

网络出版时间:2020-06-01 10:46 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2020.12.016
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.s.20200529.0830.016.html

基于改进灰狼算法的庆阳市水资源优化配置

何灏川¹,宋松柏¹,王小军^{2,3},王 博¹

(1 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100;

2 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210029;

3 水利部 应对气候变化研究中心,江苏 南京 210029)

[摘 要] **【目的】**对传统灰狼算法进行改进,并在甘肃省庆阳市的水资源配置中进行应用。**【方法】**针对传统灰狼算法易陷入局部最优、收敛速度慢、精度不高等不足,通过 Tent 混沌序列对群狼位置进行初始化,对灰狼算法中的距离控制参数 a 和位置更新方程进行优化和改进,并采用 8 个测试函数对改进灰狼算法进行测试。在此基础上以甘肃省庆阳市为例,分别以 2020,2025,2030 年为近期、中期和远期规划年,采用改进灰狼算法、传统灰狼算法、传统多目标配置方法,对庆阳市水资源的优化配置进行计算,并对 3 种方法进行主成分比选。**【结果】**改进灰狼算法的 8 个测试函数中有 7 个函数的最优值明显比传统灰狼算法更接近函数理论极小值;改进灰狼算法的 2020,2025,2030 3 个规划年的资源优化配置综合得分分别为 0.18,0.69 和 1.00,其计算结果明显优于相同年份传统灰狼算法和传统多目标配置方法。经过水资源优化配置计算,2020,2025 和 2030 年水资源所对应的经济生产总值分别为 1 074.46 亿、1 601.18 亿和 2 196.12 亿元,其中 2020 年的经济生产总值计算值大于《庆阳市十三五经济规划》的目标值 1 000 亿元。**【结论】**改进灰狼算法在水资源优化配置中具有较好的可行性,可为水资源优化配置模型提供新的优化计算途径。

[关键词] 水资源;优化配置模型;改进灰狼算法;优化方法比选;庆阳市

[中图分类号] TV213.9 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1671-9387(2020)12-0136-11

An improved GWO for optimal allocation of water resources in Qingyang

HE Haochuan¹, SONG Songbai¹, WANG Xiaojun^{2,3}, WANG Bo¹

(1 College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 State Key Laboratory of Hydrology-water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210029, China; 3 Research Center for Climate Change, Ministry of Water Resources, Nanjing, Jiangsu 210029, China)

Abstract: **【Objective】**To improve the traditional GWO and apply it to the water resources allocation in Qingyang city, Gansu Province. **【Method】**In order to solve the problem that the traditional GWO is prone to local optimization, slow convergence speed and low accuracy, the group position is initialized by Tent chaos sequence, the distance control parameter a and the position update equation in the GWO are optimized and improved, and the improved GWO is tested by 8 test functions. On this basis, Qingyang city in Gansu province is taken as an example, and 2020, 2025 and 2030 are taken as the short-term, medium-term and long-term planning years respectively. The improved GWO, traditional GWO and traditional multi-objective allocation method are adopted to calculate the optimal allocation of water resources in Qingyang city, and the principal components of the three methods are selected. **【Result】**The optimal value of 7 of the 8 test functions of the improved GWO is obviously closer to the theoretical minimum than that of the tradi-

[收稿日期] 2019-11-20
[基金项目] 国家重点研发计划项目(2017YFC0403506);国家自然科学基金项目(51479171);中央财政水资源节约、管理与保护项目(126302001000150005)
[作者简介] 何灏川(1993—),男,天津人,在读硕士,主要从事水文水资源研究。E-mail:hhe@nwafu.edu.cn
[通信作者] 宋松柏(1965—),男,陕西咸阳人,教授,博士,博士生导师,主要从事水文水资源研究。E-mail:ssb6533@nwsuaf.edu.cn

tional GWO. In 2020, 2025 and 2030, the comprehensive scores of the three planning years are 0.18, 0.69 and 1.00 respectively, which are obviously better than those of the traditional GWO and the traditional multi-objective algorithm in the same year. According to the calculation of optimal allocation of water resources, the corresponding economic output of water resources in 2020, 2025 and 2030 is 107.446 billion yuan, 160.118 billion yuan and 219.612 billion yuan, respectively. The calculated value of economic output in 2020 is greater than the target value of 100 billion yuan in the 13th five-year economic plan of Qingyang city. 【Conclusion】 The Improved GWO has good feasibility in the optimal allocation of water resources, and can provide a new optimization calculation method for the optimal allocation model of water resources.

Key words: water resources; optimization of model configuration; improved GWO; optimization scheme selection; Qingyang

高强度人类活动从多个方面影响和改变了自然驱动力下的水循环模式^[1],原有的自然水循环已演变成自然-社会二元水循环^[2],水资源对经济和社会可持续发展的制约作用日益凸现^[3]。如何在人口、环境、资源与经济协调发展的条件下,分配和利用水资源以发挥有限水资源的最大利用效益,成为西北地区面临的重要社会问题^[4]。随着干旱区经济系统的发展和人口的快速增长,水资源的消耗量越来越大,经济活动所依赖的生态环境质量每况愈下,在这种严峻的态势面前,寻求合理的水资源利用方式或合理的组合与配置方式,具有一定的紧迫性和必要性^[5]。

水资源的优化配置研究始于 20 世纪中叶^[6],国内水资源优化配置模型理论研究起始于 20 世纪 80 年代^[7],水资源优化配置的思想经历了“以需定供”、“以供定需”、“基于宏观经济的水资源配置理论”和“可持续发展的水资源配置”等阶段^[5]。2004 年,尹明万等^[8]率先建立了基于“三生(生活、生产和生态环境用水)”的水资源优化配置模型,这标志着我国已经进入“三生水”水资源配置理论阶段。水资源配置模型一旦成功建立,水资源配置工作实质上转化为求解满足特定约束条件下的多目标问题,但所用算法的优劣也决定着计算结果的好坏。在计算机普及前,传统算法对于求解早期连续或者可导函数起着关键作用^[9-11]。而在水资源优化配置的实践中,常常表现出高维、多峰值、非线性、不连续、非凸性等特性,运用传统算法难以解决好这类问题^[12]。随着计算机的普及,智能仿生算法开始用于水资源的优化配置^[13]。目前,应用于我国水资源优化配置的智能仿生方法正逐步趋于成熟,并处于不断地改进和完善过程中^[14]。如遗传算法^[15]、粒子群算法^[16]、模拟退火算法^[17]、蚁群算法^[18]等。灰狼算法作为一种新型智能仿生算法^[19],具有原理简单、需调整参数少、易于实现和全局搜索能力强等优点^[20],已开始

在水资源优化配置中得到应用^[21]。这些仿生算法在一定程度上解决了传统水资源优化配置求解的一些不足,但是与其他算法相同,传统灰狼算法在优化计算过程中也存在过早收敛、易陷入局部最优等缺点^[22]。针对灰狼算法的这些不足,一些学者开展了改进研究工作,如 Pan 等^[23]采用了并行化和反向学习的种群沟通策略;Nasrabadi 等^[24]采用了种群交流策略改进算法。但是在水资源优化配置过程中,仍缺少前期针对优化目标扩大灰狼搜索范围、后期针对目标精准围捕有机结合的改进方案。本研究利用改进灰狼算法的前期全局优化及后期高精度、优速度捕捉目标的特性,提出了基于改进灰狼算法的水资源优化配置方法,并以位于西北干旱典型地区的甘肃省庆阳市为例,针对复杂水资源系统的优化配置问题进行求解,以期对西北干旱地区水资源的优化配置提供支持。

