

基于 WDO-PP 模型的文山州近 10 年水资源承载力评价

崔东文, 金波

(云南省文山州水务局, 云南 文山 663000)

摘要:利用 6 个典型测试函数对新型优化算法——风力驱动优化(WDO)算法进行仿真验证,将仿真结果与布谷鸟搜索(CS)算法、差分进化(DE)算法、混合蛙跳算法(SFLA)、粒子群优化(PSO)算法、蚁群优化(ACO)算法、帝国竞争算法(ICA)和模拟退火算法(SA)的寻优结果进行比较。选取水资源开发利用率、降水量等 10 个评价指标,运用风力驱动投影寻踪(WDO-PP)模型计算文山州 2006—2015 年的水资源承载力,并对其变化趋势及规划水平年 2020 年、2030 年水资源承载力进行预测及评价分析。结果表明:①无论是单峰还是多峰函数,WDO 算法寻优效果远优于 CS、DE、SFLA、PSO、ACO、ICA 和 SA 算法,具有较好的寻优精度、收敛速度、极值寻优能力以及收敛稳定性与可靠性。②文山州 2006—2014 年水资源承载力评价结果均为基本可承载(Ⅲ级),2015 年评价结果为可承载(Ⅱ级)。水资源承载力随时间呈提升趋势,且提升趋势显著。规划水平年 2020 年、2030 年水资源承载力预测评价结果分别为可承载(Ⅱ级)和绝对可承载(Ⅰ级)。

关键词:水资源承载力;投影寻踪;风力驱动优化算法;文山州

中图分类号:TV213.4

文献标识码:A

文章编号:1003-9511(2016)06-0043-07

开展水资源承载力研究对于区域水资源的合理开发与优化配置,协调水资源与人口、经济和生态环境之间的关系,以及推进生态文明建设、落实严格的水资源管理制度均具有重要意义。水资源承载力是衡量区域水资源支撑经济社会可持续发展能力大小的重要指标之一,提出时间较早,但目前尚未形成系统、科学的理论体系^[1]。目前,主成分分析法^[2]、最小二乘法^[3]、模糊评价法^[4]、系统动力学法^[5]、可拓理论法^[6]、集对分析法^[7]、神经网络法^[8]等被广泛应用于水资源承载力的评价分析,虽然取得了一定的实际应用效果,但也存在主观随意性、信息丢失等问题。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,在克服维数祸根以及解决小样本、超高维等问题中具有明显优势^[9],已应用于水资源承载力评价中^[10-11],而合理选取 PP 模型最佳投影方向是提高 PP 模型评价或预测精度的关键因素。遗传算法(genetic algorithm, GA)及其改进算法^[12-13]、粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法^[14]等常用于 PP 模型最佳投影方向的优

化。然而,对于高维、非线性系统问题,GA 或改进 GA 算法、PSO 算法的不足之处在于其优化性能是否满足 PP 模型的精度要求,以及其获得的 PP 模型最佳投影方向 α 是否最优及稳定。近年来,群智能优化算法(swarm intelligence optimization algorithm, SIOA)因其具有概念简单、易于实现、无需梯度信息、避免局部最优解等特点在 PP 模型 α 的选取上得到广泛应用,并取得了较好的应用效果,如差分进化(differential evolution, DE)算法^[15]、混合蛙跳算法(shuffled frog leaping algorithm, SFLA)^[16]、蚁群优化(ant colony optimization, ACO)算法^[17]、群居蜘蛛优化(social spider optimization, SSO)算法^[9]和鸡群优化(chicken swarm optimization, CSO)算法^[18]等。风力驱动优化(wind driven optimization, WDO)算法是 Bayraktar 等^[19]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优化算法,在电磁、天线合成等领域得到应用。

本文采用6个典型30维测试函数对WDO算法进行仿真验证,并与布谷鸟搜索(cuckoo search, CS)算法、DE算法、SFLA、PSO算法、ACO算法、帝国竞争算法(imperialist competitive algorithm, ICA)和模拟退火(simulated annealing, SA)算法的仿真结果进行对比分析;选取水资源开发利用等10个指标构建水资源承载力评价指标体系和分级标准;利用WDO算法优化PP模型最佳投影方向 \mathbf{a} ,构建WDO-PP模型,计算云南省文山州2006—2015年水资源承载力,并对其变化趋势及文山州规划水平年2020年、2030年水资源承载力进行评价及预测分析。

