

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2018.05.16

基于最优觅食算法 - 投影寻踪 - 云模型的最严格水资源管理评价

周有荣¹, 崔东文²

(1. 临沧润汀水资源科技服务有限公司, 云南 临沧 677000;

2. 云南省文山州水务局, 云南 文山 663000)

摘要: 为全面衡量最严格水资源管理评价过程中的随机性与模糊性,将正态云模型引入最严格水资源管理评价,建立最优觅食算法 - 投影寻踪 - 正态云评价模型,以云南省16个州市最严格水资源管理评价为例进行研究。选取当前最严格水资源管理考核中万元GDP用水量等6大指标构建评价指标体系和分级标准,采用云模型正向发生器计算最严格水资源管理分级评价指标的隶属度,利用最优觅食算法 - 投影寻踪方法给出各指标权重,并与传统粒子群算法、人工蜂群算法和差分进化算法优化结果进行比较。根据隶属度矩阵和权重矩阵给出最严格水资源管理评价分级的确定度并进行评价。结果表明:最优觅食算法寻优精度高于传统粒子群等3种算法。昆明市、曲靖市最严格水资源管理评价为优秀,保山市、红河州、德宏州评价为合格,其余11个州市评价为良好。最优觅食算法 - 投影寻踪 - 正态云评价模型兼具模糊性和随机性,既能反映最严格水资源管理评价分级的定性概念,又可反映隶属程度的不确定性,具有较好的应用推广价值。

关键词: 最严格水资源管理; 正态云模型; 指标体系; 最优觅食算法; 投影寻踪; 云南省

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)05-0101-08

The most stringent water resources management evaluation based on optimal foraging algorithm - projection pursuit - cloud model

ZHOU Yourong¹, CUI Dongwen²

(1. Lincang Runtong Water Resources Technology Services Limited, Lincang 677000, China;

2. Wenshan Water Bureau, Yunnan Province, Wenshan 663000, China)

Abstract: In order to comprehensively measure the randomness and ambiguity in the most stringent water resources management evaluation process, the normal cloud model was introduced into the most stringent water resources management evaluation, and the optimal foraging algorithm - projection pursuit - normal cloud evaluation model was established. Examples of the most stringent water resources management evaluations in 16 cities in Yunnan province are taken for case studies. Six indicators to build evaluation index system, such as the most stringent water resources management assessment of water consumption of 10,000 yuan GDP, and grading standards were selected, and the cloud model forward generator was adopted to calculate the membership degree of the most stringent water resources management grading evaluation index. The optimal foraging algorithm - projection pursuit method was used to work out the weight of each index, and compared with the traditional particle swarm optimization, artificial bee colony algorithm and differential evolution algorithm optimization results. The degree of certainty of the most stringent evaluation of water resources management is given and evaluated according to membership matrix and weight matrix. The results show that the precision of the optimal foraging algorithm is higher than that of

收稿日期: 2017-11-19; 修回日期: 2018-01-02

作者简介: 周有荣(1971-), 男, 云南巍山人, 学士, 高级工程师, 主要从事水资源管理护保、水电开发、水环境评价等研究工作。

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。

the traditional particle swarm optimization algorithm, the most stringent water resources management evaluation of Kunming and Qujing City was excellent, Baoshan City, Honghe Prefecture, Dehong Prefecture were evaluated as qualified, the remaining 11 states were rated as good. The optimal foraging algorithm – projection pursuit – normal cloud evaluation model has both fuzziness and randomness, which not only reflect the qualitative concept of the most stringent evaluation and classification of water resources management, but also reflect the uncertainty of the degree of membership, which is of good promotional value.

Key words: most stringent water resources management; normal cloud model; index system; optimal foraging algorithm; projection pursuit; Yunnan Province

1 研究背景

最严格水资源管理制度在我国正式实行以来,对当前水资源管理格局产生了重大而深远的影响,但其理论与实践工作仍处于初级阶段^[1]。目前,各级最严格水资源管理考核指标均为用水总量控制率、万元 GDP 用水量、万元工业增加值用水量、灌溉水利用系数、水功能区达标率和饮用水水源达标率,普遍采用一票否决法进行分级评分,即达不到年度下达考核目标要求的,则该项指标得分为零,因而很难科学、客观地评价最严格水资源管理水平。除分级评分法外,得分法^[2]、模糊物元分析法^[3]、可变模糊集法^[4]、神经网络法^[5]等均尝试应用于最严格水资源管理评价,在一定区域及环境背景条件下取得较好的评价效果。但最严格水资源管理评价分级标准具有一定的随机性和模糊性,上述评价方法很难有效解决这一问题。针对自然界中存在的模糊性和随机性评价问题,李德毅院士提出了定性与定量相互转换模型,即云模型,该模型已在水质评价^[6-7]、灾害风险评价^[8-9]、膨胀土胀缩等级分类^[10]、水利现代化评价^[11]、水安全评价^[12-13]、河流健康评价^[14]等领域得到应用。但在云模型评价过程中,如何客观确定各指标权重已成为制约云模型广泛应用的关键因素。目前,熵权法^[6,9]、层次分析法^[10,15]、投影寻踪法^[16]等方法已广泛用于在云模型指标权重的确定。投影寻踪 (projection pursuit, PP) 方法确定各指标权重是通过数学方法将高维指标数据投影到低维空间,在低维空间进行数据分析以获取评价指标最优空间投影向量,将投影向量归一化后即各评价指标权重。然而,利用投影寻踪方法确定指标权重的难点是如何获取最优空间投影向量,目前鸡群优化算法^[17]、足球联赛竞争算法^[18]、蛾群算法^[19]、混沌闪电搜索算法^[20]、凉亭鸟优化算法^[21]、正弦余弦算法^[22]、风力驱动优化算法^[23]等一些新型群体智能算法被尝试用于投影寻踪最优空间投影向量的优化,并取得了较好的优化效果。