1 灰狼算法的改进

1.1 传统灰狼算法

Mirjalili 等^[19]于 2014 年根据灰狼种群特性首次提出了灰狼算法。灰狼是顶级食肉动物,生活方式大多以群居为主,其行为构成了灰狼种群等级金字塔,并具有严格的等级管理制。首先,狼群以团队模式搜索、跟踪、靠近猎物;然后,从各个方位包围猎物,当包围圈足够小且完善时,狼群在 α 的指挥下由猎物最近的 β 、 δ 展开进攻,当猎物逃跑时,其余个体进行补给,实现群狼包围圈的跟随变换移动,从而对猎物不断实施各个方向的攻击,最终捕获猎物。传统灰狼算法的详细数学模型见文献^[19]。

1.2 改进灰狼算法

(1)种群除量的 Tent 混沌初始化改进。初始狼群的位置直接影响到算法求解,传统灰狼算法初始化种群的随机性较低,易产生局部最优解。近年来

混沌开始被运用于粒子群算法^[25]、飞蛾扑火算法^[26]、鲸鱼算法^[27]等。根据文献[22]引用 Tent 混沌序列进行群狼位置初始化改进, Tent 初始化数学模型如下:

$$\begin{cases} x^{t+1} = 2x^t, 0 \leq x^t \leq \frac{1}{2}; \\ x^{t+1} = 2(1-x^t), \frac{1}{2} < x^t \leq 1. \end{cases} \quad (1)$$

经贝努力移位变换后其位置为:

$$x^{t+1} = 2(x^t) \bmod 1. \quad (2)$$

式中: x^t 、 x^{t+1} 分别为初期灰狼经 t 、 $t+1$ 次迭代的位置, mod 为余数运算符号。

(2) 距离控制参数 a 的优化选择。优秀的优化算法在前期应该具备较高的搜索能力, 在后期应该具备较强的开发能力^[28], 但传统灰狼算法在多峰优化问题中容易陷入局部最优^[19]。由传统灰狼位置更新公式可知, 收敛因子 A 的大小可平衡局部搜索和全局搜索, $|A| \geq 1$ 则种群搜索范围加大, 有利于全局搜索; $|A| < 1$ 则种群搜索精度加强, 有利于局部搜索。在计算公式 $A = 2a \cdot r - a$ 中, 因 r 为 $[0, 1]$ 之间的随机数, 所以距离控制参数 a 决定 A 的大小, 对协调算法的探索和开发能力起着关键作用, a 值越大, 则算法的探索能力越强; a 值越小, 则搜索精度越高。传统灰狼算法中 a 值的计算公式为 $a = 2(1 - t/t_{\max})$, 其中 $t_{\max}$ 为最大迭代次数, 由此可以看出 a 随迭代次数增加从 2 线性递减到 0, 不利于改善前期收敛快、搜索范围小, 后期搜索范围大、精度不高的不足。因此, 本研究提出基于圆形公式的距离控制参数计算方法, 其表达式为:

$$a = 2 \times \sqrt{1 - \left(\frac{t}{t_{\max}}\right)^2}. \quad (3)$$

距离控制参数 a 随迭代次数的变化见图 1。

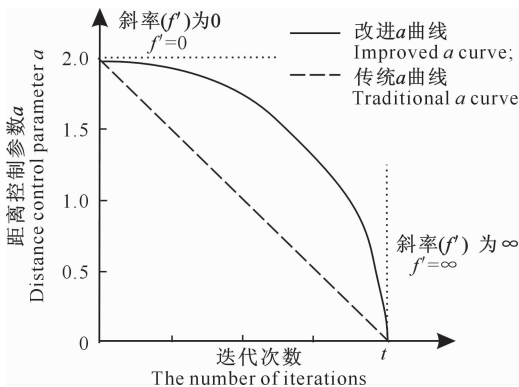


图 1 距离控制参数 a 随迭代次数的变化

Fig. 1 Change of distance control parameter a with the number of iterations

如图 1 所示, 该距离控制参数计算方法所得曲线在前期趋于平直, 可减缓前期收敛速度, 有利于狼群部署, 也即有利于扩大搜索面积; 后期曲线趋于竖直, 有利于加快收敛速度, 可增加狼群捕猎精度。

(3) 灰狼位置更新方程的改进。传统灰狼算法中, 当后期所有灰狼个体向最优的 3 个个体位置靠近时, 灰狼位置更新过程仅考虑当前位置信息和历史最优信息, 从而丧失灰狼种群的多样性, 容易发生早熟现象^[29]。受粒子群算法启发^[30], 提出基于粒子群速度更新的改进灰狼位置更新方程为:

$$X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^t. \quad (4)$$

式中: X_i^t 、 X_i^{t+1} 为 t 、 $t+1$ 次迭代中第 i 个灰狼的位置; V_i^t 为 t 次迭代中第 i 个灰狼的速度矢量。

V_i^t 可用灰狼速度更新公式计算, 有:

$$V_i^t = W \cdot V_i^{t-1} + c_1 \cdot r_1 (X_1^t - X_p^t) + c_2 \cdot r_2 (X_2^t - X_p^t) + c_3 \cdot r_3 (X_3^t - X_p^t). \quad (5)$$

式中: W 为惯性权重, 因 W 影响搜索范围及精度, 随迭代进行 W 取值范围从 0.9 递减至 0.4; c_i ($i = 1, 2, 3$) 为灰狼认知系数; r_i 为 $[0, 1]$ 之间的随机数; X_p^t 为历史最佳位置。

如图 2 所示, 灰狼速度更新公式包含 3 个部分, 即原灰狼先前的速度、灰狼对原猎物位置认知所产生的惯性向量、其他灰狼对该灰狼提示所产生的改变速度矢量。

则改进后的猎物位置为:

$$X_p^{t+1} = (X_1^{t+1} + X_2^{t+1} + X_3^{t+1})/3. \quad (6)$$

式中: X_p^{t+1} 为猎物更新位置, X_1^{t+1} 、 X_2^{t+1} 、 X_3^{t+1} 分别为 α 、 β 、 δ 狼的第 $t+1$ 次迭代位置。

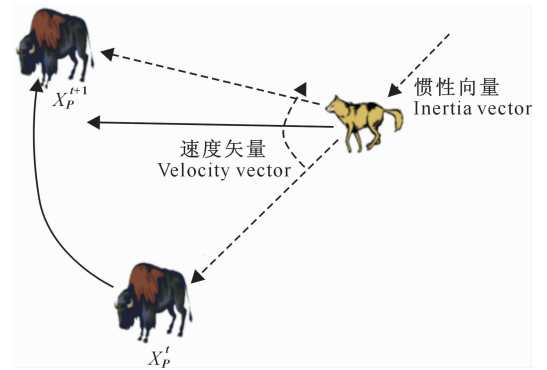


图 2 改进的灰狼位置更新示意图

Fig. 2 Improved gray wolf position updating diagram

1.3 仿真测试

为了对比测试改进灰狼算法和传统灰狼算法优化函数的求解能力, 参照文献[19], 选取 4 个单峰测试函数 (Sphere、Schwefel 2. 21、Schwefel 2. 22、Rosenbrock) 和 4 个多峰测试函数 (Rastrigin、Grie-

wank、Ackley、Schwefel), 分别对传统灰狼算法和改进灰狼算法进行仿真测试。设置参数如下:种群数目为 30,最大迭代次数为 500;距离控制参数 a 的初始值为 2,终止值为 0。仿真结果如表 1 和图 3 所示。

