

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2016.06.012

正弦余弦算法-投影寻踪水污染物总量分配模型

崔东文

(云南省文山壮族苗族自治州水务局,云南 文山 663000)

摘要:基于水资源禀赋条件、效率原则和尊重现状的原则,构建水污染物总量分配指标体系和水污染物分配投影寻踪(PP)模型。针对PP模型最佳投影方向难以确定的不足,利用正弦余弦算法(SCA)搜寻PP模型最佳投影方向,构建SCA-PP模型对云南省文山州壮族苗族自治州8县(市)水污染物控制总量进行分配。并通过6个典型测试函数对SCA算法进行仿真验证,仿真结果与蚁群优化(ACO)算法、模拟退火算法(SA)、文化算法(CA)、布谷鸟搜索(CS)算法和人工蜂群(ABC)算法进行对比。结果表明:①SCA算法寻优效果明显优于ACO、SA、CA、CS和ABC算法,具有模型简单、调节参数少、收敛速度快、寻优精度高、全局寻优能力强以及收敛稳定性与收敛可靠性好等特点。②SCA-PP模型水污染物控制总量分配结果符合区域经济社会发展和水污染物削减客观要求。模型及方法具有一定的可操作性和有效性,可为水污染物分配提供新的途径和方法。

关键词:水污染物;区域分配;指标体系;正弦余弦算法;投影寻踪;文山壮族苗族自治州;云南省

中图分类号:X32 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2016)06-0075-07

Sine cosine algorithm-projection pursuit model for water pollutant load allocation

CUI Dongwen

(Wenshan Water Conservancy Bureau of Yunnan Province, Wenshan 663000, China)

Abstract: Based on the conditions of water resources endowment, the efficiency principle, and the principle of respecting actual conditions, an index system for water pollutant load allocation and a water pollutant allocation projection pursuit (PP) model were established. It is difficult to determine the optimal projection direction using the PP model. In order to solve this problem, the sine cosine algorithm (SCA) was used to search for the optimal projection direction of the PP model. An SCA-PP model was built for the water pollutant load allocation for eight counties (cities) in Wenshan Zhuang and Miao Autonomous Prefecture of Yunnan Province. The SCA algorithm was verified using six typical test functions. The simulation results were compared with those of the ant colony optimization (ACO) algorithm, simulated annealing (SA) algorithm, cultural algorithm (CA), Cuckoo search (CS) algorithm, and artificial bee colony (ABC) algorithm. The results are as follows: (1) The SCA algorithm performs better than the ACO, SA, CA, CS, and ABC algorithms. It is simple and has a fast convergence speed, high precision of optimization, high capability of global optimization, and strong convergence stability and reliability. (2) The simulations results of the SCA-PP model for water pollutant load control meet the economic and social development and water pollutant reduction requirements in the study area. The model has certain operability and effectiveness, providing a new method of water pollutant allocation.

Key words: water pollutants; regional allocation; index system; sine cosine algorithm; projection pursuit; Wenshan Zhuang and Miao Autonomous Prefecture; Yunnan Province

水污染物总量分配是水污染物总量控制制度的重要内容之一,科学、客观的水污染物分配对于推进工业企业污染治理、调整产业结构、改善区域水环境

质量、促进经济社会发展方式转变具有重要意义。常用于水污染物总量分配的方法有等比例分配法^[1]、基尼系数法^[2-3]、层次分析法^[4]、分配指数

法^[5]、信息熵法^[6]和组合赋权法^[7]等。探索科学、客观的水污染物分配模型及方法仍是当前国家实行水污染物总量控制制度的重要内容和研究热点。投影寻踪 (projection pursuit, PP) 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,其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,在行业领域具有广泛应用^[8-9]。在水污染物分配中,PP 模型最佳投影方向 $\mathbf{a}$ 的选取对于 PP 模型确定各水污染物分配指标的权重极为关键。目前,除遗传算法 (genetic algorithms, GA)^[10-11]、粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法^[12]用于优化 PP 模型最佳投影方向 $\mathbf{a}$ 外,人工鱼群 (artificial fish swarm algorithm, AFSA) 算法^[13]、人工蜂群 (artificial bee colony, ABC) 算法^[14]、混合蛙跳算法 (shuffled frog leaping algorithm, SFL)^[15]、蚁群优化 (ant colony optimization, ACO) 算法^[16]、鸡群优化 (chicken swarm optimization, CSO) 算法^[17]等也尝试用于 PP 模型最佳投影方向 $\mathbf{a}$ 的选取,并取得了较好的应用效果。然而,对于高维优化问题,传统智能优化方法普遍存在早熟收敛和易陷入局部极值等不足。正弦余弦算法 (sine cosine algorithm, SCA) 是文献[18]于 2015 年基于正弦余弦函数提出的一种新型优化算法,该算法通过创建多个随机候选解,利用正弦余弦数学模型来求解最优化问题,能够探索不同的搜索空间,有效避免局部最优,具有模型简单、调节参数少、收敛速度快、全局寻优能力强等优点,在函数优化和工程设计领域得到初步应用^[18]。

虽然 PP 模型在各行业领域均有广泛应用,但在水污染物分配中的应用较少,尤其是在与新型智能算法相融合的水污染物分配中的应用更为少见。本文基于水资源禀赋条件、效率原则和尊重现状原则选取水资源可利用量等 10 个水污染物分配指标构建 SCA-PP 水污染物分配模型,以云南省文山壮族苗族自治州 (以下简称文山州) 8 县 (市) 水污染物分配为例进行实例研究。主要做法为:①选取水