1 水资源承载力评价指标体系和分级标准

目前,开展水资源承载力评价分析的相关研究众多,但由于影响区域水资源承载力的因素较多,目前尚未形成普遍认同的评价指标体系和分级标准。笔者充分考虑区域水资源特点及经济社会发展状况,遵行科学性、可操作性和可量化的原则,选取水资源开发利用 C_1 、降水量 C_2 、万元GDP用水量 C_3 、供水量模数 C_4 、人均水资源量 C_5 、农业用水比例 C_6 、河道外生态用水比例 C_7 、水功能区达标率 C_8 、污水处理率 C_9 、灌溉水利用系数 C_{10} 等10个指标构建文山州水资源承载力评价指标体系,并参考相关文献^[8,10,20]将水资源承载力分为绝对可承载(I级)、可承载(II级)、基本可承载(III级)和不可承载(IV级)4个等级,见表1。

2 WDO-PP 水资源承载力评价模型

2.1 投影寻踪模型

PP模型用于水资源承载力评价的简要算法如下^[9,15,18]。

a. 数据预处理。设样本评价指标集为 $\{x(i,j) \mid i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m\}$,为避免各评价指标归一化后出现0的情形,对于正向指标利用式(1)进行处理;负向指标取倒数乘以100后利用式(1)进行数据处理。

$$x(i,j) = 0.1 + 0.8 \frac{x(i,j) - x_{\min}(j)}{x_{\max}(j) - x_{\min}(j)} \quad (1)$$

式中: $x(i,j)$ 为评价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。

b. 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 $\mathbf{a} = \{a(1), a(2), \dots, a(m)\}$ 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: \mathbf{a} 为单位长度向量。

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

$$Q(\mathbf{a}) = S_z D_z \quad (3)$$

式中: S_z 为 $z(i)$ 的标准差^[9]; D_z 为 $z(i)$ 的局部密度^[18]。

c. 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:

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

d. 计算投影值。将 \mathbf{a} 代入式(2)得到 $z(i)$ 。

2.2 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,使用假设和简化的方式进行WDO算法推导^[19]。

a. 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:

$$\rho \boldsymbol{\vartheta} = \sum \mathbf{F}_i \quad (5)$$

式中: $\boldsymbol{\vartheta}$ 为加速度向量; ρ 为空气体积密度微元; \mathbf{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。

b. 式(5)中压力梯度(\mathbf{F}_{PC})、摩擦力(\mathbf{F}_F)、重力(\mathbf{F}_G)、向心力(\mathbf{F}_C)等4个主要因素将导致风在一定方向上移动或偏离其路径。可观测到的 \mathbf{F}_{PC} 、 \mathbf{F}_F 仅起相反的制约作用。 \mathbf{F}_F 的确切描述非常复杂,本文使用式(10)进行简化描述。 \mathbf{F}_G 被映射到 N 维空间中时,成为一个朝坐标系原点方向的吸引力。 \mathbf{F}_C

表1 水资源承载力评价指标体系及分级标准

影响程度	$C_1/\%$	C_2/mm	C_3/m^3	$C_4/(\text{万 m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	C_5/m^3	C_6	C_7	$C_8/\%$	$C_9/\%$	C_{10}
绝对可承载(I级)	≤ 10	≥ 1000	≤ 80	≥ 10	≥ 4000	≤ 0.3	≥ 0.1	≥ 95	≥ 90	≥ 0.7
可承载(II级)	10~20	800~1000	80~160	7.5~10	3000~4000	0.3~0.5	0.08~0.1	85~95	75~90	0.5~0.7
基本可承载(III级)	20~40	600~800	160~240	5~7.5	2000~3000	0.5~0.7	0.06~0.08	75~85	60~75	0.3~0.5
不可承载(IV级)	≥ 40	≤ 600	≥ 240	≤ 5	≤ 2000	≥ 0.7	≤ 0.06	≤ 75	≤ 60	≤ 0.3

注: C_1 、 C_3 和 C_6 为负向指标,指标越大,其水资源承载力越小;其余为正向指标,指标越大,其水资源承载力越大。

由地球自转引起,迫使风从一个方向向另一方向偏转。支配这 4 个因素的物理方程式为

$$\mathbf{F}_{\text{PG}} = -\nabla P \delta V \quad (7)$$

$$\mathbf{F}_{\text{C}} = -2\Omega \mathbf{u} \quad (8)$$

$$\mathbf{F}_{\text{G}} = \rho \delta V \mathbf{g} \quad (9)$$

$$\mathbf{F}_{\text{F}} = -\rho \alpha \mathbf{u} \quad (10)$$

式中: δV 为空气体积微元; ∇P 为压力梯度; Ω 表示地球自转; \mathbf{g} 为重力加速度; \mathbf{u} 为风的速度矢量; α 为常数。

c. 将式(7)~(10)相加,并在式(5)牛顿第二定律的右端插入,所得方程为

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

利用式(6),并规定时间步长 $\Delta t = 1$,通过简化式(11)可推导出速度更新方程:

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

式中: \mathbf{u}_{new} 为下一次迭代更新速度; \mathbf{u}_{old} 为当前迭代速度; \mathbf{x}_{old} 为空气包微元在搜索空间中的当前位置; \mathbf{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; c 为常数。

d. 通过式(13)更新空气包微元位置:

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

从式(12)等号右侧第一项可知,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;第二项为朝坐标系原点方向的吸引力;第三项为朝待优化问题的全局最佳位置移动的最大压力;最后一项为模拟向心力,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。

2.3 WDO-PP 水资源承载力计算实现步骤^[9,18-19]

a. 构建水资源承载力评价指标体系和分级标准,利用式(1)进行评价指标一致性处理。

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

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

c. 初始化算法参数。设置群体数 M 、最大迭代次数 L 、最大允许风速度 \mathbf{u} ,以及常数 R 、 α 和 c 。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 $\mathbf{x}_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 及速率 $\mathbf{u}_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 。

d. 基于水资源承载力评价样本及式(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位置 \mathbf{x}^* 。

e. 令 $t = t + 1$,利用式(12)、式(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 \mathbf{x}^* ,否则视前次空气包微元为当前 \mathbf{x}^* 。

f. 判断算法是否满足终止条件,若满足,则转到 g;否则,重复执行 e、f。

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

h. 将 \mathbf{a} 代入式(2)求得各评价样本最佳投影值 $z'(i)$, $z'(i)$ 即为各评价样本的水资源承载力大小。

i. 将水资源承载力评价分级标准阈值进行归一化处理,利用 \mathbf{a} 计算 4 个等级的水资源承载力分级标准 $z''(i)$ 。

j. 利用 $z''(i)$ 对各评价样本水资源承载力进行评价,并采用 Spearman 统计量 $|T|$ 与 Kendall 统计量 $|M|$ 对序列样本的 $z'(i)$ 进行变化趋势分析。

k. 利用 WDO-PP 水资源承载力模型预测及评价规划水平年 2020 年、2030 年区域水资源承载力水平。

3 试验仿真与结果分析

针对 WDO 算法寻优能力,采用 6 个典型测试函数(见表 2)进行仿真验证,求测试函数的极小值,并与 CS 算法、DE 算法、SFLA、PSO 算法、ACO 算法、ICA 和 SA 的寻优结果进行比较,见表 3 和图 1(为便于观察比较,图中将纵坐标取为以 10 为底的对数)。表 2 中, Sphere、Sumsquares、Schwefel 2.22 函数为单峰测试函数,用来测试算法的收敛速度和寻优精度; Griewank、Rastrigin、Ackley 函数为多峰测试函数,具有多个局部极值点,用来测试算法的避免早熟能力和全局寻优性能。试验参数设置如下: WDO 算法 $L = 1000$, $M = 50$, $u = 0.01$, $R = 0.1$, $\alpha = 0.4$, $g = 0.2$, $c = 0.4$ 。CS 算法 $L = 1000$, 鸟窝数量 $M = 25$, 发现概率 $p_a = 0.25$ 。DE 算法 $L = 1000$, $M = 50$, 上下限的尺度因子分别为 0.8、0.2,交叉率 $C_r = 0.2$ 。SLFA 算法 $L = 1000$, 青蛙群体规模 $M = 50$, 子群数 $K = 5$, 子群内青蛙个数 $U = 10$; 子群数局部进化次数 $L_1 = 10$ 。PSO 算法 $L = 1000$, $M = 50$, 惯性权重 $\omega_{\text{初始值}} = 1$, $\omega_{\text{衰减系数}} = 0.99$, 局部学习因子、全局学习因子

表 2 基准函数

函数	表达式	维数	取值范围	理论最优解
Sphere	$f(x) = \sum_{i=1}^N x_i^2$	30	$[-100, 100]$	minf=0
Sumsquares	$f(x) = \sum_{i=1}^N ix_i^2$	30	$[-100, 100]$	minf=0
Schwefel 2.22	$f(x) = \sum_{i=1}^N x_i + \prod_{i=1}^N x_i $	30	$[-10, 10]$	minf=0
Griewank	$f(x) = \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^N x_i^2 - \prod_{i=1}^N \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1$	30	$[-600, 600]$	minf=0
Rastrigin	$f(x) = \sum_{i=1}^N [x_i^2 - 10\cos(2\pi x_i) + 10]$	30	$[-5.12, 5.12]$	minf=0
Ackley	$f(x) = -20\exp\left(-0.2\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^N x_i^2}\right) - \exp\left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^N \cos 2\pi x_i\right) + 20 + e$	30	$[-32, 32]$	minf=0