表 1 改进灰狼算法与传统灰狼算法仿真测试结果的对比
Table 1 Comparison of improved and traditional GWO simulations

函数名称 Function	函数表达式 Functional expression	特性 Features	最小值 Minimum value	计算最优值 Calculated value	
				传统灰狼算法 Traditional GWO	改进灰狼算法 Improved GWO
Sphere	$f(x)=\sum_{i=1}^n x_i^2$	单峰 Unimodal	0	1.059×10^{-27}	7.063×10^{-42}
Schwefel 2.21	$f(x)=\max x_i , i\in(1,n)$	单峰 Unimodal	0	1.317×10^{-7}	5.879×10^{-10}
Schwefel 2.22	$f(x)=\sum_{i=1}^n x_i + \prod_{i=1}^n x_i $	单峰 Unimodal	0	1.085×10^{-16}	8.150×10^{-21}
Rosenbrock	$f(x)=\sum_{i=1}^{n-1} (100(x_{i+1}-x_i)^2 + (x_i-1)^2)$	单峰 Unimodal	0	26.246	26.170
Rastrigin	$f(x)=\sum_{i=1}^n (100(x_i^2-10\cos(2\pi x_i))+10))$	多峰 Multimodal	0	21.155	1.432×10^{-2}
Griewank	$f(x)=\frac{1}{4\,000}\sum_{i=1}^n x_i^2 - \prod_{i=1}^n \cos\frac{x_i}{\sqrt{i}} + 1$	多峰 Multimodal	0	1.843×10^{-1}	2.131×10^{-5}
Ackley	$f(x)=-20\exp(-0.2\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n x_i^2}) - \exp(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n \cos(2\pi x_i)) + 20 + e$	多峰 Multimodal	0	7.813×10^{-7}	1.059×10^{-9}
Schwefel	$f(x)= \sum_{i=1}^n (-x_i \cdot \sin \sqrt{ x_i }) $	多峰 Multimodal	0	5.862×10^{-1}	5.684×10^{-14}

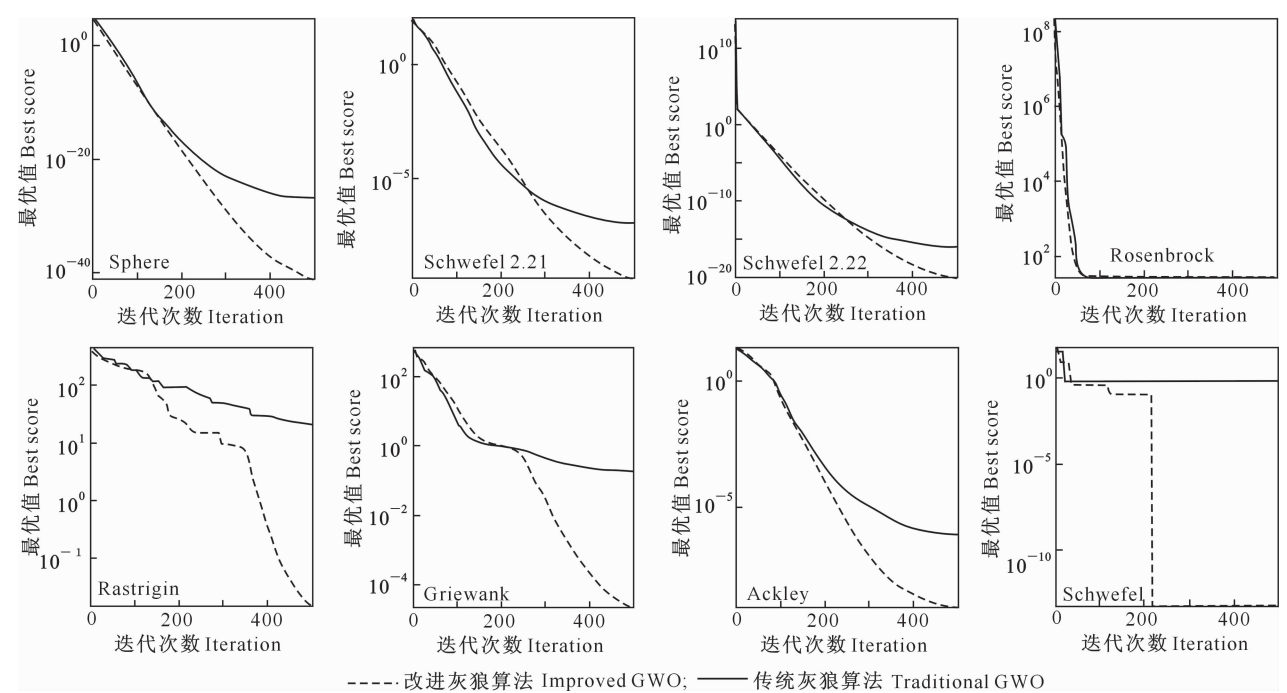


图 3 改进灰狼算法与传统灰狼算法测试函数的对比

Fig. 3 Comparison of test functions between the improved and traditional GWO

从表 1 和图 3 可以看出,除 Rosenbrock 函数中两者计算结果均不佳外,其余 7 个测试函数中,改进灰狼算法在精度、优化速度上均明显优于传统灰狼算法,且不易陷入函数的局部最优,说明优化后的灰狼算法具有可行性。

2 实例应用

2.1 研究区基本情况及数据来源

2.1.1 研究区基本情况

庆阳市位于甘肃省最东部,总面积 27 119 km²,下辖 1 个区 7 个县。该市地

形北高南低,海拔 878~2 078 m。庆阳市是甘肃的石油天然气化工基地、长庆油田的主产区,已探明油气总资源量 40 亿 t,占鄂尔多斯盆地总资源量的 41%。全市平均降水量 468.1 mm,降水地域分布不均。多年平均降水量最小为环县耿湾站,仅为 374.2 mm;最大是正宁县站,为 623.3 mm。降水量总趋势由东南向西北递减。庆阳市位于黄河流域,其中泾河水系流域面积 23 855 km²,占总土地面积的 87.97%;北洛河水系流域面积 2 330 km²,占 8.58%;苦水河和清水河流域面积 934 km²,占 3.44%。全市主干河流是马莲河,其在庆阳市境内的流域面积为 16 920 km²。

2.1.2 数据来源 本研究数据来源于 2011—2018 年《庆阳市统计年鉴》、《庆阳水资源综合规划》、《庆阳水利志》、《甘肃省庆阳市水资源利用中长期规划》、《庆阳市十三五规划报告》、甘肃省统计局网站 (<http://www.gstj.gov.cn/>)。

2.2 水资源配置模型

2.2.1 配置原则 水资源优化配置的目标是满足人口、环境、资源与经济协调发展对水资源在时间、空间、用途和数量上的要求,使有限的水资源获得最大的利用效益^[31]。依据研究区的基本情况,庆阳市水资源优化配置应遵循以下原则:

(1)以人为本,生活、生态用水优先原则^[23]。在以人为本的前提下,首先保证生活和环境用水的需水量及需水水质。

(2)供水设施建设便利原则^[32]。为减小取水成本,在无政策或强制性要求下,需水区单位就近取水。

(3)水源水质与需水水质相近原则^[33]。原则上非常规水资源不用于第三产业及居民生活用水;地表水与调水资源优先保证城镇居民生活、第三产业及农业,再供应第二产业;污水再生回用资源(主要是中水回收利用)和雨洪水资源,优先用于第二产业和生态、公共卫生,其次用于农业。

(4)用水价格与当地经济状况相近原则。在满足水质标准的要求下,地表水、地下水、雨洪水、中水回收利用的成本价格符合用水区域经济状况。

(5)综合效益最大化原则^[34]。维持经济、环境、社会大系统的协调发展,从而获得经济、环境、社会协调发展的最佳综合效益。

2.2.2 目标函数 庆阳市分为西峰区、庆城县、环县、华池县、合水县、正宁县、宁县和镇原县 8 个用水单位,依次用 $k=1\sim 8$ 来表示;各区县用水部门分为生活用水、生态用水、第三产业用水、第二产业用水、

农业用水,依次用 $j=1\sim 5$ 来表示。以经济目标、社会效益目标和生态目标为 3 个目标建立多目标函数优化配置方案。

目标 1:经济目标函数。以经济效益最大为目标,表达式为:

$$\max f_1(x) = \sum_{j=1}^n \tau_j \cdot \sum_{k=1}^m (a_{kj} - b_{kj}) \cdot x_{kj} \quad (7)$$

式中: a_{kj} 为 k 地区 j 用水部门的单位水资源经济产值(元/m³),参考行业万元产值用水量确定; b_{kj} 为 k 地区 j 用水部门的单位水资源成本; x_{kj} 为 k 地区 j 部门的供水量(m³); m 取 8,代表了庆阳市一区七县; n 取 5,代表了 5 个部门的用水量; τ_j 为部门用水次序系数^[35],计算公式为:

$$\tau_j = \frac{1 + n_{\max} - n_j}{\sum_{j=1}^n (1 + n_{\max} - n_j)} \quad (8)$$

式中: n_j 为部门用水次序的序号, $n_j=1\sim 5$; $n_{\max}$ 为部门用水次序序号最大值, $n_{\max}=5$ 。

目标 2:社会效益目标函数。以全市总缺水量最小为社会效益目标,表达式为:

$$\min f_2(x) = \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n (D_{kj} - x_{kj}) \quad (9)$$

式中: D_{kj} 为 k 地区 j 部门的需水量(m³)。

目标 3:生态目标函数。以 COD 排放量最小作为生态目标,表达式为:

$$\min f_3(x) = \sum_{j=1}^n 0.01 d_j p_j \sum_{k=1}^m x_{kj} \quad (10)$$

式中: d_j 为 j 用水部门单位污水排放量中的 COD 质量浓度(mg/L); p_j 为 j 用水部门的污水排放系数。

2.2.3 约束条件 本研究确定了 5 个约束条件。

约束 1:供水条件约束。水资源供给量不可超过水资源可供给总量,表达式为:

$$\sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n x_{kj} \leq W \quad (11)$$

式中: W 为水资源可供给总量(m³)。

因可供给水资源中的地表水和地下水为常规水资源,需要着重节约并得到各地政府的支持。本研究中,可供给地表水和地下水总量在不超过计算可供水量的同时,均不能超过庆阳市地表水和地下水用水总量控制红线。

约束 2:基本用水保证约束。各部门供水之比大于部门需水保证率,表达式为:

$$\delta_j < \frac{x_{kj}}{D_{kj}} \leq 1 \quad (12)$$

式中: δ_j 为 j 部门需水保证率。

约束 3:有效浇灌面积约束。同水平年灌溉面

积用水量应高于低方案预测水量,但同时低于高方案预测水量,表达式为:

$$N_{k1}C_k \leqslant x_{kg} \leqslant N_{k2}C_k。$$
 (13)

式中: N_{k1} 、 N_{k2} 分别为 k 地区低方案和高方案有效灌溉面积预测值(m^2)^[33]; C_k 为 k 地区单位有效灌溉面积需水量(m^3),参考甘肃省用水定额取值; x_{kg} 为向 k 地区灌溉面积用水量(m^3), x_{kg} 包含在农业用水 x_{k5} 中。

约束 4:第三产业产值约束。规划年第三产业产值应大于规划值目标,表达式为:

$$\sum_{k=1}^m x_{k3} \cdot \alpha_{k3} \geqslant Z_3。$$
 (14)

式中: x_{k3} 为 k 地区第三产业的供水量(m^3); α_{k3} 为 k

地区第三产业用水的单位水资源经济产值($\text{元}/\text{m}^3$); Z_3 为第三产业产值规划目标(元),参考庆阳市十三五规划、庆阳市统计年鉴取值。

约束 5:非负约束。所供水量不小于 0,表达式为:

$$x_{kj} \geqslant 0。$$
 (15)

2.3 配置方案计算及方法对比

2.3.1 配置方案计算 目标函数和约束条件处理参考文献[36]。以 2020,2025 和 2030 年分别为近期、中期和远期规划年,分别采用改进灰狼算法、传统灰狼算法和传统多目标配置方法进行水资源优化配置,结果见表 2~4。

表 2 基于改进灰狼算法的庆阳市水资源配置结果

Table 2 Water resources allocation in Qingyang based on the improved GWO

10⁴ m³

规划年 Planning year	范围 Range	生活用水量 Domestic water utilization	生态用水量 Ecological water utilization	第三产业用水量 Tertiary industry water utilization	第二产业用水量 Secondary industry water utilization	农业用水量 Agricultural water utilization	可供水总量 Total water supply	需水总量 Total water demand
2020	全市 Whole city	6 269.90	456.56	1 863.39	25 245.94	14 363.31	48 199.00	49 511.00
	西峰 Xifeng	925.21	85.42	631.67	3 490.54	4 454.16	9 587.00	9 981.00
	庆城 Qingcheng	835.06	64.21	161.35	2 577.55	1 558.83	5 197.00	5 316.00
	环县 Huanxian	664.06	47.04	152.97	2 160.54	911.38	3 936.00	4 009.00
	华池 Huachi	368.91	22.10	181.15	1 131.51	775.42	2 479.00	2 587.00
	合水 Heshui	186.76	13.23	56.07	760.72	709.22	1 726.00	1 859.00
	正宁 Zhengning	891.80	62.60	254.27	2 834.70	2 061.65	6 105.00	6 145.00
	宁县 Ningxian	1 179.76	66.12	219.81	11 643.37	1 962.94	15 072.00	15 217.00
	镇原 Zhenyuan	1 218.34	95.84	206.10	647.01	1 929.71	4 097.00	4 397.00
2025	全市 Whole city	7 225.49	647.64	2 725.36	28 673.94	14 953.54	54 226.00	55 483.00
	西峰 Xifeng	1 085.71	122.37	961.98	4 457.60	4 515.33	11 143.00	11 527.00
	庆城 Qingcheng	925.16	90.62	198.00	2 695.54	1 569.67	5 479.00	5 596.00
	环县 Huanxian	790.52	67.75	166.18	2 226.01	916.53	4 167.00	4 245.00
	华池 Huachi	412.02	31.48	259.89	1 140.40	776.20	2 620.00	2 727.00
	合水 Heshui	184.49	15.90	70.90	989.01	609.70	1 870.00	2 002.00
	正宁 Zhengning	1 178.45	101.04	434.77	3 355.96	2 402.77	7 473.00	7 512.00
	宁县 Ningxian	1 371.03	95.61	304.88	13 046.09	1 999.38	16 817.00	16 960.00
	镇原 Zhenyuan	1 278.10	122.86	328.75	763.32	2 163.96	4 657.00	4 913.00
2030	全市 Whole city	7 895.19	801.68	3 406.56	30 296.20	14 698.39	57 099.00	58 223.00
	西峰 Xifeng	1 183.32	152.62	1 240.45	5 171.16	4 302.45	12050.00	12402.00
	庆城 Qingcheng	961.81	111.99	223.39	2 656.45	1 488.36	5 442.00	5 550.00
	环县 Huanxian	871.41	84.62	169.71	2 161.45	867.80	4 155.00	4 233.00
	华池 Huachi	431.09	39.03	323.42	1 083.65	731.80	2 609.00	2 708.00
	合水 Heshui	175.30	17.28	79.24	1 125.50	509.68	1 907.00	2 029.00
	正宁 Zhengning	1 417.64	139.47	619.61	3 653.25	2 576.03	8 406.00	8 442.00
	宁县 Ningxian	1 483.86	120.07	373.64	13 690.46	1 914.98	17 583.00	17 716.00
	镇原 Zhenyuan	1 370.75	136.61	377.09	754.26	2 307.29	4 946.00	5 143.00

