

# 基于 WCA - MEPP 模型的云南省水资源 利用效率动态评价

胡林凯

(云南省水文水资源局文山分局, 云南 文山 663000)

**摘要:** 以云南省 2006 - 2015 年及 2020 年水资源利用效率评价为例, 从综合、工业、农业、生活和生态 5 个方面遴选 15 个指标构建水资源利用效率评价指标体系和分级标准, 基于最大熵投影寻踪 (MEPP) 技术进行区域水资源利用效率动态评价。采用在指标分级标准阈值间随机生成样本的方法构造 MEPP 目标函数, 利用水循环算法 (WCA) 优化 MEPP 最佳投影方向, 建立 WCA - MEPP 水资源利用效率评价模型, 并分别构建生物地理优化 (BBO) 算法、差分进化 (DE) 算法和粒子群优化 (PSO) 算法 - MEPP 水资源利用效率评价模型作对比模型。结果表明: (1) WCA 寻优 MEPP 目标函数获得的最优值、最劣值、平均值和标准差均优于 BBO、DE 和 PSO 算法, 具有较好的全局极值寻优能力。 (2) WCA - MEPP 模型对云南省 2006 - 2007 年水资源利用效率评价为“较低水平”, 2008 - 2015 年评价为“中等水平”, 2020 年评价为“较高水平”。2006 - 2015 年间云南省水资源利用效率随时间呈提升趋势, 且提升趋势显著。 (3) WCA - MEPP 模型对云南省水资源利用效率评价结果与 BBO - MEPP 模型相同, 但在排序上存在差异; 与 DE - MEPP、PSO - MEPP 模型在评价结果及排序上均存在差异。

**关键词:** 水资源利用效率; 最大熵投影寻踪; 指标体系; 水循环算法; 生物地理优化算法; 差分进化算法; 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)04-0075-07

## Dynamic evaluation of water resources utilization efficiency in Yunnan Province based on WCA - MEPP model

HU Linkai

(Yunnan Province Hydrology and Water Resources Bureau Wenshan Branch, Wenshan 663000, China)

**Abstract:** Taking the evaluation of water resources use efficiency in Yunnan Province from 2006 to 2015 and 2020 as an example, 15 indicators were selected from aspects of comprehensiveness, industry, agriculture, life and ecology to construct the evaluation index system and grading standard of water resources utilization efficiency, and the dynamic evaluation of regional water resources utilization efficiency was conducted based on maximum entropy projection pursuit (MEPP). The MEPP objective function was constructed by randomly generating the samples between the thresholds of the target classification criteria, and the optimal projection direction of the MEPP was optimized by using the water cycle algorithm (WCA). The WCA - MEPP water resource utilization efficiency evaluation model was proposed, and the biogeographic optimization (BBO) Algorithm, differential evolution (DE) algorithm and particle swarm optimization (PSO) algorithm - MEPP water use efficiency evaluation model were established. The results show that: (1) the optimal value, the worst value, the average value and the standard deviation of WCA - based optimal MEPP are better than those of BBO, DE and PSO, and have the best global extreme value optimization ability. (2) WCA - MEPP model evaluates the water use efficiency of Yunnan Province as "low level" from 2006 to 2007 and "medium level" from 2008 to 2015, and "high level" in 2020. From 2006 to 2015, the water use efficiency of Yunnan Province increased with the time, and the

trend of upgrading was remarkable. (3) the WCA - MEPP model has the same results as the BBO - MEPP model, but the rankings are different in the WCA - MEPP model. There are differences in the evaluation results and ranking between the DE - MEPP model and the PSO - MEPP model.

**Key words:** water resources use efficiency; maximum entropy projection pursuit; index system; water cycle algorithm; biogeography - based optimization algorithm; differential evolution algorithm; particle swarm optimization algorithm; Yunnan Province

水资源利用效率是指一个国家或区域在有限的水资源供给条件下,以促进水资源高效利用和永续利用为目的,寻求单位水资源在经济、社会、生态环境等方面效率的最大化<sup>[1]</sup>。目前用于水资源利用效率评价的综合方法有:因子分析法<sup>[2]</sup>、层次分析法<sup>[3]</sup>、模糊评价法<sup>[4]</sup>、数据包络分析法<sup>[5-6]</sup>、投影寻踪法<sup>[7-8]</sup>等。由于水资源利用效率评价涉及水资源禀赋、经济社会和“三生”用水,属典型的多指标、高维、非线性复杂系统问题,上述方法和模型各有优势和特点,但也存在不足,如因子分析法易造成评价指标信息的丢失;层次分析法存在人为确定指标权重的不足;模糊分析法由于模糊隶属度值之间较为接近,不易区分各个评价区域;数据包络分析法存在对异常值敏感以及投入产出数据往往无法定量等不足;投影寻踪法由于忽略了投影向量分布的不确定性和评价指标在一定程度上存在着的相关性,从而可导致评价或分类能力的下降<sup>[9]</sup>。