基于此,本文通过建立最严格水资源管理评价指标体系和分级标准,将正态云模型引入最严格水资源管理评价。采用云模型正向发生器计算最严格水资源管理分级评价指标的隶属度,利用一种新型群体智能算法——最优觅食算法 (optimal foraging algorithm, OFA)^[24]优化投影寻踪最佳投影向量,提出最优觅食算法 – 投影寻踪指标权重确定方法,并将优化适应度值与传统粒子群算法、人工蜂群算法和差分进化算法的优化结果进行比较。建立最优觅食算法 – 投影寻踪 – 正态云最严格水资源管理评价模型,以云南省 16 个州(市)最严格水资源管理评价为例进行实例研究,评价结果与最优觅食算法 – 投影寻踪法评价结果进行对比。旨在为云南省实行最严格水资源管理制度考核提供参考,同时验证最优觅食算法 – 投影寻踪 – 正态云模型用于最严格水资源管理评价的可行性和有效性。

2 评价指标体系及分级标准

本文最严格水资源管理评价指标采用省、州(市)、县(市)各级最严格水资源管理考核的 6 大指标,并在充分考虑云南省各区域水资源禀赋、经济社会发展水平和水环境条件的前提下,合理确定最严格水资源管理评价分级,即优秀(I级)、良好(II级)、合格(III级)、不合格(IV级)的阈值及各指标上、下限值,见表 1。

3 最优觅食算法 – 投影寻踪 – 正态云评价模型

3.1 最优觅食算法

最优觅食算法(OFA)是文献[24]于 2016 年基于行为生态理论 – 最佳觅食理论提出的一种新型群体智能算法,该算法通过模拟动物觅食搜索、猎物识别时间、食物地域和觅食中心位置来建立数学模型,并通过达到觅食动物净能量最大来解决待优化问题。OFA 数学描述简述如下^[24]:

(1) 觅食位置初始化。受最佳觅食理论的启

发,OFA 中个体被认为是一种觅食动物,其位置分布代表待优化问题的可行解。文献[24]利用公式(1)初始化 d 维变量第 $t+1$ 代觅食空间位置。

$$x_i^{t+1} = x_i^t - k \cdot r_{1i} \cdot \Delta x_i^t + k \cdot r_{2i} \cdot \Delta x_i^t \quad (1)$$

$$(t = 1, 2, \dots, ; i = 1, 2, \dots, d)$$

式中: x_i^{t+1} 为第 i 个个体第 $t+1$ 代觅食空间位置; x_i^t

为第 i 个个体第 t 代觅食空间位置; k 为比例因子; r_{1i}, r_{2i} 为 $[0, 1]$ 范围内均匀分布的随机数; Δx_i^t 为第 i 个个体第 t 代觅食的位置增量。

(2) 位置更新。文献[24] 给出第 i 个动物个体第 t 代觅食的位置增量数学描述:

$$\begin{cases} \Delta x_{ji}^t = x_{bi}^t - x_{ji}^t & (F_b^t < F_j^t, F_j^t \neq \min(F_1^t, F_2^t, \dots, F_N^t), b = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, N; i = 1, 2, \dots, d) \\ \Delta x_{ji}^t = x_{Ni}^t - x_{ji}^t & (F_j^t = \min(F_1^t, F_2^t, \dots, F_N^t), F_N^t = \max(F_1^t, F_2^t, \dots, F_N^t), i = 1, 2, \dots, d) \end{cases} \quad (2)$$

式中: Δx_{ji}^t 为表示第 t 代搜索中第 j 个个体第 i 个向量增量; $x_{bi}^t, x_{ji}^t, x_{Ni}^t$ 分别表示第 t 代觅食中,个体 b 获得的第 i 个向量位置、个体 j 获得的第 i 个向量位置