表 3 基于传统灰狼算法的庆阳市水资源配置结果

Table 3 Water resources allocation in Qingyang based on the traditional GWO

10⁴ m³

规划年 Planning year	范围 Range	生活用水量 Domestic water utilization	生态用水量 Ecological water utilization	第三产业用水量 Tertiary industry water utilization	第二产业用水量 Secondary industry water utilization	农业用水量 Agricultural water utilization	可供水总量 Total water supply	需水总量 Total water demand
2020	全市 Whole city	6 065.50	450.74	1 870.02	26 016.66	13 796.07	48 199.00	49 511.00
	西峰 Xifeng	907.25	82.29	630.42	3 634.97	4 332.06	9 587.00	9 981.00
	庆城 Qingcheng	820.43	62.32	160.65	2 663.78	1 489.82	5 197.00	5 316.00
	环县 Huanxian	647.46	46.33	152.74	2 200.37	889.09	3 936.00	4 009.00
	华池 Huachi	366.36	21.65	180.77	1 171.74	738.47	2 479.00	2 587.00

表 3(续) Continued table 3								10 ⁴ m ³
规划年 Planning year	范围 Range	生活用水量 Domestic water utilization	生态用水量 Ecological water utilization	第三产业用水量 Tertiary industry water utilization	第二产业用水量 Secondary industry water utilization	农业用水量 Agricultural water utilization	可供水总量 Total water supply	需水总量 Total water demand
2020	合水 Heshui	179.78	12.85	55.74	801.01	676.62	1 726.00	1 859.00
	正宁 Zhengning	865.78	61.37	253.51	2 937.02	1 987.32	6 105.00	6 145.00
	宁县 Ningxian	1 161.68	64.96	219.13	11 729.47	1 896.77	15 072.00	15 217.00
	镇原 Zhenyuan	1 116.75	98.96	217.05	878.29	1 785.93	4 097.00	4 397.00
2025	全市 Whole city	7 006.20	629.52	2 651.33	29 492.63	14 446.31	54 226.00	55 483.00
	西峰 Xifeng	1 047.39	117.92	927.21	4 622.74	4 427.74	11 143.00	11 527.00
	庆城 Qingcheng	886.35	89.76	194.65	2 799.35	1 508.87	5 479.00	5 596.00
	环县 Huanxian	773.11	66.05	162.98	2 269.73	895.11	4 167.00	4 245.00
2030	华池 Huachi	404.09	30.36	250.57	1 183.09	751.89	2 620.00	2 727.00
	合水 Heshui	182.73	15.23	70.04	1025.04	576.96	1870.00	2002.00
	正宁 Zhengning	1 135.02	98.80	425.02	3 482.82	2 331.33	7 473.00	7 512.00
	宁县 Ningxian	1 358.17	93.76	301.61	13 134.23	1 929.24	16 817.00	16 960.00
	镇原 Zhenyuan	1 219.34	117.63	319.25	975.62	2 025.17	4 657.00	4 913.00
	全市 Whole city	7 707.70	770.80	3 285.54	31 318.95	14 015.02	57 099.00	58 223.00
	西峰 Xifeng	1 154.94	149.85	1 223.87	5 319.76	4 201.59	12 050.00	12 402.00
	庆城 Qingcheng	939.16	109.16	214.91	2 868.98	1 309.80	5 442.00	5 550.00
	环县 Huanxian	855.63	81.66	165.91	2 209.83	841.97	4 155.00	4 233.00
	华池 Huachi	420.69	38.08	315.61	1 126.07	708.55	2 609.00	2 708.00
	合水 Heshui	172.81	17.12	78.38	1 155.53	483.15	1 907.00	2 029.00
	正宁 Zhengning	1 373.06	124.41	554.29	3 784.27	2 569.97	8 406.00	8 442.00
	宁县 Ningxian	1 471.26	118.44	366.37	13 798.72	1 828.19	17 583.00	17 716.00
	镇原 Zhenyuan	1 320.15	132.08	366.20	1 055.78	2 071.79	4 946.00	5 143.00

