

# 基于磷虾觅食算法 - 最大熵投影寻踪模型的区域水安全评价

王应武, 陈栋格

(云南省水利水电勘测设计研究院, 云南 昆明 650021)

**摘要:** 从总量红线、效率红线、纳污红线3个方面遴选12个指标构建最严格水资源管理约束下的区域水安全评价指标体系和分级标准。提出磷虾觅食算法(KH) - 最大熵投影寻踪(MEPP)水安全评价模型,并构建人工蜂群(ABC)算法、文化算法(CA)和粒子群优化(PSO)算法 - MEPP评价模型作对比,以云南省所辖16个行政区水安全评价为例进行实例研究。结果表明:KH算法寻优精度优于ABC、CA和PSO算法,具有较好的全局极值寻优能力。KH - MEPP模型对迪庆州、德宏州、怒江州和西双版纳州水安全评价为“安全”;丽江市评价为“不安全”;其余行政区评价为“基本安全”。KH - MEPP模型对云南省16个行政区评价结果与PSO - MEPP模型相同,但在排序上存在差异;与CA - MEPP、ABC - MEPP模型在评价结果及排序上均存在差异。

**关键词:** 水安全; 最大熵投影寻踪; 指标体系; 磷虾觅食算法; 人工蜂群算法; 文化算法; 粒子群优化算法; 云南省

中图分类号:TV213.4

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2017)05-0080-07

## Regional water security evaluation based on krill herd algorithm-maximum entropy projection pursuit model

WANG Yingwu, CHEN Dongge

(Yunnan Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Institute, Kunming 650021, China)

**Abstract:** According to 12 indicators selected from three aspects of the total red line, the efficiency of the red line, accept the red line, the regional water safety evaluation index system and grading standards were built under the most stringent water resources management constraints. Krill foraging algorithm (KH) - Maximum Entropy Projection Pursuit (MEPP) water security evaluation was proposed, and Artificial Bee Colony (ABC) algorithm, cultural algorithm (CA) were constructed to compare with the particle swarm optimization (PSO) algorithm - MEPP evaluation model. A case study on water security of 16 administrative regions in Yunnan Province was carried out. The results show that the optimization accuracy of KH algorithm is better than that of ABC, CA and PSO algorithm, and has good global extremum search ability. The KH - MEPP model evaluates the water security of Diqing, Dehong, Nujiang and Xishuangbanna as safe, and Lijiang is evaluated as “unsafe”. The rest of the administrative regions are rated as “basically safe”. The results of the KH - MEPP model are the same as those of the PSO - MEPP model in Yunnan Province, but there are differences in the sorting. The results of CA - MEPP and ABC - MEPP are different in the evaluation results and ranking.

**Key words:** water security; maximum entropy projection pursuit; index system; krill herd algorithm; artificial bee colony algorithm; cultural algorithm; particle swarm optimization algorithm; Yunnan Province

### 1 研究背景

水安全是指一个国家或区域在一定技术水平和

经济社会发展条件下,以人类社会与经济、生态环境协调发展为原则,水资源、水环境和供水能力等能够支撑经济社会持续发展、维护生态系统良性循环的

收稿日期:2017-05-20; 修回日期:2017-06-17

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(201307102-006-01),院士工作站建设专项(2015IC013)

作者简介:王应武(1987-),男,云南楚雄人,学士,工程师,主要从事水利工程规划设计咨询工作。

状态。水安全评价研究起步较早,评价方法主要有层次分析法<sup>[1]</sup>、物元分析法<sup>[1]</sup>、概率神经网络法<sup>[2]</sup>、水贫困指数法<sup>[3]</sup>、支持向量机法<sup>[4]</sup>、逻辑斯蒂曲线法<sup>[5]</sup>、模糊集对分析法<sup>[6-7]</sup>等,均在一定条件下的水安全评价中取得了较好的评价效果。投影寻踪(Projection Pursuit, PP)技术是将高维数据投影到低维空间,并在低维空间进行数据分析研究的统计方法,已在各行业领域得到广泛应用。然而,将 PP 技术应用于水安全评价中需解决好 3 方面的问题:(1)基本 PP 技术是以投影值标准差与类内密度之积最大为优化目标,忽略了投影向量分布的不确定性、随机性和评价指标间的相关性,可能导致分类(评价)能力下降的问题<sup>[8]</sup>。(2)基本粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法<sup>[11]</sup>等传统智能算法在用于 PP 最佳投影方向优化中存在早熟收敛、易陷入局部极值等问题。(3)目前没有统一的或在全国范围内均适用的水安全评价指标体系和等级标准。

