

AGPSO – MEPP 模型在云南省水安全 动态评价中的应用

祝秀信

(云南省水文水资源局文山分局, 云南 文山 663000)

摘要: 从生命安全、经济安全、社会安全和生态安全 4 个方面选取 20 个指标构建区域水安全动态评价指标体系和分级标准。利用自治粒子群优化 (AGPSO) 算法寻优最大熵投影寻踪 (MEPP) 技术最佳投影方向, 提出 AGPSO – MEPP 水安全评价模型, 并分别构建加速粒子群优化 (APSO) 算法、惯性权重线性递减粒子群优化 (LDWPSO) 算法和基本粒子群优化 (PSO) 算法 – MEPP 模型作对比模型对云南省 2006 – 2015 年及 2020 年水安全进行评价。结果表明: AGPSO 寻优 MEPP 目标函数获得的最优值、最差值、平均值和标准差均优于 APSO、LDWPSO 和 PSO 算法, 具有较好的全局极值寻优能力; AGPSO – MEPP 模型对云南省 2006 – 2013 年水安全评价为“不安全”, 2014 – 2015 年评价为“基本安全”, 2020 年评价为“安全”。2006 – 2015 年的 10 年间云南省水安全随时间呈提升趋势, 且提升趋势显著; AGPSO – MEPP 模型对云南省水安全评价结果与 APSO – MEPP 模型相同, 但在排序上存在差异; 与 LDWPSO – MEPP、PSO – MEPP 模型在评价结果及排序上均存在差异。其中, 与 PSO – MEPP 模型的评价及排序结果差异最为显著, 表明算法的极值寻优能力决定着评价精度的高低。

关键词: 水安全; 最大熵投影寻踪; 指标体系; 自治粒子群优化算法; 加速粒子群优化算法; 惯性权重线性递减粒子群优化算法; 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)03-0091-07

Application of AGPSO – MEPP model in dynamic evaluation of water security in Yunnan Province

ZHU Xiuxin

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

Abstract: In view of life safety, economic security, social security and ecological security, 20 indicators were selected to construct regional water security dynamic evaluation index system and grading standard. The AGPSO – MEPP is proposed to optimize the projection direction of the maximum entropy projection pursuit (MEPP), and the AGPSO – MEPP water safety evaluation model is proposed. The APSO algorithm is constructed and the inertia weight is linearly reduced. Particle Swarm Optimization (LDWPSO) algorithm and Basic Particle Swarm Optimization (PSO) – MEPP model were used to evaluate the water security of Yunnan Province from 2006 to 2015 and 2020. The results show that: The optimal, worst – case, average and standard deviation of objective function of AGPSO were better than those of APSO, LDWPSO and PSO, and had the best global optimum. The water security assessment of Yunnan Province from 2006 to 2013 was “unsafe” by the AGPSO – MEPP model, “almost safe” from 2014 to 2015, and “safe” in 2020. From 2006 to 2015, the water security of Yunnan Province showed an increasing trend with time, and the upgrading trend was remarkable. The water security evaluation results of APSAP – MEPP model are the same as those of APSO – MEPP model, but the rankings are different. There are differences in the evaluation results and ranking with LDWPSO – MEPP and PSO – MEPP models. Among them, the difference between PSO – MEPP model and the ranking of PSO – MEPP model is the most sig-

nificant, which indicates that the extreme value optimization ability of the algorithm determines the accuracy of evaluation.

Key words: water security; maximum entropy projection pursuit; index system; autonomy particle swarm optimization algorithm; accelerated particle swarm optimization algorithm; linear decreasing weight particle swarm optimization algorithm; particle swarm optimization algorithm; Yunnan Province