表 4 基于传统多目标配置方法的庆阳市水资源配置结果								10 ⁴ m ³
Table 4 Water resources allocation in Qingyang based on traditional multi-objective method								10 ⁴ m ³
规划年 Planning year	范围 Range	生活用水量 Domestic water u tilization	生态用水量 Ecological water utilization	第三产业用水量 Tertiary industry water utilization	第二产业用水量 Secondary industry water utilization	农业用水量 Agricultural water utilization	可供水总量 Total water supply	需水总量 Total water demand
2020	全市 Whole city	5 822.28	433.27	1 795.96	26 772.70	13 374.82	48 199.00	49 511.00
	西峰 Xifeng	878.43	81.94	603.23	3 886.53	4 136.88	9 587.00	9 981.00
	庆城 Qingcheng	792.13	62.03	153.80	2 742.72	1 446.32	5 197.00	5 316.00
	环县 Huanxian	634.63	45.04	146.75	2 258.64	850.93	3 936.00	4 009.00
	华池 Huachi	354.36	21.01	172.19	1 201.82	729.62	2 479.00	2 587.00
	合水 Heshui	180.34	12.57	53.16	818.82	661.11	1 726.00	1 859.00
	正宁 Zhengning	853.96	59.45	241.34	3 012.68	1 937.58	6 105.00	6 145.00
	宁县 Ningxian	1 124.15	62.99	212.12	11 818.00	1 854.75	15 072.00	15 217.00
2025	镇原 Zhenyuan	1 004.27	88.26	213.36	1 033.50	1 757.63	4 097.00	4 397.00
	全市 Whole city	6 843.01	610.00	2 584.33	30 257.49	13 931.17	54 226.00	55 483.00
	西峰 Xifeng	1 037.36	117.04	914.05	4 814.39	4 260.16	11 143.00	11 527.00
	庆城 Qingcheng	888.85	86.63	188.05	2 829.30	1 486.17	5 479.00	5 596.00
	环县 Huanxian	764.19	65.08	158.26	2 317.07	862.39	4 167.00	4 245.00
	华池 Huachi	391.73	29.93	248.57	1 221.19	728.57	2 620.00	2 727.00
	合水 Heshui	175.22	15.11	67.60	1 045.85	566.22	1 870.00	2 002.00
	正宁 Zhengning	1127.13	95.94	417.07	3 596.34	2 236.51	7 473.00	7 512.00
2030	宁县 Ningxian	1 312.95	92.39	294.13	13 251.58	1 865.96	16 817.00	16 960.00
	镇原 Zhenyuan	1 145.57	107.88	296.59	1 181.77	1 925.19	4 657.00	4 913.00
	全市 Whole city	7 545.80	766.65	3 255.75	31 798.90	13 730.92	57 099.00	58 223.00
	西峰 Xifeng	1 130.59	145.03	1 191.20	5 534.38	4 048.80	12 050.00	12 402.00
	庆城 Qingcheng	913.99	106.37	215.56	2 812.42	1 393.67	5 442.00	5 550.00
	环县 Huanxian	833.84	80.64	162.48	2 257.76	820.28	4 155.00	4 233.00
	华池 Huachi	412.90	37.34	307.54	1 159.12	692.12	2 609.00	2 708.00
	合水 Heshui	168.30	16.51	75.22	1 172.21	474.76	1 907.00	2 029.00
	正宁 Zhengning	1 370.03	133.96	588.25	3 904.07	2 409.69	8 406.00	8 442.00
	宁县 Ningxian	1 411.15	116.07	356.04	13 878.92	1 820.84	17 583.00	17 716.00
	镇原 Zhenyuan	1 305.01	130.73	359.47	1 080.02	2 070.77	4 946.00	5 143.00

经计算,3 种计算方法均达到了各约束条件的约束标准且基本达到供需平衡。通过对比分析 3 种方法的配置结果可知:若主要考虑经济效益目标,传统多目标配置方法更能满足要求。庆阳市仍以第二产业为经济主导,传统多目标配置方法结果中的第二产业用水量较大,有利于庆阳市水资源配置中经济效益最大目标的实现。若主要考虑社会效益目标,改进灰狼算法更能满足要求,其结果中的生活、生态用水量较大,提高了人民生活水平,有利于庆阳市水资源配置中社会效益最大目标的实现。若主要考虑生态效益目标,传统灰狼算法更能满足要求,其结果中的第三产业用水量较大,有利于促进庆阳市的产业调整,抑制高污染、高排放产业发展。从配置结果来看,农业用水量三者均偏大,建议推广节水农业措施以提高灌溉效率,减少大水漫灌等灌溉方式,从农业技术上促进水资源的节约与利用。

但是为了全面、系统地分析问题,必须同时考虑众多影响因素,不能单纯以某一部门供水量的多少来决定方法的优劣。但是各部门供水量所对应的人

口承载力、经济、生态等各评价指标单位不同,数据很难直观判断 3 种方法所计算结果的综合效益的优劣。所以本研究选择主成分分析法对 3 种方法的综合效益进行评价,其主要利用降维思想,将多种指标转变为少数几个综合性指标(即主成分),既能使问题简单化,又可得到更加科学有效的数据信息。

2.3.2 配置方法对比 参照文献[37],选用改进的主成分分析法对 3 个方法进行优化选则。以 A、B、C 分别代表改进灰狼算法、传统灰狼算法和传统多目标配置方法,以 I、II、III 分别代表 3 个规划年,则设立 9 个基本目标(A_I 、 A_{II} 、 A_{III} 、 B_I 、 B_{II} 、 B_{III} 、 C_I 、 C_{II} 、 C_{III})。以庆阳市的生活用水量、生态用水量、第三产业用水量、第二产业用水量、农业用水量、经济生产总值、总可承载人口、第三产业产值、城市绿地面积、人均耕地面积和人均生产总值 11 个指标成分(记为 $Y_1 \sim Y_{11}$)进行方法比选,对应指标参考《甘肃省庆阳市水资源利用中长期规划》所推求用水定额计算,结果如表 5 所示。

表 5 庆阳市水资源配置方法比对的基础数据

Table 5 Basic data of comparison and selection of water resources allocation method in Qingyang

目标 Aims	生活用水量 Y_1 / ($\times 10^4 \text{ m}^3$) Domestic water utilization Y_1	生态用水量 Y_2 / ($\times 10^4 \text{ m}^3$) Ecological water utilization Y_2	第三产业用水量 Y_3 / ($\times 10^4 \text{ m}^3$) Tertiary industry water utilization Y_3	第二产业用水量 Y_4 / ($\times 10^4 \text{ m}^3$) Secondary industry water utilization Y_4	农业用水量 Y_5 / ($\times 10^4 \text{ m}^3$) Agricultural water utilization Y_5	经济生产总值 Y_6 / 亿元 GDP Y_6
A_I	6 269.90	456.56	1 863.39	25 245.94	14 363.31	1 074.46
A_{II}	7 225.49	647.64	2 725.36	28 673.94	14 953.54	1 601.18
A_{III}	7 895.19	801.68	3 406.56	30 296.20	14 698.39	2 196.12
B_I	6 065.50	450.74	1 870.02	26 016.66	13 796.07	1 100.97
B_{II}	7 006.20	629.52	2 651.33	29 492.63	14 446.31	1 621.59
B_{III}	7 707.70	770.80	3 285.54	31 318.95	14 015.02	2 223.05
C_I	5 822.28	433.27	1 795.96	26 772.70	13 374.82	1 116.92
C_{II}	6 843.01	610.00	2 584.33	30 257.49	13 931.17	1 641.02
C_{III}	7 545.80	766.65	3 255.75	31 798.90	13 730.92	2 241.10
目标 Aims	总可承载人口 Y_7 / ($\times 10^4$) Total population carrying capacity Y_7	第三产业产值 Y_8 / ($\times 10^8$ 元) Output value of tertiary industry Y_8	城市绿地面积 Y_9 / ($\times 10^4 \text{ m}^2$) Urban green area Y_9	人均耕地面积 Y_{10} / hm^2 Per capita cultivated land area Y_{10}	人均生产总值 Y_{11} / ($\times 10^4$ 元) GDP per capita Y_{11}	
A_I	252.61	232.92	2 029.16	2.53×10^{-2}	4.25	
A_{II}	274.18	454.23	2 878.42	2.42×10^{-2}	5.84	
A_{III}	283.12	681.31	3 563.04	2.31×10^{-2}	7.76	
B_I	244.38	233.75	2 003.30	2.51×10^{-2}	4.51	
B_{II}	265.86	441.89	2 797.85	2.42×10^{-2}	6.10	
B_{III}	276.40	657.11	3 425.76	2.25×10^{-2}	8.04	
C_I	234.58	224.49	1 925.65	2.53×10^{-2}	4.76	
C_{II}	259.67	430.72	2 711.11	2.38×10^{-2}	6.32	
C_{III}	270.59	651.15	3 407.31	2.26×10^{-2}	8.28	

