

新型萤火虫算法 – 投影寻踪模型在区域人水和谐评价中的应用

潘思成¹, 崔东文²

(1. 云南省水利水电勘测设计研究院, 云南 昆明 650021; 2. 云南省文山州水务局, 云南 文山 663099)

摘要: 为科学评价区域人水和谐状况, 构建新型萤火虫算法(NFA) – 投影寻踪(PP)评价模型。以文山州 2006 – 2018 年资料为例进行实例研究。选取 8 个典型测试函数对 NFA 进行仿真验证, 并与教学优化(TLBO)等 4 种优化算法的仿真结果进行对比。从水资源、经济社会、生态环境 3 个方面遴选 16 个指标构建区域人水和谐度评价指标体系和分级标准, 在各分级标准阈值间采用随机内插的方法生成样本构建人水和谐度评价投影目标函数, 利用 NFA 优化求解该目标函数的最佳投影向量, 构建 NFA – PP 模型对研究区 2006 – 2018 年人水和谐状况进行评价。结果表明: NFA 寻优效果优于 TLBO 等 4 种算法, 具有较好的寻优精度、极值寻优能力和全局搜索能力。NFA – PP 模型对实例 2006 – 2011 年人水和谐度评价为“不和谐”, 2012 – 2016 年评价为“基本和谐”, 2017 – 2018 年评价为“较和谐”。2006 – 2018 年文山州人水和谐度呈上升趋势, 且上升趋势显著。

关键词: 人水和谐评价; 新型萤火虫算法 – 投影寻踪模型; 指标体系; 文山州

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)01-0124-07

New firefly algorithm – projection pursuit model in regional human-water harmony evaluation

PAN Sicheng¹, CUI Dongwen²

(1. Yunnan Institute of Water & Hydropower Engineering Investigation, Design and Research, Kunming 650021, China;

2. Wenshan Water Bureau of Yunnan Province, Wenshan 663099, China)

Abstract: In order to scientifically evaluate the harmony of human and water, a new firefly algorithm (NFA)-projection pursuit (PP) evaluation model was constructed. The case study of Wenshan Prefecture in 2006 – 2018 was taken as an example. Eight typical test functions were selected to simulate the NFA, and compared with the simulation results of four optimization algorithms such as teaching learning based optimization (TLBO). Sixteen indicators were selected from three aspects, namely water resources, economy & society and ecological environment, to construct regional human-water harmony evaluation index system and grading standards. Random interpolation method was used to generate sample construction human water harmony degree evaluation projection between each grading standard threshold. The objective function, obtained by using NFA to optimize the optimal projection vector, constructs the NFA – PP model to evaluate the annual human-water harmony in the study area. The results showed that the NFA optimization effect is better than that of the four algorithms such as TLBO in terms of better optimization precision, extreme value optimization ability and global search ability. The NFA – PP model evaluates the human-water harmony degree as “disharmonious” in 2006 – 2011, “almost harmonious” in 2012 – 2016, and “harmonious” in 2017 – 2018. In the past 13 years, the human-water harmony in Wenshan Prefec-

收稿日期: 2019-07-12; 修回日期: 2019-09-23

基金项目: 云南省应用基础研究重点基金项目(2017FA022); 院士工作站建设专项(2015IC013); 云南省创新团队建设专项(YKRF2017-07-26)

作者简介: 潘思成(1986-), 男, 云南保山人, 工程硕士, 工程师, 主要从事建设征地移民安置规划、工程规划等工作。

通讯作者: 崔东文(1978-), 男, 云南玉溪人, 学士, 教授级高级工程师, 主要从事水资源管理保护及智能算法在水文水资源系统中的应用研究等工作。

ture has shown an upward trend, and the upward trend is remarkable.