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状态。水安全评价研究起步较早,但由于水安全是一个以“水”为中心,涉及经济社会、生态环境、自然资源、洪旱灾害等各个方面,属典型的多指标、非线性复杂系统问题。目前主要用于水安全评价的方法有层次分析法^[1]、物元分析法^[2]、水贫困指数法^[3-4]、神经网络法^[5]、支持向量机法^[6]、模糊集对分析法^[7-8]等,这些评价方法具有一定的应用价值,但也存在不足,如层次分析法存在人为确定指标权重的不足;物元分析法需要构造较多的评价函数,且函数设计无规律可循;水贫困指数法存在子系统赋权相同的不客观性,或采用主观赋权的随意性;神经网络法存在训练样本难以获取、权阈值参数较难确定以及算法易陷入局部极值等不足;支持向量机法存在训练样本难以获取、惩罚因子和核函数参数选取困难等不足;模糊集对分析法需人为确定各评价指标的分类等级,存在一定的主观性,同时存在同、异、反标准的确定和相异度系数合理取值的困难。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,已在水利等领域得到广泛应用。但由于 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,易导致评价能力下降的问题^[9]。基于此,本文提出最大熵投影寻踪(Maximum Entropy Projection Pursuit, MEPP)技术,并利用自治粒子群优化(Autonomy Particle Swarm Optimization, AGPSO)算法寻优 MEPP 技术最佳投影方向,提出 AGPSO - MEPP 水安全评价模型,分别构建加速粒子群优化(Accelerated Particle Swarm Optimization, APSO)算法、惯性权重线性递减粒子群优化(Linear Decreasing Weight Particle Swarm Optimization, LDWPSO)算法和基本粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法 - MEPP 模型作对比模型,并从生命安全、经济安全、社会安全和生态安全 4 个方面选取 20 个指标构建区域水安全动态评

价指标体系和分级标准对云南省 2006 - 2015 年及 2020 年水安全进行动态评价分析,旨在验证 AGPSO - MEPP 模型应用于动态水安全评价中的有效性和可行性。

1 水安全评价指标体系及分级标准

虽然水安全评价研究起步于 20 世纪 70 年代,但到目前为止,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点的指标体系和等级标准。本文基于云南省区域水资源、经济社会、生态环境等特点,参考相关文献[1-6]、[10-11],遵循科学性、可操作、可获取、可度量等原则,从生命安全、经济安全、社会安全和生态安全 4 个方面遴选 20 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 5 个等级,依次是:“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”,见表 1。

2 AGPSO - MEPP 水安全评价模型

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^[12]。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,将其用于水资源利用效率评价步骤简述如下^[9,12-13]:

Step1 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(1)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(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; n 、 m 分别为评价区年度数量和评价指标数目。

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 $\{x(i,j) \mid j = 1,2,\cdots,m\}$ 综合成

$$\vec{a} = \{a_1,a_2,\cdots,a_m\}$$
$$z(i) = \sum_{j=1}^m \vec{a}(j)x(i,j)$$

式中: $\vec{a}$ 为单位长度向量。

表 1 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	生命 安全	人均水资源量 C_1/m^3	+	≥ 6000	[4000 6000)	[2000 4000)	[1000 2000)	< 1000
		人均综合用水量 C_2/m^3	+	≥ 400	[300 400)	[200 300)	[100 200)	< 100
		饮用水水源达标率 $C_3/\%$	+	≥ 95	[90 95)	[85 90)	[80 85)	< 80
		城镇人均生活用水量 $C_4/(\text{L} \cdot \text{d}^{-1})$	+	≥ 180	[150 180)	[120 150)	[80 120)	< 80
		农村人均生活用水量 $C_5/(\text{L} \cdot \text{d}^{-1})$	+	≥ 160	[130 160)	[100 130)	[70 100)	< 70
		人均 GDP $C_6/\text{元}$	+	≥ 20000	[15000 20000)	[10000 15000)	[5000 10000)	< 5000
	经济 安全	人均粮食 C_7/kg	+	≥ 550	[450 550)	[350 450)	[250 350)	< 250
		万元工业增加值用水量 C_8/m^3	-	< 40	[40 60)	[60 90)	[90 120)	≥ 120
		工业用水重复利用率 $C_9/\%$	+	≥ 95	[85 95)	[75 85)	[60 75)	< 60
		万元农业增加值用水量 C_{10}/m^3	-	< 400	[400 600)	[600 800)	[800 1200)	≥ 1200
		人均有效灌溉面积 C_{11}/hm^2	+	≥ 0.06	[0.05 0.06)	[0.04 0.05)	[0.03 0.04)	< 0.03
		干旱直接经济损失率 $C_{12}/\%$	-	< 0.20	[0.20 0.40)	[0.40 0.55)	[0.55 0.70)	≥ 0.7
	社会 安全	洪涝受灾直接经济损失率 $C_{13}/\%$	-	< 0.30	[0.30 0.50)	[0.50 0.70)	[0.70 1.00)	≥ 1.00
		城镇化率 $C_{14}/\%$	+	≥ 80	[65 80)	[50 65)	[35 50)	< 35
		人口密度 $C_{15}/(\text{人} \cdot \text{km}^{-2})$	-	< 90	[90 105)	[105 120)	[120 140)	≥ 140
		蓄水工程供水率 $C_{16}/\%$	+	≥ 70	[60 70)	[50 60)	[40 50)	< 40
		供水量模数 $C_{17}/10^4(\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	+	≥ 8	[6 8)	[4 6)	[2 4)	< 2
		生态环境用水率 $C_{18}/\%$	+	≥ 5	[4 5)	[2 4)	[1 2)	< 1
	生态 安全	水功能区达标率 $C_{19}/\%$	+	≥ 90	[80 90)	[70 80)	[60 70)	< 60
		人均 COD 环境容量 C_{20}/kg	+	≥ 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。