经协方差计算,获得各主成分的特征值及方差贡献率如表 6 所示。表 6 表明,当主成分为 Y_2 时,累积方差贡献率 γ 的值为 $99.109\% > 99\%$,包含原

始指标大部分信息,满足评价要求。所以本研究提取前 2 个主成分作为评价指标,起到了降维和简化的作用。

表 6 庆阳市水资源配置方法的主成分特征值及方差贡献率

Table 6 Principal component characteristic value and variance contribution rate of water resource allocation methods in Qingyang

主成分 Principal component	特征值 Eigen value	方差贡献率/% Variance contribution rates		主成分 Principal component	特征值 Eigen value	方差贡献率/% Variance contribution rates	
		数值 Value	累积值 γ Accumulated value γ			数值 Value	累积值 γ Accumulated value γ
Y_1	8.726	87.262	87.262	Y_7	0.000	0.000	100.000
Y_2	1.185	11.847	99.109	Y_8	0.000	0.000	100.000
Y_3	0.079	0.794	99.903	Y_9	0.000	0.000	100.000
Y_4	0.009	0.085	99.988	Y_{10}	0.000	0.000	100.000
Y_5	0.001	0.010	99.998	Y_{11}	0.000	0.000	100.000
Y_6	0.000	0.002	100.000				

为方便观测,参考文献[38]的综合得分计算方法,将综合得分控制在 $[0,1]$,得到 3 个计算方法比选结果见表 7,其中得分(1)和得分(2)分别表示各目标的两个主成分得分情况。表 7 显示,所得综合得分表现为 $A_{III} > B_{III} > C_{III} > A_{II} > B_{II} > C_{II} > A_I > B_I > C_I$ 。该结果表明,改进灰狼算法的计算结果优于相同年份传统灰狼算法和传统多目标配置方法。同时,经过改进灰狼算法配置后,2020、2025 和

2030 年水资源所对应的经济生产总值分别为 1 074.46 亿、1601.18 亿和 2 196.12 亿元;其中 2020 年配置后的水资源所对应的经济生产总值超过《庆阳市十三五经济规划》中 1 000 亿元的产值目标。可以看出,经过水资源优化配置模型计算,庆阳市有限的水资源供应量在满足人民生活、生态发展的前提下,其综合效益获得最大化。

表 7 庆阳市水资源优化配置方法的评价结果

Table 7 Evaluation of Qingyang water resources optimal allocation schemes

方法 Program	得分(1) Score (1)	得分(2) Score (2)	综合得分 Synthesis	排名 Ranking	方法 Program	得分(1) Score(1)	得分(2) Score (2)	综合得分 Synthesis	排名 Ranking
A_I	-1.100	0.994	0.18	7	B_{III}	1.066	-0.620	0.88	2
A_{II}	0.220	1.586	0.69	4	C_I	-1.312	-1.169	0.00	9
A_{III}	1.211	0.728	1.00	1	C_{II}	-0.007	-0.549	0.50	6
B_I	-1.182	-0.189	0.09	8	C_{III}	1.006	-1.277	0.83	3
B_{II}	0.098	0.496	0.59	5					

注:得分(1)和得分(2)分别表示各目标的 2 个主成分得分情况。
Note:The score (1) and score (2) represent the scores of the two principal components of each target, respectively.

3 结 论

本研究对传统灰狼算法的初始种群、距离控制参数 α 、灰狼位置更新方程进行了改进,并应用于庆阳市水资源优化配置模型的求解,取得以下主要结论。

1)在对改进灰狼算法进行测试时,8 个测试函数中有 7 个函数计算极值显示,改进灰狼算法明显优于传统灰狼算法。结果表明,改进的灰狼算法在前期搜索范围、收敛速度及精度方面均优于传统灰狼算法,且不易于陷入函数的局部最优。

2)将改进的灰狼算法应用于庆阳市的水资源优化配置,并对改进灰狼算法、传统灰狼算法、传统多目标配置方法进行对比,结果表明,在庆阳市水资源优化配置中,改进灰狼算法优于另外 2 个计算方法。庆阳市优化配置后的 2020 年相应水资源所对应的经济生产总值为 1 074.46 亿元,大于《庆阳市十三

五经济规划》目标值 1 000 亿元。这表明,庆阳市在优先满足人民生活、生态发展的前提下,其有限的水资源经优化配置可获得最大的水资源综合效益。

3)相对于传统灰狼算法易陷入局部最优、收敛速度慢、精度不高等不足,改进灰狼算法有明显的改善。同时,改进灰狼算法在水资源优化配置中有较好的可行性,可为水资源优化配置模型求解提供新的途径。

[参考文献]

[1] Wang H,Wang C,Wang J,et al. Theory of annual runoff evolution under natural-artificial dual mode and case study of Wuding River basin on the middle Yellow River [J]. Science in China,2004,47(S1):51-59.
[2] 王 浩,游进军.中国水资源配置 30 年 [J]. 水利学报,2016,47(3):265-271,282.
Wang H,You J J. 30 years of water allocation in China [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2016,47(3):265-271,282.