Key words: human-water harmony evaluation; new firefly algorithm (NFA) – projection pursuit (PP) model; index system; Wenshan Prefecture

1 研究背景

人水和谐是指在一定历史时期、一定经济与社会发展条件下,人文系统与水系统通过博弈达到一种相互协调、共同发展的良性循环状态,使水资源能够为人类生存和经济社会可持续发展提供长久的支撑和保障能力^[1-2]。近年来,随着区域城市化进程加快和经济社会快速发展,区域水资源短缺、生态环境恶化等问题日益严峻,严重制约了经济社会绿色发展和人水和谐水平的提升。科学评价区域人水和谐水平,对于政府部门有针对性采取应对措施——合理开发水资源、发展绿色经济、提升人居环境、保护生态环境等具有重要意义。目前,用于人水和谐评价的方法有灰色关联分析法^[3]、可变模糊集法^[4-5]、主成分分析法^[6]、模糊物元法^[7]、变权法^[8]等。投影寻踪(projection pursuit, PP)技术是将高维数据投影到低维子空间上,并在该子空间寻找出反映原高维数据特征的投影,以达到研究分析高维数据的目的。目前 PP 技术已在水利行业及其他领域中得到应用。实践表明,PP 模型最佳投影向量“是否最优”是决定 PP 模型应用成败的关键。由于传统粒子群优化(PSO)算法、萤火虫算法(FA)等本身固有的早熟收敛和易陷入局部极值等缺陷所导致的“非最优”问题,在很大程度上制约了 PP 模型的应用。近年来一些新型仿生群体智能算法被陆续提出,并尝试用于 PP 最优空间投影向量的优化,取得了较好的优化效果,如足球联赛竞争(SLC)算法^[9]、鸡群优化(CSO)算法^[10]、蛾群算法(MSA)^[11]、凉亭鸟优化(SBO)算法^[12]、蚱蜢优化算法(GOA)^[13]、树-种优化算法(TSA)^[14]等。

为科学评价区域人水和谐度水平,拓展新型仿生群体智能算法融合 PP 模型在区域人水和谐度评价中的应用,本文结构安排如下:(1)介绍一种新型元启发式优化算法——新型萤火虫算法(New Firefly Algorithm, NFA),选取 8 个标准测试函数对 NFA 进行仿真测试,并与教学优化(TLBO)算法、鲸鱼优化算法(WOA)、灰狼优化(GWO)算法及基本 FA 的仿真结果进行比较。(2)基于水资源系统、经济社会系统、生态环境系统遴选 16 个指标构建区域人水和谐度评价指标体系和分级标准,在各分级标准阈值间采用随机内插的方法生成样本,构建人水和谐

度评价投影目标函数。(3)利用 NFA 优化人水和谐度评价投影目标函数,提出 NFA-PP 人水和谐度评价模型,以文山州 2006-2018 年人水和谐度评价为例进行实例分析。

2 新型萤火虫算法及仿真验证

2.1 新型萤火虫算法

萤火虫算法(Firefly Algorithm, FA)^[15]是由剑桥学者 Yang 于 2008 年通过对萤火虫相互吸引和移动过程的研究而提出的一种新型群智能优化算法。目前 FA 在各行业领域均有应用,但基本 FA 在高维问题优化中普遍存在局部收敛能力差、易陷入局部最优等问题。为了克服基本 FA 存在的不足,文献[16]提出一种新型萤火虫算法(NFA),该算法将萤火虫群体划分为雄性萤火虫子群和雌性萤火虫子群,对于雄性萤火虫,它们随机选择两个雌性萤火虫来更新它们的位置,而雌性萤火虫则通过向最亮的雄性萤火虫移动来更新它们的位置。根据文献[16],NFA 数学描述简述如下:

(1) 初始化。 D 维空间中,设萤火虫数量为 N_p ,将 N_p 划分为两个数量相同的雄性萤火虫子群和雌性萤火虫子群,第 i 只雄性萤火虫空间位置表示为 $x_i = [x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^D]$,第 i 只雌性萤火虫空间位置表示为 $y_i = [y_i^1, y_i^2, \dots, y_i^D]$,其中 $(i = 1, 2, \dots, N_p/2)$ 。随机初始化萤火虫在搜索空间中位置,计算公式为:

$$\begin{cases} x_i = L + \text{rand}(U - L) \\ y_i = L + \text{rand}(U - L) \end{cases} \quad (1)$$