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:

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

(4)

式中: $H(a)$ 为最大熵。

Step3 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(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:

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

(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[13]。

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 各种改进粒子群优化算法

2.2.1 基本粒子群优化(PSO)算法 PSO 算法可描述为^[14-15]:设在一个 S 维的搜索空间中,由 n 个粒子组成的种群 $W = (W_1,W_2,\cdots,W_m)$,其中第 i 个粒子表示为一个 S 维的向量 $W_i = (w_{i1},w_{i2},\cdots,w_{is})^T$,代表第 i 个粒子在 S 维搜索空间中的位置,表示一个问题的潜在解。根据目标函数可计算出每个粒子位置 W_i 所对应的适应度值,并将第 i 个粒子的速度记为 $V_i(V_{i1},V_{i2},\cdots,V_{is})^T$,其个体极值记为 $P_i = (P_{i1},P_{i2},\cdots,P_{is})^T$,种群全局的极值记为 $P_g = (P_{g1},P_{g2},\cdots,P_{gS})^T$ 。在每一迭代过程中,粒子通过个体极值和全局极值更新自身的速度和位置,更新公式为:

$$V_{id}^{k+1} = \omega V_{id}^k + C_1 r_1 (P_{id}^k - W_{id}^k) + C_2 r_2 (P_{gd}^k - W_{gd}^k) \quad (6)$$

$$W_{id}^{k+1} = W_{id}^k + V_{id}^{k+1} \quad (7)$$

式中: ω 为初始惯性权重; $d = 1, 2, \dots, S$; $i = 1, 2, \dots, n$; k 为当前迭代次数; V_{id} 为粒子的速度; C_1 和 C_2 分别为认知因子和社会因子; r_1 和 r_2 为分布于 $[0, 1]$ 之间的随机数。

2.2.2 加速粒子群优化 (APSO) 算法 惯性权重 ω 的改进方法较多, 一般较大的惯性权值利于全局搜索, 较小的惯性权值利于提高局部搜索能力和收敛速度。为能有效提高 PSO 算法的寻优能力和收敛速度, 本文利用加速因子 α 对惯性权重 ω 进行改进:

$$\omega(k+1) = \alpha \cdot \omega(k) \quad (8)$$

式中: α 为惯性权重加速因子。

2.2.3 惯性权重线性递减粒子群优化 (LDWPSO) 算法 LDWPSO 算法利用线性递减策略对惯性因子 ω 进行动态调整, 公式如下:

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{T} \cdot k \quad (9)$$

式中: $\omega_{\max}$ 为惯性因子初始值; $\omega_{\min}$ 为惯性因子终值; T 为最大迭代次数。

2.2.4 自治粒子群优化 (AGPSO) 算法 参考文献 [16] 提出多组自治粒子群优化算法, 即将粒子群分成多组, 采用具有不同斜率、曲率和截点的函数来调整 PSO 算法的认知因子 C_1 和社会因子 C_2 , 利用自治组给予粒子独立性来平衡局部搜索能力和全局搜索能力, 以提高 PSO 算法的极值寻优性能和收敛速度。本文将粒子群分成 [Group1, Group2, Group3, Group4] 4 个组, 每组粒子自主地利用各自的 C_1 和 C_2 改进策略搜索问题空间。AGPSO 算法中 ω 及各组 C_1 和 C_2 改进策略如下 (式 (10) 中参数同上):