- [3] 张浩佳,吴剑锋,林 锦,等. 基于 GSFLOW 的地下水-地表水耦合模拟与分析 [J]. 工程勘察,2015,43(5):34-38.
Zhang H J, Wu J F, Lin J, et al. Comparative analysis and coupling simulation of groundwater and surface water flow based on GSFLOW [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2015,43(5):34-38.
- [4] 李贺娟,李万明.“一带一路”背景下西北干旱地区水资源与经济生产要素匹配关系研究 [J]. 节水灌溉,2016(11):67-70.
Li H J, Li W M. Study on the matching relationship between water resources and economic production factors in northwest arid region under the background of One Belt And One Road [J]. Water Saving Irrigation, 2016(11):67-70.
- [5] 王 浩,秦大庸,郭孟卓,等. 干旱区水资源合理配置模式与计算方法 [J]. 水科学进展,2004(6):689-694.
Wang H, Qin D Y, Guo M Z, et al. Mode and calculation method for rational water resources allocation in arid zone [J]. Advances in Water Science, 2004(6):689-694.
- [6] Massa A, Hufschmidt M M, Dorfman R. Design of water resources management [M]. Cambridge: Harvard Press, 1962.
- [7] 华士乾. 水资源系统分析指南 [M]. 北京:水利电力出版社, 1988.
Hua S Q. Guide to water resource system analysis [M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1988.
- [8] 尹明万,谢新民,王 浩,等. 基于生活、生产和生态环境用水的水资源配置模型 [J]. 水利水电科技进展,2004,24(2):5-8.
Yin M W, Xie X M, Wang H, et al. Water resource allocation model based on living production and ecological environment [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2004,24(2):5-8.
- [9] Rosenbrock H H. Book Review: transform and state variable methods in Linear Systems [J]. International Journal of Electrical Engineering Education, 1967,5(3):544-545.
- [10] Robert H. Use of randomization in the investigation of unknown functions [J]. Journal of the American Statistical Association, 1958,53(281):176-186.
- [11] Spendley W, Hext G R, Himsforth F R. Sequential application of simplex designs in optimisation and evolutionary operation [J]. Technometrics, 1962,4(4):441-461.
- [12] 陈南祥,李跃鹏,徐晨光. 基于多目标遗传算法的水资源优化配置 [J]. 水利学报,2006,37(3):308-313.
Chen N X, Li Y P, Xu C G. Optimal deployment of water resources based on multi-objective genetic algorithm [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006,37(3):308-313.
- [13] 吴泽宁,索丽生. 水资源优化配置研究进展 [J]. 灌溉排水学报,2004,23(2):1-5.
Wu Z N, Suo L S. Advance about study of water resources optimal distribution [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2004,23(2):1-5.
- [14] 陈太政,侯景伟,陈 准. 中国水资源优化配置定量研究进展 [J]. 资源科学,2013,35(1):132-139.
Chen T Z, Hou J W, Chen H. Quantitative studies of the optimization allocation of water resources in China : a review [J]. Resources Science, 2013,35(1):132-139.
- [15] 娄 帅,王慧敏,牛文娟,等. 基于免疫遗传算法水资源配置多阶段群决策优化模型研究 [J]. 资源科学,2013,35(3):569-577.
Lou S, Wang H M, Niu W J, et al. Optimization of multi-stage group decision making for water resource allocation [J]. Resources Science, 2013,35(3):569-577.
- [16] 陈晓楠,段春青,邱 林,等. 基于粒子群的大系统优化模型在灌区水资源优化配置中的应用 [J]. 农业工程学报,2008,24(3):103-106.
Chen X N, Duan C Q, Qiu L, et al. Application of large scale system model based on particle swarm optimization to optimal allocation of water resources in irrigation areas [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008,24(3):103-106.
- [17] 侍翰生,程吉林,方红远,等. 基于动态规划与模拟退火算法的河-湖-梯级泵站系统水资源优化配置研究 [J]. 水利学报, 2013,44(1):91-96.
Shi H S, Cheng J L, Fang H Y, et al. Research on optimal water resources allocation of river-lake-pumping stations system by dynamic programming and simulated annealing approach [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013,44(1):91-96.
- [18] 侯景伟,孔云峰,孙九林. Pareto 蚁群算法与遥感技术耦合的水资源优化配置 [J]. 控制理论与应用,2012,29(9):1157-1162.
Hou J W, Kong Y F, Sun J L. Combination of Pareto ant colony algorithm with remote sensing for optimal location of water resources [J]. Control Theory & Applications, 2012,29(9):1157-1162.
- [19] Mirjalili S, Mirjalili S M, Lewis A. Grey wolf optimizer [J]. Advances in Engineering Software, 2014,69(3):46-61.
- [20] 马 骏. 基于灰狼优化算法的改进研究及其应用 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学,2017.
Ma J. Improved research based on GWO and its application [D]. Hangzhou: Hanzhou Electronic Science and Technology University, 2017.
- [21] 陈金红,程 刚. 灰狼优化算法-投影寻踪模型在云南省水量分配中的应用 [J]. 三峡大学学报(自然科学版),2016,38(5):29-35.
Chen J H, Cheng G. Application of GWO-projection pursuit model to water allocation for Yunnan Province [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2016,38(5):29-35.
- [22] 龙 文,蔡绍洪,焦建军,等. 一种改进的灰狼优化算法 [J]. 电子学报,2019,47(1):171-177.
Long W, Cai S H, Jiao J J, et al. An improved GWO [J]. Acta Electronica Sinica, 2019,47(1):171-177.
- [23] Pan T S, Dao T K, Nguyen T T, et al. A Communication strategy for paralleling grey wolf optimizer [C]//Weinheimer: International Conference on Genetic and Evolutionary Computing. Berlin: Springer International Publishing, 2015: 253-262.

- [24] Nasrabadi M S, Sharafi Y, Tayari M. A parallel grey wolf optimizer combined with opposition based learning [C]// 2016 1st Conference on Swarm Intelligence and Evolutionary Computation (CSIEC). Bam Kerman; IEEE, 2016: 18-23.
- [25] 蔡延光, 黄柏亮, 蔡 颢, 等. 公交优先交通控制的协同混沌粒子群算法 [J]. 控制工程, 2019, 26(4): 675-681.
Cai Y G, Huang B L, Cai H, et al. Traffic control with bus priority based on cooperative chaos PSO [J]. Control Engineering of China, 2019, 26(4): 675-681.
- [26] 岳龙飞, 杨任农, 张一杰, 等. Tent 混沌和模拟退火改进的飞蛾扑火优化算法 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(5): 146-154.
Yue L F, Yang R N, Zhang Y J, et al. Tent chaos and simulated annealing improved moth-flame optimization algorithm [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(5): 146-154.
- [27] 涂春梅, 陈国彬, 刘 超. 混沌反馈自适应鲸鱼优化算法研究 [J]. 统计与决策, 2019, 35(7): 17-20.
Tu C M, Chen G B, Liu C. Research on chaotic feedback adaptive WOA [J]. Statistics & Decision, 2019, 35(7): 17-20.
- [28] 崔明朗, 杜海文, 魏政磊, 等. 多目标灰狼优化算法的改进策略研究 [J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(5): 156-164.
Cui M L, Du H W, Wei Z L, et al. Research on improved strategy for multi-objective GWO [J]. Computer Engineering and Applications, 2018, 54(5): 156-164.
- [29] 吕新桥, 廖天龙. 基于灰狼优化算法的置换流水线车间调度 [J]. 武汉理工大学学报, 2015, 37(5): 111-116.
Lü X Q, Liao T L. Permutation flow-shop scheduling based on the GWO [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2015, 37(5): 111-116.
- [30] Wang D, Tan D, Lei L. Particle swarm optimization algorithm: an overview [J]. Soft Computing, 2018, 22(2): 387-408.
- [31] 王顺久. 水资源优化配置原理及方法 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
Wang S J. Principle and method of optimal allocation of water resources [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2007.
- [32] USNA. Climate change and water supply [M]. Washington D C: National Academy Press, 1977.
- [33] 王建华. 苦咸水高含沙水利用与能源基地水资源配置关键技术及示范 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015.
Wang J H. Utilization of brackish water with high sediment content and water technology and demonstration of energy base [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2015.
- [34] Arnell N W. Hydrology and climate change [C]// Calow P, Petts G E. The Rivers Handbook, Vol 2. Oxford: Blackwell, 1992: 173-186.
- [35] 张成凤. 考虑不确定性的榆林市榆阳区水资源优化配置及配置系统和谐性研究 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
Zhang C F. Optimization of water resources allocation and harmony of allocation system in Yuyang district of Yulin City considering uncertainty [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2017.
- [36] 栗晓玲, 宋 悦, 刘俊民, 等. 耦合地下水模拟的渠井灌区水资源时空优化配置 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(13): 43-51.
Su X L, Song Y, Liu J M, et al. Spatiotemporal optimize allocation of water resources coupling groundwater simulation model in canal-well irrigation district [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(13): 43-51.
- [37] 商立群, 王守鹏. 改进主成分分析法在火电机组综合评价中的应用 [J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1928-1933.
Shang L Q, Wang S P. Application of improved principal component analysis in comprehensive assessment on thermal power generation units [J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1928-1933.
- [38] 周蓓棋, 徐向阳, 贾 晨, 等. 改进主成分分析法在区域水资源综合评价中的应用研究 [J]. 中国农村水利水电, 2014(3): 88-91.
Zhou L Q, Xu X Y, Jia C, et al. Study on the application of improved principal component analysis in regional water resources comprehensive evaluation [J]. China Rural Water and Hydropower, 2014(3): 88-91.