

SCE - UA - PP 水量分配模型及应用

李小波, 杨霄, 陈刚

(云南省水利水电勘测设计研究院, 云南 昆明 650021)

摘要: 基于公平和效率原则, 构建水量分配指标体系和水量分配投影寻踪(PP)模型。利用 SCE - UA 算法对 PP 模型最佳投影方向进行优化, 构建 SCE - UA - PP 水量分配模型, 以文山州水资源三级区水量分配为例进行实例研究, 并与分类权重法分配结果进行对比。结果表明: SCE - UA 算法具有较快的收敛速度、较高的寻优精度和较好的收敛稳定性。SCE - UA - PP 模型水量分配结果较目前分类权重法分配结果更科学、客观。模型及方法可为水量分配提供参考和借鉴。

关键词: 水量分配; 指标体系; SCE - UA 算法; 投影寻踪

中图分类号: TV211

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)04-0093-05

Model of SCE - UA - PP water allocation and its application

LI Xiaobo, YANG Xiao, CHEN Gang

(Yunnan Institute of Water & Hydropower Engineering Investigation Design Research, Kunming 650021, China)

Abstract: Based on the principle of fairness and efficiency, the paper set up water allocation index system and water allocation projection pursuit (PP) model. It used SCE - UA algorithm to optimize to optimize the best projection direction of PP model, and built SCE - UA - PP water allocation model. Taking the water allocation of water resources in Wenshan district for example, the paper compared it with the results of right allocation method. The results showed that SCE - UA algorithm has faster convergence speed, higher precision and better optimization convergence stability. The water allocation results of SCE - UA - PP model have more scientific and objective than that of the current method. The model and method can provide reference for water allocation.

Key words: water allocation; index system; SCE - UA algorithm; projection pursuit

水量分配对于贯彻落实最严格水资源管理制度具有重要意义。水量分配的科学合理直接关系到最严格水资源管理制度能否顺利施行和稳步推进。目前, 最常用的水量分配方法主要是定额法^[1]、分类权重法^[1]和层次分析法^[1], 但普遍存在精度低和主观随意性强等问题和不足。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, 其在克服维数灾难以及解决小样本、超高维等问题中具有明显优势^[2-3]。

在水量分配中, PP 模型最佳投影方向的选取对于确定各分水指标权重至关重要。目前, 遗传算法(GA)^[4-5]、粒子群优化算法(PSO)^[6]常用于 PP 模型最佳投影方向的优化。然而, 基本遗传算法

和粒子群优化算法对于高维优化问题普遍存在早熟收敛和易陷入局部极值的不足。SCE - UA 算法是一种将确定性的复合型搜索技术和自然界中的生物竞争进化原理相结合的全局优化算法, 具有较好的收敛精度, 在新安江模型参数优化^[7]、河网水系水闸调度模拟^[8]、水环境系统优化^[9]、水资源优化配置^[10]等优化领域具有较广泛的应用。

本文采用 PP 模型的方法进行水量分配, 选取总人口、国内生产总值(GDP)等 8 个分水指标构建水量分配指标体系, 针对 PP 模型最佳投影方向难于确定的不足, 利用 SCE - UA 优化 PP 模型最佳投影方向, 提出 SCE - UA - PP 水量分配模型, 以文山州水资源三级区水量分配为例进行实例研究, 旨在为水量分配探索新的途径和方法。

收稿日期: 2016-01-12; 修回日期: 2016-04-19

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(201307102-006-01); 院士工作站建设专项(20151C013)

作者简介: 李小波(1979-), 女, 云南陆良人, 学士, 工程师, 主要从事水资源规划研究等工作。

1 水量分配指标体系

水量分配属多目标多层次决策问题,涉及到流域或区域内社会、经济、水利设施供水能力等多方面因素,且又存在区域差异,须根据区域实际,并基于公平、效率原则选取分水指标。本文结合区域实际,

基于公平性原则选取总人口、GDP、农业有效灌溉面积、水利实施供水能力、2014年用水量5个公平性分水指标;基于效率性原则选取人均综合用水量、万元工业增加值用水量、农田灌溉水利用系数3个效率性分水指标,见表1。

