

基于 WDO - PP 模型的区域水资源系统与经济社会生态系统协调度评价

杨红霞, 蔡昕

(云南省水利水电勘测设计研究院, 云南 昆明 650021)

摘要: 以云南省 16 个州市为例进行实例研究, 提出风力驱动优化(WDO)算法 - 投影寻踪(PP)水资源系统与经济社会生态系统协调度评价模型, 构建布谷鸟搜索(CS)算法、差分进化(DE)算法和粒子群优化(PSO)算法优化的 PP 模型作对比, 进行水资源系统与经济社会生态系统协调度评价。从水资源、经济、社会和生态系统遴选 20 个指标构建区域水资源系统与经济社会生态系统协调度评价指标体系, 并基于指标系列均值及标准差构造“绝对协调”~“极不协调”6 个等级的水资源系统与经济社会生态系统协调度评价标准, 应用 WDO - PP、CS - PP、DE - PP 和 PSO - PP 模型对实例协调度进行评价及分析。结果表明: DWO 算法优化 PP 模型获得的适应度值和最佳投影方向均优于 CS、DE 和 PSO 算法, 具有较好的求解精度和全局极值能力。WDO - PP 模型对昆明、玉溪两市以及怒江、德宏、西双版纳、迪庆 4 州的水资源系统与经济社会生态系统协调度评价为“协调”, 其余州市协调度评价为“基本协调”。WDO - PP 模型对实例的评价结果与 CS - PP、DE - PP 模型相同, 但在排序上存在差异; 与 PSO - PP 模型的评价结果及排序上均存在差异, 表明智能算法极值寻优能力的强弱决定了评价精度的高低。

关键词: 水资源系统; 经济社会生态系统; 指标体系; 协调度评价; 投影寻踪; 风力驱动优化算法; 云南省
中图分类号: TV213.9 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2017)02-0068-08

Coordination degree evaluation of regional water resources system and economic social ecosystem based on WDO - PP model

YANG Hongxia, CAI Xin

(Yunnan Institute of Water Resources and Hydropower Investigation and Design, Kunming 650021, China)

Abstract: The wind-driven optimization (WDO) algorithm - projection pursuit (PP) water systems and coordination of economic and social ecosystem evaluation model was proposed, and the cuckoo search (CS) algorithm, differential evolution (DE) algorithm and particle swarm optimization (PSO) were build an compared taking 16 cities in Yunnan Province as examples to study the water resources system and economic and social eco-system coordination degree. From the water resources, economic, social and ecological systems, 20 indicators were selected to build coordination degree evaluation index system between regional water resources system and economic and social ecosystem. Based on the mean and standard deviation of index series, 6 levels of coordination evaluation criteria, from “absolute coordination” to “very inconsistent”, were established. The WDO - PP, CS - PP, DE - PP and PSO - PP models were applied to evaluate and analyze the coordination degree of the examples. The results showed that, the fitness value and the best projection direction of the PP model were better than those of the CS, DE and PSO algorithms, and had good solution accuracy and global extremum ability. The WDO - PP model evaluated the coordination degrees of water resources system and economic and social ecosystem of Kunming, Yuxi, Nujiang, Dehong, Xishuangbanna and Diqing as “coordinated”, and the coordination degrees of other cities were “basically coordinated”. The results of WDO - PP model were the same as

收稿日期: 2016-11-15; 修回日期: 2017-01-05

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2013ZX07102-006-01); 院士工作站建设专项(2015IC013)

作者简介: 杨红霞(1985-), 女, 云南大理人, 学士, 工程师, 主要从事水资源开发利用及规划研究等工作。

those of CS-PP and DE-PP models, but there were differences in the rankings. The differences between PSO-PP model and PSO-PP model indicated that the strength of the extreme value optimization ability of intelligent algorithms determined the level of accuracy.

Key words: water resources system; economic social ecological system; index system; coordination evaluation; projection pursuit; wind driven optimization algorithm; Yunnan Province