表 3 函数优化对比结果

函数	算法	寻优平均值	标准差	函数	算法	寻优平均值	标准差
Sphere	DWO	0	0	Griewank	DWO	0	0
	CS	6.22×10^{-9}	5.05×10^{-9}		CS	5.13×10^{-8}	3.07×10^{-8}
	DE	3.41×10^{-12}	1.75×10^{-12}		DE	6.04×10^{-11}	2.43×10^{-11}
	SFLA	8.56×10^{-40}	1.73×10^{-39}		SFLA	2.75×10^{-39}	4.62×10^{-39}
	PSO	4.90×10^{-12}	1.06×10^{-11}		PSO	1.37×10^{-12}	2.56×10^{-12}
	ACO	1.30×10^2	3.92×10		ACO	2.1422	0.4148
	ICA	1.17×10^{-13}	1.74×10^{-13}		ICA	4.04×10^{-2}	3.98×10^{-2}
SA	1.25×10^{-14}	2.47×10^{-15}	SA	1.20×10^{-2}	8.25×10^{-3}		
Sumsquares	DWO	0	0	Rastrigin	DWO	0	0
	CS	1.03×10^{-3}	2.01×10^{-3}		CS	7.82×10^2	1.66×10
	DE	2.41×10^{-10}	5.05×10^{-10}		DE	6.09×10	7.8952
	SFLA	7.84×10^{-3}	9.36×10^{-3}		SFLA	6.96×10	2.04×10
	PSO	2.22×10^{-2}	1.82×10^{-2}		PSO	3.35×10	1.24×10
	ACO	1.81×10^3	5.99×10^2		ACO	2.66×10^2	1.42×10
	ICA	9.61×10^{-13}	1.29×10^{-12}		ICA	3.16×10	6.4326
SA	1.89×10^{-13}	1.92×10^{-14}	SA	4.29×10	7.1632		
Schwefel 2.22	DWO	0	0	Ackley	DWO	8.88×10^{-16}	1.97×10^{-31}
	CS	2.05×10^{-4}	1.30×10^{-4}		CS	2.56×10^{-3}	4.09×10^{-3}
	DE	3.48×10^{-8}	8.58×10^{-9}		DE	5.22×10^{-7}	9.85×10^{-8}
	SFLA	3.97×10^{-23}	7.54×10^{-23}		SFLA	0.3579	0.5544
	PSO	2.19×10^{-3}	4.76×10^{-3}		PSO	2.97×10^{-4}	7.20×10^{-4}
	ACO	4.83×10^4	9.05×10^4		ACO	5.1999	0.6954
	ICA	2.43×10^{-9}	2.68×10^{-9}		ICA	9.23×10^{-7}	1.51×10^{-6}
SA	4.88×10^{-8}	1.64×10^{-9}	SA	2.55×10^{-8}	1.92×10^{-9}		

$c_1 = c_2 = 2.0$, 个体速度限制为 $[-0.5, 0.5]$ 。ACO 算法 $L=1000, M=50$, 常量 $Q=1$, 最大信息挥发系数 $\psi_{\max}=0.4$, 最小信息挥发系数 $\psi_{\min}=0.1$, 最大信息量 $\tau_{\max}=1$, 最小信息量 $\tau_{\min}=0.1$ 。ICA 算法 $L=1000, M=50, N_{\text{imp}}=10$ (表示势力较大的前 10 个国家), 同化系数 $\beta=1.5$, 竞争系数 $\xi=0.1$ 。SA 算法 $L=1000, M=50$, 初始温度 $T_0=500$, 终止温度 $T_{\text{end}}=0.001$, 温度冷却系数 $q=0.99$ 。

8 种算法基于 Matlab 2010a 用 M 语言实现, 对表 2 中 6 个测试函数重复进行 20 次寻优计算, 并从平均值、标准差两个方面进行评估, 见表 3。其中, 寻优平均值反映的是算法在运行至最大迭代次数时可以达到的求解精度, 标准差反映算法的收敛稳定性。

a. 从表 3 寻优平均值来看, 对于单峰函数

Sphere、Sumsquares、Schwefel 2.22, WDO 算法寻优均获得了理论最优值, 寻优效果远优于 CS 算法、DE 算法、SFLA、PSO 算法、ACO 算法、ICA 和 SA, 表现出较好的寻优精度和收敛速度; 对于多峰函数 Griewank、Rastrigin, WDO 算法寻优同样获得了理论最优值, 寻优效果远优于 CS 算法、DE 算法、SFLA、PSO 算法、ACO 算法、ICA 和 SA, 表现出较好的避免早熟能力和全局极值搜索能力; 对于 Ackley 函数, WDO 算法寻优精度优于 CS 算法、DE 算法、SFLA、PSO 算法、ACO 算法、ICA 和 SA 7 个数量级以上, 具有跳出局部最优的良好性能。

b. WDO 算法对于 Sphere、Sumsquares、Schwefel 2.22、Griewank、Rastrigin 函数的寻优标准差均为 0, 远优于 CS 算法、DE 算法、SFLA、PSO 算法、ACO 算