$$\begin{cases} \omega(k+1) = \alpha \cdot \omega(k) \\ \text{Group1} \begin{cases} C_1 = 2.5 + 2(k/T)^2 - 2(2k/T) \\ C_2 = 3 - C_1 \end{cases} \\ \text{Group2} \begin{cases} C_1 = 2.5 - 2 \log(k)/\log(T) \\ C_2 = 2 \log(k)/\log(T) + 0.5 \end{cases} \\ \text{Group3} \begin{cases} C_1 = (-2.05/T) \cdot k + 2 \cdot 55 \\ C_2 = (1/T) \cdot k + 1.25 \end{cases} \\ \text{Group4} \begin{cases} C_1 = (-2k^3/T^3) + 2.5 \\ C_2 = (2k^3/T^3) + 0.5 \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

2.3 水安全评价实现步骤

AGPSO - MEPP、APSO - MEPP、LDWPSO - MEPP 和 PSO - MEPP 模型水安全评价步骤可归纳

如下:

Step1 构建水安全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) 对生成的样本进行处理。

Step2 确定式 (5) 作为 AGPSO、APSO、LDWPSO 和 PSO 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。设置最大迭代次数 T 、惯性权重 ω 、惯性权重加速系数 α , 随机初始化可行解位置 $W_i = (w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{is})^T$ 和速度 $V_i = (V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{is})^T$ 。对于 APSO、LDWPSO 和 PSO 算法, 设置 $C_1 = C_2 = 2.0$ 。

Step4 对于 AGPSO 算法, 将粒子随机分成 4 个自治组, 利用式 (5) 计算各自治组粒子适应度值, 确定全局最佳适应度值位置 $P_G = (P_{p1}, P_{p2}, \dots, P_{ps})^T$ 和各自治组最佳适应度值位置, 将群体极值 P_G 设置为当前群体中最佳粒子的位置。

Step5 利用式 (5), 计算 APSO、LDWPSO 和 PSO 3 种算法的适应度值, 记忆个体与群体所对应的最佳适应度的位置 $P_i = (P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{is})^T$ 与 $P_g = (P_{g1}, P_{g2}, \dots, P_{gs})^T$, 将个体极值 P_i 设置为当前位置, 群体极值 P_g 设置为初始群体中最佳粒子的位置。

Step6 判断 4 种算法是否满足迭代终止条件, 若满足, 转到 Step9; 否则, 执行 Step7。

Step7 利用式 (6)、式 (7) 和式 (10) 更新 AGPSO 算法各自治组粒子的位置、速度; 利用式 (6) ~ (8) 更新 APSO 算法粒子的位置、速度; 利用式 (6)、式 (7) 和式 (9) 更新 LDWPSO 算法粒子的位置、速度; 利用式 (6)、式 (7) 更新 PSO 算法粒子的位置、速度。分别搜寻并保留 4 种算法当前最好的粒子空间位置。

Step8 判断算法是否满足终止条件, 若满足, 则转到 Step9; 否则, 重复执行 Step7 - Step8。

Step9 输出 4 种算法的最佳粒子空间位置, 即 MEPP 最佳投影方向 $\vec{a}$, 算法结束。

Step10 通过式 (1)、式 (2) 对云南省 2006 - 2015 年、2020 年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 $\vec{a}$ 并通过式 (3) 计算得到各年度水安全评价投影值 $z(i)$ 及各分级标准投影值 $z'(o)$ ($o = 5$, 表示水安全评价划分等级数, 见表 1)。

Step11 利用 $z'(o)$ 对云南省近 10 年及 2020 年水安全进行评价分析。

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 $2\,210 \times 10^8\text{ m}^3$,仅次于西藏、四川,居全国第三位,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 $3\,835 \times 10^8\text{ m}^3$,水资源总量相对丰富。近 10 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。但由于云南省年际降水丰枯变化大、区域分布不匀(尤其是在人口集中、经济发达的滇中地区,水资源短缺、水环境恶化、水害灾害频发)等问题日益突出,水安全问题面临着严峻挑战。因此,科学客观评价云南省近 10 年来的水安全状态,对实现云南省水资源可持续利用支撑经济社会可持续发展具有重要意义。