1 研究背景

水资源系统与经济社会生态系统协调度是指一定时期,一定空间结构和功能特征条件下,水资源系统与经济、社会和生态系统之间功能互补、相互促进,从而实现区域水资源与经济社会可持续发展、生态环境良性循环、人水和谐共处的适宜程度大小^[1-2]。目前,用于水资源系统与经济社会生态系统协调度评价的方法有主成分分析法^[3]、层次分析法^[4]、神经网络法^[1]、耦合^[5]或构造函数法^[2]、匹配度算法^[6]等,对区域水资源系统与经济社会生态系统协调度计算评价起到了积极效果,但也普遍存在以下问题和不足:(1)指标选取较少,不足以支撑区域水资源系统与经济社会生态系统协调度的定量评价;(2)忽略了生态系统指标;(3)评价精度低,采用层次分析法确定指标权重存在主观臆断成分较大的缺陷,而采用主成分分析法降维易造成指标信息量丢失的不足;(4)水资源系统与经济社会生态系统协调度评价涉及经济、社会和生态等各方面,属多指标、高维、非线性系统问题,指标的选取难以达成共识。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,在克服维数灾难、解决超高维等问题中具有明显优势。然而,在实际应用中,PP模型最佳投影方向的精确选取是决定其评价或计算精度高低的关键所在。目前,除遗传算法(Genetic Algorithm,GA)被广泛用于PP模型最佳投影方向 \vec{a} 的选取外,群智能优化算法也尝试用于PP模型最佳投影方向 \vec{a} 的选取,如人工蜂群(Artificial Bee Colony,ABC)算法^[7]、混合蛙跳算法(Shuffled Frog Leaping Algorithm,SPLA)^[8]、差分进化(Differential Evolution,DE)算法^[9]等。风力驱动优化(Wind Driven Optimization,WDO)算法是Bayraktar等^[10]受风在地球大气层中移动启发而提出的一种新型自然灵感优化算法,该算法中空气包微元分布在一个N维问题空间,通过随机分配速度使得空气包微元位置随着大气运动物理方程的每次迭代进行位置更新,是一种群体迭代启发式全局多维优化算法,在电磁、天线合成等领域得到应用^[10]。

本文结合PP技术及WDO算法优点,建立WDO-

PP模型对云南省16个州市水资源系统与经济社会生态系统协调度进行计算分析。主要步骤为:(1)从水资源、经济、社会和生态环境系统遴选20个指标构建区域水资源系统与经济社会生态系统评价指标体系,并基于指标系列均值及标准差构造“绝对协调”~“极不协调”6个等级的水资源系统与经济社会生态系统协调度评价标准;(2)构建WDO-PP、布谷鸟搜索(Search cuckoo,CS)算法-PP、DE-PP和粒子群优化(Particle Swarm Optimization,PSO)算法-PP模型对云南省16个州市水资源系统与经济社会生态系统协调度进行计算分析。

2 水资源系统与经济社会生态系统协调度评价指标体系

开展水资源系统与经济社会生态系统协调度评价的目的在于对水资源及开发利用现状与经济社会发展、生态环境保护之间协调发展的程度进行计算分析,从而为保护水资源、建立节水型社会、实行最严格水资源管理提供参考依据^[11]。目前,国内外开展水资源系统与经济社会生态系统协调度评价分析的相关研究不多^[1-6,12],尚未形成普遍认同的指标体系、分级标准以及成熟的评价方法。笔者参考相关文献^[2,5,13],并充分考虑区域水资源与经济社会生态发展现状,遵循科学性、可量化、可操作、指标可获取等原则,从水资源系统、经济系统、社会系统和生态环境系统遴选20个指标构建具有目标层A、准则层B和指标层C的区域水资源系统与经济社会生态系统协调度评价指标体系,见表1。

3 WDO-PP 协调度评价模型

3.1 投影寻踪模型

PP模型用于水资源系统与经济社会生态系统协调度评价的简要算法如下^[13]:

Step1 数据预处理。设样本评价指标集为 $\{x(i,j) \mid i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m\}$,对于正向指标利用公式(1)进行处理;负向指标取倒后乘100后再利用公式(1)进行数据处理。

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

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 个指标值的最大和最小值; n, m 分别为样本容量和指标数目。

Step2 构造投影指标函数。PP 方法就是将 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 $z(i)$:

$$z(i) = \sum_{j=1}^m a(j)x(i, j) \quad (2)$$

式中: \vec{a} 为单位长度向量。

确定投影指标时,要求投影值 $z(i)$ 的局部投影点尽可能密集,因此,构造投影指标函数为:

$$Q(a) = S_z D_z \quad (3)$$

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。

Step3 优化投影指标函数。将搜寻最优投影方向问题转化为非线性最优求解问题,即:

$$\begin{cases} \max: Q(a) = S_z D_z \\ \text{s. t.} \sum_{j=1}^m a^2(j) = 1 \quad a \in [-1, 1] \end{cases} \quad (4)$$