表1 水量分配指标体系

目标	原则	指标	表征
水量分配	公平性原则	总人口 $C_1 / 10^4$ 人	正向指标,表征区域人口规模大小
		GDP $C_2 / 10^8$ 元	正向指标,表征区域经济规模大小
		农业有效灌溉面积 $C_3 / 10^3 \text{ hm}^2$	正向指标,表征区域农田有效灌溉面积大小
	效率性原则	水利实施供水能力 $C_4 / 10^8 \text{ m}^3$	正向指标,表征区域水利实施供水能力大小
		2014年用水量 $C_5 / 10^8 \text{ m}^3$	正向指标,表征2014年度区域实际用水量大小
		人均综合用水量 $C_6 / (\text{m}^3 \cdot \text{人}^{-1})$	正向指标,总用水量/总人口,表征区域人均综合用水水平
		万元工业增加值用水量 $C_7 / (\text{m}^3 \cdot 10^{-4} \text{ 元})$	负向指标,工业用水量/工业增加值,表征区域工业用水水平
		农田灌溉水利用系数 C_8	正向指标,灌溉净用水量/渠首取水量,表征区域农业用水水平

2 SCE - UA - PP 水量分配模型

2.1 投影寻踪模型

PP模型用于水量分配简要算法过程如下^[3,11]:

Step1 数据预处理。设水量分配数据集为 $\{x(i,j) \mid i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m\}$, 为避免水量分配指标归一化后出现0的情形,对于正向指标采用公式(1)进行数据处理;对于负向指标,将其取倒后乘100,再利用式(1)进行数据处理。

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

式中: $x(i,j)$ 为第 i 个分水区域第 j 个分水指标值; $x_{\max}(j)$ 、 $x_{\min}(j)$ 分别为第 j 个分水指标的最大、最小值; n 、 m 分别为分水区域总数及分水指标数目。

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,即

$$S_z = \sqrt{\sum_{i=1}^n [z(i) - \bar{z}]^2 / (n-1)} \quad (4)$$

$$D_z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [R - r(i,j)] \cdot o[R - r(i,j)] \quad (5)$$

式中: \bar{z} 为序列 $z(i)$ 的平均值; R 为局部密度的窗口半径; $r(i,j)$ 为样本之间的距离; $o(\tau)$ 为单位阶跃函数,当 $\tau \geq 0$ 时,其值为1, $\tau < 0$ 时,其值为0。

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:

$$\begin{cases} \max: Q(a) = S_z D_z \\ \text{s. t. } \sum_{j=1}^m a^2(j) = 1, \quad a \in [0, 1] \end{cases} \quad (6)$$

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

2.2 SCE - UA 算法

SCE - UA 算法的基本思想是把确定性的复合形搜索技术和自然界中的生物竞争进化原理相结合。对于一个 n 维的连续优化问题, SCE - UA 算法实现步骤如下^[7-9]:

Step1 初始化。选取参与进化的复合形个数 p ($p \geq 1$) 和每个复合形所包含的顶点数 q ($q \geq n + 1$), 则计算样本点数目 $s = p \cdot q$ 。

Step2 生成样本点。在可行域内随机产生 s 个样本点 x_1, x_2, \dots, x_s , 分别计算每一点 x_i 的函数值 $f_i = f(x_i)$, $i = 1, 2, \dots, s$ 。

Step3 排序样本点。将 s 个样本点 (x_i, f_i) 函数

值按升序排列,排序后仍记为 $(x_i, f_i), i = 1, 2, \dots, s$, 其中 $f_1 \leq f_2 \leq \dots \leq f_s$, 记 $D = \{(x_i, f_i), i = 1, 2, \dots, s\}$ 。

Step4 复合型群体划分。将 D 划分为 p 个复合型 A_1, A_2, \dots, A_p , 每个复合型含 q 点, 其中 $A^k = \{(x_j^k, f_j^k) \mid x_j^k = x_{k+q(k-1)}, f_j^k = f_{i+k+q(k-1)}, j = 1, 2, \dots, q, k = 1, 2, \dots, p\}$ 。

Step5 复合型进化。按复合型进化算法分别进化各个复合型。

Step6 复合型混合。将进化后的每个复合型的所有顶点组合成新的点集, 再次按函数值 f_i 升序排列, 排序后记为 D , 对 D 按目标函数的升序进行排列。

Step7 重复 Step5 ~ Step7 直至满足算法终止条件或最大迭代次数。

2.3 SCE-UA-PP水量分配实现步骤

SCE-UA-PP模型水量分配实现步骤可归纳如下:

Step1 构建水量分配指标体系, 利用式(1)进行指标归一化处理。

Step2 确定目标函数。由于SCE-UA算法是求解极小值, 因此将式(6)的倒数作为目标函数, 即以式(7)作为适应度函数:

$$\begin{cases} \min: Q'(a) = 1. / (S_z D_z) \\ \text{s. t.} : \sum_{j=1}^m a^2(j) = 1 \quad a \in [0, 1] \end{cases} \quad (7)$$

Step3 初始算法参数。设置SCE-UA算法最大迭代次数 T , 复合形个数 p , 每个复合形所包含的顶点数 q 。

Step4 利用上述SCE-UA算法步骤寻优, 直至满足算法最大迭代次数。

Step5 输出最终优化结果, 即PP模型最佳投影方向 \vec{a} 。

Step6 将最佳投影方向 \vec{a} 代入式(2)求得各水资源三级区最佳投影值 $z'(i)$, 将 $z'(i)$ 归一化处理即为各水资源三级区水量分配权重, 该权重乘以总分配水量即为各水资源三级区水量分配结果。

3 实例应用

3.1 研究区概况

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, 境内县(市)及河流分属南盘江、右

江、盘龙江和元江4个水资源三级区。其中, 南盘江、右江属珠江流域, 盘龙江、元江属红河流域。全州多年平均径流深501 mm, 水资源总量 157.7×10^8 m³。2013年云南省分解并下达文山州2015年、2020年和2030年用水总量控制目标分别为 11.02×10^8 、 12.77×10^8 和 13.37×10^8 m³, 同年文山州将2015年、2020年和2030年用水总量控制目标分解至南盘江、右江、盘龙江和元江4个水资源三级区。2014年, 用于文山州水资源三级区水量分配的用水指标见表2。

表2 文山州所辖行政区水量分配指标数据

水资源三级区	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8
南盘江	69.6	44.8	27.44	1.62	1.89	250.0	72.0	0.51
右江	93.9	62.2	31.59	2.34	2.25	206.0	74.0	0.52
元江	35.1	39.0	9.36	0.86	0.67	168.0	71.0	0.52
盘龙江	149.8	183.0	45.03	4.13	4.32	287.0	68.0	0.53

3.2 水量分配模型求解

(1) SCE-UA算法参数设置: 最大迭代次数 $T = 50/100/200$ (为验证SCE-UA算法寻优能力, 最大迭代次数分别设置为50、100、200, 并分别连续运行5次), 复合形个数 $p = 50$, 每个复合形所包含的顶点数 $q = 5$, 搜索空间设置为 $[0, 1]$ 。

(2) SCE-UA算法验证。根据SCE-UA-PP水量分配模型实现步骤, 采用式(1)归一化后的各水资源三级区指标构造投影指标函数, 利用SCE-UA算法求解PP模型最佳投影方向, 并分别将最大迭代次数为50、100、200的SCE-UA算法连续运行5次, 进化过程见表3和图1~图3。

从表3及图1~3可以看出, 当最大迭代次数 $T = 50$ 时, 连续5次运行PP模型最佳投影方向 \vec{a} 及适应度值 $Q'(a)$ 均不相同; 当最大迭代次数 $T = 100$ 时, 连续5次运行其适应度值 $Q'(a)$ 均相同, 但最佳投影方向 \vec{a} 第2次与其余4次优化结果略有差异; 当最大迭代次数 $T = 200$ 时, 连续5次运行其最佳投影方向 \vec{a} 及适应度值 $Q'(a)$ 均完全相同。表明SCE-UA算法随着迭代次数的增加, 寻优精度呈提高趋势。针对该优化问题, SCE-UA算法具有较快的收敛速度、较高的寻优精度和较好的收敛稳定性。

(3) 水量分配结果及比较。将优化得到的各用水指标最佳投影方向 $\vec{a} = (0.3792 \ 0.4172 \ 0.3584 \ 0.3873 \ 0.3812 \ 0.3624 \ 0.2541 \ 0.2499)$ 代入式(2), 得到各水资源三级区水量分配的投影值 $z'(i) =$