本文以 2006 – 2015 年、2020 年云南省水安全评价为研究对象,指标数据来源于 2006 – 2015 年历年的《云南省水资源公报》、《云南省统计年鉴》以及《云南省“十三五”水利发展规划》,见表 2。

表 2 云南省 2006 – 2015 年、2020 年水安全评价指标数据

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}	C_{16}	C_{17}	C_{18}	C_{19}	C_{20}
2006	3800	327	85.2	135	64	8929	325.14	133	67.4	1725.6	0.0331	0.1825	0.6306	30.50	113.75	42.7	3.67	0.600	56.0	5.969
2007	4996	333	81.5	131	68	10609	323.59	115	72.1	1548.5	0.0333	0.2150	0.8571	31.60	114.54	43.3	3.81	1.203	36.8	5.928
2008	5095	337	77.8	117	70	12570	334.27	107	75.8	1389.9	0.0334	0.1106	0.9598	33.00	115.28	42.3	3.88	2.380	54.8	5.890
2009	3450	334	88.5	125	70	13539	344.98	100	77.8	1277.3	0.0336	0.2825	0.2615	34.00	115.99	42.0	3.87	2.670	59.0	5.854
2010	4224	321	83.0	119	68	15752	358.57	98	80.8	1090.5	0.0339	1.3662	0.4095	34.81	116.76	40.0	3.76	2.700	50.0	5.815
2011	3196	317	89.0	118	71	19265	379.05	77	82.0	897.9	0.0343	0.4138	0.1570	36.80	117.51	39.0	3.73	0.680	44.0	5.778
2012	3627	326	79.0	120	72	22195	392.32	71	83.1	743.6	0.0351	0.4346	0.4830	39.31	118.22	39.0	3.86	0.660	46.0	5.744
2013	3642	319	87.0	120	73	25322	404.90	67	84.5	626.4	0.0358	0.3043	0.2684	40.48	118.92	41.6	3.80	0.860	49.6	5.710
2014	3663	317	91.7	127	71	27264	411.72	63	89.9	571.9	0.0417	0.2922	0.3445	41.73	119.61	51.8	3.79	1.350	56.1	5.677
2015	3948	317	88.9	124	71	28929	416.89	66	91.2	548.6	0.0360	0.2512	0.3883	43.33	120.32	53.5	3.81	1.560	63.2	5.643
2020	4700	350	95	130	85	38467	450.00	50	95	450.0	0.0500	0.2200	0.3500	60.00	125.00	65	4.50	4.500	85	5.500

3.2 水安全评价模型求解

(1)构造样本数据。基于本文所构建的区域水安全评价指标等级标准(见表 1),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(1)、式(2)对生成的样本数据进行处理。

(2)算法参数设置。由于本文 4 种算法为基本 PSO 算法及其改进算法,为了算法间比较的公平性,设置共有参数最大迭代次数 $T = 100$ 、惯性权重 $\omega = 0.729$ 、 $C_1 = C_2 = 2.0$ 。其中 AGPSO、APSO 算法惯性权重加速系数 $\alpha = 0.99$;LDWPSO 算法惯性权值 $\omega_{\max} = 0.9$, $\omega_{\min} = 0.3$ 。4 种算法搜索空间均设置为 $[-1,1]$,维度均为 20 维。

(3)模型求解。依据前文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(5),并采用 AGPSO、APSO、LDWPSO 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、最差

值、标准差和最佳投影方向 $\vec{a}_{1 \sim 20}$ 的平均值,见表 3。4 种算法某次进化过程见图 1。其中,适应度值越大,表示其所对应的 MEPP 模型投影方向越佳。

(4)投影值计算。采用式(1)、式(2)对表 2 云南省 2006 – 2015 年、2020 年水安全评价指标数据及表 1 水安全评价分级阈值进行处理,利用表 3 最佳投影方向 $\vec{a}$ 分别计算各年度水安全投影值 $z(i)$ 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。

3.3 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,AGPSO 算法 20 次优化式(5)结果均为 12243.82200,其最优值、最差值、平均值、标准差均优于 APSO、LDWPSO 和 PSO 算法,其中,标准差高于其他 3 种算法 10 个数量级以上;从图 1 来看,AGPSO 收敛速度和寻优精度均优于 APSO、LDWPSO 和 PSO 3 种算法。实例优化结果验证了 AGPSO 算法具有较高的求解精度,表明利用自治组