本文针对投影寻踪(Projection Pursuit, PP)技术的不足,应用基于信息熵理论改进的最大熵投影寻踪(Maximum Entropy Projection Pursuit, MEPP)技术,利用水循环算法(Water Cycle Algorithm, WCA)优化 MEPP 最佳投影方向,建立 WCA - MEPP 水资源利用效率评价模型,并构建生物地理优化(Biogeography - Based Optimization, BBO)算法 - MEPP、差分进化(Differential Evolution, DE)算法 - MEPP 和 PSO - MEPP 评价模型进行对比,以云南省近 10 年及 2020 年水资源利用效率动态评价为例进行实例分析,旨在验证 WCA - MEPP 模型应用于水资源利用效率动态评价中的可行性和有效性。

## 1 水资源利用效率评价指标体系及分级标准

目前,开展水资源利用效率评价研究的文献不多,且研究主要集中于农业<sup>[10]</sup>、工业<sup>[11-12]</sup>以及生态<sup>[13]</sup>的单项评价。本文考虑云南水资源特点及经济社会发展状况,遵行科学性、可操作、可度量以及指标可获取等原则,从综合用水、工业用水、农业用水、生活用水和生态用水 5 个方面遴选 15 个指标,

构建具有目标层 A、准则层 B 和指标层 C 的区域水资源利用效率评价指标体系,并将水资源利用效率评价等级划分为“高水平/Ⅰ级”、“较高水平/Ⅱ级”、“中等水平/Ⅲ级”、“较低水平/Ⅳ级”和“低水平/Ⅴ级”,见表 1。

## 2 WCA - MEPP 水资源利用效率评价模型

### 2.1 MEPP 技术

信息熵理论认为,在仅有部分信息的条件下要对概率分布做出推断,最有效的方法是使信息熵值最大,即熵值越大,人为造成的约束和假设越少<sup>[14]</sup>。本文利用最大熵改进传统 PP 技术的不足,应用最大熵投影寻踪(MEPP)技术。将其应用于水资源利用效率评价步骤可简述如下<sup>[9,14-15]</sup>:

Step1 数据预处理。对于正向指标,利用式(1)对评价指标进行处理;对于负向指标,利用式(2)进行处理。

$$x(i, j) = \frac{x^*(i, j) - x_{\min}(j)}{x_{\max}(j) - x_{\min}(j)} \quad (1)$$

$$x(i, j) = \frac{x_{\max}(j) - x^*(i, j)}{x_{\max}(j) - x_{\min}(j)} \quad (2)$$

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。

Step2 投影指标函数及最大熵目标函数。PP 技术就是将  $m$  维数据  $\{x(i, j) | j = 1, 2, \dots, m\}$  综合成  $\vec{a} = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$  为投影方向的一维投影值  $z(i)$

$$z(i) = \sum_{j=1}^m (a(j)x(i, j)) \quad (3)$$

式中:  $\vec{a}$  为单位长度向量。

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最小。为求出投影方向的最佳分布,可构建最大熵目标函数如下:

$$H(a) = - \sum_{j=1}^m (a^2(j) \lg a^2(j)) \quad (4)$$

式中:  $H(a)$  为最大熵。

表 1 水资源利用效率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
水资源利用效率评价	综合用水	万元 GDP 用水量 $C_1 / m^3$	-	< 80	[ 80 120)	[ 120 160)	[ 160 200)	$\geq 200$
		人均水资源量 $C_2 / m^3$	+	$\geq 6000$	[ 4000 6000)	[ 2000 4000)	[ 1000 2000)	< 1000
		人均综合用水量 $C_3 / m^3$	+	$\geq 400$	[ 300 400)	[ 200 300)	[ 100 200)	< 100
	工业用水	万元工业增加值用水量 $C_4 / m^3$	-	< 40	[ 40 60)	[ 60 90)	[ 90 120)	$\geq 120$
		万元工业总产值用水量 $C_5 / m^3$	-	< 10	[ 10 20)	[ 20 35)	[ 35 50)	$\geq 50$
		工业用水重复利用率 $C_6 / \%$	+	$\geq 95$	[ 80 95)	[ 60 80)	[ 40 60)	< 40
	农业用水	农业用水率 $C_7 / \%$	-	< 40	[ 40 50)	[ 50 60)	[ 60 75)	$\geq 75$
		万元农业增加值用水量 $C_8 / m^3$	-	< 400	[ 400 600)	[ 600 800)	[ 800 1200)	$\geq 1200$
		亩均灌溉用水量 $C_9 / m^3$	-	< 300	[ 300 400)	[ 400 600)	[ 600 800)	$\geq 800$
		城镇人均生活用水量 $C_{10} / (L \cdot d^{-1})$	+	$\geq 160$	[ 130 160)	[ 100 130)	[ 80 100)	< 80
		农村人均生活用水量 $C_{11} / (L \cdot d^{-1})$	+	$\geq 130$	[ 100 130)	[ 80 100)	[ 60 80)	< 60
		居民生活用水率 $C_{12} / \%$	+	$\geq 15$	[ 12 15)	[ 10 12)	[ 5 10)	< 5
	生态用水	生态环境用水率 $C_{13} / \%$	+	$\geq 6$	[ 4 6)	[ 2 4)	[ 1 2)	< 1
		水功能区达标率 $C_{14} / \%$	+	$\geq 90$	[ 80 90)	[ 70 80)	[ 60 70)	< 60
		人均 COD 环境容量 $C_{15} / kg$	+	$\geq 15$	[ 10 15)	[ 8 10)	[ 5 8)	< 5