和该组中最差第 i 个向量位置; F_b^t, F_j^t, F_N^t 分别表示各位置对应的目标函数值。

公式(1) 中加入公式(2) 得到位置更新公式:

$$\begin{cases} x_{ji}^{t+1} = x_{ji}^t - k \cdot r_{1ji} \cdot (x_{bi}^t - x_{ji}^t) + k \cdot r_{2ji} \cdot (x_{bi}^t - x_{ji}^t) \\ (F_b^t < F_j^t; F_j^t \neq \min(F_1^t, F_2^t, \dots, F_N^t); b = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, N; i = 1, 2, \dots, d) \\ x_{ji}^{t+1} = x_{ji}^t - k \cdot r_{1ji} \cdot (x_{Ni}^t - x_{ji}^t) + k \cdot r_{2ji} \cdot (x_{Ni}^t - x_{ji}^t) \\ (F_j^t = \min(F_1^t, F_2^t, \dots, F_N^t); F_N^t = \max(F_1^t, F_2^t, \dots, F_N^t); i = 1, 2, \dots, d) \end{cases} \quad (3)$$

(3) 猎物识别。假设在动物觅食过程中只存在两种类型的猎物,它们是有利可图猎物 1 型和无利可图猎物 2 型。

依据最优觅食理论,动物总是选择具有更好能量摄入的猎物。如果满足公式(4),动物将忽略无利可图的猎物类型 2。

$$\frac{\lambda_1 E_1}{1 + \lambda_1 h_1} > \frac{E_2}{h_2} \quad (4)$$

式中: E_1 为有利可图猎物 1 型的净能量收益; E_2 为无利可图猎物 2 型的净能量收益; h_1 为有利可图猎物 1 型的处理时间; h_2 为无利可图猎物 2 型的处理时间; λ_1 为遇到有利可图猎物 1 型的比率,即相遇率。

在 OFA 中,搜索最佳位置的时间成本与搜索猎物的时间相似,可以由群组的觅食次数 t 表示,其在 $t+1$ 次搜索后获得的位置被视为有利可图猎物位

置,相应的适应度值被视为有利可图的猎物能量,即 F_j^{t+1} 为 E_1 ;在 t 次搜索后获得的位置被视为无利可图的猎物,相应的适应度值被看作是无利可图的猎物类型能量,即 F_j^t 为 E_2 。对于最小值优化问题,公式(4) 可以描述为:

$$\frac{\lambda_j^{t+1} F_j^{t+1}}{1 + \lambda_j^{t+1} (t + 1)} < \frac{F_j^t}{t} \quad (5)$$

式中: λ_j^{t+1} 为 $[0, 1]$ 范围内的随机数。

(4)OFA 的改进。FAO 中比例因子 $k = t/T$,可见较大的比例因子有利于全局搜索,较小的比例因子则有利于局部搜索。为能有效平衡 FAO 的全局搜索能力与局部搜索能力,参考粒子群优化算法惯性权重改进方法,本文利用系数法对比例因子 k 进行改进:

$$k(t + 1) = \eta k(t) \quad (6)$$

式中: η 为比例因子衰减系数,本文取 0.99。

表 1 最严格水资源管理区域类型识别指标体系及分级标准

指标	类型	优秀(Ⅰ级)	良好(Ⅱ级)	合格(Ⅲ级)	不合格(Ⅳ级)	上下限值
用水总量控制率 C_1	↓	<0.70	[0.70,0.90)	[0.90,1.00)	≥1.00	[0.40,1.20]
万元 GDP 用水量 C_2 / m^3	↓	<70	[70,120)	[120,200)	≥200	[35,300]
万元工业增加值用水量 C_3 / m^3	↓	<60	[60,100)	[100,150)	≥150	[30,200]
灌溉水利用系数 C_4	↑	≥0.60	[0.50,0.60)	[0.40,0.50)	<0.40	[0.30,0.80]
水功能区达标率 $C_5 / \%$	↑	≥90	[80,90)	[70,80)	<70	[35.0,100]
饮用水水源达标率 $C_6 / \%$	↑	≥95	[85,95)	[75,85)	<75	[40.0,100]

注:用水总量控制率是指年度用水总量与年度下达用水总量控制指标的比值;↑表示越大越优型指标,↓表示越小越优型指标。

3.2 投影寻踪模型

投影寻踪简要算法如下^[17-23]:

(1) 数据预处理。用公式(7)对正向指标进行处理。

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

式中: $x(i, j)$ 为指标特征值归一化序列; $x_{\max}(j)$ 、 $x_{\min}(j)$ 分别为第 j 个指标值上、下限值。

(2) 构造投影值 $z(i)$ 指标函数:

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

式中: a 为单位长度向量。

(3) 模型求解。将搜寻最优投影向量问题转化为单目标非线性最优求解问题, 即:

$$\begin{cases} \max: Q(a) = S_z D_z \\ \text{s. t.}: \sum_{j=1}^m a^2(j) = 1 \quad a \in [-1, 1] \end{cases} \quad (9)$$