资源可利用量、COD 纳污能力等 10 个指标构建水污染物分配指标体系;②采用 6 个典型 10 维测试函数对 SCA 算法进行仿真验证,并与 ACO 算法、模拟退火 (Simulated Annealing, SA) 算法、文化算法 (Cultural Algorithm, CA)、布谷鸟搜索 (Cuckoo Search, CS) 算法和 ABC 算法的仿真结果进行对比分析;③利用 SCA 算法优化 PP 模型最佳投影方向 $\mathbf{a}$, 构建 SCA-PP 水污染物分配模型,确定云南省文山壮族苗族自治州 8 县 (市) 水污染物分配权重,并计算各县 (市) COD 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的分配量。

1 水污染物分配指标体系

水污染物分配涉及区域内社会、经济、水资源条件等多方面因素的影响和制约,属多目标多层次决策优化问题。笔者遵循水资源禀赋条件、效率原则和尊重现状的原则,并结合区域实际,选取 10 个指标构建水污染物分配指标体系。具体为:基于水资源禀赋条件选取水资源可利用量、COD 纳污能力、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 纳污能力 3 个指标;基于高效性原则选取城镇污水处理率、二产比例和万元产值废水排污量 3 个指标;基于尊重现状原则选取 GDP、总人口、工业污水排放量和年度用水总量 4 个指标 (表 1)。

2 SCA-PP 水污染物分配模型

2.1 PP 模型

PP 模型用于水污染物分配的简要算法如下^[8,17]。

a. 数据预处理。设水污染物分配数据集为 $\{x(i, j) \mid i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m\}$, 为避免水污染物分配指标归一化后出现 0 的情形,对于正向指标采用式(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: $x(i, j)$ 、 $x^*(i, j)$ 分别为第 i 个区域第 j 个水污染物指标值及归一化后的值; $x_{\max}(j)$ 、 $x_{\min}(j)$ 分别为第 j 个水污染物指标的最大、最小值; n 、 m 分别为区

表 1 水污染物分配指标体系

目标	原则	指标	表 征
水 污 染 物 分 配	水资源 禀赋条件	C_1 : 水资源可利用量 (亿 m^3)	正向指标, 表征水资源可利用量越大的区域水环境容量禀赋越好
		C_2 : COD 纳污能力 (t)	正向指标, 表征 COD 纳污能力越大的区域水污染物削减量越大
		C_3 : $\text{NH}_3\text{-N}$ 纳污能力 (t)	正向指标, 表征 $\text{NH}_3\text{-N}$ 纳污能力越大的区域水污染物削减量越大
	效率性 原则	C_4 : 城镇污水处理率 (%)	正向指标, 表征污水处理能力越大的区域水污染物削减量越大
		C_5 : 二产比例 (%)	正向指标, 表征工业比重越大的区域水污染物削减量越大
		C_6 : 万元产值废水排污量 (t/万元)	正向指标, 表征工业发展水平较低的区域承担更多的水污染物削减任务
	尊重现状 原则	C_7 : GDP (亿元)	正向指标, 表征经济规模越大的区域污染物排放量越大, 水污染物削减任务越重
		C_8 : 总人口 (万人)	正向指标, 表征人口规模越大的区域污染物排放量越大, 水污染物削减任务越重
		C_9 : 工业污水排放量 (万 t)	正向指标, 表征工业污水排放量越大的区域水污染物削减量越大
		C_{10} : 年度用水总量 (亿 m^3)	正向指标, 表征年度用水总量越大的区域污水排放量越大, 水污染物削减量越大

域总数及水污染物指标数目。

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。 S_z 、 D_z 的表达式参见文献[8,17]。

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:

$$\begin{cases} \max: Q(a) = S_z D_z \\ \text{s. t. } \sum_{j=1}^m a^2(j) = 1 \quad a \in [0,1] \end{cases} \quad (4)$$

d. 计算投影值。将最佳投影方向 $\mathbf{a}$ 代入式(2),得到投影值 $z(i)$ 。

2.2 SCA 算法

一般来说,以群体为基础的优化算法是通过一组随机解以及更新策略而开始优化迭代过程,并利用目标函数进行反复评价,在保证足够数的随机解和优化步骤(迭代)条件下,算法可大大增加获得最优解的概率。参考文献[18],SCA 算法提出以下位置更新公式:

$$X_i^{t+1} = X_i^t + r_1 \sin(r_2) \mid r_3 P_i^t - X_i^t \mid \quad (5)$$

$$X_i^{t+1} = X_i^t + r_1 \cos(r_2) \mid r_3 P_i^t - X_i^t \mid \quad (6)$$

式中: X_i^t 为当前解的第 i 维第 t 次迭代空间位置; r_1 、 r_2 、 r_3 均为随机数; P_i^t 为第 i 维第 t 次迭代目标点的空间位置。

通过式(5)、式(6)组合后的位置更新公式如下:

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} X_i^t + r_1 \sin(r_2) \mid r_3 P_i^t - X_i^t \mid & r_4 < 0.5 \\ X_i^t + r_1 \cos(r_2) \mid r_3 P_i^t - X_i^t \mid & r_4 \geq 0.5 \end{cases} \quad (7)$$