针对 PP 技术应用于水安全评价中的不足,本文有针对性地提出以下改进方法:(1)针对基本 PP 技术的不足,提出基于信息熵理论改进的最大熵投影寻踪(Maximum Entropy Projection Pursuit, MEPP)技术。(2)针对基本 PSO 算法在寻优过程中存在的早熟收敛等问题,利用一种新型算法——磷虾觅食(Krill Herd, KH)算法优化 MEPP 技术最佳投影方向。(3)基于最严格水资源“三条红线”管理,提出区域水安全评价指标体系和分级标准。

本文结合 KH 算法与 MEPP 技术二者优点,提出最严格水资源管理“三条红线”约束下的 KH - MEPP 水安全评价模型,并构建人工蜂群(Artificial Bee Colony, ABC)算法、人文化算法(Cultural Algorithm, CA)和 PSO - MEPP 评价模型作对比,以云南省所辖 16 个行政分区水安全评价为例进行实例分析,旨在验证 KH - MEPP 模型应用于水安全评价中的可行性和有效性。

## 2 KH - MEPP 水安全评价模型

### 2.1 磷虾觅食算法

磷虾觅食(Krill Herd, KH)算法是美国学者 Gandomi 等<sup>[9]</sup>于 2012 年提出的一种基于磷虾群体觅食行为的元启发式优化算法,该算法将优化问题转换成在一个解空间内的全局搜索问题,通过磷虾个体之间及个体与群体之间信息交换,不断向全局最优解(食物位置)移动,目前已在工程<sup>[10]</sup>、参数优

化<sup>[11-12]</sup>等领域得到应用。

参考文献[9-13]中将 KH 算法数学描述如下:

(1)初始化种群。设  $n$  维搜索空间中,磷虾个体  $i$  的空间位置  $X_i$  表示为  $X_i = (x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^n)$ , 其任意第  $k$  维变量  $x_i^k$  取值区间为  $[l^k, u^k]$ , 磷虾个体  $i$  的移动位置可用拉格朗日模型进行建模:

$$\frac{dX_i}{dt} = N_i + F_i + D_i \quad (1)$$

式中:  $N_i$  为磷虾  $i$  受其他磷虾引导所产生的移动向量;  $F_i$  为磷虾  $i$  的觅食活动向量;  $D_i$  为磷虾  $i$  的随机扩散向量。

(2)移动向量  $N_i$  建模。文献[9]认为磷虾个体不仅受到周围磷虾个体的局部吸引,同时受当前全局最优个体的吸引,因此,运动向量  $N_i$  可表示为:

$$N_i = N^{\max}(a_i^{\text{local}} + a_i^{\text{target}}) + \omega^n N_i^{\text{old}} \quad (2)$$

式中:  $N^{\max}$  为最大移动步长;  $\omega^n$  为惯性权重;  $a_i^{\text{local}}$  为周围磷虾吸引的运动向量;  $a_i^{\text{target}}$  为受当前最优磷虾个体吸引的运动向量。

(3)觅食活动向量  $F_i$  建模。觅食活动向量  $F_i$  受当前食物位置和前次觅食活动及位置的影响,  $F_i$  可用下式进行描述:

$$F_i = V_f \beta_i + \omega^f F_i^{\text{old}} \quad (3)$$

式中:  $V_f$  为最大觅食速度向量;  $\omega^f$  为惯性权重;  $\beta_i = \beta_i^{\text{food}} + \beta_i^{\text{best}}$  为当前食物位置和磷虾个体历史最优觅食位置共同计算出的吸引度值;  $F_i^{\text{old}}$  为前次觅食运动向量。

(4)随机扩散向量  $D_i$  建模。随机扩散向量  $D_i$  表示磷虾个体随机搜索行为,表示如下:

$$D_i = D^{\max} \left(1 - \frac{r}{r^{\max}}\right) \delta \quad (4)$$

式中:  $D^{\max}$  为最大扩散速度值;  $\delta$  为随机扩散方向向量;  $r, r^{\max}$  分别为当前迭代次数和最大迭代次数。

(5)磷虾个体位置更新。通过以上 3 种活动行为,使得磷虾位置不断更新并最终获得全局极值位置。磷虾个体  $i$  在时刻  $t$  到时刻  $t + \Delta t$  内的位移公式表示:

$$X_i(t + \Delta t) = X_i(t) + \Delta T \frac{dX_i}{dt} \quad (5)$$

式中:  $\Delta t$  为时间间隔;  $\Delta T$  为速度向量步长调节因子。

### 2.2 MEPP 技术

本文利用最大熵改进传统 PP 技术的不足,提出最大熵投影寻踪(MEPP)技术,将其用于水安全评价步骤简述如下<sup>[8,14-15]</sup>:

(1)数据预处理。设水安全评价指标集为

$\{x(i,j) \mid i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m\}$ , 对于指标值越大水安全性越高类指标, 利用式(6)对评价指标进行处理; 对于指标值越小水安全性越高类指标, 利用式(7)进行处理。

$$x(i,j) = \frac{x^*(i,j) - x_{\min}(j)}{x_{\max}(j) - x_{\min}(j)} \quad (6)$$

$$x(i,j) = \frac{x_{\max}(j) - x^*(i,j)}{x_{\max}(j) - x_{\min}(j)} \quad (7)$$

式中:  $x(i,j)$  为指标特征值归一化序列;  $x^*(i,j)$  为第  $i$  年第  $j$  个评价指标;  $x_{\max}(j)$ 、 $x_{\min}(j)$  分别为第  $j$  个评价指标的最大和最小值;  $n$ 、 $m$  分别为评价区年度数量和评价指标数目。

(2) 投影指标函数。PP 技术就是将  $m$  维数据  $\{x(i,j) \mid j = 1, 2, \dots, m\}$  综合成  $\vec{a} = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$  为投影方向的一维投影值  $z(i)$ 。

$$z(i) = \sum_{j=1}^m (a(j)x(i,j)) \quad (8)$$

式中:  $\vec{a}$  为单位长度向量。

(3) 最大熵目标函数。依据最大熵原理, 熵值越大, 意味着寻优获得的投影向量分布不确定性和随机性越小, 因此构建最大熵目标函数如下:

$$H(a) = - \sum_{j=1}^m (a^2(j) \lg a^2(j)) \quad (9)$$

式中:  $H(a)$  为最大熵。

(4) 构造多准则优化目标函数。为使各评价对象综合值的分布在整体上尽量分散、局部上尽量紧密, 可根据综合值的类密度最大、类间距离最大为目标, 构建式(10)多准则目标函数, 将 MEPP 技术确定最优投影方向问题转化为非线性最优求解问题, 即:

$$\begin{cases} \max: Q(a) = H(a)S_z D_z \\ \text{s. t. } \sum_{j=1}^m a^2(j) = 1 \quad a \in [-1, 1] \end{cases} \quad (10)$$

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[15]。

(5) 计算投影值。将最佳投影方向  $\vec{a}$  代入式(8)得到综合投影值  $z(i)$ 。

### 2.3 水安全评价实现步骤

KH - MEPP 水安全评价模型实现步骤可归纳如下(ABC - MEPP、CA - MEPP 和 PSO - MEPP 模型可参考实现):

Step1 构建最严格水资源管理约束下的水安全评价指标体系和分级标准, 在各分级标准阈值间随机生成样本, 利用(6)~(7)式对生成的样本进行处理。

Step2 确定式(10)为 4 种算法的优化目标函

数, 即适应度函数。

Step3 初始化算法参数。设置最大迭代次数  $r^{\max}$ 、种群规模  $M$ 、最大移动步长  $N^{\max}$ 、最大扩散速度  $D^{\max}$ 、最大觅食速度  $V_f$ 。

Step4 随机初始化  $M$  个磷虾个体空间位置  $X_i = (x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^n)$ , 令  $r = 1$ 。

Step5 计算适应度函数值, 确定当前最优个体  $X^{\text{best}}$ 。

Step6 分别按式(2)~(4)计算所有磷虾个体的运动向量, 并按式(5)更新其位置。

Step7 重新计算适应度函数值, 并确定当前最优个体  $X^{\text{best}}$ 。

Step8 若  $r < r^{\max}$ , 由令  $r = r + 1$ , 并转至 Step6; 否则, 输出最优解  $X^* = X^{\text{best}}$ , 即最佳投影方向  $\vec{a}$ , 算法结束。

Step9 对云南省 16 个行政分区水安全评价指标及各分级阈值进行一致性处理; 利用最佳投影方向  $\vec{a}$  计算各行政分区水安全评价投影值  $z(i)$  及各分级标准投影值  $z'(o)$ 。并利用  $z'(o)$  对 16 个行政分区水安全进行评价。