Step4 计算投影值。将最佳投影方向 \vec{a} 代入公式(2)得到投影值 $z(i)$ 。

表1 区域水资源系统与经济社会生态系统评价指标体系

目标层	准则层	指标层 C	类型	表 征
A	B			
水资源系统与经济社会生态系统协调度	水资源系统	水资源开发利用率 $C_1 / \%$	-	表征统计期内水资源开发利用程度
		降水量 C_2 / mm	+	表征统计期内降水量大小
		人均水资源量 C_3 / m^3	+	表征统计期内人均水资源量大小
		产水量模数 $C_4 / 10^4 (\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	+	表征统计期内单位面积上的产水量大小
		人均综合用水量 C_5 / m^3	-	表征统计期内人均综合用水水平
	经济系统	人均 GDP $C_6 / \text{元}$	+	表征统计期内人均国内生产总值大小
		第三产业比重 $C_7 / \%$	+	表征在统计期内区域服务业占国民经济的比重
		万元 GDP 用水量 C_8 / m^3	-	表征产生同样大小的 GDP 所用水资源量
		万元工业增加值用水量 C_9 / m^3	-	表征产生同样大小的工业增加值所用水资源量
		万元农业增加值用水量 C_{10} / m^3	-	表征产生同样大小的农业增加值所用的水资源量
	社会系统	城镇化率 $C_{11} / \%$	+	表征统计期内区域人口向城市聚集的过程和聚集程度
		人口自然增长率 $C_{12} / \%$	+	表征在统计期区域人口自然增长的程度和趋势
		人口密度 $C_{13} / (\text{人} \cdot \text{km}^{-2})$	-	表征统计期区域单位国土面积上的人口数量
		城镇人均生活用水量 $C_{14} / (\text{L} \cdot \text{d}^{-1})$	+	表征在统计期内城镇人口生活的用水水平
		农村人均生活用水量 $C_{15} / (\text{L} \cdot \text{d}^{-1})$	+	表征在统计期内农村人口生活的用水水平
	生态环境系统	水功能区达标率 $C_{16} / \%$	+	表征在统计期内达到水污染治理或水资源保护目标的程度
城市污水处理回用率 $C_{17} / \%$		+	表征在统计期城市污水经处理后能够回用量占污水总量的百分比	
天然湿地占国土面积比重 $C_{18} / \%$		+	表征在统计期内天然湿地面积占国土面积的百分比	
河道外生态用水比例 $C_{19} / \%$		+	表征在统计期内生态环境用水保证程度	
建成区绿化覆盖率 $C_{20} / \%$		+	表征在统计期内成区绿化面积占建成区面积的百分比	

注:“+”表示正向指标,指标越大,其协调度越大;“-”表示负向指标,指标越小,其协调度越大。

3.2 风力驱动优化算法

在大气层中,风通过一个正比于压力梯度的速度从大气高压吹向大气低压方向。假设空气处于静压平衡,考虑到水平运动产生的压力比垂直运动产生的更强,因此,将风视为水平运动,可通过抽象的风驱动-气压平衡来解决多维问题。即 WDO 算法随着迭代次数的增加不断更新空气包微元位置,直至达到气压平衡或满足最大迭代次数,从而获得最佳空气包微元位置,即待优化问题的最优解。参考文献[11]通过使用假设和简化的方式进行 WDO 算法推导。

(1) WDO 算法基于牛顿第二运动定律,并将之应用到大气运动分析以提供较精确的模拟结果:

$$\rho \vec{a} = \sum \vec{F}_i \quad (5)$$

式中: a 为加速度向量; ρ 为空气体积密度微元; F_i 为作用力。

空气压力与密度、温度关系可由理想气体定律决定:

$$P = \rho RT \quad (6)$$

式中: P 为空气压力; R 为气体常数; T 为温度。

(2) 公式(5)中有 4 个主要因素将导致风在一定方向上移动或偏离它的路径。引起空气移动可观

测到的压力梯度 (F_{PC}), 摩擦力 (F_F) 仅起相反的制约作用。摩擦力的确切描述是非常复杂的, 这里使用公式(10) 进行简化描述。重力 (F_C) 被映射到 N 维空间中时, 它成为一个朝坐标系原点方向的吸引力。向心力 (F_C) 由地球自转引起的, 迫使风从一个方向到另一方向偏转。支配这 4 个因素的物理方程式在下面给出, 其中 δV 表示空气体积微元; ∇P 表示压力梯度; Ω 表示地球自转; g 表示重力加速度; u 表示风的速度矢量。

$$\vec{F}_{PC} = -\nabla P \delta V \quad (7)$$

$$\vec{F}_C = -2\Omega \vec{u} \quad (8)$$

$$\vec{F}_G = \rho \delta V \vec{g} \quad (9)$$

$$\vec{F}_F = -\rho \alpha \vec{u} \quad (10)$$

(3) 将公式(7) ~ (10) 相加, 并在上述公式(5) 牛顿第二定律的右端插入, 所得方程如下所示:

$$\rho \vec{u} \Delta t = (\rho \delta V \vec{g}) + (-\nabla P \delta V) + (-\rho \alpha \vec{u}) + (-2\Omega \vec{u}) \quad (11)$$

利用理想气体定律公式(6), 并规定时间步长 $\Delta t = 1$, 通过简化公式(11) 可推导出速度更新方程:

$$\vec{u}_{new} = ((1 - \alpha) \vec{u}_{old}) + g(-\vec{x}_{old}) + \left[\left| \frac{P_{max}}{P_{old}} - 1 \right| RT(x_{max} - x_{old}) \right] + \left[\frac{-cu_{old}^{other\ dim}}{P_{old}} \right] \quad (12)$$

式中: u_{new} 为下一次迭代更新速度; u_{old} 为当前迭代速度; \vec{x}_{old} 为空气包微元在搜索空间中的当前位置; x_{max} 为发现点到最高压力点的距离; P_{max} 为最大压力; P_{old} 为当前位置压力; T 为温度; g 为重力加速度; R 为普适气体常数; α 为摩擦系数; c 为地球自转系数。

