

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2017.02.006

文山州近10年水资源利用效率评价 SLC-PP 模型及应用

崔东文

(云南省文山州水务局,云南 文山 663099)

摘要: 为科学、客观地评价区域水资源利用效率,提出足球联赛竞争(SLC)-投影寻踪(PP)水资源利用效率评价模型,以文山州2006—2015年水资源利用效率评价为例进行实例分析。通过6个典型高维测试函数对SLC算法进行验证,并将仿真结果与教学优化(TLBO)算法、灰狼优化(GWO)算法、差分进化(DE)算法、混合蛙跳算法(SFLA)、粒子群优化(PSO)算法和帝国竞争算法(ICA)的寻优结果进行比较。从综合、工业、农业、生活和生态环境用水5个方面选取23个指标构建水资源利用效率评价指标体系,应用SLC-PP模型,并基于投影系列均值 $\bar{z}$ 及标准差 σ 构造低水平、较低水平、中等水平、较高水平和高水平5个等级的水资源利用效率评价标准对实例进行评价,并分析近10年的水资源利用效率变化趋势。结果表明:(a)无论是单峰还是多峰函数,SLC算法寻优精度优于TLBO和GWO算法,远优于DE、SFLA、PSO和ICA算法,具有寻优精度高、收敛速度快、极值寻优能力强以及收敛稳定性与可靠性好等特点。(b)SLC-PP模型对实例水资源利用效率评价结果均为:2006—2007年处于低水平,2008—2012年处于中等水平,2013—2015年处于较高水平,水资源利用效率随时间呈提升趋势,且提升趋势显著。

关键词: 水资源利用效率;评价指标体系;投影寻踪;足球联赛竞争算法;文山州

中图分类号:TV213.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2017)02-0129-08

SLC-PP model and its application to evaluation of water use efficiency in Wenshan Prefecture in last ten years

CUI Dongwen

(Wenshan Water Conservancy Bureau of Yunnan Province, Wenshan 663099, China)

Abstract: For the scientific and objective evaluation of regional water use efficiency, a projection pursuit (PP) model based on the soccer league competition (SLC) algorithm was established. The evaluation of water use efficiency in Wenshan Prefecture during the period from 2006 to 2015 was used as an example. The SLC algorithm was validated using six typical high-dimensional functions, and the simulation results were compared with the optimization results of the teaching-learning-based optimization (TLBO) algorithm, gray wolf optimization (GWO) algorithm, differential evolution (DE) algorithm, shuffled frog-leaping algorithm (SFLA), particle swarm optimization (PSO) algorithm, and imperial competitive algorithm (ICA). From five types of water use, including comprehensive water use, industrial water use, agricultural water use, domestic water use, and ecological environmental water use, 23 indices were selected to build an index system for the evaluation of water use efficiency. A water use efficiency evaluation standard with five grades (low level, relatively low level, medium level, relatively high level, and high level) were constructed based on the mean and standard deviation values of the projection series. Based on this standard, the SLC-PP model was used to analyze the trend of water use efficiency in the study area over the past ten years. The results showed the following: First, whether for the optimization of unimodal or multimodal functions, the SLC algorithm performs better than the TLBO and GWO

收稿日期: 2016-05-04

作者简介: 崔东文(1978—),男,云南玉溪人,教授级高级工程师,主要从事水资源管理及智能算法在水文水资源系统中的应用研究。E-mail:cdwgr@163.com

algorithms, and much better than the DE, SFLA, PSO, and ICA algorithms. The SLC algorithm has the advantages of high optimization accuracy, fast convergence, high capability in seeking extreme values, excellent stability, and high reliability. Second, the evaluation results of water use efficiency in the study area using the SLC-PP model show that the water use efficiency grades were at a low level in the period from 2006 to 2007, a medium level from 2008 to 2012, and a relatively high level from 2013 to 2015. The water use efficiency shows a significant increasing trend over time.

Key words: water use efficiency; evaluation index system; projection pursuit; soccer league competition algorithm; Wenshan Prefecture

水资源利用效率是研究在水资源供给有限,工业、农业、生活与生态环境需水日益高涨的状态下,如何使单位水资源在经济、社会、生态环境等方面利用效率最大化的问题,有利促进水资源的高效利用和永续利用^[1]。水资源利用效率问题一直是水资源管理领域的研究热点和难点,开展水资源利用效率评价研究对于建立节水型社会、优化配置水资源、实行最严格水资源管理制度等具有重要意义。目前,国内关于水资源利用效率综合评价的研究不多^[2],其研究多偏向于农业^[3-4]、工业^[5-6]或生态^[7-8]等的单项评价;主要评价方法有常规趋势法、模糊评价法、主成分分析法、人工神经网络法、数据包络分析法^[1-9]等,虽然取得一定的实际应用效果,但存在评价指标多是单项指标或指标较少,以及采用主成分分析等方法降维造成的指标信息量丢失两方面的不足^[2]。