注：“+”表示正向指标，指标值越大，水资源利用效率越高；“-”表示负向指标，指标值越小，水资源利用效率越高。

Step3 构造多准则优化目标函数。为使各评价区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(5)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：

$$\begin{cases} \max: Q(a) = H(a)S_zD_z \\ \text{s. t: } \sum_{j=1}^m a^2(j) = 1 \quad a \in [-1, 1] \end{cases} \quad (5)$$

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]。

Step4 计算投影值。将最佳投影方向  $\vec{a}$  代入式(3)得到综合投影值  $z(i)$ 。

## 2.2 水循环算法

WCA 原理可归纳为如下<sup>[16-17]</sup>：

(1)降水初始化。在一个  $N_{var}$  维优化问题中，一个雨滴是大小  $1 \times N_{var}$  的一组向量，可表示如下：

$$Raindrop = [x_1, x_2, \dots, x_N] \quad (6)$$

假设降雨层个数为  $N_{pop}$ ，通过公式(7)生成初始降雨层为  $N_{pop} \times N_{var}$  的矩阵  $X$ 。

$$X = LB + rand \times (UB - LB) \quad (7)$$

式中： $UB$  和  $LB$  分别为变量的上、下边界； $rand$  为 0 到 1 之间均匀分布的随机数。

其展开后表达式为：

$$\begin{aligned} \text{population of raindrops} &= \begin{bmatrix} Raindrop_1 \\ Raindrop_2 \\ \vdots \\ Raindrop_{N_{pop}} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_{N_{var}}^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_{N_{var}}^2 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_1^{N_{pop}} & x_2^{N_{pop}} & \dots & x_{N_{var}}^{N_{pop}} \end{bmatrix} \quad (8) \end{aligned}$$

(2) 适应度函数。雨滴个体的适应度函数由式(9)给出：

$$\begin{aligned} C_i &= Cost_i \\ &= f(x_1^i, x_2^i, \dots, x_{N_{var}}^i) \quad i = 1, 2, \dots, N_{pop} \quad (9) \end{aligned}$$

式中： $N_{pop}$  为雨滴(初始种群)； $N_{vars}$  为待优化变量维度。

(3) 确定海洋及河流数量。从最好的个体(最小值)中选取  $N_{sr}$  作为海洋和河流，具有最小值的雨滴被认为是海洋。单一海洋计算由式(10)给出；雨滴的其余部分(形成雨滴流向河流或直接流向大海流)用式(11)进行计算。

$$N_{sr} = \text{Number of Rivers} + \underbrace{1}_{sea} \quad (10)$$

$$N_{Raindrops} = N_{pop} - N_{sr} \quad (11)$$

用公式(12)确定雨滴流向河流和海洋的强度：

$$NS_n = \text{round} \left\{ \left| \frac{Cost_n}{\sum_{i=1}^{N_{sr}} Cost_i} \right| \times N_{Raindrops} \right\}$$

$$n = 1, 2, \dots, N_{sr} \quad (12)$$

式中:  $NS_n$  为流向特定河流或海洋的溪流数目。

(4) 汇流。水循环过程中, 降雨形成溪流, 部分溪流流入河流中, 另一部分溪流则直接流入大海, 这里假设所有的河流与溪流最终都会流入大海。如果溪流给出的适应度值比其相连的河流好, 则河流和溪流的位置对换(即溪流变成河流和河流变成溪流)。这种交换同样可发生于河流和海洋。溪流和河流新位置可以表示为:

$$X_{Stream}^{i+1} = X_{Stream}^i + rand \times C \times (X_{River}^i - X_{Stream}^i) \quad (13)$$

$$X_{River}^{i+1} = X_{River}^i + rand \times C \times (X_{Sea}^i - X_{River}^i) \quad (14)$$