## 3 实例应用

### 3.1 研究区概况

云南省地处我国西南边陲, 辖昆明、曲靖、玉溪等 16 个州(市)129 县(区、市)。境内水资源丰富, 分属长江、珠江、红河、澜沧江、怒江、伊洛瓦底江 6 大水系。多年平均降水量 1 278.8 mm, 水资源总量  $2 210 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 仅次于西藏、四川, 居全国第三位。2014 年云南省用水量  $149.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 水资源利用率 6.8%, 万元工业增加值用水量  $63 \text{ m}^3$ , 亩均灌溉用水量  $397 \text{ m}^3$ , 灌溉水利用系数 0.49, 水功能区达标率为 56.1% (全指标), 部分行政分区用水量已接近用水总量控制红线, 水资源“三条红线”管理面临严峻考验。近年来, 云南省经济社会得到迅猛发展, 以水利为主要内容的水安全建设为促进云南省经济、社会、环境和谐发展提供了重要支撑和保障。然而, 云南省水资源总量虽然丰富, 但面临着水土资源不匹配、降水时空分布不均、开发难度大和水质污染逐年加剧以及用水结构不尽合理、水资源利用效率偏低、水资源配置能力不足等问题, 工程型、水质型、发展型缺水并存, 水安全问题面临着严峻挑战。因此, 科学、客观评价最严格水资源管理约束下的区域水安全状态, 对于实现云南省水资源可持续利用和经济社会的可持续发展具有重要意义。

本文以 2014 年云南省所辖 16 个行政分区水安全评价为研究对象,指标数据来源于《2014 年云南省水资源公报》、《2014 年云南省统计年鉴》,见表 1。

表 1 云南省区域水安全评价指标数据

区域	水资源 利用率/ %	人均水 资源量/ m <sup>3</sup>	用水总 量控制 率/%	供水 模数/ 10 <sup>4</sup> (m <sup>3</sup> ·km <sup>-2</sup> )	工业用 水重复 利用率/ %	万元工 业增加 值用水 量/m <sup>3</sup>	灌溉水 利用系 数	亩均灌 溉用水 量/m <sup>3</sup>	水功能 区达标 率/%	城市污 水处理 率/%	饮用水 水源达 标率/%	人均 COD 环境容 量/kg
昆明市	36.87	749.2	73.35	8.71	91.6	49	0.52	370	30.0	94.1	87.5	5.70
曲靖市	10.91	2628.0	71.36	4.76	95.4	51	0.52	304	41.2	85.2	87.5	2.76
玉溪市	21.85	1591.0	77.64	5.47	81.8	28	0.52	452	50.5	80.2	81.3	9.02
保山市	9.57	4381.0	96.42	5.64	39.8	109	0.48	380	82.6	85.4	80.0	6.87
昭通市	7.03	2354.0	83.89	3.97	95.4	71	0.48	421	63.5	70.1	88.2	1.38
丽江市	10.50	4433.0	86.80	2.89	42.3	90	0.48	442	57.5	85.2	87.5	4.44
普洱市	4.95	9430.0	97.11	2.73	60.9	83	0.48	535	76.7	77.6	86.7	6.05
临沧市	8.61	4590.0	99.49	4.17	60.9	57	0.48	559	45.6	83.6	85.7	6.17
楚雄州	21.96	1518.0	66.93	3.20	93.5	42	0.50	478	48.5	82.8	90.0	5.14
红河州	9.31	3392.0	88.21	4.53	93.2	50	0.50	325	14.8	78.2	80.0	5.75
文山州	6.16	4127.0	82.84	2.91	74.6	64	0.52	352	65.4	80.4	92.3	3.36
西双版纳	6.28	7703.0	86.18	2.93	64.1	78	0.48	470	65.0	78.0	100.0	13.87
大理州	18.74	1941.0	83.10	4.53	52.4	75	0.50	341	61.5	81.8	87.5	5.34
德宏州	6.41	8807.0	98.20	6.39	58.7	75	0.48	377	80.0	80.4	87.5	25.44
怒江州	1.18	26883.0	93.59	1.18	83.6	79	0.45	452	71.5	36.1	100.0	3.54
迪庆州	1.53	23976.0	82.60	0.64	56.8	79	0.45	382	73.0	68.7	100.0	25.61
云南省	6.76	3663.0	83.25	3.90	89.9	63	0.49	397	56.1	88.9	89.1	5.71