投影寻踪(projection pursuit, PP)是利用投影技术将高维数据投影到低维空间,并在低维空间进行数据分析的统计方法,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,并在水资源利用效率评价中得到应用^[10-11]。在实际应用中,PP模型最佳投影方向的选取对其评价或预测精度的提高至关重要。目前,遗传算法及其改进算法(genetic algorithm, GA)^[12-13]、粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法^[14]、差分进化(differential evolution, DE)算法^[15]、混合蛙跳算法(shuffled frog leaping algorithm, SFLA)^[16]等常用于PP模型最佳投影方向的优化,虽然取得了一定的应用效果,然而对于超过20维的高维、非线性系统问题,上述算法的优化性能能否满足PP模型的精度要求,其获得的PP模型最佳投影方向向量是否最优及稳定均缺乏对比验证。

近年来,群智能优化算法(swarm intelligence optimization algorithm, SIOA)由于具有概念简单、易于实现、无需梯度信息、避免局部最优解等特点在PP模型最佳投影方向的选取上得到广泛应用,并取得较好的应用效果。足球联赛竞争(soccer league competition, SLC)算法是Moosavian等^[17-19]受足球联赛球队和球员间竞争启发而提出的一种新型群智能优化算法,该算法将球员(种群个体)分为固定球员和替补球员,并由此组成若干球队,球队之间、球员之间相互竞争,并采取积分排名方式将球队排名最前的球员位置作为待优化问题的最优解。该算法已在求解非线性方程组^[17]、供水管网系统优化^[18]、解决背包问题^[19]等方面得到应用。

笔者结合PP技术及SLC算法良好的寻优性能,建立了SLC-PP模型,并以文山州2006—2015年水资源利用效率评价为例,对模型的可行性和通用性进行评价。

1 SLC 算法仿真验证

SLC算法遵循的4个准则和原理见文献[17-19]。为客观评估SLC算法的寻优能力,选取6个典型测试函数(Sphere函数、Sumsquares函数、Schwefel 2.22函数、Griewank函数、Rastrigin函数、Ackley函数)进行仿真验证,将仿真结果与教学优化(teaching-learning-based optimization, TLBO)算法、灰狼优化(gray wolf optimization, GWO)算法、帝国竞争(imperialist competitive algorithm, ICA)算法,以及DE、SFLA、PSO等进行对比分析,结果见表1。

Sphere函数、Sumsquares函数、Schwefel 2.22函数、Griewank函数、Rastrigin函数、Ackley函数的待优化变量取值范围分别为 $[-100, 100]$ 、 $[-100, 100]$ 、 $[-10, 10]$ 、 $[-600, 600]$ 、 $[-5.12, 5.12]$ 、 $[-32, 32]$,维数均为30,理论最优解均为 $\min f = 0$ 。6个函数中,Sphere函数、Sumsquares函数、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。

表 1 函数优化对比结果

Table 1 Comparison results of function optimization

函数	算法	平均值	标准差	函数	算法	平均值	标准差
Sphere	SLC	0	0	Griewank	SLC	0	0
	TLBO	2.41×10^{-85}	1.72×10^{-85}		TLBO	0	0
	GWO	1.20×10^{-41}	1.61×10^{-41}		GWO	2.01×10^{-3}	4.36×10^{-3}
	DE	6.88×10^{-4}	1.76×10^{-4}		DE	7.41×10^{-3}	3.56×10^{-3}
	SFLA	1.57×10^{-18}	2.19×10^{-18}		SFLA	1.11×10^{-2}	1.14×10^{-2}
	PSO	7.48×10^{-11}	1.62×10^{-10}		PSO	2.28×10^{-2}	2.10×10^{-2}
	ICA	1.35×10^{-7}	1.86×10^{-7}		ICA	2.94×10^{-2}	3.28×10^{-2}
Sumsquares	SLC	0	0	Rastrigin	SLC	0	0
	TLBO	4.33×10^{-84}	3.06×10^{-84}		TLBO	1.68×10^{-5}	3.71×10^{-5}
	GWO	1.74×10^{-11}	3.95×10^{-11}		GWO	8.98×10^{-1}	1.9300
	DE	7.69×10^{-3}	1.51×10^{-3}		DE	83.2	7.1487
	SFLA	1.07×10^{-17}	1.41×10^{-17}		SFLA	70.3	26.3
	PSO	8.17×10^{-11}	1.33×10^{-10}		PSO	20.6	5.5087
	ICA	1.94×10^{-6}	2.44×10^{-6}		ICA	35.5	9.1973
Schwefel 2.22	SLC	0	0	Ackley	SLC	8.88×10^{-16}	1.97×10^{-31}
	TLBO	1.36×10^{-42}	4.69×10^{-43}		TLBO	4.76×10^{-15}	7.88×10^{-16}
	GWO	1.56×10^{-24}	1.19×10^{-24}		GWO	2.48×10^{-14}	4.30×10^{-15}
	DE	2.77×10^{-3}	4.36×10^{-4}		DE	7.09×10^{-3}	1.04×10^{-3}
	SFLA	2.63×10^{-11}	2.44×10^{-11}		SFLA	4.62×10^{-1}	6.58×10^{-1}
	PSO	5.07×10^{-8}	1.18×10^{-7}		PSO	9.35×10^{-6}	1.65×10^{-5}
	ICA	7.22×10^{-7}	5.59×10^{-7}		ICA	8.08×10^{-5}	7.30×10^{-5}