(4) 通过公式(13) 更新空气包微元位置:

$$\vec{x}_{new} = \vec{x}_{old} + (\vec{u}_{new} \cdot \Delta t) \quad (13)$$

从公式(12) 等号右侧第 1 项可知, 空气包微元将继续在前一路径上移动, 并与产生的摩擦力方向相反; 第 2 项为向坐标系原点方向的吸引力; 第 3 项为向待优化问题的全局最佳位置移动的最大压力; 最后一项模拟向心力, 即偏转力。WDO 算法随着迭代次数的增加不断更新空气包微元位置, 直至达到气压平衡或满足最大迭代次数, 从而获得最佳空气包微元位置, 即待优化问题的最优解。

3.3 WDO-PP 协调度计算实现步骤

WDO-PP 水资源系统与经济社会生态系统协调度计算步骤可归纳如下(其他 3 种算法评价步骤可参考实现)^[10,14]:

Step1 构建水资源系统与经济社会生态系统评价指标体系, 利用指标系列均值及标准差构造协调度评价的分级标准, 采用公式(1) 进行指标一致性处理。

Step2 确定目标函数。由于 WDO 算法是求解极小值, 因此取式公(4) 的倒数作为目标函数, 即以公式(14) 作为适应度函数:

$$\begin{cases} \min: Q'(a) = 1/(S_z D_z) \\ \text{s. t: } \sum_{j=1}^m a^2(j) = 1 \quad a \in [-1, 1] \end{cases} \quad (14)$$

Step3 初始化算法参数。设置群体数目 M 、最大迭代次数 T 、最大允许风速度 u 。设置待优化问题维数 N 、搜索空间及算法终止条件, 并在解空间内随机初始化空气包微元空间位置 $x_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 及速率置 $u_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 。

Step4 基于水资源系统与经济社会生态系统评价样本及公式(14) 计算每个空气包微元适应度值, 排序并保存当前群体中最佳空气包微元 \vec{x}^* 。

Step5 令 $t = t + 1$, 利用公式(12)、(13) 更新空气包微元位置, 计算当前空气包微元适应度值, 并与前次适应度值进行比较。若当前适应度值优于前次, 则替换并保存当前群体中最佳空气包微元 \vec{x}^* , 否则视前次空气包微元为当前最佳空气包微元 \vec{x}^* 。

Step6 判断算法是否满足终止条件, 若满足, 则转到 Step7; 否则, 重复执行 Step5 ~ Step6。

Step7 输出最佳空气包微元个体适应度值及所处空间位置 \vec{x}^* , 即最佳投影方向 \vec{a} , 算法结束。

Step8 将最佳投影方向 \vec{a} 代入公式(2) 求得各州市水资源系统与经济社会生态系统协调度评价投影值 $z(i)$ 及各分级标准投影值 $z'(s)$ (s 为分级标准级数, 本文利用 $z'(s)$ 将水资源系统与经济社会生态系统协调度大小划分为“绝对协调”、“较协调”、“协调”、“基本协调”、“不协调”和“极不协调”6 个等级)。

Step9 分别利用 $z(i)$ 及 $z'(s)$ 对各州市水资源系统与经济社会生态系统协调度大小进行评价、排序和分析。

4 实例应用

4.1 数据来源

云南省地处我国西南边陲, 辖昆明、曲靖、玉溪、保山、昭通、丽江、普洱、临沧、楚雄、红河、文山、西双版纳、大理、德宏、怒江和迪庆 16 个州市。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。气候以亚热带山地和高原季风气候为主, 干、湿季节分

明,有明显的垂直分带现象,降水以降雨为主。多年平均降水量 1 278.8 mm,自产水资源总量 $2\ 210 \times 10^8 \text{ m}^3$,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 $3\ 835 \times 10^8 \text{ m}^3$,多年平均地下水资源量 $767 \times 10^8 \text{ m}^3$,水资源总量相对丰富。近年来,随着云南省工业化、城镇化快速推进和全球气候变化影响加剧,云南省需水持续增长,水资源供需矛盾日益突出,水环境污染日趋严峻,水资源问题已成为

制约经济、社会和生态可持续发展和良性循环的主要瓶颈。因此,科学客观评价区域水资源系统与经济社会生态系统协调度,对于协调区域产业布局、实行最严格水资源管理、推进水生态文明建设、保证水资源与经济社会生态可持续发展均具有重要意义。