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[17-23]。

3.3 云模型简介

云模型基于正态分布与钟形隶属函数, 用来实现客观世界中某个现象和事物的定性与定量相互发生不确定性转换的数学模型, 能够有效解决最严格水资源管理评价过程中的模糊性、随机性和离散性问题, 具有较广的普适性特征^[8-9]。云模型通过期望值 Ex (Ex 代表该定性概念的中心值)、熵值 En (En 表示对定性概念模糊度的度量) 和超熵值 He (He 是对 Ex 的不确定性度量, 由熵的随机性和模糊性共同决定, 反映了云滴的离散程度) 将最严格水资源管理评价过程中的模糊性、随机性和离散性有机结合起来, 实现不确定性语言和定量数量之间的转换^[8]。云模型计算过程如下:

(1) 采用云模型正向发生器生成正态随机数 $En_i = \text{norm}(En, He^2)$, 其中, 值 $\text{norm}()$ 表示正态分布函数。

(2) 再次生成正态随机数 $x_i = \text{norm}(Ex, En'^2)$, 其中, En'^2 表示方差。

(3) 计算 $\mu = e^{-(x-x_i)^2/(2En'^2)}$, (x_i, μ_i) 构建数域中任意一个云滴。

(4) 重复上述步骤, 直至产生设定的 n 个云滴为止。

3.4 最严格水资源管理评价实现步骤

3.4.1 评价指标权重的确定 步骤1 基于表1, 对于用水总量控制率等3个负向指标, 采用取倒乘

100的方法进行处理。并利用随机内插的方法在最严格水资源管理评价指标各阈值间随机生成10组数据样本, 共随机生成40组数据样本, 利用公式(7)对样本进行一致性处理。

步骤2 利用一致性处理后的样本构建投影目标函数 $Q(a)$ 。利用最优觅食算法对 $Q(a)$ 投影向量进行优化求解。

步骤3 设置最优觅食算法的种群规模 N , 问题维度 d , 最大迭代次数 T 、比例因子衰减系数 η , 当前迭代次数 t 。在搜索空间随机生成种群个体的初始觅食位置; 采用最优觅食算法对目标函数 $Q(a)$ 进行优化求解, 然后计算和排序每个个体的目标函数值。

步骤4 利用公式(3)更新每个个体新的觅食位置。

步骤5 利用公式(5)判断下一次迭代搜索方向。若满足公式(5), 则在第 $t+1$ 次搜索之后获得的位置将被保存用于下一次迭代搜索; 否则, 在第 $t+1$ 次搜索之后获得的位置将被忽略, 而在第 t 次搜索后获得位置信息将被保存并用于下一次迭代搜索。

步骤6 利用公式(6)改进比例因子衰减系数 η 。

步骤7 判断算法是否达到终止条件, 若是, 输出最佳个体空间位置, 算法结束; 否则重复步骤4~7。

步骤8 输出最佳个体目标函数值及最佳个体空间位置, 即 $\max Q$ 和最佳投影向量 $a = [a_1, a_2, \dots, a_6]$, 归一化后即各评价指标权重 $w = [w_1, w_2, \dots, w_6]$ 。

步骤9 同理, 利用传统粒子群算法、人工蜂群算法和差分进化算法优化目标函数 $Q(a)$, 优化结果与最优觅食算法的优化结果进行比较, 以验证最优觅食算法的优化性能。

3.4.2 隶属度矩阵的确定 步骤1 云模型参数的计算。基于表1, 云模型参数通过下式计算:

$$Ex = (x_{ij}^1 + x_{ij}^2) / 2 \quad (10)$$

式中: x_{ij}^1 、 x_{ij}^2 分别表示某一等级标准区间。

在最严格水资源管理评价中, 由于评价标准的边界具有一定模糊性, 可以分属相邻等级, 故隶属度应当相等, 即:

$$\exp[-(x_{ij}^1 - x_{ij}^2) / (8En^2)] = 0.5 \quad (11)$$

得到云模型的熵值 En :

$$En = (x_{ij}^1 - x_{ij}^2) / 2.355 \quad (12)$$

$$He = K \quad (13)$$

式中: K 为常数, 根据经验取值, 反映云模型的离散程度。

通过上述方法可以确定最严格水资源管理分级云模型的特征参数 (Ex, En, He), 见表2。根据表2

中云模型特征参数信息,由云模型正向发生器在 matlab 程序上生成用水总量控制率、万元 GDP 用水量、万元工业增加值用水量、灌溉水利用系数、水功能区达标率和饮用水水源达标率的正态图,见图 1。程序计算时,设置生成 2000 个云滴,以平均值为最终的确定度值。