为客观比较 7 种算法的优化性能,设置各算法的最大迭代次数 T 和群体数目 M 均相同($T = 500$ 、 $M = 110$)。其他参数设置如下:SLC 算法联赛球队数 $N = 5$,固定球员 F 和替补球员 S 均为 11,变异概率为 0.15。TLBO 算法的 T_f 为 1 ~ 10 之间随机整数。DE 算法上下限的尺度因子分别为 0.8、0.2,交叉率 $C_R = 0.2$ 。SLFA 算法子群数 $M_1 = 5$,子群内青蛙个数 $M_2 = 22$;子群数局部进化次数 $T_1 = 10$ 。PSO 算法中惯性因子取 0.729,衰减系数取 0.99,局部学习因子 c_1 和全局学习因子 c_2 均取 2.0,个体速度限制为 $[-0.5,0.5]$ 。ICA 算法 $N_{\text{imp}} = 10$,同化系数 $\beta = 1.5$,比重系数 $\xi = 0.1$ 。

7 种算法基于 Matlab 2010a 用 M 语言实现,对 6 个测试函数重复 20 次寻优计算,并从平均值、标准差两方面进行评估(表 1)。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. 由表 1 寻优平均值可知,对于单峰函数 Sphere、Sumsquares、Schwefel 2.22,SLC 算法寻优均获得了理论最优值,寻优精度优于 TLBO 和 GWO 算法,远优于 DE、SFLA、PSO 和 ICA 算法,具有相当高的寻优精度和较快的收敛速度;对于多峰函数 Griewank,SLC 算法与 TLBO 算法均获得理论最优值,寻优精度远优于 GWO、DE、SFLA、PSO 和 ICA 算法;对于存在多个局部极值点的复杂多峰函数 Rastrigin,SLC 算法寻优同样获得理论最优值,精度远远优于 TLBO、GWO、DE、SFLA、PSO 和 ICA 算法,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,SLC 算法寻优精度同样优于 TLBO 和 GWO 算法,精度优于 DE、SFLA、PSO 和 ICA 算法 10 个数量级以上,具有跳出局部最优的良好性能。

b. SLC 算法对于 Sphere、Sumsquares、Schwefel 2.22、Griewank、Rastrigin 函数的寻优标准差均为 0(除 TLBO 算法对 Griewank 函数寻优标准差为 0 外),效果优于 TLBO 和 GWO 算法,远优于 DE、SFLA、PSO 和 ICA 算法;对于 Ackley 函数的寻优标准差为 1.97×10^{-31} ,优于其他算法 15 个数量级以上,表现出较高的算法收敛稳定性。

c. 除 SLC 算法外,TLBO 和 GWO 算法寻优性能要优于 DE、SFLA、PSO 和 ICA 算法,表明 TLBO 和 GWO 这 2 种新型群智能优化算法同样具有较好的全局寻优性能。

综上,无论是单峰还是多峰函数,SLC 算法均具有较好的寻优精度、收敛速度、极值寻优能力和收敛稳定性、收敛可靠性。

2 水资源利用效率指标体系

目前,国内关于水资源利用效率综合评价指标体系的研究,或是指标较少^[9-10],或是采用主成分分析等方法^[1,20-21]降维造成信息量丢失,均或多或少存在不足,尚未形成统一的或普遍认同的指标体系。由于区域水资源利用效率具有经济效益、社会效益、生态环境效益,水资源利用效率涉及人-经济社会-生态环境系统,相应的指标体系也是一个复杂系统,应由不同层次、不同要素组成^[1]。基于此,笔者参考文献[1,20-21],充分考虑文山州区域水资源特点及经济社会发展状况,遵循科学性、可操作性和可量化原则,从水资源综合用水效率、工业用水效率、农业用水效率、生活用水效率及生态环境用水效率 5 个方面选取万元 GDP 用水量、用水弹性系数、人均水资源量等 23 个效率指标构建区域水资源利用效率评价指标体系(表 2)。