式中, r_4 为 $\text{rand}(0,1)$ 随机数。

SCA 算法中 4 个主要参数为 r_1 、 r_2 、 r_3 和 r_4 。参数 r_1 决定了下一空间位置区域(或移动方向),该区域或移动方向可以是候选解和目标解之间的任一空间或之外的空间;参数 r_2 定义了移动方向上应该移动的步长;参数 r_3 提供了随机选择权,即随机强调($r_3 > 1$)或淡化($r_3 < 1$)对所定义距离的影响;参数 r_4 表示如何选择在式(6)、式(7)中的正弦和余弦分量之间切换。

一种优秀算法应能够平衡勘探和开采能力,以期遍历搜索空间内所有区域,并最终收敛到全局最优。为了平衡 SCA 算法中正弦和余弦函数在搜索范围内的勘探和开采能力,利用式(8)来调整参数 r_1 的自适应变化策略。

$$r_1 = a - t \frac{a}{T} \quad (8)$$

式中: t 为当前迭代次数; T 为最大迭代次数; a 为常数。

在理论上,SCA 算法基于下述原因能获得较好的优化性能:

a. 针对给出问题,SCA 算法创建并改进一系列候选解,其本质有益于全局勘探和局部优化;

b. 在探索所定义的搜索空间之外的区域时,正弦和余弦函数返回一个大于 1 或小于 -1 的值;

c. 当正弦和余弦函数返回值在 -1 和 1 之间时,具有较好搜索前景的空间得到开发;

d. SCA 算法在定义范围内运用正弦和余弦函数顺利地由勘探阶段过渡到开发阶段;

e. 在优化过程中,全局相对最佳的候选解被存储为一个可变目标点而不丢失;

f. 在优化过程中,候选解总是在当前最佳候选解周围更新他们的位置,并趋向于搜索空间中的最佳区域。

2.3 SCA-PP 水污染物分配实现步骤

SCA-PP 模型水污染物分配实现步骤可归纳如下:

a. 构建水污染物分配指标体系,利用式(1)进行指标一致性处理。

b. 确定目标函数。由于 SCA 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(9)作为适应度函数:

$$\begin{cases} \min: Q'(a) = 1/(S_z D_z) \\ \text{s. t. } \sum_{j=1}^m a^2(j) = 1 \quad a \in [0,1] \end{cases} \quad (9)$$

c. 初始化算法参数。设置群体数目 N 、最大迭代次数 M 、常数 a 、参数 r_2 、 r_3 ,搜索空间,设置算法终止条件,并在解空间内随机初始化候选解空间位置 $X_{ij}(i \in [1,2,\dots,N], j \in [1,2,\dots,D])$ 。

d. 基于式(9)计算群体候选解的第一次迭代适应度值,找到并保存当前群体中最佳候选解。

e. 令 $t=2$,利用式(8)计算参数 r_1 ,利用式(7)更新候选解位置。

f. 计算新候选解的适应度值,并与前次迭代最佳候选解的适应度值进行比较。若当前候选解优于前次候选解,则保存当前候选解为最佳候选解;否则,保存上次候选解为最佳候选解。

g. 判断算法是否满足终止条件,若满足,则转到步骤 h ;否则,令 $t=t+1$,重复执行步骤 f~g。

h. 输出最优候选解适应度值及所处空间位置,最优候选解所处空间位置即为最佳投影方向 $\boldsymbol{a}$ 。

i. 将最佳投影方向 $\boldsymbol{a}$ 代入式(2)求得各县(市)最佳投影值 $z'(i)$,将 $z'(i)$ 归一化处理即为各县(市)水污染物分配权重,该权重乘以水污染物控制总量即为各县(市)水污染物分配结果。

3 实验仿真与结果分析

针对 10 维优化问题,采用 6 个典型 10 维测试函数(表 2)对 SCA 算法寻优能力进行仿真验证,求测试函数的极小值,并与 ACO、SA、CA、CS 和 ABC 算法的寻优结果进行比较,见表 3 和图 1。表 2 中 Sphere、Schwefel 2.22 函数常用于测试算法的收敛速度和收敛精度;Griewank 函数常用于测试算法对全局与局部搜索能力的平衡性能;Quadric、Rastrigin 函数常用于测试算法的全局搜索能力;Ackley 函数常用于测试算法跳出局部极值的能力。实验参数设置如下:SCA 算法最大迭代次数 $T=1\,000$,群体数目 $N=50$,常数 $a=2$,参数 $r_2=2\pi\text{rand}(\)$, $r_3=2\text{rand}(\)$ 。ACO 算法最大迭代次数 $T=1\,000$,群体规模 $N=50$,常量 $Q=1$,最大信息素挥发系数 $\rho_{\max}=0.4$,最小信息素挥发系数 $\rho_{\min}=0.1$,最大信息量 $\tau_{\max}=1$,最小信息量 $\tau_{\min}=0.1$ 。SA 算法最大迭代次数 $T=1\,000$,种群规模 $N=50$,初始温度 $T_0=500$,终止温度 $T_{\text{end}}=0.001$,温度冷却系数 $q=0.99$ 。CA 算法最大迭代次数 $T=1\,000$,群体规模 $m=50$,根据标准知识产生的群体规模 $m'=50$ 。CS 算法最大迭代次数 $T=1\,000$,鸟窝位置数 $N=25$ 、发现概率 $p_a=0.25$ 。ABC 算法最大迭代次数 $T=1\,000$,种群规模 $S_N=50$,局部循环次数 $l_c=60$ 。