式中:  $rand$  定义同上;  $X_{Stream}^i$ 、 $X_{River}^i$ 、 $X_{Sea}^i$  分别表示第  $i$  次迭代溪流、河流和海洋的位置。

(5) 蒸发。蒸发可以防止算法早熟收敛。在水循环过程中, 水不断从水面(或地面、植物表面等)蒸发, 化作水蒸气后升至大气中形成云, 然后冷凝, 以降雨等形式重新回到地表, 最终回归大海。WCA 算法中, 若  $|X_{Sea}^i - X_{River}^i| < d_{max}$  ( $i = 1, 2, \dots, N_{sr} - 1$ ), 则表示蒸发和降雨过程结束。较大的  $d_{max}$  值减少了在海洋附近的搜索力度; 而较小的  $d_{max}$  值增大了在海洋附近的搜索力度。因此,  $d_{max}$  控制着海域附近的搜索强度。 $d_{max}$  值自适应地减小可表示为:

$$d_{max}^{i+1} = d_{max}^i - \frac{d_{max}^i}{T} \quad (15)$$

式中:  $d_{max}$  为接近 0 的极小值;  $T$  为最大迭代次数。因此, 如果河流和大海之间的距离小于  $d_{max}$ , 则表明河流已经达到或汇入了大海。

(6) 降水。在满足蒸发条件后, 进入降水过程, 形成新的降水。降水表示如下:

$$X_{Stream}^{new} = LB + rand \times (UB - LB) \quad (16)$$

式中:  $UB$  和  $LB$  分别为变量的上、下边界;  $rand$  定义同上。

为保证算法的收敛速度和良好的寻优性能, 当形成的新溪流处于海洋附近, 且直接流入海洋时, 用公式(17)表示:

$$X_{Stream}^{new} = X_{sea} + \sqrt{\mu} \times \text{randn}(1 - N_{var}) \quad (17)$$

式中:  $\mu$  表示海洋附近搜索区域范围的系数;  $\text{randn}$  是正态分布的随机数。 $\mu$  越小, 则搜索范围离海洋(最优解)越近, 一般  $\mu$  取 0.1。形成新的降水后, 重新进入新的循环过程。

## 2.3 WCA - MEPP 水资源利用效率计算实现步骤

WCA - MEPP 水资源利用效率计算步骤可归纳如下:

Step1 构建水资源利用效率评价指标体系和分级标准。基于表 1, 在各分级标准阈值间随机生成样本, 利用式(1)、式(2)对生成的样本进行一致性处理。

Step2 确定式(5)作为 WCA 等 4 种算法优化的目标函数, 即适应度函数。

Step3 初始化算法参数。设置降雨层个数  $N_{pop}$ , 河流和海洋总数  $N_{sr}$ , 海洋(最优解)个数为 1, 极小值  $d_{max}$  和最大迭代次数  $T$ 。

Step4 随机生成初始种群, 利用式(8)、(10)和(11)形成初始溪流(雨滴)、河流和海洋。

Step5 利用式(5)计算每个雨滴的适应度函数值。

Step6 利用式(12)确定雨滴流向河流和海洋的强度; 利用式(13)更新溪流位置; 利用式(14)更新河流位置。

Step7 若溪流给出的适应度值比其相连的河流好, 则河流和溪流的位置对换; 若河流给出的适应度值比其相连的海洋好, 则海洋和河流的位置对换。

Step8 判断是否满足蒸发条件。若满足蒸发条件, 利用式(16)、式(17)进入降水过程, 形成新的降水。

Step9 利用式(15)减小  $d_{max}$  值; 判断算法是否满足终止条件, 若满足, 则转到 Step10; 否则, 重复执行 Step6 ~ Step9。

Step10 输出最优解, 即 MEPP 模型的最佳投影方向  $\vec{a}$ , 算法结束。

Step11 通过式(1)、式(2)对云南省 2006 - 2015 年、2020 年水资源利用效率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  $\vec{a}$  并通过式(3)计算得到各年度水资源利用效率投影值  $z(i)$  及各分级标准投影值  $z'(s)$  ( $s = 5$ , 表示水资源利用效率评价分级数)。

Step12 利用  $z'(s)$  对云南省近 10 年及 2020 年水资源利用效率进行评价分析。

## 3 实例分析

### 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)。境内河流分属长江、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 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>, 约占全国水资源量的七分之一, 仅次于西

藏、四川,居全国第三位;此外冰川雪山静贮水量约  $10 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,湖泊静贮水量近  $300 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,从邻近省区入境水量  $1\ 625 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,从缅甸、越南、老挝入境水量  $25 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,出境水量  $3\ 835 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。云南省水资源总量相对丰富,但丰枯变化大、开发利用程度低,水资源管理粗放、节水意识不强、用水效率不高,等交织存在。据统计,2015年云南省用水量  $150.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,水资源利用率  $6.8\%$ ,万元工业增加值用水量  $66 \text{ m}^3$ ,农业用水率  $69.7\%$ ,生态环境用水率  $1.56\%$ ,水功能区达标率为  $63.2\%$ (全指标),水资源“三条红线”管理面临严峻考验。近10年来,随