### 3.2 基于“三条红线”的水安全评价指标体系及分级标准

云南省降水年际丰、枯变化大,区域分布不匀,加之经济社会的快速发展,城镇化、工业化进程的加快,水资源短缺、水污染、洪涝灾害、水土流失等省情决定了云南省必须实行最严格的水资源管理制度才能支撑经济社会的可持续发展,才能有效保障区域水安全。虽然水安全评价研究起步于 20 世纪 70 年代,但目前尚没有统一的、在全国范围内均适用的水安全评价指标体系和等级标准,当前研究较多的是针对各个评价区域实际而提出的具有一定区域特征的指标体系和等级标准。本文基于云南省所辖行政分区最严格水资源管理控制指标,参考相关文献<sup>[1-7]</sup>,遵行科学性、可获取、可度量等原则,从总量红线、效率红线、纳污红线 3 个方面遴选 12 个指标构建具有目标层 A、准则层 B 和指标层 C 的区域水安全评价指标体系,并将水安全划分为“非常安全/I 级”、“安全/II 级”、“基本安全/III 级”、“不安全/

IV 级”和“极不安全/V 级”5 个等级,见表 2。

### 3.3 水安全评价模型求解

(1)构造样本数据。基于所构建的水安全评价指标等级标准(见表 2),在每个评价指标的等级标准阈值间随机生成 10 组样本,5 个等级共随机生成 50 组样本数据,利用式(6)、(7)对生成的样本数据进行处理。

(2)算法参数设置。KH 算法最大迭代次数  $r^{\max} = 200$ 、种群规模  $M = 50$ 、最大移动步长  $N^{\max} = 0.01$ 、最大扩散速度  $D^{\max} = 0.005$ 、最大觅食速度  $V_f = 0.02$ 。ABC 算法最大迭代次数  $T = 200$ ,种群规模  $M = 50$ ,局部循环次数  $l_c = 60$ 。CA 最大迭代次数  $T = 200$ ,群体规模  $M = 50$ ,根据标准知识产生的群体规模  $M' = 50$ 。PSO 算法最大迭代次数  $T = 200$ ,种群规模  $M = 50$ , $\omega = 0.729$ ,局部学习因子、全局学习因子  $c_1 = c_2 = 2.0$ ,个体速度限制为  $[-0.5, 0.5]$ 。4 种算法搜索空间均设置为  $[-1, 1]$ ,维度均为 12 维。

(3)模型求解投影值计算。依据水安全评价实现步骤,利用所构造的样本数据构建多准则目标函数式(10),并采用KH、ABC、CA和PSO算法优化式(10),求解MEPP模型最佳投影方向。将4种算法连续运行20次,求解最优适应度值 $Q(a)$ 的最优值、平均值、最差值、标准差和最佳投影方向 $\bar{a}_{1-12}$ 的平均值,见表3。4种算法某次进化过程见图1。利用公式(6)~公式(7)对表1云南省所辖16个行政分区水安全评价指标数据及表2水安全评价分级阈值进行处理,利用优化得到的最佳投影方向 $\bar{a}$ 分别计算各行政分区水安全投影值 $z(i)$ 和水安全评价等级标准 $z'(o)$ (见表4);利用 $z'(o)$ 进行水安全评价,见表5。

### 3.4 评价结果分析

从表3~5及图1可以得到以下结论:

(1)从表3来看,KH算法20次寻优精度优于ABC、CA和PSO算法,其中,标准差高于其他3种算法5个数量级以上。从表3寻优平均值、标准差及图1进化过程来看,4种算法优化性能由优至劣依次是:KH、PSO、ABC和CA,即KH优化所获得的投影方向 $\bar{a}_{1-12}$ 最佳。

(2)从KH优化MEPP获得的最佳投影方向来看,人均COD环境容量指标投影分量最大,其对水安全评价的影响最大;其余指标投影分量在0.2005~0.2713之间,相对较小,其对应的评价指标对水安全评价的影响相对较小。