步骤 2 隶属度矩阵的确定。利用云模型的特征

参数 (Ex, En, He) 和 $\mu = e^{-(-x-Ex)^2/(2En^2)}$ 可计算出某评价区域各指标数据 x_i 隶属于某分级云的隶属度 U 。
 3.4.3 最严格水资源管理评价 基于上述计算获得的各评价指标权重 $w = [w_1, w_2, \dots, w_6]$ 和各评价区域隶属度 U , 利用 $V = w^T U$ 计算获得 $V = [V_1, V_2, V_3, V_4]$ 。而后结合最大确定度原则, 获得最严格水资源管理评价分级。

表 2 正态云模型特征参数

等级	C_1	C_2/m^3	C_3/m^3	C_4	$C_5/\%$	$C_6/\%$
I级	(196.5,45.4,0.1)	(2.14,0.603,0.001)	(2.50,0.705,0.001)	(0.750,0.127,0.001)	(95,4.25,0.001)	(97.5,2.12,0.001)
II级	(127,13.6,0.1)	(1.13,0.254,0.001)	(1.335,0.285,0.001)	(0.550,0.042,0.001)	(85,4.25,0.001)	(90,4.25,0.001)
III级	(105.5,4.7,0.1)	(0.67,0.141,0.001)	(0.834,0.141,0.001)	(0.450,0.042,0.001)	(75,4.25,0.001)	(80,4.25,0.001)
IV级	(91.7,7.1,0.1)	(0.42,0.072,0.001)	(0.584,0.071,0.001)	(0.350,0.042,0.001)	(52.5,14.9,0.001)	(57.5,14.9,0.001)

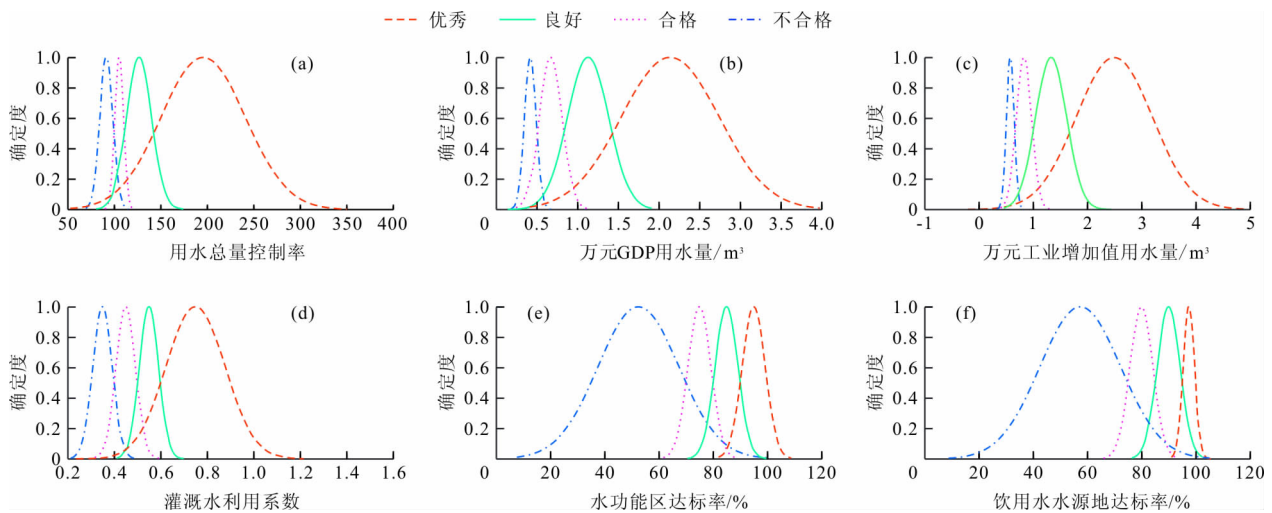


图 1 最严格水资源管理各评价指标等级正态图

4 应用实例

4.1 研究区概况与数据来源

云南省地处祖国西南边陲,辖昆明等 16 个州(市),面积 $39 \times 10^4 \text{ km}^2$, 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 1 279 mm,水资源总量 $2210 \times 10^8 \text{ m}^3$,居全国第三位。2015 年全省用水总量 $150.1 \times 10^8 \text{ m}^3$,用水总量控制率 0.81,万元 GDP 用水量 109 m^3 ,万元工业增加值用水量 66 m^3 ,灌溉水有效利用系数 0.52,实行最严格水资源管理制度效果明显。

但由于云南省地形地貌复杂、水资源开发利用难度大、成本高、边际效益低,加之降水时空分布极不均匀,造成各州市间经济社会发展不平衡,用水总量、用水效率和水环境状况差异十分明显。因此,开展云南

省各区域最严格水资源管理评价对于云南省“因地制宜、因域施策”地推进最严格水资源管理制度具有重要意义。本文研究数据来源于《2015 年云南省水资源公报》《2015 年云南省统计年鉴》等。指标数据见表 3。