着云南省经济社会的快速发展、城镇化工业化进程加快,水资源供需矛盾日益加剧,水环境污染日趋严峻,水资源支撑经济社会可持续发展的要求越来越迫切。因此,科学客观动态评价云南省水资源利用效率,对于实现水资源可持续利用,实行最严格水资源管理制度,推进全面建成小康社会和节水型社会具有重要意义。

本文以2006-2015年、2020年云南省水资源利用效率评价为研究对象,指标数据来源于《2015年云南省水资源公报》、《2015年云南省统计年鉴》、《云南省“十三五”水利发展规划》,见表2。

表2 云南省2006-2015年、2020年水资源利用效率评价指标数据

年份	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$	$C_8$	$C_9$	$C_{10}$	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{13}$	$C_{14}$	$C_{15}$
2006	361.0	3800	327	133	47.2	67.4	75.1	1725.6	543	135	64	10.9	0.600	56.0	5.969
2007	313.0	4996	333	115	45.3	72.1	73.0	1548.5	524	131	68	10.3	1.203	36.8	5.928
2008	269.0	5095	337	107	40.3	75.8	71.8	1389.9	505	117	70	10.7	2.380	54.8	5.890
2009	247.0	3450	334	100	37.3	77.8	71.2	1277.3	492	125	70	10.8	2.670	59.0	5.854
2010	204.0	4224	321	98	33.1	80.8	68.2	1090.5	448	119	68	11.5	2.700	50.0	5.815
2011	165.0	3196	317	77	28.2	82.0	68.7	897.9	435	118	71	12.2	0.680	44.0	5.778
2012	144.0	3627	326	71	23.0	83.1	68.4	743.6	440	120	72	13.3	0.660	46.0	5.744
2013	128.0	3642	319	67	22.4	84.5	68.6	626.4	409	120	73	11.4	0.860	49.6	5.710
2014	117.0	3663	317	63	19.2	89.9	69.1	571.9	397	127	71	13.1	1.350	56.1	5.677
2015	109.0	3948	317	66	17.7	91.2	69.7	548.6	398	124	71	13.5	1.560	63.2	5.643
2020	85.0	4700	350	50	12.0	95.0	60.0	450.0	320	130	85	14.5	4.500	85.0	5.500

### 3.2 水资源利用效率评价模型求解

(1)算法参数设置。WCA最大迭代次数  $T = 100$ ,降雨层个数  $N_{pop} = 50$ ,河流和海洋总数  $N_{sr} = 4$ ,极小值  $d_{max} = 10^{-16}$ 。BBO算法最大迭代次数  $T = 100$ ,种群规模  $M = 50$ ,最大迁入率  $I = 1$ ,最大迁出率  $E = 1$ ,突变概率  $m_s = 0.1$ 。DE算法最大迭代次数  $T = 100$ ,种群规模  $M = 50$ ,上下限的尺度因子分别为  $0.8, 0.2$ ,交叉率  $CR = 0.2$ 。PSO算法最大迭代次数  $T = 100$ ,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15维。

(2)构造样本数据。基本表1,在各评价指标分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(1)、式(2)对生成的样本进行一致处理。

(3)模型求解。依据WCA - MEPP水资源利用效率评价模型求解步骤(其他3种算法可参考实

现),利用上述随机生成并通过一致性处理后的指标数据构造多准则目标函数式(5),运用WCA、BBO、DE和PSO算法优化式(5),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、最劣值、标准差和最佳投影方向  $\vec{a}_{1-15}$  的平均值,见表3。

(4)计算投影值。采用式(1)、式(2)对云南省2006-2015年、2020年水资源利用效率评价指标(见表2)及水资源利用效率评价分级阈值(见表1)进行一致性处理,利用表3最佳投影方向  $\vec{a}$ (20次均值)分别计算2006-2015年、2020年水资源利用效率投影值  $z(i)$  和等级标准  $z'(s)$ (见表4);利用  $z'(s)$  对云南省各年度水资源利用效率进行评价,见表5。