(0.9686 1.1318 0.4779 2.5107), 将 $z'(i)$ 归一化处理后即为各水资源三级区水量分配权重, 分别再乘以 2015 年、2020 年和 2030 年用水总量控制指标即可得到文山州各水资源三级区 2015 年、2020 年和

2030 年水量分配结果。

将分配结果与目前文山州“三条红线”控制指标水量分配所采用的分类权重法分配结果进行对比, 见表 4。

表 3 不同迭代次数的 SCE-UA-PP 模型优化结果及比较

最大迭代次数	运行次数	最佳投影方向 \vec{a}	适应度值 $Q'(a)$
$T = 50$	1	(0.3794 0.4199 0.3604 0.3827 0.3804 0.3569 0.2555 0.2570)	0.013684738267550
	2	(0.3891 0.4149 0.3662 0.3845 0.3808 0.3562 0.2530 0.2422)	0.013684738238837
	3	(0.3793 0.4187 0.3583 0.3892 0.3799 0.3601 0.2533 0.2505)	0.013684738244151
	4	(0.3842 0.4196 0.3516 0.3832 0.3833 0.3669 0.2489 0.2498)	0.013684738246989
	5	(0.3789 0.4196 0.3574 0.3831 0.3837 0.3582 0.2537 0.2568)	0.013684738248316
$T = 100$	1	(0.3792 0.4172 0.3584 0.3873 0.3812 0.3624 0.2541 0.2499)	0.013684738040943
	2	(0.3791 0.4171 0.3585 0.3873 0.3812 0.3624 0.2542 0.2499)	0.013684738040943
	3	(0.3792 0.4172 0.3584 0.3873 0.3812 0.3624 0.2541 0.2499)	0.013684738040943
	4	(0.3792 0.4172 0.3584 0.3873 0.3812 0.3624 0.2541 0.2499)	0.013684738040943
	5	(0.3792 0.4172 0.3584 0.3873 0.3812 0.3624 0.2541 0.2499)	0.013684738040943
$T = 200$	1	(0.3792 0.4172 0.3584 0.3873 0.3812 0.3624 0.2541 0.2499)	0.013684738040943
	2	(0.3792 0.4172 0.3584 0.3873 0.3812 0.3624 0.2541 0.2499)	0.013684738040943
	3	(0.3792 0.4172 0.3584 0.3873 0.3812 0.3624 0.2541 0.2499)	0.013684738040943
	4	(0.3792 0.4172 0.3584 0.3873 0.3812 0.3624 0.2541 0.2499)	0.013684738040943
	5	(0.3792 0.4172 0.3584 0.3873 0.3812 0.3624 0.2541 0.2499)	0.013684738040943

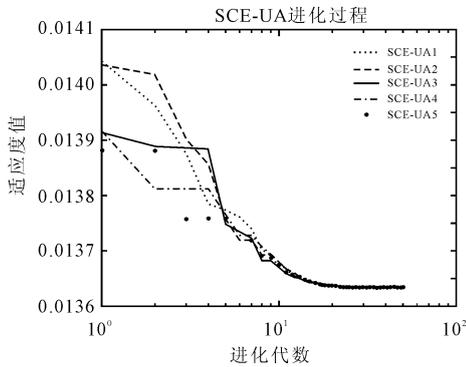


图 1 SCE-UA 算法 5 次进化过程图 ($T = 50$)

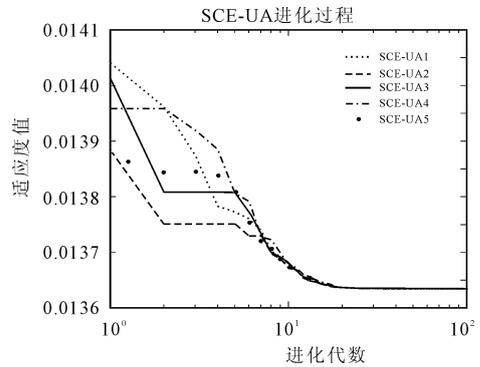


图 2 SCE-UA 算法 5 次进化过程图 ($T = 100$)