式中: x_i, y_i 分别为第 i 只雄性萤火虫和第 i 只雌性萤火虫空间位置; U, L 分别为搜索空间上、下限值。

(2) 雄性萤火虫位置更新。雄性萤火虫 i 从雌性萤火虫子群中随机选择两只雌性萤火虫 j, k ,通过雄性萤火虫和两只雌性萤火虫的亮度判别因子(d_1, d_2) 确定雄性萤火虫的移动方向,即根据 d_1, d_2 确定雄性萤火虫将飞向或远离搜索空间中选定的雌性萤火虫。该策略可以增强雄性萤火虫空间探索能力和种群多样性,从而提高 NFA 全局搜索能力。

$$d_1 = \begin{cases} 1, & f(y_k^t) < f(x_i^t) \\ -1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$$d_2 = \begin{cases} 1, & f(y_j^t) < f(x_i^t) \\ -1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $f(x'_i)$ 、 $f(y'_j)$ 、 $f(y'_k)$ 分别为第 i 只雄性萤火虫和第 j 、 k 只雌性萤火虫在第 t 次迭代适应度值; x'_i 、 y'_j 、 y'_k 分别为第 i 只雄性萤火虫和第 j 、 k 只雌性萤火虫在第 t 次迭代空间位置。

则雄性萤火虫位置更新公式为:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + d_1\beta_1\lambda(y'_k - x_i^t) + d_2\beta_2\mu(y'_j - x_i^t) \quad (4)$$

式中: x_i^{t+1} 为第 i 只雄性萤火虫第 $t+1$ 次迭代位置; λ 、 μ 均为 $[0,1]$ 中的随机数; 两只萤火虫之间的吸引度 β_1 、 β_2 由式(5) 计算得到。

计算萤火虫 i 、 j 间的相对吸引度。

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}} \quad (5)$$

式中: β_0 为最大吸引度; γ 为光强吸收系数; r_{ij} 为萤火虫 i 和萤火虫 j 之间的距离。

(3) 雌性萤火虫位置更新。在搜寻过程中, 雌性萤火虫只会被雄性子群中最亮的雄性萤火虫所吸引, 这意味着雌性萤火虫在搜寻过程中能够从最亮的雄性萤火虫中学习有用信息以更新其位置。雌性萤火虫位置更新公式为:

$$y_i^{t+1} = y_i^t + \beta\phi(x_{best}^t - y_i^t) \quad (6)$$

式中: x_{best}^t 为第 t 次迭代雄性子群中最亮的萤火虫; β 为 x_{best}^t 与 y_i^t 之间的吸引度; ϕ 为 $[0,1]$ 之间的随机数。

(4) 混沌搜索。为了进一步提高 NFA 寻优能力, 在对所有雄性和雌雄萤火虫位置更新后, 在算法中引入混沌搜索, 使算法搜索过程具有避免陷入极小的能力。本文采用逻辑映射生成混沌序列, 首先根据公式(7) 产生混沌序列, 基于公式(8) 将混沌数映射到搜索空间, 由公式(9) 生成萤火虫新个体; 最后将萤火虫新个体与当前最佳萤火虫个体进行比较, 并保留适应度值最优的萤火虫个体。

$$ch(m+1) = \alpha \cdot ch(m)(1 - ch(m)) \quad (7)$$

$$ch(m) = L + ch(m) \cdot (U - L) \quad (8)$$

$$g'_{best} = (1 - \xi)g_{best} + \xi ch(m) \quad (9)$$

式中: $ch(m)$ 为第 m 个混沌数; m 为迭代计数器, 本文设置为 5; $\alpha = 4$, 表示序列完全处于混沌状态; g'_{best} 为混沌搜索最佳萤火虫个体; g_{best} 为当前最佳萤火虫个体; $\xi = (T - t + 1)/T$, T 为最大迭代次数; t 为当前迭代次数。

2.2 仿真实验

为验证 NFA 寻优能力, 利用 NFA 对 Sphere、Quartic、Schwefel 2.22、Schwefel 2.21、Schwefel 1.2、Griewank、Rastrigin 和 Ackley 8 个典型测试函数进行仿真实验, 并与当前具有较好寻优能力的新型群体

智能算法 TLBO、WOA、GWO 和基本 FA 的仿真结果进行比较。上述 8 个函数变量取值范围分别为 $[-100,100]$ 、 $[-1.28,1.28]$ 、 $[-10,10]$ 、 $[-100,100]$ 、 $[-100,100]$ 、 $[-600,600]$ 、 $[-5.12,5.12]$ 、 $[-32,32]$, 维度均为 30 维, 理论最优解值均为 0。其中, 函数 Sphere、Schwefel 2.22、Schwefel 2.21、Schwefel 1.2、Quartic 为单峰函数, 主要用于测试算法的寻优精度; 函数 Griewank、Rastrigin、Ackley 为多峰函数, 主要用于测试算法的全局搜索能力。