(5)进化过程图绘制。4种算法某次进化过程见图1。依据MEPP技术原理,适应度值越大,表示其所对应的MEPP模型投影方向越佳。

表3 目标函数优化结果及比较

算法	最优值	最劣值	平均值	标准差	投影方向 $\vec{a}_{1-15}$ (20次均值)
WCA	8795.19130	8795.19130	8795.19130	$3.64 \times 10^{-12}$	(0.2062 0.2376 0.2293 0.2116 -0.2157 0.2507 -0.2258 0.2179 0.2200 0.2219 0.2103 0.2241 0.2345 0.1888 0.5595)
BBO	8795.17380	8760.62330	8787.7570	$1.29 \times 10^1$	(0.2059 0.2391 0.2302 0.2167 -0.2181 0.2536 -0.2228 0.2199 0.2194 0.2204 0.1978 0.2256 0.2313 0.1880 0.5600)
DE	8667.81200	8337.96910	8514.64654	$9.98 \times 10^1$	(0.1104 0.4314 0.2812 0.4314 0.0297 0.1716 -0.2452 0.0761 0.2227 0.1591 0.2954 0.2515 0.1232 0.1234 0.4294)
PSO	8737.41740	5735.00980	7993.26203	$1.16 \times 10^3$	(0.0899 0.2186 0.3811 0.0000 0.3429 0.1452 -0.1350 0.4186 -0.1875 0.0000 -0.1225 0.2135 -0.0220 0.2766 0.5422)

表4 区域水资源利用效率评价等级标准  $z'(s)$ 

评价等级	WCA - MEPP	BBO - MEPP	DE - MEPP	PSO - MEPP
高水平 (I级)	$\geq 2.7709$	$\geq 2.7670$	$\geq 2.8915$	$\geq 2.1616$
较高水平 (II级)	[1.9177, 2.7709)	[1.9155, 2.7670)	[1.9834, 2.8915)	[1.4805, 2.1616)
中等水平 (III级)	[1.1390, 1.9177)	[1.1391, 1.9155)	[1.0911, 1.9834)	[0.9699, 1.4805)
较低水平 (IV级)	[0.3371, 1.1390)	[0.3378, 1.1391)	[0.2181, 1.0911)	[0.3357, 0.9699)
低水平 (V级)	$< 0.3371$	$< 0.3378$	$< 0.2181$	$< 0.3357$

表5 云南省水资源利用效率投影值  $z(i)$  及评价排序结果

年份	WCA - MEPP			BBO - MEPP			DE - MEPP			PSO - MEPP		
	投影值 $z(i)$	评价	排序	投影值 $z(i)$	评价	排序	投影值 $z(i)$	评价	排序	投影值 $z(i)$	评价	排序
2006	1.0015	IV级	10	1.0025	IV级	10	1.0565	IV级	10	0.6809	IV级	10
2007	1.1214	IV级	9	1.1232	IV级	9	1.2523	III级	9	0.6999	IV级	9
2008	1.2856	III级	7	1.2869	III级	8	1.3998	III级	7	0.9047	IV级	8
2009	1.3109	III级	6	1.3118	III级	6	1.3530	III级	8	0.9162	IV级	7
2010	1.3488	III级	5	1.3511	III级	5	1.4251	III级	6	0.9917	III级	6
2011	1.2850	III级	8	1.2892	III级	7	1.4312	III级	5	1.0431	III级	5
2012	1.3797	III级	4	1.3842	III级	4	1.5658	III级	4	1.2076	III级	4
2013	1.4159	III级	3	1.4201	III级	3	1.5817	III级	3	1.2124	III级	3
2014	1.5595	III级	2	1.5641	III级	2	1.7123	III级	2	1.3388	III级	2
2015	1.6105	III级	1	1.6149	III级	1	1.7607	III级	1	1.4241	III级	1
2020	2.0201	II级		2.0210	II级		2.1656	II级		1.6134	II级	

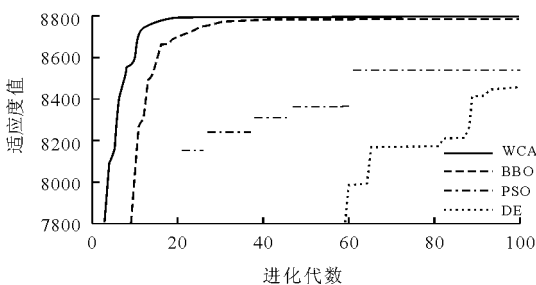


图1 4种算法某次进化过程图

### 3.3 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,WCA 20次优化式(5)结果均为8795.19130,其最优值、最劣值、平均值、标准差均优于BBO、DE和PSO算法,其中,标准差高于其他3种算法13个数量级以上。优化结果验证了WCA具有较高的求解精度和较好的收敛稳定性能,可认为8795.19130为该适应度函数的理论最大

值,其所对应的投影方向  $\vec{a}_{1-15}$  为 MEPP 最佳投影方向。从图 1 来看,WCA 收敛速度和寻优精度均优于 BBO、DE、PSO 3 种算法。