表2 水安全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	分级标准				
				I级	II级	III级	IV级	V级
水安全评价	总量	水资源利用率 $C_1 / \%$	-	<10	[10 20)	[20 30)	[30 40)	$\geq 40$
		人均水资源量 $C_2 / \text{m}^3$	+	$\geq 6000$	[4000 6000)	[2000 4000)	[1000 2000)	<1000
	效率	用水总量控制率 $C_3 / \%$	-	<70	[70 85)	[85 95)	[95 100)	$\geq 100$
		供水量模数 $C_4 / 10^4 (\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	+	$\geq 180$	[150 180)	[120 150)	[80 120)	<80
	红线	工业用水重复利用率 $C_5 / \%$	+	$\geq 95$	[85 95)	[75 85)	[60 75)	<60
		万元工业增加值用水量 $C_6 / \text{m}^3$	-	<40	[40 60)	[60 90)	[90 120)	$\geq 120$
	纳污	灌溉水利用系数 $C_7$	+	$\geq 0.60$	[0.55 0.60)	[0.50 0.55)	[0.40 0.50)	<0.40
		亩均灌溉用水量 $C_8 / \text{m}^3$	-	<300	[300 400)	[400 600)	[600 800)	$\geq 800$
	红线	水功能区达标率 $C_9 / \%$	+	$\geq 90$	[80 90)	[70 80)	[60 70)	<60
		城市污水处理率 $C_{10} / \%$	+	$\geq 90$	[80 90)	[75 85)	[60 75)	<60
	饮用水源达标率 $C_{19} / \%$	+	$\geq 95$	[90 95)	[85 90)	[80 85)	<80	
	人均COD环境容量 $C_{20} / \text{kg}$	+	$\geq 15$	[10 15)	[8 10)	[5 8)	<5	

注:“+”表示正向指标,指标值越大,水安全性越高;“-”表示负向指标,指标值越小,水安全性越高。

表3 目标函数优化结果及比较

算法	最优值	最差值	平均值	标准差	投影方向 $\bar{a}_{1-12}$ (20次均值)
KH	5848.851	5848.850	5848.850	$4.12 \times 10^{-5}$	(0.263 0.261 0.223 0.271 0.271 0.269 0.201 0.256 0.228 0.261 0.223 0.564)
ABC	5828.673	5703.069	5784.142	$3.75 \times 10^1$	(0.271 0.226 0.125 0.285 0.161 0.289 0.233 0.161 0.193 0.141 0.121 0.570)
CA	5848.851	3766.778	5534.380	$6.24 \times 10^2$	(0.241 0.235 0.231 0.302 0.259 0.314 0.230 0.271 0.260 0.284 0.244 0.300)
PSO	5842.134	5805.563	5832.963	$1.03 \times 10^1$	(0.214 0.287 0.255 0.247 0.292 0.269 0.208 0.216 0.244 0.232 0.228 0.516)

表4 区域水安全评价等级标准  $z'(o)$

评价等级	KH - MEPP	ABC - MEPP	CA - MEPP	PSO - MEPP
非常安全/I级	$\geq 2.4887$	$\geq 2.0520$	$\geq 2.4371$	$\geq 2.4206$
安全/II级	[1.9900, 2.4887)	[1.6118, 2.0520)	[1.9849, 2.4371)	[1.9409, 2.4206)
基本安全/III级	[1.5443, 1.9900)	[1.2285, 1.6118)	[1.5446, 1.9849)	[1.5109, 1.9409)
不安全/IV级	[1.0844, 1.5443)	[0.8391, 1.2285)	[1.1013, 1.5446)	[1.0698, 1.5109)
极不安全/V级	<1.0844	<0.8391	<1.1013	<1.0698

表 5 云南省水安全投影值  $z(i)$  及评价排序结果

行政分区	KH - MEPP			ABC - MEPP			CA - MEPP			PSO - MEPP		
	投影值 $z(i)$	评价	排序									
昆明市	1.8396	Ⅲ级	5	1.4642	Ⅲ级	6	1.9049	Ⅲ级	5	1.7873	Ⅲ级	6
曲靖市	1.8274	Ⅲ级	7	1.4368	Ⅲ级	7	1.9017	Ⅲ级	6	1.7787	Ⅲ级	7
玉溪市	1.8393	Ⅲ级	6	1.5194	Ⅲ级	5	1.8499	Ⅲ级	7	1.7874	Ⅲ级	5
保山市	1.6748	Ⅲ级	12	1.3898	Ⅲ级	11	1.6966	Ⅲ级	13	1.6040	Ⅲ级	13
昭通市	1.6605	Ⅲ级	13	1.3093	Ⅲ级	15	1.7397	Ⅲ级	12	1.6261	Ⅲ级	12
丽江市	1.5267	Ⅳ级	16	1.2318	Ⅲ级	16	1.5670	Ⅲ级	16	1.4738	Ⅳ级	16
普洱市	1.7430	Ⅲ级	10	1.4350	Ⅲ级	8	1.7493	Ⅲ级	11	1.7078	Ⅲ级	8
临沧市	1.6438	Ⅲ级	14	1.3633	Ⅲ级	12	1.6640	Ⅲ级	15	1.5894	Ⅲ级	14
楚雄州	1.7272	Ⅲ级	11	1.3578	Ⅲ级	13	1.7741	Ⅲ级	10	1.6976	Ⅲ级	10
红河州	1.7557	Ⅲ级	8	1.4173	Ⅲ级	9	1.7747	Ⅲ级	9	1.6948	Ⅲ级	11
文山州	1.7516	Ⅲ级	9	1.3934	Ⅲ级	10	1.8128	Ⅲ级	8	1.7062	Ⅲ级	9
西双版纳	2.0007	Ⅱ级	4	1.6579	Ⅱ级	4	1.9199	Ⅲ级	4	1.9439	Ⅱ级	4
大理州	1.6215	Ⅲ级	15	1.3099	Ⅲ级	14	1.6714	Ⅲ级	14	1.5635	Ⅲ级	15
德宏州	2.3546	Ⅱ级	2	2.0342	Ⅱ级	2	2.1822	Ⅱ级	2	2.2612	Ⅱ级	2
怒江州	2.0475	Ⅱ级	3	1.6826	Ⅱ级	3	2.0261	Ⅱ级	3	2.0785	Ⅱ级	3
迪庆州	2.5292	Ⅱ级	1	2.1439	Ⅰ级	1	2.2977	Ⅱ级	1	2.4910	Ⅱ级	1
云南省	1.8648	Ⅲ级		1.4769	Ⅲ级		1.8881	Ⅲ级		1.8052	Ⅲ级	