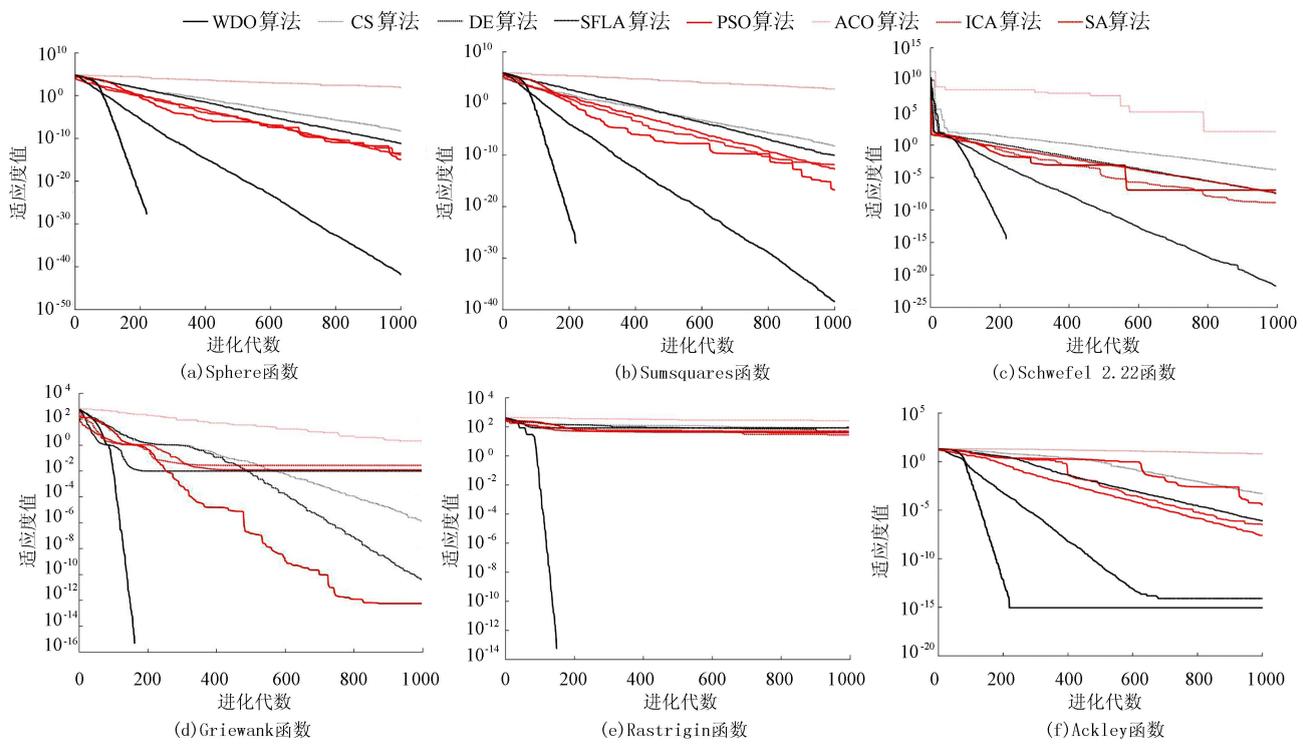


图1 测试寻优曲线

法、ICA 和 SA; Ackley 函数的寻优标准差为 1.97×10^{-31} , 优于其他算法 22 个数量级以上, 表现出较高的算法收敛稳定性。

c. 从收敛曲线对比图图 1 可以看出, WDO 算法寻优效果明显优于 CS 算法、DE 算法、SFLA、PSO 算法、ACO 算法、ICA 和 SA, 具有较好的收敛速度、收敛精度和极值寻优能力。尤其对 Sphere、Sumsquares、Schwefel 2.22、Griewank、Rastrigin 函数, 其迭代不足 250 次时便获得了理论最优值。