(2) 从 4 种算法的整体优化性能比较来看,WCA 优化性能略优于 BBO 算法,远优于 DE 和 PSO 算法。DE 与 PSO 算法相比,虽然 PSO 算法寻优最优值优于 DE 算法,但在 20 次寻优化过程中,PSO 算法有 4 次寻优结果小于 6 000,即陷入局部最优值,以致 20 次平均值和标准差劣于 DE 算法,整体寻优能力不如 DE 算法。

(3) 从表 3 WCA 优化 MEPP 获得的最佳投影方向  $\vec{a}_{1-15}$  来看,人均 COD 环境容量指标投影分量最大,为 0.5595,其对水资源利用效率评价的影响最大;其余指标投影分量在 0.1888 ~ 0.2507 之间,相对较小,其对应的评价指标对水资源利用效率评价的影响相对较小。其中,万元工业总产值用水量、农业用水率 2 个指标投影分量为负值,在 -0.2258 ~ -0.2157 之间,表明对应指标的投影分量越小,其对水资源利用效率评价的影响就越大。

(4) WCA - MEPP 模型对云南省近 10 年及 2020 年水资源利用效率评价结果与 BBO - MEPP 模型相同,但在排序上有 2 个存在差异;与 DE - MEPP 模型在评价等级上有 1 个不同,排序上有 3 个存在差异;与 PSO - MEPP 模型在评价等级上有 2 个不同,排序上有 4 个存在差异。

(5) 从表 4、表 5 来看,WCA - MEPP 模型对云南省 2006 - 2007 年水资源利用效率评价为Ⅳ级“较低水平”;2008 - 2015 年评价为Ⅲ级“中等水平”;2020 年评价为Ⅱ级“较高水平”。从表 5 来看,除 2011 年由于受干旱影响外,云南省水资源利用效率投影值  $z(i)$  总体上呈增加趋势,利用 Spearman 统计量  $|T|$  与 Kendall 统计量  $|M|$  对 2006 - 2015 年云南省水资源利用效率投影值  $z(i)$  进行分析。经计算,投影值  $z(i)$  的 Spearman 统计量  $|T|$  与 Kendall 统计量  $|M|$  分别为 6.04、3.49,均大于置信水平为 0.05 时的相应临界值 2.01 和 1.96,表明云南省水资源利用效率随时间呈提升趋势,且提升趋势显著。按照《云南省“十三五”水利发展规划》,“十三五”期间,随着最严格水资源管理制度的进一步贯彻落实,节水型社会建设的持续推进,云南省水资源利用效率将得到进一步提升,将从现状的“中等水平”提升至“较高水平”,但受生态用水指标以及水资源系统随机变化、人口增长、经济规模扩大等因素的影响和制约,云南省水资源利用效率提升的空间有限。

## 4 结 论

(1) 依据水资源利用效率内涵,遵行科学性、可操作、可度量、指标可获取等原则构建水资源利用效率评价指标体系和分级标准,在各指标分级标准阈值间随机生成样本用于构建多准则目标函数。指标体系、分级标准、样本构建方法对于水资源利用效率的评价及研究具有一定的参考意义。

(2) 从目标函数的优化结果来看,WCA 优化性能略优于 BBO 算法,远优于 DE 和 PSO 算法,验证了 WCA 具有较高的求解精度。从实例评价结果来看,对于 MEPP 技术,决定水资源利用效率评价精度的关键因素是智能算法的极值寻优能力。

(3) WCA - MEPP 模型对云南省近 10 年及 2020 年水资源利用效率评价结果与 BBO - MEPP 模型相同,但在排序上存在差异;与 DE - MEPP、PSO - MEPP 模型在评价等级及排序上均存在差异。WCA - MEPP 模型对云南省 2006 - 2007 年水资源利用效率评价为“较低水平”,2008 - 2015 年评价为“中等水平”,2020 年评价为“较高水平”。从实例评价结果来看,将 WCA - MEPP 模型应用于水资源利用效率动态评价是可行和有效的。

(4) 云南省近 10 年水资源利用效率随时间呈提升趋势,且提升趋势显著。通过实行最严格水资源管理制度和推进节水型社会建设等举措,云南省水资源利用效率可以得到进一步提升,但受生态用水指标以及水资源系统随机变化、人口增长等因素的影响和制约,水资源利用效率提升的空间有限。

## 参考文献:

- [1] 许新宜,王红瑞,刘海军,等. 中国水资源利用效率评估报告[M]. 北京:北京师范大学出版社,2010.
- [2] 刘庆生. 浙江省水资源利用效率研究[J]. 水利经济,2010,28(2):28-30.
- [3] 余兴奎,何士华,高飞. 云南省水资源利用效率评价[J]. 中国农村水利水电,2012(3):87-90.
- [4] 左传英,王静,张连根,等. 基于模糊集对聚类评价模型的云南省区域水资源用水效率评价[J]. 水电能源科学,2014,32(6):29-32.
- [5] 王莹. 基于 DEA 的江苏省工业水资源利用效率研究[J]. 水利经济,2014,32(5):19-22.
- [6] 岳金桂,游海霞. 江苏省水资源可持续利用问题研究[J]. 水利经济,2016,34(3):41-45.