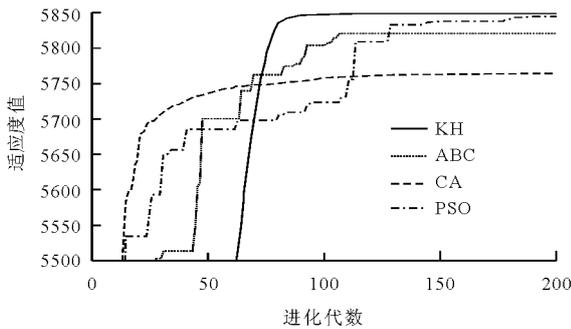


图 1 4 种算法某次进化过程图

(3)从评价及排序结果来看,KH - MEPP 模型对云南省各行政分区水安全评价结果与 PSO - MEPP 模型相同,在排序上有 7 个存在差异;与 ABC - MEPP 模型在评价结果上有 2 个不同,在排序上有 11 个存在差异;与 CA - MEPP 模型在评价结果上有 2 个不同,在排序上有 9 个存在差异。结合 4 种算法的优化性能及实例验证结果,表明智能算法的极值寻优能力决定着评价精度的高低。

(4)从 KH - MEPP 模型评价结果来看,迪庆州、德宏州、怒江州和西双版纳州水安全评价为“安全”,从评价指标及行政分区来看,虽然此 4 州经济社会发展相对滞后,但在总量红线、纳污红线指标方

面表现优秀,通过严格水资源管理、节水型社会建设等措施,水安全水平还可得到进一步的提升。丽江市属著名旅游地区,其水资源开发已初具规模,在供水量模数、工业用水重复利用率、万元工业增加值用水量、灌溉水利用系数、水功能区达标率等方面表现较差,水安全评价为“不安全”,可通过推进节水型社会建设、开展水生态文明试点、加强水利基础设施建设以及严格落实最严格水资源管理制度等举措,可有效提升水安全水平。其余 11 个行政分区评价为“基本安全”,其中,昆明、玉溪、曲靖 3 市综合投影值排名 5 ~ 7,水安全水平相对较高,原因在于此 3 市是云南省经济社会最为发达的地区,在效率红线指标以及总量指标中的用水总量控制率、供水量模数指标表现突出,通过施行最严格水资源管理制度、加大水污染防治力度等措施,水安全尚有提升的空间。其余 8 个行政分区综合投影值在 1.6215 ~ 1.7557 之间,通过有针对性地采用改进措施,水安全能得到进一步提升。

## 4 结 论

(1)结合磷虾觅食(KH)算法与最大熵投影寻踪(MEPP)技术二者优点,提出最严格水资源管理

“三条红线”约束下的 KH - MEPP 水安全评价模型,并构建 ABC - MEPP、CA - MEPP 和 PSO - MEPP 模型作为对比,以云南省所辖 16 个行政分区为例进行研究分析,模型及评价方法具有参考意义。

(2)通过对目标函数的优化验证了 KH 算法优化性能优于 ABC、CA 和 PSO 算法,具有较好的极值寻优能力和收敛稳定性。通过实例验证表明,对于 MEPP 技术,决定评价或分类精度的关键因素是智能算法的极值寻优能力。