给予粒子独立性来平衡 PSO 算法的局部搜索能力和全局搜索能力,可以有效提高基本 PSO 算法的极值寻优能力和收敛速度。可认为 12243.82200 为该适应度函数的理论最大值,其所对应的投影方向 $\vec{a}_{1 \sim 20}$ 为 MEPP 最佳投影方向。

(2)从优化、评价及排序结果来看,AGPSO 算法优化效果略优于 APSO 算法,其 AGPSO – MEPP 模型对云南省水安全评价结果与 APSO – MEPP 模型

相同,在排序上仅有 2 年存在差异;AGPSO 算法优于 LDWPSO 算法,其 AGPSO – MEPP 模型对实例的评价结果与 LDWPSO – MEPP 模型在评价结果上有 1 年不同,在排序上有 2 年存在差异;AGPSO 算法远优于 PSO 算法,其 AGPSO – MEPP 模型对实例的评价结果与 PSO – MEPP 模型在评价结果上有 3 年不同,在排序上有 7 年存在差异。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。

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 $\vec{a}_{1 \sim 20}$ (20 次均值)
AGPSO	12243.82200	12243.82200	12243.82200	7.28×10^{-12}	(0.2076 0.2061 0.1494 0.1909 0.1982 0.2090 0.1856 0.1961 0.1926 0.1953 0.1821 -0.1941 -0.2024 0.1941 0.1708 0.1738 0.1935 0.2006 0.1745 0.5546)
					(0.1963 0.2070 0.1503 0.2015 0.2017 0.2149 0.1840 0.1933 0.1973 0.1954 0.1797 -0.1967 -0.1869 0.2015 0.1693 0.1725 0.1998 0.1957 0.1717 0.5546)
					(0.2042 0.1720 0.1250 0.2442 0.2112 0.2252 0.1922 0.2214 0.0950 0.1812 0.1837 -0.2269 -0.2103 0.1963 0.1602 0.1567 0.1952 0.2227 0.1888 0.5373)
APSO	12243.80300	12242.91500	12243.54155	2.51×10^{-1}	(0.4228 0.1293 0.0335 0.3361 0.2865 0.1163 0.1326 0.2721 0.1776 0.2121 0.1042 -0.0601 -0.1876 0.2853 0.0784 0.0842 0.1937 0.2003 -0.1027 0.4407)
LDWPSO	12226.06400	12120.32300	12189.90895	3.34×10^1	
PSO	11864.47000	11248.34400	11650.42745	1.83×10^2	

表 4 区域水安全评价等级标准 $z'(o)$

评价等级	AGPSO – MEPP	APSO – MEPP	LDWPSO – MEPP	PSO – MEPP
非常安全(Ⅰ级)	≥ 2.2164	≥ 2.2164	≥ 2.1165	≥ 2.1081
安全(Ⅱ级)	[1.6929,2.2164)	[1.6929,2.2164)	[1.6133,2.1165)	[1.5702,2.1081)
基本安全(Ⅲ级)	[1.1903,1.6929)	[1.1903,1.6929)	[1.1220,1.6133)	[1.0416,1.5702)
不安全(Ⅳ级)	[0.6756,1.1903)	[0.6756,1.1903)	[0.6301,1.1220)	[0.5251,1.0416)
极不安全(Ⅴ级)	< 0.6756	< 0.6756	< 0.6301	< 0.5251