基于 Matlab 2018a M 语言实现 5 种算法寻优过程, 各测试函数均重复 20 次寻优, 利用平均值和标准差评估 5 种算法性能。实验参数设置如下: NFA、TLBO、WOA、GWO、FA 5 种算法最大迭代次数 $T = 1000$, 群体规模 $N = 100$ 。其中, NFA 和 FA 最大吸引度 $\beta_0 = 1$, 光强吸收系数 $\gamma = 1$, 突变系数 $\alpha = 0.25$ 。TLBO 算法参数 T_F 为 1~10 之间随机整数; WOA 对数螺旋形状常数 $b = 2$; 其他参数采用各算法默认值。

各函数 5 种算法优化对比结果见表 1, 对表 1 中数据进行分析可得出:

(1) 对单峰函数 Sphere, NFA 寻优精度略优于 TLBO、WOA, 优于 GWO, 远优于基本 FA; 对于较难优化的凹形非线性函数 Quartic, NFA 寻优精度高于其他 4 种算法 2 个量级以上; 对于具有明显转折点的非线性函数 Schwefel 2.22, NFA 寻优精度与 WOA 相当, 高于 TLBO、GWO, 远高于基本 FA; 对于倒锥形非线性函数 Schwefel 2.21 和最优解周围存在很小下降梯度函数 Schwefel 1.2, NFA 寻优精度优于 TLBO 和 GWO, 远优于基本 FA 和 WOA。可见, 对于 5 个单峰函数, NFA 寻优效果均优于 TLBO、WOA、GWO 和 FA, 表现出较高的寻优精度。

(2) 对于多峰函数 Griewank, NFA、TLBO 算法 20 次寻优均获得了理论最优值 0, 全局搜索能力优于 WOA、GWO、FA; 对于 Rastrigin 函数, NFA、WOA、GWO 算法均获得了理论最优值 0, 表现出较好的全局搜索能力; 对于 Ackley 函数, NFA 寻优精度均效果略优于 TLBO、WOA、GWO, 高于基本 FA 5 个量级以上, 表现出较好的平衡能力和全局搜索能力。可见, 对于多峰函数, NFA 表现出较好的逃逸局部极值能力和全局搜索能力。

综合以上仿真实验结果, NFA 在这 8 个函数上的搜索能力均优于 TLBO、WOA、GWO, 显著优于基本 FA, 具有较好的寻优精度、极值寻优能力和全局

搜索能力。

3 应用实例

3.1 人水和谐度评价指标体系

建立科学合理的人水和谐度评价指标体系和分级标准,对于客观评价区域人水和谐状况,有针对性地提出提升人水和谐度水平的应对策略和保障措施,协调处理好水资源开发与保护之间、水资源管理与经济社会发展之间关系具有重要意义。由于人水和谐论形成时间在 2006 年以后,提出时间较晚,其相关概念、内涵、理论等尚未统一认识,也未形成普

遍认同的人水和谐度评价指标体系和分级标准。本文参考文献[3,7-8,17],以文山州 2006-2018 年人水和谐度评价为例,从水资源、经济社会、生态环境 3 方面遴选 16 个指标构建由目标层 A、准则层 B 和指标层 C 组成 3 级人水和谐度评价指标体系和分级标准,并结合文山州 2006-2018 年各指标历史数据,合理确定人水和谐度评价分级标准阈值及各指标上下限值,见表 2。其中, C_1 、 C_{15} 、 C_{16} 为定性指标,采用调查问卷的方式进行专家打分获得;其余指标为定量指标,数据来源于历年文山州水资源公报和文山州统计年鉴等。