由此可见, 无论是单峰还是多峰测试函数, WDO 算法均具有较好的寻优精度、收敛速度、极值寻优能力、收敛稳定性以及收敛可靠性。

4 实例应用

4.1 数据来源

文山州位于云南省东南部, 东邻广西, 北接曲靖, 西与红河州毗邻, 南与越南接壤, 全州总面积 31456 km^2 , 分属珠江、红河两大流域, 多年平均降水量 1210 mm , 径流深 501 mm , 水资源总量 157.7 亿 m^3 , 占全省水资源总量的 7.1% , 属于相对丰水地区。但受季风气候影响, 区域降水量和径流量的年际变化大 (丰水期与枯水期水量相差 $2 \sim 4$ 倍), 年内降水高度集中 (汛期降水约占全年降水的 80%), 造成水旱灾害和水资源供需矛盾十分尖锐。2015 年, 文山州用水量 9.74 亿 m^3 , 所辖部分县市用水量已逼近控制总量上限值, 万元工业增加值用水量 $70.6 \text{ m}^3/\text{万元}$, 渠系

有效利用系数 0.522 , 水功能区达标率为 61.5% (全指标评价), “三条红线”考核形势不容乐观。加之近 10 年来, 随着文山州经济社会的快速发展、人口增加、城镇化进程加快, 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, 科学客观评价区域水资源承载力, 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水生态文明建设具有重要意义。

文山州 2006—2015 年水资源承载力评价指标数据来源于历年水资源公报。规划水平年 2020 年和 2030 年指标数据来源于最严格水资源管理考核目标及《文山州水资源保护规划》等, 其中 2020 年和 2030 年降水量采用多年平均降水量 1210 mm , 见表 4。

4.2 水资源承载力模型求解及评价结果

a. 模型求解。根据 WDO-PP 模型水资源承载力计算实现步骤, 基于表 4, 采用式 (1) 归一化后的 2006—2015 年评价指标数据构造投影指标函数, 利用 WDO 算法求解 PP 模型最佳投影方向 (WDO 算法搜索空间设置为 $[-1, 1]$, 其余参数设置同上)。将 WDO-PP 模型连续运行 5 次, 进化过程见图 2, 计算得到各评价指标 5 次最佳投影方向均为 $\mathbf{a} = (0.3961 \quad 0.2643 \quad 0.3827 \quad 0.3991 \quad 0.0796 \quad 0.1267 \quad 0.3256 \quad 0.0557 \quad 0.4476 \quad 0.3688)$, 5 次最佳适应度值均为 0.0023895866 。将此最佳投影方向代入式 (2), 得到 2006—2015 年 $z'(i)$, 见表 5。

表4 文山州水资源承载力评价指标数据

年份	$C_1/\%$	C_2/mm	C_3/m^3	$C_4/(\text{万 m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	C_5/m^3	C_6	C_7	$C_8/\%$	$C_9/\%$	C_{10}
2006	3.92	1021.6	480.0	1.96	4172	0.880	0.004	66.0	33	0.44
2007	4.31	1079.5	326.0	2.16	4214	0.790	0.006	72.3	35	0.45
2008	4.39	1386.8	283.0	2.20	5303	0.610	0.005	58.3	37	0.46
2009	4.32	812.9	259.0	2.17	3222	0.680	0.003	63.6	40	0.44
2010	4.17	933.0	203.0	2.09	3540	0.720	0.005	63.6	39	0.42
2011	4.66	860.1	183.0	2.34	3136	0.730	0.006	63.6	47	0.46
2012	4.72	1123.7	156.0	2.37	3755	0.725	0.007	72.7	65	0.48
2013	5.53	1166.5	158.0	2.77	3413	0.721	0.007	76.9	80	0.50
2014	5.79	1251.6	148.0	2.90	4127	0.712	0.008	65.4	85	0.51
2015	6.18	1363.3	147.5	3.09	4663	0.703	0.010	61.5	88	0.52
2020	8.10	1210	80	4.77	4380	0.600	0.080	80	90	0.55
2030	8.48	1210	60	6.36	4150	0.500	0.100	90	95	0.70