(2) 提出利用秩比法和最小相对信息熵原理对传统熵权法进行改进,修正后的熵权权重耦合了主客观因素,更加符合实际情况,将修正后的权重作为模糊权重对水资源承载力进行评价。

(3) 采用模糊综合评价模型对曲陆坝区5个水平年水资源承载力进行评价。结果表明在无调水的情况下,5个水平年水资源承载力综合评价价值分别为:0.479、0.390、0.335、0.287、0.283;在有调水的情况下,5个水平年水资源承载力综合评价价值分别为0.446、0.367、0.323、0.351、0.365。研究结果可以为水资源的保护和管理提供决策依据。

#### 参考文献:

- [1] 张永勇,夏军,王中根. 区域水资源承载力理论与方法探讨[J]. 地理科学进展,2007,26(2):126-132.
- [2] 左其亭. 论水资源承载能力与水资源优化配置之间的关系[J]. 水利学报,2005,36(11):1286-1291.
- [3] 夏军,朱一中. 水资源安全的度量:水资源承载力的研究与挑战[J]. 自然资源学报,2002,17(3):262-269.
- [4] 王友贞. 区域水资源承载力评价研究[D]. 南京:河海大学,2004:75.
- [5] 杨鑫,王莹,王龙,等. 基于集对分析理论的云南省水资源承载力评估模型[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(4):98-102.

- [6] 段春青,刘昌明,陈晓楠,等. 区域水资源承载力概念及研究方法的探讨[J]. 地理学报,2010,65(1):82-90.
- [7] 段新光,栾芳芳. 基于模糊综合评判的新疆水资源承载力评价[J]. 中国人口·资源与环境,2014,24(3):119-122.
- [8] 熊黑钢,付金花,王凯龙. 基于熵权法的新疆奇台绿洲水资源承载力评价研究[J]. 中国生态农业学报,2012,20(10):1382-1387.
- [9] 闵庆文,余卫东,张建新. 区域水资源承载力的模糊综合评价分析方法及应用[J]. 水土保持研究,2004,11(3):14-16+129.
- [10] 王友贞,施国庆,王德胜. 区域水资源承载力评价指标体系的研究[J]. 自然资源学报,2005,20(4):597-604.
- [11] 葛强,雷艳娇. 滇中典型流域水资源生态足迹与生态承载力研究[J]. 亚热带水土保持,2014,26(4):27-31.
- [12] 宋丽婧,魏探,宋玲梅. 五元系数法-改进熵权法在水质评价中的应用[J]. 南水北调与水利科技,2015,13(2):268-273.
- [13] 吴开亚,金菊良. 区域生态安全评价的熵组合权重属性识别模型[J]. 地理科学,2008,28(6):754-758.
- [14] 高彦春,刘昌明. 区域水资源开发利用的阀限分析[J]. 水利学报,1997,28(13):73-78.
- [15] 王西琴,张远. 中国七大河流域水资源开发利用率阈值[J]. 自然资源学报,2008,23(3):500-506.

(上接第81页)

- [7] 曹雷,周维博,庄妍. 基于遗传投影寻踪模型的延安市水资源利用效率分析[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(2):126-128.
- [8] 张云宁,袁军,陈培然. 基于投影寻踪分类法的苏北地区水足迹及用水效率评价[J]. 水利经济,2016,34(2):16-19.
- [9] 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):14-16+21.
- [10] 雷波,刘钰,许迪,等. 农业水资源利用效用评价研究进展[J]. 水科学进展,2009,20(5):732-738.
- [11] 高媛媛,许新宜,王红瑞,等. 中国水资源利用效率评估模型构建及应用[J]. 系统工程理论与实践,2013,33(3):776-784.
- [12] 岳立,白婧,郭山宁. 基于超效率的中国工业用水效率分析[J]. 石家庄经济学院学报,2013,36(6):51-55.
- [13] 播丹,应瑞瑶. 中国农业生态效率评价方法与实

- 证——基于非期望产出的SBM模型分析[J]. 生态学报,2013,33(12):3837-3845.
- [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价中的应用[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.
- [16] Hadi Eskandar, Ali Sadollah, Ardeshir Bahreininejad, et al. Water cycle algorithm - A novel metaheuristic optimization method for solving constrained engineering optimization problems[J]. Computers and Structures, 2012, 110-111: 151-166.
- [17] 章纯,刘锋,廖国维,等. 基于WCA优化算法的空间桁架结构优化设计[J]. 建筑钢结构进展,2014,16(1):34-41.