表 2 水资源利用效率评价指标体系
Table 2 Evaluation index system of water use efficiency

目标	子集	指 标	表 征
水 资 源 利 用 效 率 评 价	水资源 综合利用 效率指标	万元 GDP 用水量 C_1	负向指标,表征产生同样的 GDP 所用的水量越小,水资源利用效率越高
		用水弹性系数 C_2	
		人均水资源量 C_3	负向指标,表征一个地区在统计期内用水总量的增长率与 GDP 增长率的比值越小,水资源利用效率越高
		人均综合用水量 C_4	正向指标,表征一个地区在统计期内水资源开发利用的合理性
		水资源开发利用率 C_5	正向指标,表征一个地区在统计期内水资源使用程度
		供水量模数 C_6	负向指标,表征一个地区在统计期内水资源开发利用的相对程度
	工业用水 效率指标		正向指标,表征一个地区在统计期内单位面积上的供水能力
		万元工业增加值用水量 C_7	负向指标,表征产生同样的工业增加值所用的水量越小,水资源利用效率越高
		工业用水比例 C_8	
		工业用水重复利用率 C_9	正向指标,表征在统计期内工业用水重复利用率越大,水资源利用效率越高
	农业用水 效率指标	农业用水比例 C_{10}	负向指标,表征在统计期内农业用水量所占比重越小,水资源利用效率越高
		灌溉水利用系数 C_{11}	正向指标,表征在统计期内灌溉水利用系数越大,水资源利用效率越高
		万元农业增加值用水量 C_{12}	负向指标,表征产生同样的农业增加值所用的水量越小,水资源利用效率越高
		每公顷平均灌溉用水量 C_{13}	负向指标,表征一个地区在统计期内的农业用水水平
		有效灌溉率 C_{14}	正向指标,表征一个地区在统计期内的农业节水水平
	生活用水 效率指标	人均生活用水量 C_{15}	正向指标,表征一个地区在统计期内人们正常生活的用水水平
		城镇人均生活用水量 C_{16}	正向指标,表征一个地区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_{17}	正向指标,表征一个地区在统计期内农村人口生活的用水水平
		居民生活用水比例 C_{18}	正向指标,表征一个地区在统计期内居民生活用水保证程度
	生态环境 用水效率 指标	生态环境用水比例 C_{19}	正向指标,表征一个地区在统计期内生态环境用水保证程度
		水功能区达标率 C_{20}	正向指标,表征一个地区达到水污染治理或水资源保护目标的程度
		城市污水处理率 C_{21}	正向指标,表征一个地区在统计期内城市污水处理水平
		人均 COD 环境容量 C_{22}	正向指标,表征一个地区在统计期 COD 环境容量水平大小
		人均 $\text{NH}_3\text{-N}$ 环境容量 C_{23}	正向指标,表征一个地区在统计期 $\text{NH}_3\text{-N}$ 环境容量水平大小

3 SLC-PP 水资源利用效率评价模型

3.1 投影寻踪模型

PP 模型用于水资源利用效率评价的简要算法如下^[22-23]:

- a. 数据预处理。
- b. 构造投影指标函数。PP 模型是将 m 维数据 $\{x_{i,j} \mid j = 1, 2, \cdots, m\}$ 综合成以单位长度向量 $\vec{a} = \{a_1, a_2, \cdots, a_m\}$ 为投影方向的一维投影值 z_i :

$$z_i = \sum_{j=1}^m a_j x_{ij}$$

(1)

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

$$Q(a) = S_z D_z$$

(2)

式中： S_z —— z_i 的标准差； D_z —— z_i 的局部密度。 S_z 、 D_z 表达式见文献[18-19]。

c. 转化投影指标函数。将搜寻最优投影方向问题转化为非线性最优求解问题：

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

(3)

d. 计算投影值。将最佳投影方向 $\bar{a}$ 代入式(1)得到投影值 z_i 。

3.2 SLC-PP 水资源利用效率评价实现步骤

SLC-PP 水资源利用效率评价步骤可归纳如下^[17-19, 22-23]：(a) 构建水资源利用效率评价指标体系, 并进行指标一致性处理。(b) 确定目标函数。(c) 初始化算法参数。(d) 生成球(种群)。(e) 适应度函数值计算。(f) 开始联赛。进行模仿、挑畔、变异和替补操作。(g) 降级和提升。(h) 检查停止准则。重复步骤 e ~ g 直至满足终止准则。(i) 输出超级明星球(S_s)个体适应度值及所处空间位置, 即最佳投影方向 $\bar{a}$, 算法结束。(j) 将最佳投影方向 $\bar{a}$ 代入式(1)求得各评价样本最佳投影值 z_i ; 并利用该投影系列均值 $\bar{z}$ 及标准差 σ 构造水资源利用效率评价分级标准, 即水资源利用效率低水平 $\in (0, \bar{z} - 2\sigma]$ 、较低水平 $\in (\bar{z} - 2\sigma, \bar{z} - \sigma]$ 、中等水平 $\in (\bar{z} - \sigma, \bar{z} + \sigma]$ 、较高水平 $\in (\bar{z} + \sigma, \bar{z} + 2\sigma]$ 、高水平 $\in (\bar{z} + 2\sigma, \infty)$ 。(k) 利用所构造的水资源利用效率评价分级标准对各评价样本水资源利用效率进行评价分析, 并采用 Spearman 统计量与 Kendall 统计量对序列样本的水资源利用效率进行变化趋势分析。