云南省 16 个州市水资源系统与经济社会生态系统协调度评价的指标数据来源于 2014 年云南省水资源公报和云南省统计年鉴,见表 2。

表 2 云南省区域水资源系统与经济社会生态系统评价指标数据

区域	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}
昆明市	36.87	949.6	749.2	23.62	276	56236	53.7	49	49	419.6
曲靖市	10.91	1218.5	2628.0	43.69	229	25844	39.1	84	51	254.3
玉溪市	21.85	962.3	1591.0	25.03	348	50500	31.9	69	28	413.7
保山市	9.57	1172.6	4381.0	58.99	419	19648	38.3	215	109	602.7
昭通市	7.03	1069.9	2354.0	56.54	166	12480	35.0	133	71	403.6
丽江市	10.50	821.8	4433.0	27.51	466	21202	44.2	227	90	1063.5
普洱市	4.95	1349.8	9430.0	55.16	466	18422	36.0	260	83	710.0
临沧市	8.61	1181.9	4590.0	48.43	395	18710	36.1	212	57	565.3
楚雄州	21.96	834.7	1518.0	14.56	333	25886	40.1	130	42	456.4
红河州	9.31	1244.6	3392.0	48.69	316	24473	37.2	129	50	511.7
文山州	6.16	1251.6	4127.0	47.21	254	17208	40.8	148	64	454.4
西双版纳	6.28	1287.5	7703.0	46.92	483	26507	46.1	183	78	529.9
大理州	18.74	852.9	1941.0	24.19	364	23656	37.5	154	75	486.0
德宏州	6.41	1714.3	8807.0	99.62	565	21857	48.1	287	75	837.4
怒江州	1.18	1771.6	26883.0	99.74	318	18540	50.9	172	79	791.3
迪庆州	1.53	899.0	23976.0	42.01	367	36187	57.8	102	79	923.6
云南省	8.65	1143.4	3663.0	45.06	317	27264	43.3	117	63	509.4
区域	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{15}	C_{16}	C_{17}	C_{18}	C_{19}	C_{20}
昆明市	69.0	5.71	307	134	87	30.0	58.0	2.88	3.18	39.89
曲靖市	42.9	6.40	201	123	65	41.2	2.5	1.16	0.45	36.46
玉溪市	45.4	5.56	154	149	79	50.5	0.0	2.88	1.59	36.53
保山市	30.3	5.54	131	118	81	82.6	0.0	1.33	0.32	35.08
昭通市	27.5	8.62	234	118	61	63.5	2.1	1.30	0.61	19.26
丽江市	33.9	4.70	60	144	46	57.5	1.3	1.76	2.88	33.16
普洱市	37.2	6.15	57	144	70	76.7	0.0	1.57	1.02	30.56
临沧市	35.2	6.46	102	114	67	45.6	0.0	1.23	0.41	33.36
楚雄州	38.7	4.35	63	105	64	48.5	0.0	1.10	1.04	33.96
红河州	41.3	6.32	140	128	80	14.8	0.9	1.11	1.02	35.10
文山州	35.5	6.60	112	123	65	65.4	0.7	0.84	2.87	17.93
西双版纳	41.7	6.19	59	122	79	65.0	0.0	0.95	1.22	44.34
大理州	40.5	4.93	120	120	77	61.5	0.0	2.11	1.20	30.27
德宏州	40.0	7.30	110	149	80	80.0	0.0	1.98	0.84	34.14
怒江州	26.6	7.22	37	117	61	71.5	0.0	0.99	2.03	23.24
迪庆州	29.5	4.34	17	96	61	73.0	39.6	1.28	0.00	9.35
云南省	41.7	6.20	120	127	71	56.1	28.3	1.47	1.35	33.89

本文利用 $C_1 \sim C_{20}$ 的平均值 \bar{C} 及标准差 σ 构建水资源系统与经济社会生态系统协调度评价分级标

准,即“绝对协调 / I 级” $\in [\bar{C} + 2\sigma, \infty)$ 、“较协调 / II 级” $\in [\bar{C} + \sigma, \bar{C} + 2\sigma)$ 、“协调 / III 级” $\in [\bar{C},$

$\bar{C} + \sigma)$ 、“基本协调/IV 级” $[\bar{C} - \sigma, \bar{C})$ 、“不协调/V 级” $\in [\bar{C} - 2\sigma, \bar{C} - \sigma)$ 和“极不协调/VI 级” $\in [0, \bar{C} - 2\sigma)$ 6 个等级。

4.2 水资源系统与经济社会生态系统协调度评价模型求解

(1) 算法参数设置。WDO 算法最大迭代次数 $T = 500$, 群体数目 $M = 50$, 最大允许风速度 $u = 0.3$, 常数 $R = 0.1$, $\alpha = 0.4$, $g = 0.2$ 和 $c = 0.4$ 。CS 算法最大迭代次数 $M = 500$, 鸟窝位置数 $N = 25$ 、发现概率 $p_a = 0.25$ 。DE 算法最大迭代次数 $M = 500$, 种群规模 $N = 50$, 上下限的尺度因子分别为 0.8、0.2, 交叉率 $CR = 0.2$ 。PSO 算法最大迭代次数 $M = 500$, 种群规模 $N = 50$, $\omega = 0.729$, 局部学习因子、全局学习因子 $c_1 = c_2 = 2.0$, 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 20 维。