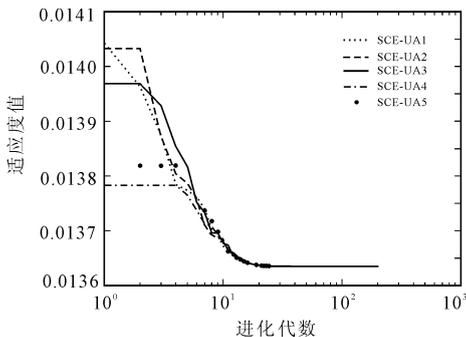


图 3 SCE-UA 算法 5 次进化过程图 ($T = 200$)

表 4 文山州水资源三级区水量分配结果及对比

水资源 三级区	SCE-UA-PP 模型			分类权重法		
	2015 年	2020 年	2030 年	2015 年	2020 年	2030 年
南盘江	2.10	2.43	2.54	2.14	2.46	2.55
右江	2.45	2.84	2.97	2.59	3.21	3.34
元江	1.03	1.20	1.26	1.06	1.04	1.17
盘龙江	5.44	6.30	6.60	5.23	5.96	6.32

从表 4 可以得到以下结论:

(1)从最佳投影方向优化结果来看,GDP指标权重最大,为0.4172,其对水量分配影响也最大;其次为水利设施供水能力、2014年用水量指标、总人口、人均综合用水量和农田有效灌溉面积;万元工业增加值用水量和农田灌溉水利用系数指标权重分别为0.2541和0.2499,对水量分配的影响相对较小。

(2)SCE-UA-PP模型水量分配结果与分类权重法分配结果存在差异,原因在于分配方法及指标权重的不同。从表4来看,对于南盘江和元江水资源三级区,SCE-UA-PP模型水量分配结果与分类权重法分配结果较为接近,最大相差为元江三级区2020年 $0.16 \times 10^8 \text{ m}^3$,其余分配结果相差均在 $0.09 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以内;对于右江三级区(右江三级区包括广南、富宁两县,其经济发展及工业基础相对薄弱),SCE-UA-PP模型水量分配结果较分类权重法分配结果小,最大相差为2030年的 $0.37 \times 10^8 \text{ m}^3$;对于盘龙江三级区(盘龙江三级区主要包括文山市、砚山县、马关县和麻栗坡县等社会、经济和工业相对发展迅猛的县市),SCE-UA-PP模型水量分配结果较分类权重法分配结果大,最大相差为2030年的 $0.34 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

从水量分配结果来看,由于分类权重法依赖于经济社会等指标的预测结果,其预测结果往往偏离实际,因此造成水量分配结果不尽科学合理。

(3)表2中水量分配指标均属动态指标,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量分配结果。

4 结 论

(1)基于公平和效率原则构建的符合区域实际的水资源三级区水量分配指标体系,对于流域或区域水分量具有一定的参考意义。

(2)利用SCE-UA算法搜寻PP模型最佳投影方向,在最大迭代次数为200的条件下连续5次运行均可获得完全相同的寻优结果,表明SCE-UA算法具有较快的收敛速度、较高的寻优精度和较好的

收敛稳定性。利用该算法搜寻PP模型最佳投影方向,不但提高了PP水量分配模型的分配精度,而且为解决PP模型最佳投影方向提供了一种新的途径和方法。

(3)从实例水量分配结果来看,SCE-UA-PP模型可以获得比分类权重法更科学合理的水量分配结果。在实际应用中,可根据各分水区域实际增加或减少水量分配指标,以及通过适时调整指标数据,以获得更科学合理且满足各分水区域要求的水量分配结果。

参考文献:

- [1] 孔琼菊,方国华.修河流域水量分配方案研究[J].人民长江,2009,40(1):27-30.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 叶金印,姚成,李京兵,等.综合误差系数在新安江模型参数全局优化中的应用[J].河海大学学报(自然科学版),2013,41(1):1-5.
- [8] 邢宝龙,薛联青,陈奕,等.基于SCE-UA算法的河网水系水闸调度模拟[J].水资源保护,2013,29(6):26-30.
- [9] 张景,张文婷,邢宝龙.SCE-UA算法在水环境系统优化问题中的应用[J].水资源保护,2014,30(3):61-64.
- [10] 辛朋磊,陈建标.基于全局优化的南通市水资源优化配置研究[J].人民长江,2012,43(17):55-60.
- [11] 余航,王龙,文俊,等.基于投影寻踪原理的云南旱灾评估[J].中国农学通报,2012,28(8):267-270.