4 实例应用

4.1 基本概况

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 31 456 km², 分属珠江、红河两大流域, 多年平均降水量 1 210 mm, 径流深 501 mm, 水资源总量 157.7 亿 m³, 占全省水资源总量的 7.1%, 属相对丰水地区。2006—2015 年文山州稳步推进节水型社会建设, 通过建立健全节水制度体系, 编制节水规划, 实施工业、农业和生活节水, 加强节水试点建设和宣传教育等措施, 水资源利用效率较 2006 年得到了较大提升。但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, 进一步提高水资源利用效率对支撑区域经济社会可持续发展的要求越来越迫切。因此, 科学客观地评价区域水资源利用效率, 对于推进节水型社会建设、实行最严格水资源管理制度、实现水资源永续利用支撑经济社会的可持续发展具有重要意义。文山州 2006—2015 年水资源利用效率评价指标数据来源于历年水资源公报、文山州统计年鉴及相关规划等, 见表 3。

4.2 水资源利用效率模型求解及评价结果

a. 模型求解。根据 SLC-PP 水资源利用效率评价模型实现步骤, 基于表 4, 采用归一化后的 2006—2015 年指标数据构造投影目标函数, 并利用 SLC 算法求解 PP 模型最佳投影方向 (SLC 算法搜索空间设置为 $[-1, 1]$, 最大迭代次数设置为 100, 其余参数设置均同上)。将 SLC-PP 模型连续运行 20 次 (前 5 次进化过程见图 1), 计算得到各评价指标 20 次最佳投影方向均为 $\bar{a} = (0.2524, -0.1295, 0.0207, 0.2580, -0.2472, 0.2484, 0.2464, 0.1882, 0.2529, 0.0734, 0.2134, 0.2262, 0.1132, 0.2825, 0.1828, 0.2156, 0.1755, -0.0446, 0.1957, 0.0875, 0.2917, -0.2562, -0.2561)$; 20 次最佳适应度值均为 0.000 697 313 038 331 011。将此 $\bar{a}$ 代入式(1), 得到 2006—2015 年综合投影值 z_i ; 利用 2006—2015 年综合投影值 z_i 计算得到水资源利用效率投影系列均值 $\bar{z}$ 、标准差 σ 分别为 1.239 0、0.757 7。由 $\bar{z}$ 和 σ 构造 5 个等级的水资源利用效率评价分级标准分别为: 低水平 $\in (-\infty, -0.2764]$ 、较低水平 $\in (-0.2764, 0.4813]$ 、中等水平 $\in (0.4813, 1.9967]$ 、较高水平 $\in (1.9967, 2.7544]$ 和高水平 $\in (2.7544, \infty)$ 。

b. 评价结果。利用上述水资源利用效率评价分级标准对文山州 2006—2015 年水资源利用效率进行评价, 结果见表 4。

c. 绘制 2006—2015 年水资源利用效率综合投影值 z_i 变化趋势及 2 a 滑动平均过程见图 2。

表3 文山州水资源利用效率评价指标数据

Table 3 Evaluation indices of water use efficiency in Wenshan Prefecture

年份	C_1/m^3	C_2	C_3/m^3	C_4/m^3	C_5	$C_6/(\text{万 m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	C_7/m^3	$C_8/\%$	$C_9/\%$	$C_{10}/\%$	C_{11}	C_{12}/m^3
2006	480.0	0.160 8	4 172	187	3.92	1.96	169.0	9.87	55.0	88.0	0.44	978.4
2007	326.0	0.107 1	4 214	198	4.31	2.16	147.0	9.27	60.0	79.0	0.45	893.4
2008	283.0	0.211 9	5 303	202	4.39	2.20	120.0	9.82	65.0	61.0	0.46	655.8
2009	259.0	0.149 9	3 222	201	4.32	2.17	102.0	9.69	68.0	68.0	0.44	641.6
2010	203.0	0.490 3	3 540	187	4.17	2.09	91.0	12.47	74.0	72.0	0.42	561.7
2011	183.0	0.073 2	3 136	207	4.66	2.34	76.1	11.70	76.0	73.0	0.44	587.8
2012	156.0	1.088 0	3 755	211	4.72	2.37	75.6	12.21	80.0	72.5	0.48	432.1
2013	158.0	0.399 3	3 413	243	5.53	2.77	74.4	11.93	87.0	72.1	0.50	471.4
2014	148.0	0.662 2	4 127	254	5.79	2.90	73.7	12.38	91.0	71.2	0.51	469.2
2015	147.5	0.598 5	4 663	265	6.18	3.09	70.6	11.56	92.5	70.3	0.52	467.8