(2) 模型求解。依据 WDO-PP 水资源系统与经济社会生态系统协调度评价模型求解步骤(其他 3 种算法求解步骤可参考实现), 采用式(1) 对表 2 中各州市

指标 $C_1 \sim C_{20}$ 进行正向指标一致性处理, 利用处理后的指标数据构造投影指标函数, 并运用 WDO、CS、DE 和 PSO 算法求解 PP 模型最佳投影方向。将 4 种模型连续运行 20 次, 计算出最优适应度值 $Q'(a)$ 、最佳投影方向 \vec{a} 的平均值、标准差, 见表 3; 利用 20 次最佳投影方向 \vec{a} 均值计算水资源系统与经济社会生态系统协调度评价等级标准 $z'(s)$, 见表 4; 各州市综合投影值 $z(i)$ 及排序、评价结果见表 5; 4 种算法进化过程见图 1(为了便于观察, 图 1 为在纵坐标轴 $[4600, 4665]$ 上的截图)。其中, 适应度值越大, 表示其所对应的 PP 模型投影方向越佳; 投影值越大, 表示水资源系统与经济社会生态系统协调度越佳。

4.3 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 及图 1 来看, WDO-PP 模型 20 次运行所获得的适应度值 $Q'(a)$ 均值为 4 662. 2092, 标准差为 0. 0198, 优化效果均优于 CS、DE 和 PSO 3 种算法, 验证了 WDO 算法具有较好的求解精度、极值寻优能力和算法稳定性。

表 3 4 种算法 PP 模型优化结果

优化结果	WDO-PP		CS-PP		DE-PP		PSO-PP		
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	
a_1	0.1744	0.0013	0.1906	0.0502	0.1783	0.0017	0.2294	0.0587	
a_2	0.2395	0.0003	0.2385	0.0025	0.2453	0.0019	0.1442	0.0641	
a_3	0.2197	0.0010	0.1968	0.0457	0.2222	0.0032	0.1581	0.1219	
a_4	0.2307	0.0010	0.2287	0.0097	0.2348	0.0051	0.2540	0.0942	
a_5	0.1790	0.0005	0.1769	0.0022	0.1812	0.0030	0.2535	0.0743	
a_6	0.2464	0.0011	0.2456	0.0036	0.2533	0.0039	0.2243	0.0915	
a_7	0.2574	0.0011	0.2626	0.0077	0.2547	0.0036	0.2169	0.0613	
a_8	0.2301	0.0005	0.2323	0.0045	0.2307	0.0023	0.2003	0.1286	
a_9	0.1915	0.0006	0.1938	0.0048	0.1935	0.0019	0.1786	0.0941	
最佳投影方向	a_{10}	0.1847	0.0009	0.2015	0.0392	0.1872	0.0031	0.1948	0.0872
\vec{a}	a_{11}	0.2181	0.0008	0.1196	0.1830	0.2176	0.0041	0.2277	0.1018
	a_{12}	0.2217	0.0004	0.1940	0.0787	0.2265	0.0027	0.1480	0.0766
	a_{13}	0.1532	0.0017	0.1530	0.0036	0.1560	0.0014	0.1711	0.0308
	a_{14}	0.2629	0.0009	0.2664	0.0052	0.2558	0.0046	0.1163	0.0753
	a_{15}	0.2449	0.0008	0.2481	0.0055	0.2483	0.0035	0.2637	0.0875
	a_{16}	0.1928	0.0003	0.1904	0.0046	0.1972	0.0025	0.1925	0.0745
	a_{17}	0.2212	0.0012	0.2211	0.0068	0.2229	0.0011	0.2661	0.0742
	a_{18}	0.2630	0.0006	0.2675	0.0084	0.2558	0.0046	0.1884	0.1349
	a_{19}	0.2790	0.0008	0.1896	0.1727	0.2558	0.0046	0.2206	0.1041
	a_{20}	0.2136	0.0010	0.2153	0.0075	0.2150	0.0032	0.1490	0.1121
最佳适应度值 $Q'(a)$	4662.2092	0.0198	4661.3882	0.3068	4660.2514	0.4795	4613.7222	14.4799	

表4 各评价模型协调度评价等级划分结果

评价等级	WDO - PP	CS - PP	DE - PP	PSO - PP
绝对协调/Ⅰ级	≥ 3.50	≥ 3.35	≥ 3.50	≥ 3.12
较协调/Ⅱ级	[2.70, 3.50)	[2.58, 3.48)	[2.70, 3.50)	[2.40, 3.12)
协调/Ⅲ级	[1.90, 2.70)	[1.82, 2.58)	[1.91, 2.70)	[1.68, 2.40)
基本协调/Ⅳ级	[1.16, 1.90)	[1.12, 1.82)	[1.17, 1.91)	[1.04, 1.68)
不协调/Ⅴ级	[0.50, 1.16)	[0.48, 1.12)	[0.50, 1.17)	[0.45, 1.04)
极不协调/Ⅵ级	< 0.50	< 0.48	< 0.50	< 0.45