表 5 云南省水安全投影值 $z(i)$ 及评价排序结果

年份	AGPSO – MEPP			APSO – MEPP			LDWPSO – 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	0.7578	Ⅳ级	10	0.7551	Ⅳ级	10	0.6743	Ⅳ级	10	0.7176	Ⅳ级	10
2007	0.8681	Ⅳ级	9	0.8671	Ⅳ级	9	0.7798	Ⅳ级	9	0.9367	Ⅳ级	8
2008	0.9799	Ⅳ级	7	0.9709	Ⅳ级	8	0.8884	Ⅳ级	8	0.9941	Ⅳ级	6
2009	0.9676	Ⅳ级	8	0.9797	Ⅳ级	7	0.8772	Ⅳ级	7	0.8899	Ⅳ级	9
2010	1.1590	Ⅳ级	3	1.1670	Ⅳ级	2	1.0898	Ⅳ级	2	1.0363	Ⅳ级	5
2011	1.0069	Ⅳ级	6	1.0144	Ⅳ级	6	0.9092	Ⅳ级	6	0.9585	Ⅳ级	7
2012	1.1199	Ⅳ级	5	1.1285	Ⅳ级	5	1.0291	Ⅳ级	5	1.0841	Ⅲ级	4
2013	1.1474	Ⅳ级	4	1.1572	Ⅳ级	4	1.0473	Ⅳ级	4	1.0978	Ⅲ级	3
2014	1.2753	Ⅲ级	2	1.2854	Ⅲ级	3	1.1682	Ⅲ级	3	1.1793	Ⅲ级	2
2015	1.3158	Ⅲ级	1	1.3261	Ⅲ级	1	1.2075	Ⅲ级	1	1.2017	Ⅲ级	1
2020	1.7107	Ⅱ级		1.7213	Ⅱ级		1.6122	Ⅲ级		1.5096	Ⅲ级	

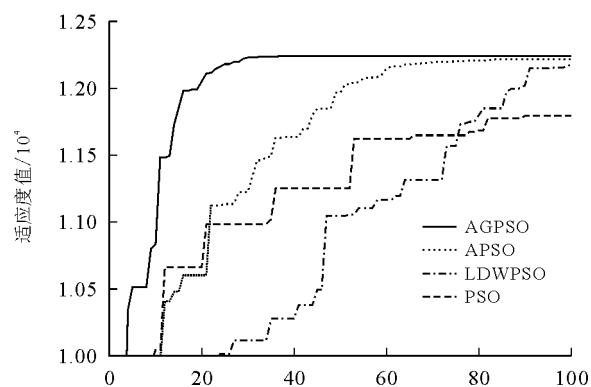


图1 4种算法某次进化过程图

(3)从表3 AGPSO 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,为 0.5546,其对水安全评价的影响最大;其余指标投影分量在 0.1494 ~ 0.2090 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。其中,干旱直接经济损失率、洪涝受灾直接经济损失率 2 个指标投影分量为负值,表明对应指标的投影分量越小,其对水安全评价的影响就越大。

(4)从 MEPP - MEPP 模型评价结果来看,云南省 2006 - 2013 年水安全评价为“不安全”;2014 - 2015 年评价为“基本安全”,2020 年评价为“安全”。从表 5 来看,云南省水安全综合投影值 $z(i)$ 呈增加趋势,利用 Spearman 统计量 $|T|$ 与 Kendall 统计量 $|M|$ 对 2006 - 2015 年水安全综合投影值 $z'(i)$ 进行分析。经计算, Spearman 统计量 $|T|$ 与 Kendall 统计量 $|M|$ 分别为 5.55、3.31,均大于置信水平为 0.05 时的相应临界值 2.01 和 1.96,表明云南省水安全随时间呈提升趋势,且提升趋势显著。从 2010 年来看,主要受当年丰水年降水的影响,水安全综合投影值要比 2011 - 2013 年的大,呈波动态势,可见由降水引起的水资源系统随机变化对水安全评价具有影响。

(5)按照《云南省“十三五”水利发展规划》思路,“十三五”期间,云南省将按照习总书记关于水安全战略讲话时提出的“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的治水方针,通过持续推进节水型社会建设、全面开展水生态文明建设试点工作、大力加强水利基础设施建设、严格落实最严格水资源管理制度等举措,云南省水安全将得到进一步提升,将从现状的“基本安全”提升至“安全”,但受生态安全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制约,云南省水安全提升的空间有限。

4 结 论

(1)针对传统投影寻踪 (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 (MEPP) 技术;针对基本 PSO 算法易陷入局部最优以及收敛速度慢等不足,提出自治粒子群优化 (AGPSO) 算法,结合 MEPP 技术与 AGPSO 算法二者优点,提出 AGPSO - MEPP 水安全评价模型对云南近 10 年水安全进行评价,并构建 APSO - MEPP、LDWPSO - MEPP 和 PSO - MEPP 模型作为对比,所提出的模型及方法具有参考价值。