年份	C_{13}/m^3	$C_{14}/\%$	$C_{15}/(\text{L} \cdot \text{d}^{-1})$	$C_{16}/(\text{L} \cdot \text{d}^{-1})$	$C_{17}/(\text{L} \cdot \text{d}^{-1})$	$C_{18}/\%$	$C_{19}/\%$	$C_{20}/\%$	$C_{21}/\%$	C_{22}/kg	C_{23}/kg
2006	7 800	12.0	71.5	101	54	14.24	0.40	66.0	33	2.353 6	0.287 9
2007	7 200	16.0	73.5	104	58	13.39	0.60	72.3	35	2.340 4	0.286 3
2008	6 450	18.0	81.5	113	61	14.73	0.50	58.3	37	2.313 8	0.283 0
2009	5 700	16.0	86.5	107	56	16.00	0.30	63.6	40	2.299 0	0.281 2
2010	5 250	12.8	68.7	97	52	13.23	0.50	63.6	39	2.286 5	0.279 7
2011	4 197	13.4	72.9	95	51	12.66	0.60	63.6	47	2.270 8	0.277 7
2012	4 665	32.0	75.5	117	55	13.02	0.70	72.7	65	2.255 9	0.275 9
2013	5 100	38.0	88.8	119	58	13.30	0.70	76.9	80	2.218 1	0.271 3
2014	5 415	42.0	86.4	123	65	12.38	0.80	65.4	85	2.213 8	0.270 8
2015	5 475	45.0	108.6	128	66	14.67	1.00	70.0	88	2.200 9	0.269 2

表4 文山州水资源利用效率评价结果

Table 4 Evaluation results of water use efficiency in Wenshan Prefecture

年份	z_i	评价等级	年份	z_i	评价等级
2006	0.161 7	较低水平	2011	1.053 8	中等水平
2007	0.471 7	较低水平	2012	1.587 0	中等水平
2008	0.788 3	中等水平	2013	2.034 5	较高水平
2009	0.729 4	中等水平	2014	2.247 2	较高水平
2010	0.829 6	中等水平	2015	2.486 7	较高水平