表5 各州市水资源系统与经济社会生态系统协调度计算投影值及排序评价结果

区域	WDO - PP		CS - PP		DE - PP		PSO - PP	
	投影值 $z(i)$	排序/评价						
昆明市	2.68	1/Ⅲ	2.52	1/Ⅲ	2.67	1/Ⅲ	2.39	1/Ⅲ
曲靖市	1.88	7/Ⅳ	1.82	7/Ⅳ	1.89	7/Ⅳ	1.68	7/Ⅲ
玉溪市	2.19	4/Ⅲ	2.10	4/Ⅲ	2.19	4/Ⅲ	1.88	3/Ⅲ
保山市	1.67	12/Ⅳ	1.62	12/Ⅳ	1.68	12/Ⅳ	1.48	12/Ⅳ
昭通市	1.71	11/Ⅳ	1.65	11/Ⅳ	1.72	11/Ⅳ	1.55	11/Ⅳ
丽江市	1.67	14/Ⅳ	1.56	14/Ⅳ	1.65	14/Ⅳ	1.39	15/Ⅳ
普洱市	1.86	8/Ⅳ	1.78	8/Ⅳ	1.86	8/Ⅳ	1.58	9/Ⅳ
临沧市	1.58	15/Ⅳ	1.52	15/Ⅳ	1.59	15/Ⅳ	1.39	14/Ⅳ
楚雄州	1.51	16/Ⅳ	1.45	16/Ⅳ	1.52	16/Ⅳ	1.37	16/Ⅳ
红河州	1.78	10/Ⅳ	1.70	10/Ⅳ	1.78	10/Ⅳ	1.55	10/Ⅳ
文山州	1.83	9/Ⅳ	1.72	9/Ⅳ	1.83	9/Ⅳ	1.62	8/Ⅳ
西双版纳	1.93	5/Ⅲ	1.85	6/Ⅲ	1.92	6/Ⅲ	1.68	6/Ⅲ
大理州	1.67	13/Ⅳ	1.59	13/Ⅳ	1.67	13/Ⅳ	1.47	13/Ⅳ
德宏州	2.21	3/Ⅲ	2.13	3/Ⅲ	2.22	3/Ⅲ	1.86	4/Ⅲ
怒江州	2.25	2/Ⅲ	2.16	2/Ⅲ	2.25	2/Ⅲ	2.00	2/Ⅲ
迪庆州	1.91	6/Ⅲ	1.87	5/Ⅲ	1.94	5/Ⅲ	1.83	5/Ⅲ
云南省	1.97	*/Ⅲ	1.88	*/Ⅲ	1.97	*/Ⅲ	1.75	*/Ⅲ

注:4种模型投影值均由最佳投影方向20次均值计算而来。

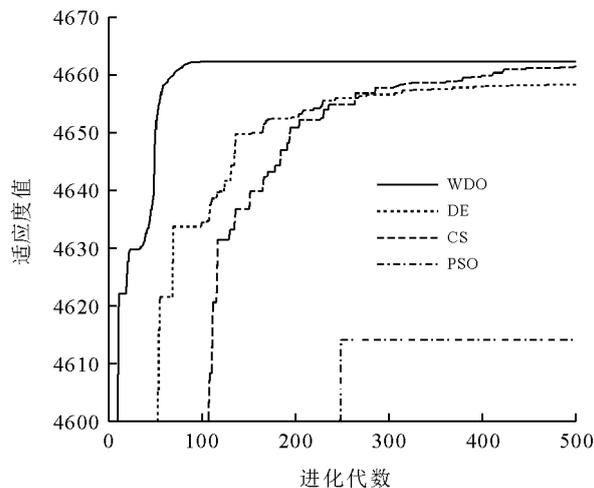


图1 4种算法模型求解进化过程图

(2)从表3 WDO算法优化PP模型得到的最佳投影方向 \vec{a}_{1-20} 来看,河道外生态用水比例、天然湿地占国土面积比重、城镇人均生活用水量、第三产业

比重、人均GDP等12个指标的投影分量在0.2136~0.2790之间,相对较大,其对水资源系统与经济社会生态系统协调度评价的影响也较大;其余指标投影分量在0.1744~0.1928之间,投影分量相对较小,其对水资源系统与经济社会生态系统协调度评价的影响相对较小。

(3)从表5来看,WDO-PP模型对16个州市水资源系统与经济社会生态系统协调度评价结果与CS-PP、DE-PP模型相同,但在排序结果上存在差异;与PSO-PP模型的评价及排序结果上均存在差异,且差异明显。表明智能算法寻优能力越强,其获得的适应度函数值、最佳投影方向越好,评价或计算精度越高。从图1来看,WDO算法具有较好的收敛速度和全局寻优能力。