表 1 函数优化对比结果

函数	算法	平均值	标准差	函数	算法	平均值	标准差
Sphere	NFA	1.64×10^{-214}	0	Schwefel 1.2	NFA	9.67×10^{-60}	2.36×10^{-59}
	TLBO	2.64×10^{-164}	0		TLBO	5.52×10^{-34}	1.04×10^{-33}
	WOA	6.07×10^{-193}	0		WOA	5.03×10^2	3.16×10^2
	GWO	1.81×10^{-85}	2.92×10^{-85}		GWO	1.91×10^{-26}	4.16×10^{-26}
	FA	1.46×10^{-16}	1.39×10^{-17}		FA	6.13×10^{-16}	1.62×10^{-16}
Quartic	NFA	4.41×10^{-7}	4.01×10^{-7}	Griewank	NFA	0	0
	TLBO	3.87×10^{-4}	1.32×10^{-4}		TLBO	0	0
	WOA	5.79×10^{-4}	5.36×10^{-4}		WOA	3.28×10^{-3}	7.03×10^{-3}
	GWO	2.53×10^{-4}	1.13×10^{-44}		GWO	1.96×10^{-3}	4.18×10^{-3}
	FA	2.29×10^{-4}	6.62×10^{-5}		FA	2.80×10^{-3}	3.91×10^{-3}
Schwefel 2.22	NFA	1.66×10^{-114}	2.68×10^{-114}	Rastrigin	NFA	0	0
	TLBO	1.39×10^{-86}	1.28×10^{-86}		TLBO	6.14×10^{-11}	1.38×10^{-10}
	WOA	9.68×10^{-114}	2.28×10^{-113}		WOA	0	0
	GWO	3.69×10^{-49}	2.72×10^{-49}		GWO	0	0
	FA	4.45×10^{-9}	3.27×10^{-10}		FA	4.01	1.61×10
Schwefel 2.21	NFA	1.36×10^{-97}	2.30×10^{-97}	Ackley	NFA	4.44×10^{-15}	1.58×10^{-30}
	TLBO	6.00×10^{-70}	3.89×10^{-70}		TLBO	4.76×10^{-15}	7.88×10^{-16}
	WOA	1.84×10	1.57×10		WOA	4.60×10^{-15}	2.09×10^{-15}
	GWO	$1.38e \times 10^{-21}$	1.58×10^{-21}		GWO	1.19×10^{-14}	3.16×10^{-15}
	FA	4.69×10^{-9}	3.40×10^{-10}		FA	2.76×10^{-9}	1.91×10^{-10}

3.2 研究区概况与数据来源

文山州位于云南省东南部,全州总面积 31 456 km²,分属珠江、红河两大流域,水资源总量 156.3 × 10⁸ m³。2018 年全州人均 GDP 2.36 × 10⁴ 元,人均水资源量 4 452 m³,城镇化率 42.7%,人均年供水量 281 m³。

由于文山州特殊的地理位置、地形地貌和经济社会发展水平,提升区域人水和谐度水平面临以下困难:

(1)文山州水资源总量虽然丰富,但开发利难度大、成本高、边际效益低,区域降水量和径流量的年际变化大,水旱灾害频繁和水资源供需矛盾突出。

(2)文山州属边疆少数民族地区,经济社会发展相对滞后,人均 GDP 仅为 2018 年全国人均 GDP 的 40%,城镇化率不到 45%。

(3)文山州河道外生态环境用水率和水系统抗干扰能力低,亲水景观建设滞后,生态环境质量有待进一步提升。限于篇幅,指标数据从略。

3.3 NFA-PP 评价模型

3.3.1 投影寻踪(PP)技术 投影寻踪技术简要算法如下^[10-11]：

(1)数据预处理。参考文献[10-11]对正向、负向指标进行归一化处理。

(2)构造各指标投影值 $z(i)$ 函数：

$$z(i) = \sum_{j=1}^m a(j)x(i,j) \quad (10)$$

式中： a 为单位长度向量。

(3) 确定待优化目标函数 $Q(a)$ ：

$$\begin{cases} \max: Q(a) = S_z D_z \\ \text{s. t. } \sum_{j=1}^m a^2(j) = 1 \quad a \in [-1, 1] \end{cases} \quad (11)$$