6 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

最优值、最劣值、平均值、标准差 4 个方面进行评估。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。

表 3 函数优化对比结果

函数	算法	最优值	最劣值	平均值	标准差
Sphere	SCA	7.20×10^{-42}	7.28×10^{-34}	6.86×10^{-35}	1.61×10^{-34}
	ACO	3.20×10^{-35}	6.57×10^{-33}	1.07×10^{-33}	1.47×10^{-33}
	SA	9.46×10^{-17}	3.30×10^{-16}	1.71×10^{-16}	5.06×10^{-17}
	CA	3.13×10^{-14}	1.266 8	0.157 3	0.306 3
	CS	2.83×10^{-29}	9.39×10^{-28}	3.02×10^{-28}	2.21×10^{-28}
	ABC	4.71×10^{-15}	4.29×10^{-12}	6.40×10^{-13}	9.61×10^{-13}
Griewank	SCA	0	0	0	0
	ACO	0.223 1	0.613 3	0.447 4	0.110 6
	SA	3.45×10^{-2}	0.204 3	0.111 5	4.50×10^{-2}
	CA	5.17×10^{-2}	0.386 5	0.151 6	8.86×10^{-2}
	CS	2.28×10^{-3}	6.62×10^{-2}	3.04×10^{-2}	1.66×10^{-2}
	ABC	0.171 7	0.361 9	0.268 8	4.88×10^{-2}
Quadric	SCA	5.07×10^{-26}	7.34×10^{-17}	6.79×10^{-18}	1.63×10^{-17}
	ACO	8.82×10^{-6}	2.11×10^{-4}	6.87×10^{-5}	5.54×10^{-5}
	SA	1.92×10^{-17}	8.09×10^{-17}	4.69×10^{-17}	1.73×10^{-17}
	CA	4.22×10^{-44}	5.49×10^{-5}	5.21×10^{-6}	1.21×10^{-5}
	CS	3.47×10^{-9}	8.06×10^{-8}	2.53×10^{-8}	2.10×10^{-8}
	ABC	2.74×10^{-2}	0.438 6	0.162 9	0.127 2
Rastrigin	SCA	0	0	0	0
	ACO	1.97	3.99	3.19	5.11
	SA	1.989 9	1.49	5.291 4	2.883 9
	CA	2.034 3	1.40	7.047 0	3.245 4
	CS	2.002 8	6.454 2	4.140 1	1.220 4
	ABC	1.76	2.61	32.27	2.29
Ackley	SCA	8.88×10^{-16}	4.44×10^{-15}	3.63×10^{-15}	1.42×10^{-15}
	ACO	4.44×10^{-15}	4.44×10^{-15}	4.44×10^{-15}	1.58×10^{-30}
	SA	3.65×10^{-9}	7.28×10^{-9}	5.44×10^{-9}	1.03×10^{-9}
	CA	4.44×10^{-15}	4.44×10^{-15}	4.44×10^{-15}	1.58×10^{-30}
	CS	4.35×10^{-14}	1.04×10^{-9}	1.08×10^{-10}	2.28×10^{-10}
	ABC	5.36×10^{-7}	1.57×10^{-5}	3.89×10^{-6}	3.60×10^{-6}
Schwefel 2.22	SCA	2.63×10^{-28}	6.01×10^{-23}	8.24×10^{-24}	1.49×10^{-23}
	ACO	5.25×10^{-21}	1.44×10^{-19}	4.77×10^{-20}	3.64×10^{-20}
	SA	1.83×10^{-9}	4.07×10^{-9}	2.83×10^{-9}	6.04×10^{-10}
	CA	3.32×10^{-9}	2.37×10^{-2}	4.83×10^{-3}	7.98×10^{-3}
	CS	1.13×10^{-7}	6.71×10^{-7}	3.52×10^{-7}	1.98×10^{-7}
	ABC	2.14×10^{-12}	8.43×10^{-11}	2.46×10^{-11}	2.05×10^{-11}

表 2 基准函数

函数	表达式	维数	取值范围	理论最优解
Sphere	$f(X)=\sum_{i=1}^Dx_i^2$	10	[−100,100]	$\min f=0$
Griewank	$f(X)=\frac{1}{4\,000}\sum_{i=1}^Dx_i^2-\prod_{i=1}^D\cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right)+1$	10	[−600,600]	$\min f=0$
Quadric	$f(X)=\sum_{i=1}^D\left(\sum_{k=1}^ix_k\right)^2$	10	[−30,30]	$\min f=0$
Rastrigin	$f(X)=\sum_{i=1}^D[x_i^2-10\cos(2\pi x_i)+10]$	10	[−5.12,5.12]	$\min f=0$
Ackley	$f(X)=-20\exp\left(-0.2\sqrt{\frac{1}{D}\sum_{i=1}^Dx_i^2}\right)-\exp\left(\frac{1}{D}\sum_{i=1}^D\cos2\pi x_i\right)+20+e$	10	[−32,32]	$\min f=0$
Schwefel 2.22	$f(X)=\sum_{i=1}^D x_i +\prod_{i=1}^D x_i $	10	[−10,10]	$\min f=0$