4.2 算法验证及对比

基于上述最严格水资源管理评价实现步骤,利用随机生成并经一致性处理后的样本构建投影目标函数 $Q(a)$,并分别利用最优觅食算法、传统粒子群算法、人工蜂群算法和差分进化算法对 $Q(a)$ 进行优化求解。4 种算法参数设置如下:

最优觅食算法:种群规模 $N = 50$,初始比例因子 $k_0 = 0.90$,比例因子衰减系数 $\eta = 0.99$,最大迭代次数 $T = 1000$ 。

粒子群算法:种群规模 $N = 50$, $\omega = 0.729$,局部

学习因子、全局学习因子 $c_1 = c_2 = 2.0$, 最大迭代次数 $T = 1000$ 。

人工蜂群算法: 种群规模 $N = 50$, 局部循环次数 $l_c = 60$, 最大迭代次数 $T = 1000$ 。

差分进化算法: 种群规模 $N = 50$, 上下限的尺度因子分别为 0.8、0.2, 交叉率 $CR = 0.2$, 最大迭代

次数 $T = 1000$ 。

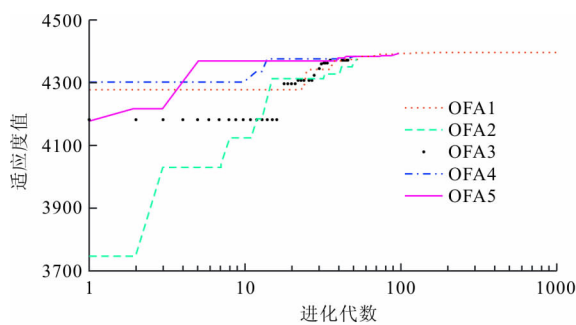
4种算法采用 Matlab 语言实现, 分别对目标函数 $Q(a)$ 独立运行 20 次, 分别统计最优适应度值、最差适应度值、平均适应度值和标准差, 见表 4。最优觅食算法某次连续 5 次进化过程及对比进化过程见图 2。

表 3 云南省最严格水资源管理评价指标

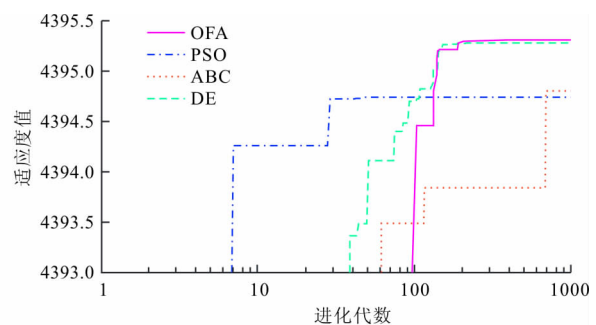
区域	C_1	C_2 / m^3	C_3 / m^3	C_4	$C_5 / \%$	$C_6 / \%$	区域	C_1	C_2 / m^3	C_3 / m^3	C_4	$C_5 / \%$	$C_6 / \%$
昆明市	0.726	49	49	0.52	68.0	87.5	楚雄州	0.663	130	42	0.50	82.0	90.0
曲靖市	0.717	84	51	0.52	70.0	87.5	红河州	0.869	129	50	0.50	70.0	80.0
玉溪市	0.812	69	28	0.52	55.2	81.3	文山州	0.868	148	64	0.52	85.0	92.3
保山市	0.948	215	109	0.48	85.0	80.0	西双版纳	0.840	183	78	0.48	100.0	100
昭通市	0.858	133	71	0.48	94.7	88.2	大理州	0.781	154	75	0.50	86.0	87.5
丽江市	0.824	227	90	0.48	84.0	87.5	德宏州	0.955	287	75	0.48	100.0	87.5
普洱市	0.867	260	83	0.48	88.0	86.7	怒江州	0.905	172	79	0.45	85.0	100
临沧市	0.910	212	57	0.48	100.0	85.7	迪庆州	0.731	102	79	0.45	90.0	100

表 4 4种算法在目标函数 $Q(a)$ 上的优化结果

算法	最优适应值	最差适应度值	平均适应度值	标准差
最优觅食算法	4395.306000	4395.306000	4395.306000	1.82×10^{-12}
粒子群算法	4393.803000	4389.804100	4392.034250	0.9344
人工蜂群算法	4395.276900	4393.339600	4394.606954	0.5465
差分进化算法	4395.306000	4395.279800	4395.287364	1.09×10^{-2}



(a) 最优觅食算法在 $Q(a)$ 上的 5 次进化过程



(b) 4种算法在 $Q(a)$ 上的对比进化曲线

图 2 进化过程图

从 $Q(a)$ 20 次寻优统计结果来看, 最优觅食算法获得的最优、最差和平均适应度值均为 4395.306000, 寻优结果均优于粒子群算法、人工蜂群算法和差分进化算法; 标准差比其他 3 种算法提高 9 个数量级以上, 表明最优觅食算法具有较好的全局极值寻优能力和稳健性能。4 种算法优化性能由优至劣依次是: 最优觅食算法、差分进化算法、人工蜂群算法和粒子群算法。