式中： S_z 为投影值 $z(i)$ 的标准差； D_z 为投影值 $z(i)$ 的局部密度。 S_z, D_z 表达式参见文献[10]。

表2 区域人水和谐度评价指标体系及分级标准

目标层 A	准则层 B	指标层 C	类型	1级和谐	2级较和谐	3级基本和谐	4级不和谐	5级极不和谐
人水和谐度评价 A	水资源 B ₁	降水量 C ₁ /mm	正向	>1100	(900, 1100]	(700, 900]	(500, 700]	≤500
		水资源开发利用率 C ₂ /%	正向	>20	(15, 20]	(10, 15]	(5, 10]	≤5
		产水量模数 C ₃ /10 ⁴ (m ³ · m ⁻²)	正向	>50	(40, 50]	(30, 40]	(20, 30]	≤20
		人均水资源量 C ₄ /m ³	正向	>6000	(4000, 6000]	(2000, 4000]	(1000, 2000]	≤1000
	经济社会 B ₂	水资源管理水平 C ₅	正向	>0.8	(0.7, 0.8]	(0.6, 0.7]	(0.5, 0.6]	≤0.5
		万元 GDP 用水量 C ₆ /m ³	负向	<120	[120, 200)	[200, 300)	[300, 400)	≥400
		万元工业增加值用水量 C ₇ / m ³	负向	<45	[45, 70)	[70, 90)	[90, 140)	≥140
		灌溉水利用系数 C ₈	正向	>0.6	(0.5, 0.6]	(0.4, 0.5]	(0.3, 0.4]	≤0.3
		城镇化率 C ₉ /%	正向	>50	(40, 50]	(30, 40]	(20, 30]	≤20
		人均 GDP C ₁₀ /10 ⁴ 元	正向	>4	(3, 4]	(2, 3]	(1, 2]	≤1
		人均供水量 C ₁₁ /m ³	正向	>400	(300, 400]	(200, 300]	(100, 200]	≤100
		河道外生态用水比例 C ₁₂ /%	正向	>3	(2, 3]	(1, 2]	(0.5, 1]	≤0.5
	生态环境 B ₃	水功能区达标率 C ₁₃ /%	正向	>80	(70, 80]	(60, 70]	(50, 60]	≤50
		污水处理率 C ₁₄ /%	正向	>90	(80, 90]	(70, 80]	(60, 70]	≤60
		亲水景观建设情况 C ₁₅	正向	>0.8	(0.65, 0.8]	(0.5, 0.65]	(0.35, 0.5]	≤0.35
		水系统抗干扰能力 C ₁₆	正向	>0.85	(0.7, 0.85]	(0.55, 0.7]	(0.4, 0.55]	≤0.40

3.3.2 NFA-PP 评价实现步骤 NFA-PP 人水和谐度评价实现步骤归纳如下：

Step1 依据表2,在评价指标标准阈值间随机生成数据样本,对样本进行归一化处理,构建区域人水和谐度评价待优化目标函数 $Q(a)$,利用 NFA 对 $Q(a)$ 投影向量进行优化求解。

Step2 参数设置。设置萤火虫数量为 $N_p = 100$,并将 N_p 划分为两个数量相同的雄性萤火虫子群和雌性萤火虫子群;设置问题维度 $D = 16$,搜索空间范围 $[-1, 1]$,最大吸引度 $\beta_0 = 1$,光强吸收系数 $\gamma = 1$,突变系数 $\alpha = 0.25$,最大迭代次数 $T = 100$ 。利用公式(1)随机初始化雄性萤火虫和雌性萤火虫位置,令当前迭代次数 $t = 1$ 。

Step3 计算所有萤火虫适应度值;找出最佳萤火虫个体 g_{best} 。

Step4 利用公式(3)判别雄性萤火虫飞行方向;利用公式(4)更新雄性萤火虫位置。

Step5 计算雄性萤火虫适应度值;找出最佳雄性萤火虫个体 x_{best} 。若 x_{best} 适应度值优于 g_{best} ,则保留 x_{best} 为最佳萤火虫个体,否则保留最佳萤火虫个体 g_{best} 。

Step6 利用公式(6)更新雌性萤火虫位置,找出最佳雌性萤火虫个体 y_{best} 。若 y_{best} 适应度值优于 g_{best} ,则保留 y_{best} 为最佳萤火虫个体,否则保留最佳萤火虫个体 g_{best} 。

Step7 利用公式(7)~(9)进行混沌搜索,找出最佳雄性萤火虫个体 g'_{best} 。若 g'_{best} 适应度值优于 g_{best} ,则保留 g'_{best} 为最佳萤火虫个体,否则保留最佳萤火虫个体 g_{best} 。

Step8 令 $t = t + 1$,判断算法是否达到终止条

件,若是,输出最佳萤火虫位置,算法结束;否则重复 Step4 ~ Step8。

Step9 输出 NFA 最优解 g_{best} , 即最佳投影向量 a 。对实例 2006 - 2018 年人水和谐度评价指标数据及分级标准阈值进行一致性处理,利用最佳投影向量 a 计算文山州各年度投影值 $z(i)$ 及各分级标准阈值投影值 $z(k)$ ($k = 5$, 为评价分级数),利用分级标准对实例 2006 - 2018 年人水和谐状况进行评价。