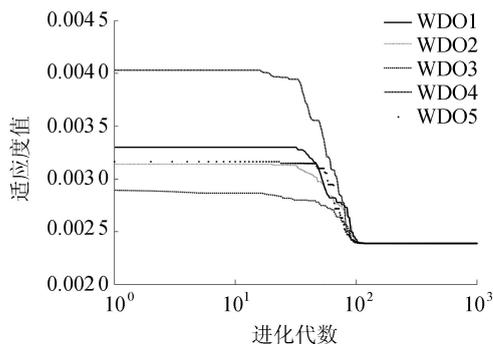


图2 WDO-PP 5次进化过程

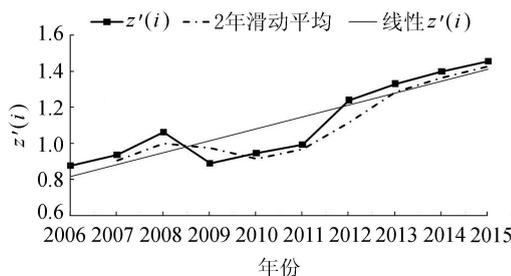


图3 投影值变化趋势及2年滑动平均过程

b. 确定水资源承载力评价标准。将表1中水资源承载力评价分级标准阈值作归一化处理,利用最佳投影方向计算得到4个等级的 $z''(i)$ 分别为:绝对可承载(Ⅰ级) $z''(i) \geq 2.2243$,可承载(Ⅱ级) $1.4352 < z''(i) < 2.2243$,基本可承载(Ⅲ级) $0.8233 < z''(i) < 1.4352$,不可承载(Ⅳ级) $z''(i) \leq 0.8233$ 。

c. 规划水平年水资源承载力预测。基于表4,利用WDO-PP模型预测并评价2020年、2030年区域水资源承载力水平,见表5。

表5 文山州水资源承载力评价结果

年份	$z'(i)$	评价等级
2006	0.8773	基本可承载(Ⅲ级)
2007	0.9374	基本可承载(Ⅲ级)
2008	1.0633	基本可承载(Ⅲ级)
2009	0.8891	基本可承载(Ⅲ级)
2010	0.9462	基本可承载(Ⅲ级)
2011	0.9932	基本可承载(Ⅲ级)
2012	1.2403	基本可承载(Ⅲ级)
2013	1.3318	基本可承载(Ⅲ级)
2014	1.4003	基本可承载(Ⅲ级)
2015	1.4607	可承载(Ⅱ级)
2020	1.8519	可承载(Ⅱ级)
2030	2.2495	绝对可承载(Ⅰ级)

d. 绘制2006—2015年水资源承载力综合投影值 $z'(i)$ 变化趋势及2年滑动平均过程,见图3。

4.3 评价结果分析

a. 从最佳投影方向的优化结果来看,污水处理

率投影分量最大,为0.4476,其对水资源承载力评价的影响也最大;其次为供水量模数、水资源开发利用率、万元GDP用水量、灌溉水利用系数、河道外生态用水比例和降水量,其投影分量在0.2643~0.3991之间;其余指标投影分量在0.0557~0.1267之间,对水资源承载力评价的影响相对较小。

b. 从表5来看,文山州2006—2014年水资源承载力评价结果均为基本可承载(Ⅲ级),2015年评价结果为可承载(Ⅱ级),但在万元GDP用水量、供水量模数、农业用水比例、河道外生态用水比例和水功能区达标率方面表现较差,通过建设节水型社会、实行最严格水资源管理、加大农业节水改造力度和开展生态文明城市建设等措施,水资源承载力还有进一步改进和提升的空间。

c. 从表5及图3来看,2009—2011年水资源承载力较2007年、2008年不升反降,主要是由于2009—2011年文山州连续3年干旱,不但对降水量指标造成影响,而且对人均水资源量、供水量模数等指标造成了间接影响,制约了水资源承载力的进一步提升。

d. 文山州规划水平年2020年、2030年水资源承载力预测评价结果分别为可承载(Ⅱ级)和绝对可承载(Ⅰ级),即水资源承载力值从2015年的1.4607提升到2020年的1.8519,从2020年的1.8519提升到2030年的2.2495,2030年的水资源承载力刚好超过绝对可承载(Ⅰ级)的临界值2.2243,表

明通过建设节水型社会建设等措施可以进一步提升水资源承载力水平。但由于受区域用水总量控制、水资源总量相对丰富、农业节水改造力度不大等客观因素的影响和制约,水资源承载力提升空间有限。

e. 从图 2 可以看出,WDO 算法连续 5 次运行均迭代至 100 次就收敛到了全局最优解 2.3896×10^{-3} ,且 5 次连续运行优化结果完全一致,再次验证了 WDO 算法具有较好的收敛速度、全局寻优能力和稳健性能。

f. 采用 Spearman 统计量 $|T|$ 与 Kendall 统计量 $|M|$ 对 2006—2015 年 $z'(i)$ 变化趋势进行分析。经计算,综合 $z'(i)$ 的 Spearman 统计量 $|T|$ 与 Kendall 统计量 $|M|$ 分别为 3.32、5.14,均大于置信水平为 0.05 时的相应临界值 2.01 和 1.96,表明文山州水资源承载力随时间呈提升趋势,且提升趋势显著。