4.3 评价结果与分析

(1) 指标权重计算。通过最优觅食算法优化 $Q(a)$, 获得各评价指标最佳投影向量, 并经归一化处理后即各评价指标权重。经计算, 各评价指标权重为: $w = [0.1741, 0.1757, 0.1747, 0.1485, 0.1589, 0.1682]$ 。

(2) 隶属度计算。以昆明市为例, 基于上述隶属度矩阵确定方法, 经计算, 昆明市隶属度矩阵 U 为:

$$U_{\text{昆明}} = \begin{bmatrix} 0.4298 & 0.9866 & 0.8090 & 0.1940 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.7631 & 0.0016 & 0.0465 & 0.7748 & 0.0003 & 0.8411 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.2494 & 0.2576 & 0.2107 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.5821 & 0.1317 \end{bmatrix}$$

同理,可计算其他州(市)隶属度矩阵。

(3) 分级评价。利用 $V = w^T U$ 计算获得 $V = [V_1, V_2, V_3, V_4]$, 并依据最大确定度原则, 确定最严格水资源管理评价分级, 并与最优觅食算法-投影寻踪方法评价结果进行对比(限于篇幅, 最优觅食算法-投影寻踪评价过程从略), 结果见表 5。

表 5 最优觅食算法-投影寻踪-云模型最严格水资源管理评价结果

评价区域	确定度				本文方法 评价结果	最优觅食算法- 投影寻踪
	I 级	II 级	III 级	IV 级		
昆明市	0.4183	0.3978	0.1134	0.1146	I 级	I 级
曲靖市	0.4235	0.3801	0.1520	0.1019	I 级	II 级
玉溪市	0.2581	0.4896	0.1991	0.2033	II 级	II 级
保山市	0.1956	0.3362	0.4672	0.0961	III 级	III 级
昭通市	0.2293	0.3970	0.3604	0.1692	II 级	II 级
丽江市	0.1311	0.7195	0.3164	0.0404	II 级	II 级
普洱市	0.1207	0.5382	0.2572	0.2043	II 级	II 级
临沧市	0.1587	0.3769	0.3240	0.1929	II 级	II 级
楚雄州	0.2331	0.4677	0.1902	0.1736	II 级	II 级
红河州	0.2424	0.2668	0.4798	0.1345	III 级	III 级
文山州	0.2323	0.6171	0.2025	0.0265	II 级	II 级
西双版纳	0.3019	0.3573	0.2932	0.0055	II 级	II 级
大理州	0.1398	0.7268	0.2346	0.0731	II 级	II 级
德宏州	0.1708	0.4287	0.4967	0.0572	III 级	II 级
怒江州	0.1791	0.4378	0.2706	0.1381	II 级	II 级
迪庆州	0.2909	0.4197	0.2944	0.0327	II 级	II 级

由表 5 可以得出以下结论:

(1) 2015 年昆明市、曲靖市最严格水资源管理评价为 I 级, 即优秀。但从确定度值来看, 其与良好(II 级)的差距并不十分明显, 原因在于昆明、曲靖两市水功能区达标率较低, 仅分别为 68% 和 70% (双指标)。可通过加大水环境综合整治力度, 严格新建、改建、扩建入河排污口的管理, 有效核减污染物入河量, 提高城市污水处理率和污水处理回用率, 两市最严格水资源管理水平可得到进一步提升。

保山市、红河州、德宏州评价为 III 级, 即合格, 从确定度值来看, 德宏州与良好(II 级)的确定度十分接近。3 个州(市)中, 保山市和德宏州可通过加强节水型社会建设、推动农业高效节水减排、制定水量核减实施方案、推进用水总量和强度双控行动等举措来提高灌溉水利用系数和行业用水效率, 其最严格水资源管理水平可得到有效提高。红河州经济社会相对发达, 用水效率较保山市和德宏州高, 但其在水功能区、水源地达标方面表现较差, 可通过加大水环境综合整治力度、强化水污染防治措施、开展水源

地达标建设等措施来提升最严格水资源管理水平。

其余玉溪等 11 个州(市)最严格水资源管理评价为 II 级, 即良好, 从确定度值来看, 昭通、临沧的确定度值与合格(III 级)较为接近。11 个州(市)中, 玉溪可通过加大水污染防治力度、开展水源地达标建设等工作来提升最严格水资源管理水平; 昭通、丽江等 10 个州(市)可通过推进节水型社会建设、调整行业用水结构、制定水量核减实施方案、落实用水总量和强度双控行动、推动农业高效节水减排建设等举措提升最严格水资源管理水平。