3.4 模型求解

基于文山州 2006 - 2018 年人水和谐度评价指标构建人水和谐度评价待优化投影目标函数 $Q(a)$, 利用 NFA 优化求解 $Q(a)$ 最佳投影向量 a 。经求解, 投影向量 $a = (0.2575 \ 0.2733 \ 0.2403 \ 0.2371 \ 0.2340 \ 0.2437 \ 0.2469 \ 0.2617 \ 0.2364 \ 0.2507 \ 0.2612 \ 0.2699 \ 0.2425 \ 0.2493 \ 0.2463 \ 0.2450)$ 。

3.5 评价结果与分析

依据 NFA - PP 人水和谐度评价模型实现步骤, 利用投影向量 a 计算文山州 2006 - 2018 年投影值 $z(i)$ 及各分级标准阈值投影值 $z(k)$ 。经计算, 文山州 2006 - 2018 年人水和谐度评价综合投影值见表 3。人水和谐度评价 5 个等级划分标准分别为: $z_{1级/和谐} > 2.8511$, $z_{2级/较和谐} \in (2.1944, 2.8511]$, $z_{3级/基本和谐} \in (1.5352, 2.1944]$, $z_{4级/不和谐} \in (0.8945, 1.5352]$, $z_{5级/级不和谐} \leq 0.8945$ 。依据分级划分标准得到文山州各年度人水和谐度评价结果, 并与模糊综合评价法评价结果进行比较, 见表 3。

表 3 2006 - 2018 年文山州人水和谐度评价
投影值及评价结果对比

年份	NFA - PP 评价法		模糊综合评价法
	投影值 $z(i)$	评价等级	
2006	0.9724	4 级	4 级
2007	1.2316	4 级	4 级
2008	1.4066	4 级	4 级
2009	1.2432	4 级	4 级
2010	1.3720	4 级	4 级
2011	1.4565	4 级	3 级
2012	1.7137	3 级	3 级
2013	1.8261	3 级	3 级
2014	1.9705	3 级	3 级
2015	2.0996	3 级	3 级
2016	2.1492	3 级	3 级
2017	2.4407	2 级	2 级
2018	2.4426	2 级	2 级

从表 3 可以得出以下结论:

(1) 从 NFA - PP 模型评价结果来看, 2006 - 2011 年文山州人水和谐度评价为“不和谐”, 2012 - 2016 年评价为“基本和谐”, 2017 - 2018 年评价为“较和谐”。采用 Man - Kendall 秩次相关法对文山州 2006 - 2018 年人水和谐度投影值的 Kendall 统计量 $|M1|$ 进行计算。经计算, 统计量 $|M1|$ 值为 4.50, 大于置信水平 0.05 时的相应临界值 1.96, 表明文山州 2006 - 2018 年人水和谐度水平呈上升趋势, 且上升趋势显著。

(2) 从表 3 评价结果来看, NFA - PP 模型评价结果与模糊评价法评价结果仅在 2011 年上存在 1 个等级的差异, 2 种方法评价结果基本一致。从具体评价数据来看, 2008 年投影值要大于 2009 年和 2010 年, 其原因在于 2008 年属丰水年份, 年降水量 1386.8 mm, 高于 2009 年的 812.9 mm 和 2010 年的 933.0 mm, 降水量大小对产水量模数、人均水资源量、人均供水量、河道外生态用水比例和水功能区达标率等指标产生直接影响。2006 - 2011 年, 文山州水资源管理水平、经济社会发展、生态环境质量虽然得到逐年增长或提升, 但总体人文系统和水系统协调程度低, 人水和谐度评价为“不和谐”符合客观实际; 2012 - 2016 年, 随着文山州经济社会的快速发展、节水型社会建设的持续推进和最严格水资源管理制度的贯彻落实, 人水和谐度水平得到进一步提升, 和谐度评价为“基本和谐”较为客观; 2017 - 2018 年, 随着文山州河长制工作的有效开展、水生态文明建设和最严格水资源管理工作的稳步推进, 人水和谐度水平得到较大提升, 和谐度评价为“较和谐”符合现状。

(3) 从文山州人水和谐度评价变化趋势来看, 虽然文山州 2006 - 2018 年人水和谐度水平得到了显著提升, 但囿于文山州地处西南边陲, 经济社会发展水平相对滞后; 水资源开发利用难度大、管理水平不高, 亲水景观建设滞后, 水系统抗干扰能力弱, 加之降水时空分布不均, 水环境污染日趋严峻等等, 文山州人水和谐水平距“和谐”尚有一定差距。