(4)从表5 WDO-PP模型对实例的评价及排序结果来看,全省16个州市水资源系统与经济社会生态系统协调度投影值处于1.51~2.68之间,即处于

“基本协调”~“协调”之间,距离“绝对协调”尚有相当的差距。其中,昆明、怒江、德宏、玉溪 4 州市水资源系统与经济社会生态系统协调度投影值大于全省投影值 1.97,表明此 4 州市的协调度高于全省平均水平。从评价结果上看,昆明、怒江、德宏、玉溪、西双版纳、迪庆 6 州市的协调度评价为“协调”,这得益于昆明市、玉溪市经济社会发展相对发达,在经济、社会指标等方面较其他州市有较大优势;而怒江、德宏、西双版纳、迪庆 4 州在水资源系统、生态环境系统类指标方面表现突出。其余 12 个州的协调度评价为“基本协调”,主要在经济、社会系统指标方面表现较差,通过推进节水型社会建设、实施最严格水资源管理、提高用水效率等措施,水资源系统与经济社会生态系统协调度水平还有进一步提升的空间。

5 结 论

(1) 遵循科学性、可量化、可操作、指标可获取等原则,从水资源系统、经济系统、社会系统和生态环境系统遴选 20 个指标构建区域水资源系统与经济社会生态系统协调度评价指标体系,并利用指标系列均值及标准差构造协调度评价标准,指标选取及等级标准构造方法对区域水资源系统与经济社会生态系统协调度评价分析具有参考意义。

(2) 提出 DWO 与 PP 相融合的区域水资源系统与经济社会生态系统协调度评价 DWO-PP 模型,以云南省 16 个州市水资源系统与经济社会生态系统协调度评价为例进行实例研究,并构建 CS-PP、DE-PP 和 PSO-PP 作为对比模型。提出的模型及验证方法具有通用性,可推广应用于其他领域。

(3) WDO 优化 PP 模型所获得的适应度值、最佳投影方向均值及标准差均优于 CS、DE 和 PSO 算法,验证了 WDO 算法具有较高的求解精度和较快的收敛速度。

(4) WDO-PP 模型对 16 个州市水资源系统与经济社会生态系统协调度评价结果与 CS-PP、DE-PP 模型相同,但在排序上存在差异;与 PSO-PP 模型在评价结果及排序上均存在差异,表明智能算法的优化性能及求解精度决定了评价或计算精度的高低。

(5) WDO-PP 模型对云南省水资源系统与经济社会生态系统协调度评价为“协调”,对昆明、玉溪 2 市以及怒江、德宏、西双版纳、迪庆 4 州评价为“协调”,其余州市评价为“基本协调”。16 个州市协调度与“绝对协调”尚有相当的差距,通过节水型社会建设、实施最严格水资源管理等措施可进一步

提升协调度水平,但限于水资源及生态环境条件,提升空间有限。

参考文献:

- [1] 崔东文. 基于模式识别的区域水资源与经济社会协调度评价[J]. 水利经济, 2013, 31(5): 15-19.
- [2] 谢永红, 张云英. 云南省水资源与经济社会发展协调趋势研究[J]. 人民长江, 2014, 45(23): 80-83.
- [3] 吕王勇, 陈美香, 王波, 等. 基于主成分的区域水资源与社会经济的协调度评价[J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(1): 122-125.
- [4] 张瑶兰, 张彦君, 沈燕红. 基于 S-AHP 定权法的水资源与经济社会协调发展评价[J]. 浙江水利水电专科学校学报, 2013, 25(4): 29-35.
- [5] 周校培, 陈建明. 南京市水资源与社会经济耦合协调发展研究[J]. 水利经济, 2016, 34(4): 26-30.
- [6] 左其亭, 赵衡, 马军霞, 等. 水资源利用与经济社会发展匹配度计算方法及应用[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(6): 1-6.
- [7] 赵建强, 戴青松, 陈必科, 等. 基于人工蜂群-投影寻踪法的南方某河水质综合评价研究[J]. 节水灌溉, 2014, (8): 49-52.
- [8] 王明昊, 董增川, 马红亮. 基于混合蛙跳与投影寻踪模型的水资源系统脆弱性评价[J]. 水电能源科学, 2014, 32(9): 31-35.
- [9] 崔东文, 姜敏. 差分进化算法-投影寻踪模型在水质综合评价中的应用[J]. 人民珠江, 2016, 37(2): 97-101.
- [10] Bayraktar Z, Komurcu M, Werner D H. Wind driven optimization (WDO): A novel nature-inspired optimization algorithm and its application to electromagnetics [C]// Proceedings of the 2010 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC/URSI National Radio Science Meeting, Toronto, Canada, July 11-17, 2010.
- [11] 邓晓军, 杨琳, 吴春玲, 等. 广西水资源与社会经济发展协调度评价[J]. 中国农村水利水电, 2013(3): 14-17+23.
- [12] 王延梅, 曹升乐, 于翠松, 等. 水资源系统与经济社会生态系统协调性评价[J]. 中国农村水利水电, 2015(3): 110-113.
- [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] Bayraktar Z, Komurcu M. Adaptive Wind Driven Optimization [C]// Eai International Conference on Bio-Inspired Information and Communications Technologies. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), 2016.