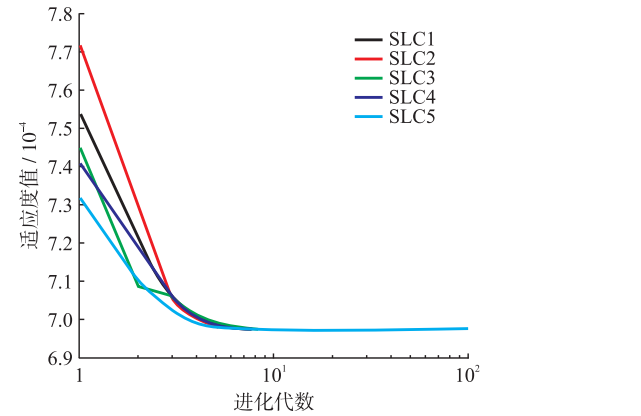


图1 SLC-PP 前5次进化过程

Fig.1 First five evolutionary processes of simulation using SLC-PP model

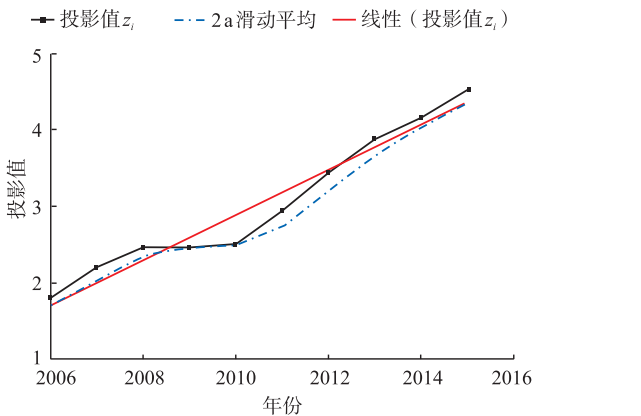


图2 投影值变化趋势及2a滑动平均过程

Fig.2 Variation trend of projected values and two-year average moving process

4.3 评价结果分析

从最佳投影方向的优化结果来看,污水处理率、有效灌溉率、人均综合用水量、工业用水重复利用率、万

元 GDP 用水量、供水量模数、万元工业增加值用水量的投影分量相对较大,在 0.2464~0.2917 之间,其对水资源利用效率评价的影响也最大;其次为万元农业增加值用水量、城镇人均生活用水量、灌溉水利用系数、河道外生态用水比例、工业用水比例、人均生活用水量、农村人均生活用水量,其投影分量在 0.1755~0.2262 之间;其余指标投影分量在 0.0207~0.1295 之间,其对水资源利用效率评价的影响相对较小。其中,用水弹性系数、水资源开发利用率、居民生活用水比例、人均 COD 环境容量和人均氨氮环境容量投影方向为负,表明这 5 个指标对水资源利用效率综合评价的贡献随时间呈下降趋势。

由表 4 可知,文山州 2006—2007 年水资源利用效率处于较低水平,2008—2012 年处于中等水平,2013—2015 年处于较高水平,但在综合用水效率、农业用水效率、生态环境用水效率三方面表现较差。通过推进节水型社会建设、最严格水资源管理、农业节水改造、水价改革和水生态保护与修复等措施,水资源利用效率还有进一步提升的空间,但由于受农业节水改造力度不大、节水型社会建设推进缓慢等客观因素的影响和制约,水资源利用效率提升空间有限。

由表 4 及图 2 可知,2008—2011 年文山州水资源利用效率投影值 z_i 提升不大,甚至 2008—2009 年不升反降,这主要是由于 2008—2011 年文山 4 年连旱,降水对人均综合用水量、供水量模数、河道外生态用水比例等造成了直接影响,制约了水资源利用效率的提升。

从图 1 可以看出,SLC 算法连续 5 次运行均迭代至 10 次就收敛到了全局最优解 6.97313×10^{-4} ,且 5 次连续运行优化结果完全一致,再次验证了 SLC 算法具有较好的收敛速度、全局寻优能力和稳健性能。

采用 Spearman 统计量与 Kendall 统计量对 2006—2015 年水资源利用效率综合投影值 z_i 变化趋势进行分析。经计算, z_i 的 Spearman 统计量与 Kendall 统计量分别为 3.85、15.6,均大于置信水平为 0.05 时的相应临界值 2.01 和 1.96,表明文山州水资源利用效率随时间呈提升趋势,且提升趋势显著。

5 结 论

- a. SLC 算法寻优精度优于 TLBO 和 GWO 算法,远优于 DE、SFLA、PSO 和 ICA 算法,具有寻优精度高、收敛速度快、极值寻优能力强以及收敛稳定性与可靠性好等特点。
- b. 从水资源综合用水效率、工业用水效率、农业用水效率、生活用水效率及生态环境用水效率 5 个方面选取 23 个效率指标构建区域水资源利用效率评价指标体系,对区域水资源利用效率评价分析具有一定的参考意义。
- c. 利用水资源利用效率投影系列均值 $\bar{z}$ 及标准差 σ 构造评价分级标准,可解决目前水资源利用效率评价中没有普遍认同的指标体系及分级标准问题,具有一定的通用性。
- d. 利用 SLC 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,不但提高了 PP 模型水资源利用效率的评价精度,且为解决 PP 模型最佳投影方向提供了一种新的途径和方法。
- e. 文山州 2006 年、2007 年水资源利用效率处于较低水平,2008—2012 年处于中等水平,2013—2015 年处于较高水平,水资源利用效率随时间呈提升趋势,且提升趋势显著。但由于 2008—2011 年连旱等因素造成的降水减少会在一定程度上制约区域水资源利用效率的提升。

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[M]. 北京:北京师范大学出版社,2010.

[2] 白颖,王红瑞,许新宜,等. 水资源利用效率及评价方法若干问题研究[J]. 水利经济,2010,28(3):1-4. (BAI Ying, WANG Hongrui, XU Xinyi, et al. Study on several problems of water use efficiency and evaluation methods[J]. Journal of Economics of Water Resources,2010,28(3):1-4. (in Chinese))

[3] 刘渝,杜江,张俊飏. 湖北省农业水资源利用效率评价[J]. 中国人口·资源与环境,2007,17(6):60-65. (LIU Yu, DU Jiang, ZHANG Junbiao. Agricultural water use efficiency evaluation of Hubei Province [J]. China Population Resources and Environment,2007,17(6):60-65. (in Chinese))

[4] 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. (LEI Bo, LIU Yu, XU Di, et al. Advances in evaluation study on utility of agriculture water utilization [J]. Advances in Water Science, 2009,20(5): 732-738. (in Chinese))

[5] 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. (GAO Yuanyuan, XU Xinyi, WANG Hongrui, et al. New model for water use efficiency evaluation of China and its application[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2013,33(3): 776-784. (in Chinese))