(3)KH - MEPP 模型对迪庆州、德宏州、怒江州和西双版纳州水安全评价为“安全”;丽江市评价为“不安全”;其余行政分区评价为“基本安全”。KH - MEPP 模型的评价结果与 PSO - MEPP 模型相同,但在排序上存在差异;与 CA - MEPP、ABC - MEPP 模型在评价结果及排序上均存在差异。

#### 参考文献:

- [1] 刘传旺,吴建平,任胜伟,等. 基于层次分析法与物元分析法的水安全评价[J]. 水资源保护,2015,31(3):27-32.
- [2] 汪嘉杨,刘韵,李祚泳,等. 基于指标规范化概率神经网络的水安全评价模型[J]. 水力发电学报,2014,33(6):78-83.
- [3] 贡力,靳春玲. 基于水贫困指数的城市水安全评价研究[J]. 水力发电学报,2014,33(6):84-90.
- [4] 汪嘉杨,王文圣,李祚泳,等. 基于 TS - SVM 模型的水安全评价[J]. 水资源保护,2010,26(2):1-4+9.
- [5] 宋培争,汪嘉杨,刘伟,等. 基于 PSO 优化逻辑斯蒂曲线的水资源安全评价模型[J]. 自然资源学报,2016,31(5):886-893.
- [6] 沈俊源,吴凤平,于倩雯. 基于模糊集对分析的最严格水安全综合评价[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(2):92-97.
- [7] 王子茹. 基于可变模糊集对立统一定理的水安全评价研究[J]. 人民长江,2011,42(9):1-3.
- [8] 张明,王贵作,张寅熙. 水文相似流域最大熵优选模型研究[J]. 水利水电技术,2012,43(2):14-17.
- [9] Gandomi A H, Alavi A H. Krill herd: a new bio - inspired optimization algorithm [J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2012, 17 (12): 4831-4845.
- [10] 牛培峰,陈科,马云鹏,等. 基于磷虾群算法的汽轮机热耗率建模应用[J]. 动力工程学报,2016,36(10):781-787.
- [11] 黄璇,郭立红,李姜,等. 磷虾群算法优化支持向量机的威胁估计[J]. 光学精密工程,2016,24(6):1448-1455.
- [12] 李丛,胡文军,丁勇,等. 基于改进磷虾群优化的中心极大化 KFCM 算法在 IDS 的应用[J]. 计算机应用研究,2016,33(2):507-512.
- [13] 王磊,张汉鹏. 基于混沌搜索与精英交叉算子的磷虾觅食算法[J]. 计算机工程,2015,41(3):156-161.
- [14] 黄健元,金广宇,于彦博. 投影寻踪模型在行蓄洪区运用风险评估中的应用[J]. 水利经济,2016,34(5):60-63.
- [15] 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.
- [9] 崔俊蕊,王政然,梁爽,等. 城市设计暴雨频率曲线的拟合及参数优化[J]. 水电能源科学,2014,32(11):48-51+128.
- [10] Awadallah A. G. Regional intensity - duration - frequency curves for Jeddah region, Saudi Arabia, using ordinary and L - moments approaches [J]. Journal of Flood Risk Management. 2015, 8(3):195-207.
- [11] 周浩澜,陈洋波,徐会军. 基于 GEV 分布模型参数与历时关系的暴雨强度公式推求[J]. 四川大学学报(工程科学版),2012,44(S1):37-41.
- [12] 张子贤,孙光东,孙建印,等. 城市暴雨强度公式拟合方法研究[J]. 水利学报,2013,44(11):1263-1271.
- [13] Rahman A S, Rahman A, Zaman M A, et al. A study on selection of probability distributions for at - site flood frequency analysis in Australia [J]. Natural Hazards. 2013,69(3):1803-1813.
- [14] Vidal I. A Bayesian analysis of the Gumbel distribution: an application to extreme rainfall data [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. 2014, 28(3):571-582.
- [15] van Dijk A I J M, Meesters A G C A, Schellekens J, et al. A two - parameter exponential rainfall depth - intensity distribution applied to runoff and erosion modelling [J]. Journal of Hydrology. 2005, 300(1-4):155-171.
- [16] 邵尧明,何明俊. 现行规范中城市暴雨强度公式有关问题探讨[J]. 中国给水排水,2008,24(2):99-102.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中国气象局. 城市暴雨强度公式编制和设计暴雨雨型确定技术导则[S]. 2014.

(上接第 79 页)