWA-VAC

CHEN Jia^{1,2}, LIU Jing-yan^{1,2}, DENG Xi^{1,2}

(1. Civil Engineering College, Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, China; 2. Key Laboratory of Building Collapse Mechanism and Disaster Prevention, China Earthquake Administration, Sanhe 065201, China)

Abstract: In order to scientifically evaluate vulnerability of heavy rainfall and waterlogging in subway Stations, determine the sensitivity index as well as improve the management level of the heavy rainfall and waterlogging in subway stations, an evaluation method based on IOWA-VAC was proposed. Firstly, an evaluation index system was constructed based on Pressure-State-Response (PSR) theory. Then, the index data was reordered in ascending order by using the IOWA operator, and the final weight of the new data was obtained by introducing coefficients θ to dynamically adjust the interval boundary weights. The Vector Angle Cosine (VAC) was introduced to test the closeness of the consistency between the target score vector to be evaluated and the ideal target vector, so as to realize the transformation from algebraic thinking to spatial geometry thinking, and the target grade to be evaluated was obtained. Single factor sensitivity analysis was used to determine the sensitivity index. The practicability of the evaluation model was verified by taking the Yansi station of Zhengzhou Metro Line 5 construction projects as examples. The results show that the vulnerability level of the Yansi station of Zhengzhou Metro Line 5 is IV, with high risk. Thus, it provides feasible suggestion for vulnerability management of heavy rainfall and waterlogging in subway stations.

Key words: subway station; heavy rainfall; waterlogging; vulnerability assessment; sensitivity analysis; induced ordered weighted average; vector angle cosine