[6] 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. (YUE Li, BAI Jing, GUO Shanning. Analysis of Chinese industrial water efficiency based on ultra-efficient [J]. Journal of Shijiazhuang University of Economics, 2013,36(6):51-55. (in Chinese))

- [7] 范丹,王维国. 中国区域全要素能源效率及节能减排潜力分析:基于非期望产出的SBM模型[J]. 数学实践与认识,2013,43(7):12-21. (FAN Dan, WANG Weiguo. China regional total factor energy efficiency and energy saving potential analysis: undesirable output model based on the SBM [J]. Mathematics in Practice and Theory,2013,43(7):12-21. (in Chinese))
- [8] 潘丹,应瑞瑶. 中国农业生态效率评价方法与实证[J]. 生态学报,2013,33(12):3837-3888. (PAN Dan, YING Ruiyao. Agricultural eco-efficiency evaluation in China based on SBM model [J]. Acta Ecologica Sinica,2013,33(12):3837-3888. (in Chinese))
- [9] 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. (WANG Ying. Industrial water use efficiency of Jiangsu Province based on DEA [J]. Journal of Economics of Water Resources,2014,32(5):19-22. (in Chinese))
- [10] 罗琳,宋进喜,梁雯. 基于遗传投影寻踪模型的陕西省水资源利用效率评估[J]. 水资源与水工程学报,2012,23(6):66-69. (LUO Lin, SONG Jinxi, LIANG Wen. Evaluation of water use efficiency based on genetic projection pursuit model in Shaanxi Province [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering,2012,23(6):66-69. (in Chinese))
- [11] 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. (CAO Lei, ZHOU Weibo, ZHUANG Yan. Analysis of use efficiency of water resources based on model of genetic projection pursuit in Yan'an [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering,2015,26(2):126-128. (in Chinese))
- [12] 陈曜,丁晶,赵永红. 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. (CHEN Yao, DING Jing, ZHAO Yonghong. Assessment on flood disaster in Sichuan Province based on the principle of projection pursuit method [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2010,41(2):220-225. (in Chinese))
- [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灌灌溉综合评价[J]. 农业工程学报,2012,28(2):84-89. (WANG Bai, ZHANG Zhongxue, LI Fanghua, et al. Comprehensive evaluation of regulated deficit irrigation using projection pursuit model based on improved double chains quantum genetic algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2012,28(2):84-89. (in Chinese))
- [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. (CHEN Guangzhou, WANG Jiaquan, XIE Huaming. Particle swarm optimization for solving projection pursuit model application [J]. Computer Simulation, 2008,25(8):159-161,165. (in Chinese))
- [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. (CUI Dongwen, JIANG Min. Application differential evolution algorithm and projection pursuit model in comprehensive evaluation of water quality [J]. Pearl River, 2016,37(2):97-101. (in Chinese))
- [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,2014,32(9):31-35. (WANG Minghao, DONG Zengchuan, MA Hongliang. Assessment of water resources system vulnerability based on shuffled frog leaping algorithm and projection pursuit model [J]. Water Resources and Power,2014,32(9):31-35. (in Chinese))
- [17] MOOSAVIAN N, ROODSARI B K. Soccer league competition algorithm, a new method for solving systems of nonlinear equations[J]. International Journal of Intelligence Science, 2014,4:7-16.
- [18] MOOSAVIAN N, ROODSARI B K. Soccer league competition algorithm: a novel meta-heuristic algorithm for optimal design of water distribution networks[J]. Swarm & Evolutionary Computation,2014,17:14-24.
- [19] MOOSAVIAN N. Soccer league competition algorithm for solving knapsack problems [J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2015,20:14-22.
- [20] 陈午,许新宜,王红瑞,等. 梯度发展模式下我国水资源利用效率评价[J]. 水力发电学报,2015,34(9):29-38. (CHEN Wu, XU Xinyi, WANG Hongrui, et al. Evaluation of water resources utilization efficiency in China under gradient development. [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015,34(9):29-38. (in Chinese))
- [21] 朱兆珍,梁中. 我国省域水资源利用效率评价研究[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版),2015,17(3):72-78. (ZHU Zhaozhen, LIANG Zhong. Research into evaluation of efficiency of provincial water resource use in China [J]. Journal of Hohai University(Philosophy and Social Sciences),2015,17(3):72-78. (in Chinese))
- [22] 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. (CUI Dongwen, GUO Rong. Application of SSO-PP model in security standard evaluation of water sources [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2015,33(5):8-13. (in Chinese))
- [23] 崔东文. 鸡群优化算法投影寻踪洪旱灾害评估模型[J]. 水利水电科技进步,2016,36(2):16-23. (CUI Dongwen. Projection pursuit model for evaluation of flood and drought disasters based on chicken swarm optimization algorithm [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2016,36(2):16-23. (in Chinese))