5 结 论

a. 通过 6 个典型高维测试函数对 WDO 算法进行仿真验证,并与 CS 算法、DE 算法、SFLA、PSO 算法、ACO 算法、ICA 和 SA 的仿真结果进行比较,验证了 WDO 算法对于单峰或多峰测试函数均具有较好的寻优精度、收敛速度、极值寻优能力、收敛稳定性以及收敛可靠性。

b. 基于科学性、可操作性和可量化的原则,选取水资源开发利用等 10 个指标构建文山州水资源承载力综合评价指标体系及分级标准,对区域水资源承载力评价分析具有一定的参考意义。

c. 利用 WDO 算法搜寻 PP 模型最佳投影方向,可获得精度高、稳定性好且唯一的最佳投影方向值,避免了寻优搜索过程陷入局部极小值,提高了 PP 模型水资源承载力的评价精度,为解决 PP 模型最佳投影方向提供了一种新的途径和方法。

d. 从实例评价结果来看,文山州 2006—2014 年水资源承载力评价结果均为基本可承载(Ⅲ级),2015 年评价结果为可承载(Ⅱ级),但在万元 GDP 用水量、供水量模数等五方面表现较差,通过建设节水型社会、实行最严格水资源管理、加大农业节水改造力度和开展生态文明城市建设等措施,水资源承载力还有进一步改进和提升的空间,但由于受区域用水总量控制、水资源总量相对丰富、农业节水改造力度不大等客观因素的影响和制约,水资源承载力提升空间有限。

e. 从文山州近 10 年水资源承载力计算结果来看,文山州水资源承载力随时间呈提升趋势,且提升趋势显著。

参考文献:

- [1] 任黎,杨金艳,相欣奕. 江苏沿海地区水资源承载力研究:以盐城市为例[J]. 水利经济,2015,33(5):1-3.
- [2] 童纪新,顾希. 基于主成分分析的南京市水资源承载力研究[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(1):122-125.
- [3] 李林,付强. 偏最小二乘回归模型的城市水资源承载力研究[J]. 水科学进展,2006,16(6):822-825.
- [4] 周念清,杨硕,朱勃. 承载指数与模糊识别评价许昌市水资源承载力[J]. 水资源保护,2014,30(6):31-34.
- [5] 杨巧宁,孙希华,张婧,等. 济南市水资源承载力系统动力学模拟研究[J]. 水利经济,2010,28(2):16-20.
- [6] 吴永斌. 基于可拓理论的区域水资源承载力评价[J]. 水资源与水工程学报,2012,23(5):162-165.
- [7] 何慧爽. 基于集对分析的中原经济区水资源承载力评价[J]. 人民黄河,2014,36(6):75-77.
- [8] 崔东文. 基于 BP 神经网络的水山州水资源承载能力评价分析[J]. 长江科学院院报,2012,29(5):9-15.
- [9] 崔东文,郭荣. SSO-PP 模型在水源地安全保障达标评价中的应用[J]. 水利经济,2015,33(5):8-13.
- [10] 彭忠福,马学明,刘雁翼. 江西省水资源承载力评价研究[J]. 人民长江,2011,42(18):75-77.
- [11] 王淑娟. 基于投影寻踪模型和加速遗传算法的石羊河流域水资源承载力综合评价[J]. 地下水,2009,31(6):82-84.
- [12] 陈曜,丁晶,赵永. 基于投影寻踪原理的四川省洪灾评估[J]. 水利学报,2010,41(2):220-225.
- [13] 王柏,张忠学,李芳花,等. 基于改进双链量子遗传算法的投影寻踪调亏灌溉综合评价[J]. 农业工程学报,2012,28(2):84-89.
- [14] 陈广洲,汪家权,解华明. 粒子群算法在投影寻踪模型优化求解中的应用[J]. 计算机仿真,2008,25(8):159-161,165.
- [15] 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.
- [16] 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,(9):31-35.
- [17] 侯景伟,孔云峰,孙九林. 蚁群算法在需水预测模型参数优化中的应用[J]. 计算机应用,2012,32(10):2952-2956.
- [18] 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.
- [19] BAYRAKTAR Z, KOMURCU M, BOSSARD J A, et al. The wind driven optimization technique and its application in electromagnetics[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2013,61(5):2745-2755.
- [20] 崔东文,郭荣. 岩溶地区生态环境脆弱性与水资源承载力评价方法研究:以云南省西畴县为例[J]. 水资源与水工程学报,23(3):124-130.

(收稿日期:2016-04-13 编辑:胡新宇)