(2)遵行科学性、可操作、可获取、可度量等原则,从生命安全、经济安全、社会安全和生态安全 4 个方面遴选 20 个指标构建区域水安全评价指标体系和等级标准,并通过随机生成的方法构造数据样本用于建立目标函数。指标体系、分级标准、样本构建方法对于水安全评价及研究具有一定的参考意义。

(3)通过对目标函数的优化验证了 AGPSO 算法优化性能略优于 APSO 算法,优于 LDWPSO 算法,远优于 PSO 算法,表明利用自治组给予粒子独立性来平衡 PSO 算法的局部搜索能力和全局搜索能力,可以有效提高基本 PSO 算法的极值寻优能力和收敛速度。对实例的评价结果表明,对于 MEPP 技术,决定水安全评价精度的关键因素是智能算法的极值寻优能力。

(4)AGPSO - MEPP 模型对云南省 2006 - 2013 年水安全评价为“不安全”;2014 - 2015 年评价为“基本安全”,2020 年评价为“安全”。近 10 年云南省年水安全随时间呈提升趋势,且提升趋势显著,但丰、枯水平年等对水安全评价具有影响。

参考文献:

- [1] 祝云龙. 基于层次分析的襄阳市水安全评价研究 [J]. 湖北文理学院学报, 2016, 37(5): 59 - 63.
- [2] 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.
- [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] 邵骏, 欧应钧, 陈金凤, 等. 基于水贫乏指数的长江流域水资源安全评价 [J]. 长江流域资源与环境 2016, 25(6): 889 - 894.
- [5] 胡昌军. 双隐层 BP 神经网络模型在区域水安全评价中的应用 [J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(3): 196 - 200.

参考文献:

- [1] 杨成有,刘进琪. 甘肃江河地理名录[M]. 兰州:甘肃人民出版社,2013.
- [2] 丁 晶,邓育仁. 随机水文学[M]. 成都:成都科技大学出版社,1988.
- [3] 潘承毅,何迎辉. 数理统计的原理与方法[M]. 上海:同济大学出版社,1992.
- [4] 苏向明,刘志辉,魏天峰,等. 新疆精河径流变化及其原因分析[J]. 水文,2016,36(5):92-96.
- [5] 黄济琛,陆宝宏,徐玲玲,等. 变化条件下常德市降水气温特征分析[J]. 水文,2016,36(5):85-91.
- [6] 莫淑红,王学风,勾 奎,等. 气候变化和人类活动对澜河流域径流形势的影响分析[J]. 水力发电学报,2016,35(9):7-17.
- [7] 黄振平. 水文统计学[M]. 南京:河海大学出版社,2003.
- [8] 牛最荣. 气候变化对祁连山区水文循环的影响研究[M]. 兰州:甘肃人民出版社,2013.
- [9] 牛最荣,赵文智,刘进琪,等. 甘肃渭河流域气温、降水和径流变化特征及趋势研究[J]. 水文,2012,32(2):78-83.
- [10] 董才文,张正栋,孟金华,等. 广东梅江中上游河段气温、降水、径流变化趋势及周期性分析[J]. 水文,2016,36(3):84-90.
- [11] 贾 杰,姜丽红. 渭河源区降水量变化特征及突变分析[J]. 甘肃水利水电技术,2017,53(2):8-10+46.
- [12] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术(第2版)[M]. 北京:气象出版社,2007.
- [13] 姚玉璧,张秀云,段志勇,等. 渭河源区气候变化及其对水资源的影响[J]. 干旱地区农业研究,2011,29(5):247-252.
- [14] 李文燕. 白龙江近60年水文水资源演变及变异趋势分析研究[J]. 地下水,2015,37(6):144-145.
- [15] 骆 方,黄 崑,刘红云. SPSS 数据统计与分析[M]. 北京:清华大学出版社,2011.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 贡 力,余 涛. 集对分析法在水安全评价中的应用[J]. 中国农村水利水电,2015(1):58-62+67.
- [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):14-17.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 邵 楠,周雁舟,惠文涛,等. 基于自适应变异粒子群优化算法的测试数据生成[J]. 计算机应用研究,2015,32(3):786-789.
- [15] 王小川,史 峰,郁 磊,等. MATLAB 神经网络43个案例分析[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2013.
- [16] Mirjalili S, Lewis A. Autonomous particles groups for particle swarm optimization[J]. Arabian Journal for Science and Engineering,2014,39(6):4683-4697.

(上接第97页)