(2) 本文方法与投影寻踪法给出的评价结果基本一致, 仅在曲靖市和德宏州评价结果上存在 1 个等级的差异, 这表明最优觅食算法-投影寻踪-云模型在最严格水资源管理评价中应用是合理可行的, 可作为一种新的水资源管理评价模型推广使用。

5 结 论

(1) 本文将正态云模型引入到最严格水资源管理评价中, 拟定了最严格水资源管理评价指标体系

和分级标准。鉴于云模型可以识别随机性和模糊性的特点,由云模型正向发生器给出评价结果,并与投影寻踪法的评价结果进行对比,验证了本文方法的合理性和可行性。

(2)提出最优觅食算法-投影寻踪指标权重的确定方法。通过在指标等级阈值间随机生成数据样本构建目标函数,利用最优觅食算法优化目标函数确定各评价指标权重。并将优化适应度值与传统粒子群算法、人工蜂群算法和差分进化算法的优化结果进行对比,结果表明最优觅食算法寻优精度高于传统粒子群算法等3种算法,具有较好的求解精度和稳定性能。同时验证了最优觅食算法-投影寻踪指标权重确定方法的可行性和有效性。

(3)构建最优觅食算法-投影寻踪-正态云模型对云南省16个州(市)最严格水资源管理进行评价,结果表明:昆明市、曲靖市最严格水资源管理评价为优秀,保山市、红河州、德宏州评价为合格,其余11个州市评价为良好。针对不同的最严格水资源管理水平,分析其存在的问题和不足,有针对性地提出对策措施,为云南省各区域实行最严格水资源管理“三条红线”、“四项制度”提供参考。

参考文献:

- [1] 左其亭. 最严格水资源管理保障体系的构建及研究展望[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2016, 37(4): 7-11.
- [2] 胡德义,程大鹏,胡彩虹,等. 基于得分法的河南省最严格水资源管理评价[J]. 人民珠江, 2016, 37(7): 102-106.
- [3] 杨阳,方国华,黄显峰,等. 基于改进模糊物元分析法的区域最严格水资源管理评价[J]. 水资源保护, 2014, 30(6): 19-24.
- [4] 王大洋,莫崇勋,钟欢欢,等. 基于综合权重可变模糊集的最严格水资源管理评价[J]. 人民珠江, 2016, 37(5): 10-14.
- [5] 代兴兰. 最严格水资源管理评价的神经网络模型及其应用[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(2): 119-125.
- [6] 付文艺. 基于熵权-正态云模型的地下水水质综合评价[J]. 人民黄河, 2016, 38(5): 68-71+76.
- [7] 任飞鹏,侯炳江,余学成. 正态云模型在地下水水质综合评价

- 价中的应用[J]. 人民长江, 2016, 47(21): 15-19+24.
- [8] 万昔超,殷伟量,孙鹏,等. 基于云模型的暴雨洪涝灾害风险分区评价[J]. 自然灾害学报, 2017, 26(4): 77-83.
- [9] 石晓静,查小春,刘嘉慧,等. 基于云模型的汉江上游安康市洪水灾害风险评价[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(3): 29-34+48.
- [10] 曾志雄,田海,黄珏皓. 基于云模型的膨胀土胀缩等级分类[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(2): 80-85.
- [11] 黄显峰,刘展志,方国华. 基于云模型的水利现代化评价方法与应用[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(6): 54-61.
- [12] 乔丹颖,刘凌,闫峰. 基于云模型的中运河水安全评价[J]. 水资源保护, 2015, 31(2): 26-29.
- [13] 周云哲,栗晓玲. 基于指标规范化的正态云模型的水安全评价[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2017, 38(4): 18-24+66.
- [14] 耿芳,董增川,徐伟. 基于云模型的黑龙江上中游河流健康评价[J]. 水资源保护, 2016, 32(6): 131-135.
- [15] 李奎,邢玉玲,谭炳卿,等. 基于云模型的黄河流域火电行业用水定额评估[J]. 人民黄河, 2017, 39(5): 64-68.
- [16] 陈杰,孟锦根. 岩爆烈度分级预测的云模型法及其应用[J]. 人民长江, 2016, 47(15): 82-86.
- [17] 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+41.
- [18] 崔东文. 文山州近10年水资源利用效率评价SLC-PP模型及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(2): 129-136.
- [19] 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.
- [20] 崔东文,郭荣. 基于混沌闪电搜索算法-最大熵投影寻踪模型的区域水安全评价[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2017, 38(3): 17-26.
- [21] 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+31+75.
- [22] 崔东文. 正弦余弦算法-投影寻踪水污染物总量分配模型[J]. 水资源保护, 2016, 32(6): 75-81+97.
- [23] 崔东文,金波. 基于WDO-PP模型的文山州近10年水资源承载力评价[J]. 水利经济, 2016, 34(6): 43-49+81.
- [24] ZHU Guangyu, ZHANG Weibo. Optimal foraging algorithm for global optimization[J]. Applied Soft Computing, 2016, 51: 294-313.