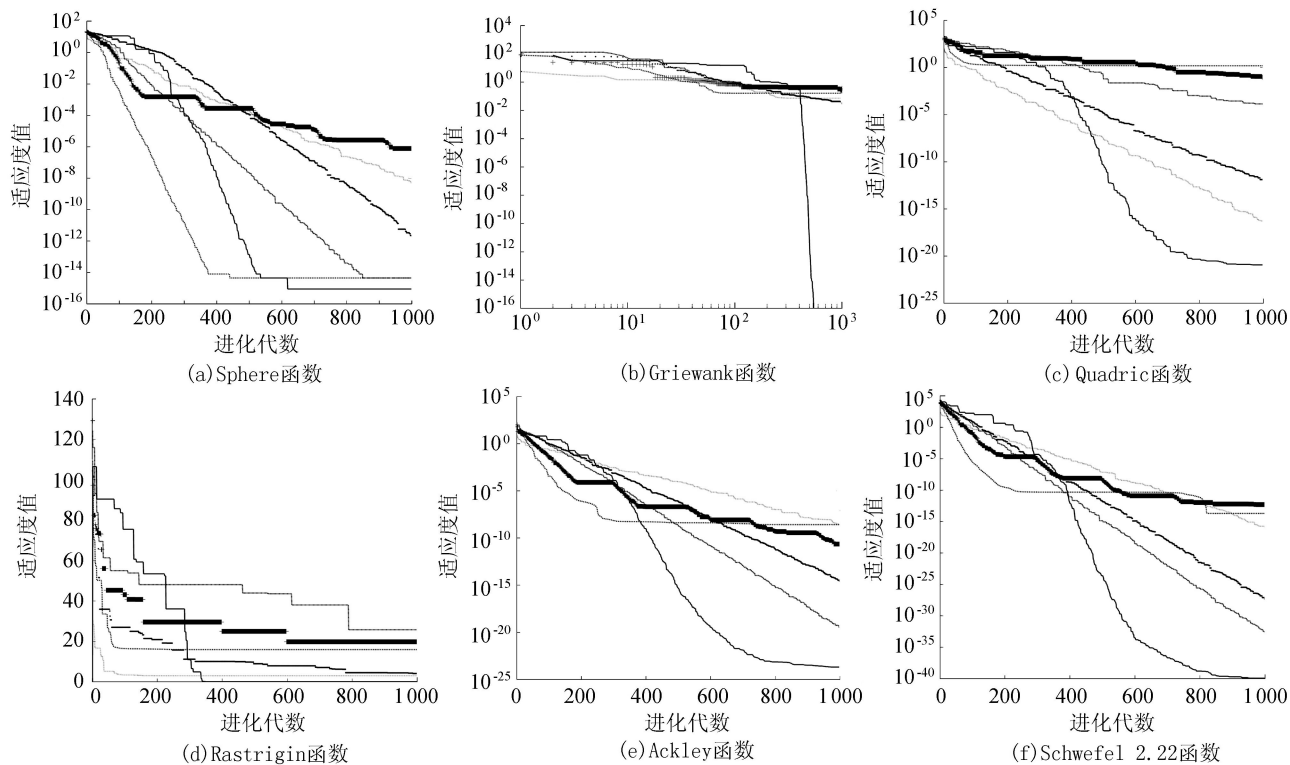


图1 各函数测试寻优曲线

a. 从表3可知,对于 Sphere、Schwefel2.22 函数,SCA 算法寻优精度明显优于 ACO、SA、CA、CS 和 ABC 算法,表现出较好的收敛精度和收敛速度;对于 Griewank 函数,SCA 算法寻优获得了理论最优值,寻优效果远远优于 ACO、SA、CA、CS 和 ABC 算法,表现出较好的全局与局部搜索平衡能力;对于 Quadric 函数,SCA 算法除最优值寻优劣于 CA 算法外,其余寻优精度均优于 ACO、SA、CA、CS 和 ABC 算法;对于 Rastrigin 函数,SCA 算法寻优获得了理论最优值,寻优效果远远优于 ACO、SA、CA、CS 和 ABC 算法,表现出较好的全局搜索能力;对于 Ackley 函数,SCA 算法除标准差劣于 ACO、CA 算法外,其余寻优精度同样优于 ACO、SA、CA、CS 和 ABC 算法,具有跳出局部最优的良好性能。

b. 从图1可见,SCA 算法寻优效果明显优于 ACO、SA、CA、CS 和 ABC 算法,具有较好的收敛速度、收敛精度和极值寻优能力。

上述比较表明,SCA 算法利用正弦余弦数学模型来求解最优化问题,能够探索不同的搜索空间,有效避免局部最优,具有模型简单、调节参数少、收敛速度快、寻优精度高、全局寻优能力强以及收敛稳定性与收敛可靠性好等特点。

4 实例应用

4.1 研究区概况

云南省文山州位于云南省东南部,全州总面积

31456 km²,辖文山、砚山、西畴、麻栗坡、马关、丘北、广南、富宁7县1市。境内河流分属红河流域和珠江流域,多年平均径流深501 mm,水资源总量157.7亿 m³。依据《文山州“十三五”污染减排的重点、难点及思路对策研究》,到2020年云南省文山州 COD 和 NH₃-N 排放总量控制在31328 t、3330 t 以内,比2015年的32977 万 t、3510 万 t 均减少约5%。为能科学、客观地对水污染物进行分配,本文基于水污染物分配指标,利用 SCA-PP 模型将云南省文山州2020年水污染物排放控制总量分解到文山、砚山、西畴、麻栗坡、马关、丘北、广南、富宁7县1市,为“十三五”云南省文山州实施更科学、合理的区域水污染物总量分配提供参考。云南省文山州所辖8县(市)用于水污染物分配的指标见表4。