4 结 论

(1) 介绍了新型萤火虫算法 (NFA), 选取国际通用的 8 个典型测试函数对 NFA 进行仿真验证, 并与 TLBO、WOA、GWO 和基本 FA 的仿真结果进行比较。结果表明: NFA 寻优效果优于 TLBO、WOA、GWO 算法, 显著优于基本 FA, 具有较好的寻优精度

全局搜索能力。

(2)从水资源、经济社会、生态环境3个方面遴选16个指标构建区域人水和谐度评价指标体系和分级标准,在各评价指标标准阈值间随机生成数据样本构造投影目标函数,利用NFA搜索目标函数最佳投影向量,提出NFA-PP人水和谐度评价模型,以文山州2006-2018年人水和谐度评价为例进行实例研究,评价结果与模糊评价法的评价结果进行对比,验证了本文方法的可行性和有效性。

(3)从NFA-PP模型实例评价结果来看,文山州2006-2011年人水和谐度评价为“不和谐”,2012-2016年评价为“基本和谐”,2017-2018年评价为“较和谐”。2006-2018年文山州人水和谐度水平呈上升趋势,且上升趋势显著。下步建议在区域最严格水资源管理、水生态文明建设、河长制等工作中融入人水和谐论。

参考文献:

- [1] 左其亭,张志强. 人水和谐理论在最严格水资源管理中的应用[J]. 人民黄河,2014,36(8):47-51.
- [2] 左其亭. 人水和谐论及其应用研究总结与展望[J]. 水利学报,2019,50(1):135-144.
- [3] 陆赛,唐德善,孟令爽. 基于GRA-IECD协调发展模型的人水和谐评价[J]. 人民黄河,2019,41(3):88-92.
- [4] 康艳,蔡焕杰,宋松柏. 宝鸡市人水和谐评价研究[J]. 自然资源学报,2014,29(1):156-165.
- [5] 刘斌,宋松柏. 基于可变模糊集的区域人水和谐评价[J]. 人民黄河,2009,31(3):55-56+59.
- [6] 孟令爽,唐德善,史毅超. 基于主成分分析法的城市人

水和谐度评价[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(1):93-98.

- [7] 王梅,唐德善,孟珍珠,等. 基于模糊物元的综合评价模型在区域人水和谐评价中的应用[J]. 水电能源科学,2015,33(2):160-163.
- [8] 莫崇勋,莫桂燕,阮俞理,等. 基于变权法的南宁市人水和谐度评价[J]. 水电能源科学,2018,36(3):30-33.
- [9] 李菊,崔东文,袁树堂. 基于足球联赛竞争算法-投影寻踪-云模型的水资源短缺风险评价[J]. 水文,2018,38(4):40-47.
- [10] 崔东文. 鸡群优化算法-投影寻踪洪旱灾害评估模型[J]. 水利水电科技进展,2016,36(2):16-23.
- [11] 崔东文. 蛾群算法与投影寻踪耦合模型在区域水资源脆弱性评价中的应用[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2017,39(4):10-18.
- [12] 胡林凯,崔东文. 基于SBO-PP模型的水资源可持续发展能力评价模型及应用[J]. 水利经济,2017,35(5):7-11.
- [13] 崔东文,郭荣. 基于GOA-PP模型的区域水资源红黄绿分区管理识别[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2018,39(1):68-76.
- [14] 李杰,崔东文. 云南省水安全区域类型识别TSA-PP模型及应用[J]. 人民长江,2019,50(2):62-68+118.
- [15] YANG Xinshe. Nature-inspired metaheuristic algorithms [M]. Beckington, UK: Luniver Press,2008.
- [16] WANG Chunfeng, SONG Wenxin. A novel firefly algorithm based on gender difference and its convergence [J] Applied Soft Computing Journal,2019,80:107-124.
- [17] 左其亭,张云,林平. 人水和谐评价指标及量化方法研究[J]. 水利学报,2008,39(4):440-447.

喜 讯

《水资源与水工程学报》被中国科学引文数据库(Chinese Science Citation Database,简称CSCD)收录为2019-2020年度来源期刊(核心库);2008-2020年连续13年被中国科学技术信息研究所评为中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊)。