4.2 水污染物分配模型求解

根据 SCA-PP 水污染物分配模型实现步骤,采用式(1)归一化后的各县(市)指标构造投影指标函数,并利用 SCA 算法求解 PP 模型最佳投影方向(SCA 算法搜索空间设置为[0,1],其余参数设置均同上)。将 SCA-PP 模型连续运行5次,进化过程见图2,计算得到各水污染物分配指标5次最佳投影方向均为 $a = (0.2505 \quad 0.1239 \quad 0.1091 \quad 0.3966 \quad 0.3832 \quad 0.4163 \quad 0.3809 \quad 0.2001 \quad 0.3737$

表 4 云南省文山州所辖行政区水污染物分配指标数据

县(市)	$C_1/\text{亿 m}^3$	C_2/t	C_3/t	$C_4/\%$	$C_5/\%$	$C_6/(\text{t} \cdot \text{万元}^{-1})$	$C_7/\text{亿元}$	$C_8/\text{万人}$	$C_9/\text{万 t}$	$C_{10}/\text{亿 m}^3$
文山市	7.01	577.8	64.1	88.72	50.96	20.45	176.6	47.3	918.56	1.36
砚山县	4.61	571.3	27.1	60.64	40.40	16.80	99.0	48.3	423.14	1.30
西畴县	2.41	37.4	10.1	41.90	11.90	4.40	25.2	25.8	28.23	0.45
麻栗坡县	4.91	1568.4	174.6	91.74	42.21	7.42	46.2	29.0	87.15	0.82
马关县	6.12	4292.6	308.6	75.83	46.44	17.61	68.9	38.0	308.70	0.96
丘北县	7.28	2179.2	260.3	50.00	30.70	7.48	53.1	48.3	101.08	1.21
广南县	10.9	3310.1	185.0	92.50	26.63	6.02	81.1	80.7	124.23	1.67
富宁县	8.59	1669.3	260.1	82.84	27.18	13.36	66.6	41.8	226.25	1.35

注:资料来源于 2014 年《文山州环境质量公报》《水资源公报》和《文山州水资源保护规划》等。

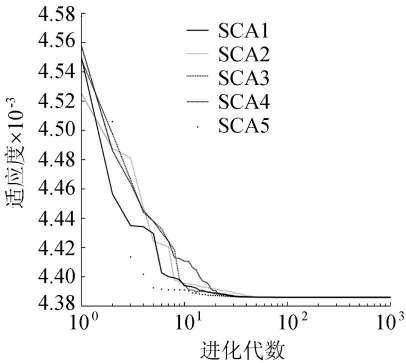


图 2 SCA-PP 5 次进化过程

0.3283),5 次最佳适应度值均为 0.0043860195252040。将此最佳投影方向代入式(2),得到 8 县(市)水污染物分配的投影值 $z'(i) = (2.2276 \quad 1.4930 \quad 0.2944 \quad 1.2017 \quad 1.6547 \quad 1.1055 \quad 1.6581 \quad 1.5047)$,将 $z'(i)$ 归一化处理后即为 8 县(市)水污染物分配权重,该权重分别再乘以 2020 年文山州 COD 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 排放控制总量 31328 t 和 3330 t,即可得到文山州 8 县(市)2020 年水污染物分配量(表 5)。

表 5 文山州 8 县(市)2020 年水污染物分配比例及分配量

县(市)	投影值 $z'(i)$	分配 权重/%	水污染物分配量/t	
			COD	$\text{NH}_3\text{-N}$
文山市	2.2276	20.00	6264.7	665.9
砚山县	1.4930	13.40	4198.7	446.3
西畴县	0.2944	2.64	827.8	88.0
麻栗坡县	1.2017	10.79	3379.6	359.2
马关县	1.6547	14.85	4653.5	494.6
丘北县	1.1055	9.92	3109.0	330.5
广南县	1.6581	14.89	4663.0	495.7
富宁县	1.5047	13.51	4231.6	449.8

从图 2 及表 5 可以得到以下结论:

- a. SCA 算法连续 5 次运行均迭代至 100 次就收敛到了全局最优解 4.386×10^{-3} ,且 5 次连续运行优化结果完全一致,再次验证了 SCA 算法具有较好的收敛速度、全局寻优能力和稳健性能。
- b. 从最佳投影方向优化结果来看,万元产值废水排污量、城镇污水处理率、二产比例和 GDP 4 个指标权重最大,在 0.3809 ~ 0.4163 之间,其对水污染物分配影响也最大;其次为工业污水排放量、用水

总量,权重分别为 0.3737 和 0.3283;其余 4 个指标权重在 0.1091 ~ 0.2505 之间,对水污染物分配的影响相对较小。

c. 从 SCA-PP 模型水污染物分配结果来看,文山市水污染物分配比例最大,为 20.00%,这是由于文山市是文山州经济、政治、文化中心,且为州府所在地,其经济、社会、工业等最为发达,理应承担更大的水污染物削减任务。其次为经济总量、人口规模及工业水平相对发达的广南、马关、富宁和砚山 4 县,水污染物分配比例在 13.40% ~ 14.88% 之间。其中,广南县在人口规模、年度用水量、水资源可利用量和城镇污水处理率方面表现最为突出,水污物分配比例仅次于文山市;马关县工业相对发达,COD 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 纳污能力最大,水污物分配比例也相对较大;富宁和砚山分别在年度用水量、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 纳污能力、城镇污水处理率和万元产值废水排污量、二产比例等效率方面表现突出。麻栗坡县人口规模不大,但工业较为发达,在用水效率方面表现相对突出,水污染物削减比例为 10.79%;丘北县在水资源禀赋方面表现突出,水污染物削减比例为 9.92%。西畴县是文山州经济总量、人口规模最小,工业水平最欠发达的区域,因此,水污染物分配比例最小,仅为 2.64%。

当然,表 4 中水污染物削减指标均属动态指标,在实际应用中应注意适时调整指标数据,以期获得更加科学合理的水污染物分配结果。

5 结 语

本文基于水资源禀赋条件、效率原则和尊重现状原则构建水污染物分配指标体系,提出 SCA-PP 水污染物分配模型,以文山州所辖 8 县(市)水污染物分配为例进行实例研究,结果表明:

- a. 选取的 10 个指标构建符合区域实际的水污染物分配指标体系,为“十三五”文山州开展区域水污染物分配提供参考和借鉴。
- b. 通过 6 个典型 10 维测试函数对 SCA 算法进行仿真验证,并与 ACO、SA、CA、CS 和 ABC 算法的

寻优结果进行比较。结果表明,SCA 算法寻优效果明显优于 ACO、SA、CA、CS 和 ABC 算法,具有模型简单、调节参数少、收敛速度快、寻优精度高、全局寻优能力强以及收敛稳定性与收敛可靠性好等特点,具有较好的应用前景。

c. 利用 SCA 算法搜寻 PP 模型最佳投影方向 α ,提出 SCA 算法与 PP 模型的融合方法及模型,不仅提高了 PP 模型的分配精度,而且为优化解决 PP 模型最佳投影方向提供了新的途径。

d. 从实例水污染物分配结果来看,SCA-PP 模型可以获得更加科学合理的水污染物分配结果。在实际应用中,可根据各区域实际增加或减少水污染物分配指标,以及通过适调整指标数据,以获得更科学合理且满足各区域污染物削减任务的分配结果。本文提出的模型及方法具有通用性,有一定的参考价值。

参考文献:

[1] 郑英铭,周晶璧,袁国兵. 控制排污总量的河流水质管理:实例介绍[J]. 水资源保护,1993(2):13-18. (ZHEN Yingming, ZHOU Jingbi,YUAN Guobing. Total amount of emissions control river water quality management:example introduction. [J]. Water Resources Protection, 1993 (2):13-18. (in Chinese))

[2] 肖伟华,秦大庸,李玮,等. 基于基尼系数的湖泊流域分区水污染物总量分配[J]. 环境科学学报,2009,29(8):1765-1771. (XIAO Weihua,QIN Dayong,LI wei,et al. Model for distribution of water pollutants in a lake basin based on environmental Gini coefficient [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2009,29(8):1765-1771. (in Chinese))

[3] 张文静,陈岩,刘雅玲,等. 综合考虑减排效益的污染物总量分配方法研究[J]. 环境污染与防治,2015,37(3):107-110. (ZHANG Wenjin, CHEN Yan, LIU Yaling, et al. Total amount allocation methods of pollutants considering emission reduction benefits [J]. Environmental Pollution & Control,2015,37(3):107-110. (in Chinese))

[4] 李如忠,舒琨. 基于多目标决策的水污染负荷分配方法[J]. 环境科学学报,2011,31(12):2814-2821. (LI Ruzhong,SHU Kun. Model for wastewater load allocation based on multi-objective decision making [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2011,31(12):2814-2821. (in Chinese))

[5] 邓义祥,雷坤,富国,等. 基于分配指数的渤海 TN 总量分配研究[J]. 环境科学研究,2015,28(12):1832-1869. (DENG Yixiang, LEI Kun, FU Guo,et al. Load allocation of total nitrogen around Bohai sea based on allocation index [J]. Research of Environmental

Sciences, 2015,28(12):1832-1869. (in Chinese))

[6] 刘杰. 基于最大信息熵模型的水污染物总量分配[J]. 长江科学院院报,2015,32(1):16-20. (LIU Jie. Total amount allocation of water pollutant based on model of maximum weighted information entropy [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32 (1):16-20. (in Chinese))

[7] 陈艳萍,胡玉盼. 基于组合赋权的水污染物总量区域分配方法[J]. 水资源保护,2015,31(6):170-173. (CHEN Yanping, HU Yupan. Regional allocation method of water pollutants based on combination weighting [J]. Water Resources Protection, 2015, 31 (6):170-173. (in Chinese))

[8] 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))

[9] 付强,赵小勇. 投影寻踪模型原理及其应用[M]. 北京:科学出版社,2006.

[10] 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. (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 CSAE, 2012, 28 (2):84-89. (in Chinese))

[11] 王婷,方国华,刘羽,等. 基于最严格水资源管理制度的初始水权分配研究[J]. 长江流域资源与环境,2015,24(11):1870-1875. (WANG Ting,FANG Guohua,LIU Yu, et al. Research of initial water rights allocation based on the most stringent water resources management system [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015,24(11):1870-1875. (in Chinese))

[12] 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. (CHEN Guangzhou,WANG Jiaquan,XIE Huaming. Application of particle swarm optimization for solving optimization problem of projection pursuit model [J]. Computer Simulation, 2008, 25 (8):159-161. (in Chinese))

[13] 丁红,刘东,李陶. 基于改进人工鱼群算法的三江平原投影寻踪旱情评价模型[J]. 农业工程学报,2010,26(12):84-88. (DING Hong, LIU Dong, LI Tao. Projection pursuit model for evaluating drought based on improved artificial fish swarm algorithm of Sanjiang plain [J]. Transactions of the CSAE,2010,26(12):84-88. (in Chinese))

(下转第 97 页)

(in Chinese))

[4] SPALDING R F, EXNER M E. Occurrence of nitrate ingroundwater-a review [J]. Environment Quality, 1993, 22:392-402.

[5] WARD M H, MARK S D, CANTOR K P. Drinking water nitrate and the risk of non-Hidgkin’ s lymphoma [J]. Epidemiology, 1996(7):465-471.

[6] STEVEN R K. Effect of acclimation time on nitrite movement across the gill epithelia of rainbow trout [J]. Fish Cult, 1982, 44(2):126-130.

[7] 余瑞兰, 聂湘平, 魏泰莉, 等. 分子氨和亚硝酸盐对鱼类的危害及其对策 [J]. 中国水产科学, 1999, 9(3): 73-77. (YU Ruilan, NIE Xiangping, WEI Taili, et al. The harm of molecular ammonia and nitrite to fish and its countermeasures [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 1999, 9(3): 73-77. (in Chinese))

[8] 王业耀, 孟凡生. 地下水污染修复的渗透反应格栅技术 [J]. 地下水, 2004, 26(2): 97-100. (WANG Yeyao, MENG Fansheng. Permeable reactive barrier technology for remediation of groundwater pollution [J]. Groundwater, 2004, 26(2): 97-100. (in Chinese))

[9] 何理, 李晶, 任丽霞, 等. 地下水环境修复工艺优化设计

(上接第 81 页)

[14] 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. (ZHAO Jianqiang, DAI Qingsong, CHEN Bike, et al. Comprehensive evaluation of river water quality in southern China based on artificial bee colony-projection pursuit [J]. Water Saving Irrigation, 2014(8): 49-52. (in Chinese))

[15] 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))

[16] 侯景伟, 孔云峰, 孙九林. 蚁群算法在需水预测模型参

研究进展 [J]. 水资源保护, 2014, 30(3): 1-4. (HE Li, LI Jing, REN Lixia, et al. Research progress in groundwater remediation technology and optimization design [J]. Water Resources Protection, 2014, 30(3): 1-4. (in Chinese))

[10] 金赞芳, 陈英旭, 小仓纪雄. 以棉花为碳源去除地下水硝酸盐的研究 [J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(3): 512-515. (JIN Zangfang, CHEN Yingxu, Ogura Norio. Denitrification of groundwater using cotton as energy source [J]. Journal of Agro-environment Science, 2004, 23(3): 512-515. (in Chinese))

[11] ROCCA C D, BELGIOMO V. Heterotrophic/autotrophic denitrification (HAD) of drinking water: prospective use for permeable reactive barrier [J]. Desalination, 2007, 21: 194-204

[12] 王珍, 张增强, 唐次来, 等. 生物-化学联合法去处地下水中硝酸盐 [J]. 环境科学学报, 2008, 28(9): 1839-1846. (WANG Zhen, ZHANG Zengqiang, TANG Cilai, et al. A combination biological and chenmical approach for nitrate removal from groundwater [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(9): 1839-1846. (in Chinese))

(收稿日期: 2016 - 04 - 24 编辑: 彭桃英)

数优化中的应用 [J]. 计算机应用, 2012, 32(10): 2952-2956. (HOU Jingwei, KONG Yunfeng, SUN Jiulin. Application of ant colony algorithm for parameter optimization of water demand prediction model [J]. Journal of Computer Applications, 2012, 32(10): 2952-2955. (in Chinese))

[17] 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): 12-18. (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): 12-18. (in Chinese))

[18] MIRJALILI S. SCA: a sine cosine algorithm for solving optimization problems [J]. Knowledge-based Systems, 2016, 96(15): 120-133.

(收稿日期: 2016 - 05 - 16 编辑: 徐 娟)

· 信息播报 ·

河海大学水利工程入选世界一流学科

2016 年 10 月 31 日, 艾瑞深中国校友会网正式发布《2016 中国大学学科评价报告》, 评选出了 8 星级学科(世界一流学科)。这对我国大战略双一流建设是一个有力的数据支持和佐证。

我国有 27 个学科入选世界一流(实际上是 26 个学科, 北京大学数学、中国科学院大学数学均入选)。入选高校中, 北京大学共有 5 个世界一流学科, 清华大学 4 个, 中国科学院大学 4 个。值得注意的是, 有 4 所 211 院校分别有一个学科进入世界一流, 其中, 河海大学水利工程入选世界一流学科。

(本刊编辑部 供稿)